

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

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

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА за ступенем вищої освіти «Бакалавр»

на тему:

**«Модернізація системи автоматичного регулювання
тиску в камері установки синтезу плівкових
структур»**

**«Modernisation of the automatic pressure control system
in the chamber of film structure synthesis unit»**

Виконав студент IV курсу групи АК-20
спеціальності 151 «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»
_____ Є.П. Паламарчук
« ____ » _____ 2024 р.

Керівник роботи
доц, канд. техн. наук
_____ І.А. Березюк
« ____ » _____ 2024 р.

Рецензент _____
« ____ » _____ 2024 р.

м. Кропивницький

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Призначення установки електронно-променевого напилювання.....	6
1.1 Особливості вакуумного напилювання.....	6
1.2 Опис установки напилювання.....	10
2 Огляд методів нанесення органічних плівок.....	13
2.1 Принципи роботи електродугових і електронно- променевих випаровувачів.....	13
2.2 Методи нанесення іонних покриттів.....	16
3 Обґрунтування проектних рішень та конструкцій.....	25
3.1 Опис установки синтезу тонкоплівкових структур.....	25
3.2 Основні параметри та класифікація вакуумних насосів	30
3.2.1 Пластинчато-роторний насос 2НВР-5ДМ.....	31
3.2.2 Насос дифузійний НВДМ-160.....	33
3.3 Іонізаційні вакуумметри.....	40
3.4 Мікроконтролер АТmega169.....	43
4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність виробу.....	48
4.1 Розробка функціональної схеми системи.....	48
4.2 Дослідження системи на стійкість.....	54
4.3 Оцінка якості регулювання замкнутої системи по логарифмічним частотним характеристикам розімкнутої системи	56
5 Опис робіт, пов'язаних з експлуатацією установки синтезу тонкоплівкових структур.....	58
Висновки.....	63
Перелік скорочень, символів та спеціальних термінів.....	64
Список літератури.....	65

ВСТУП

Автоматизація технологічних процесів відіграє ключову роль у підвищенні продуктивності праці та покращенні якісних і техніко-економічних показників.

Використовувані технічні засоби автоматизації морально і технічно застаріли і не здатні забезпечити необхідний рівень управління процесом. Тому основною метою створення автоматизованих систем управління є підвищення технологічних і техніко-економічних показників виробництва, забезпечуючи при цьому необхідну якість продукції.

Ефективне використання енергоресурсів є додатковою можливістю значно знизити собівартість виробленої продукції. Сучасна автоматизована система управління повинна не лише підтримувати заданий режим, але й максимально ефективно використовувати потенціал виконавчих систем.

Зараз активно модернізуються об'єкти управління, що супроводжується збільшенням кількості виконавчих систем. Чим більше виконавчих систем має об'єкт, тим важливіше стає вибір критерію, який визначає стратегію підтримки певного параметра.

Експериментальні дослідження випаровування та конденсації, поверхневих явищ, деяких теплових процесів, низьких температур, а також ядерних і термоядерних реакцій здійснюються у вакуумних установках. Прискорювач заряджених часток, основний інструмент сучасної ядерної фізики, неможливий без вакууму. Вакуумні системи також застосовуються в хімії для дослідження властивостей чистих речовин, аналізу складу і розділення компонентів сумішей, а також для вивчення швидкостей хімічних реакцій.

У хімічній промисловості вакуумні сушильні апарати використовуються для виробництва синтетичних волокон, поліамідів, амінопластів, поліетилену та органічних розчинників. Вакуумні фільтри застосовуються у виробництві целюлози, паперу та мастил. Кристалізаційні вакуумні апарати використовуються при виробництві барвників і добрив.

В електротехнічній промисловості вакуумне просочення, як найбільш економічний метод, широко застосовується у виробництві трансформаторів, електродвигунів, конденсаторів і кабелів. Використання вакууму також підвищує термін служби та надійність перемикаючих електричних апаратів.

У харчовій промисловості вакуумне сушіння використовується для тривалого зберігання та консервування продуктів. Вакуумна упаковка швидкопсувних продуктів подовжує термін зберігання фруктів і овочів. Вакуумне випарювання застосовується у виробництві цукру, опрісненні морської води та солеварінні. У сільському господарстві широко використовуються вакуумні доїльні апарати. В побуті пилосос став нашим незамінним помічником.

На транспорті вакуум використовується для постачання палива в карбюраторах і для вакуумних підсилювачів гальмових систем автомобілів. Імітація космічного середовища в умовах земної атмосфери необхідна для проведення випробувань штучних супутників і ракет.

У медицині вакуум використовується для зберігання гормонів, лікувальних сироваток, вітамінів, а також при отриманні антибіотиків, анатомічних і бактеріологічних препаратів.

У оптичній промисловості при виготовленні оптичних і побутових дзеркал відмовилися від хімічного сріблення на користь вакуумного алюмінівання. Прояснюючі елементи оптики, захисні покриття і інтерференційні фільтри наносяться шляхом напилення тонких шарів у вакуумі.

Застосування вакууму в техніці постійно розширюється, але з кінця минулого століття й досі його найважливішим залишається в електроніці. У електровакуумних пристроях вакуум є необхідним елементом конструкції, який забезпечує їх нормальне функціонування протягом усього терміну служби. Низький і середній вакуум застосовуються у світлодіодних та газорозрядних пристроях. Високий вакуум використовується в приймально-підсилювальних і генераторних лампах. Особливо високі вимоги до вакууму пред'являються при виготовленні електронно-променевих трубок і високочастотних приладів.

Напівпровідникові пристрої не потребують вакууму для своєї роботи, але вакуумні технології широко використовуються в їх виробництві.

Вакуумна техніка знаходить широке застосування у виробництві мікросхем, де процеси, такі як нанесення тонких плівок, іонне травлення та електролітографія, дозволяють отримати елементи електронних схем з субмікронними розмірами. Таким чином, вивчення і вдосконалення процесів нанесення тонких плівок є важливою науковою і інженерною задачею. Це дослідження присвячене розробці та вивченню системи автоматичного контролю тиску у вакуумній системі електронно-променевого випаровувача.

Об'єктом дослідження є процес, який стосується нанесення полімерних плівок.

Предмет дослідження є система, яка забезпечує стабілізацію технологічного параметра установки для синтезу органічних тонкоплівкових структур.

У роботі важливо зосередитися на стабілізації технологічного параметра. Для досягнення цієї мети потрібно розглянути важливість підтримки цього параметра, різні підходи до реалізації відповідних систем та вибрати найкращий. Також необхідно розробити функціональну та структурну схеми системи, визначити її показники якості, провести аналіз перехідного процесу, і у разі неприпустимих відхилень від заданих значень здійснити синтез корекційного пристрою.

1 ПРИЗНАЧЕННЯ УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО НАПИЛЮВАННЯ

1.1 Особливості вакуумного напилювання

Вакуумне напилювання – це процес переміщення частинок напилювального матеріалу від джерела, де вони переходять у газоподібну фазу, до поверхні деталі. Цей процес відбувається по прямим лініях у вакуумі з тиском 10^{-2} Па і нижче (для вакуумного випару), а також шляхом дифузійного та конвективного переносу в плазмі при тисках 1 Па (для катодного розпилення) і від 10^{-1} до 10^{-2} Па (для магнетронного і іонно-плазмового розпилення). Процент частинок напилювального матеріалу, що досягають поверхні деталі, залежить від їхньої енергії, температури поверхні і хімічної сумісності матеріалів плівки та деталі. Атоми або молекули, які досягають поверхні, можуть відбитися від неї, або адсорбуватися і пізніше десорбуватися, або адсорбуватися і утворювати конденсат на поверхні (конденсація). При великих енергіях частинок, високій температурі поверхні та невеликій хімічній сумісності, частинка відбивається від поверхні.

Структура напиляних плівок формується відповідно до властивостей матеріалу, стану і температури поверхні, а також швидкості напилювання. Ці плівки можуть мати аморфний характер (наприклад, оксиди, Si), полікристалічну будову (метали, сплави, Si) або бути монокристалічними (наприклад, напівпровідникові плівки, отримані методом молекулярно-променевої епітаксії). Для покращення порядку в структурі та зниження внутрішніх механічних напруг плівок, підвищення стійкості їхніх властивостей і покращення адгезії до поверхні виробів виконують обпалювання плівок при температурах, що трохи вищі за температуру поверхні під час напилювання, зберігаючи вакуум. Часто вакуумне напилювання використовується для створення багат шарових плівкових структур з різних матеріалів.

Для вакуумного напилювання використовуються технологічні установки трьох типів: періодичної, напівбезперервної і безперервної дії. Установки періодичної дії виконують один цикл нанесення плівок на задану кількість виробів, що завантажуються. Установки безперервної дії використовуються для серійного та масового виробництва. Вони поділяються на багатокамерні і багатопозиційні однокамерні. Перші складаються з послідовно розташованих напилювальних модулів, кожен з яких здійснює напилювання плівок з різних матеріалів або проводить їхню термічну обробку й контроль. Модулі з'єднані між собою шлюзовими камерами і транспортним конвеєрним пристроєм. Багатопозиційні однокамерні установки містять кілька напилювальних станцій, що розташовані в одній вакуумній камері і з'єднані транспортним пристроєм типу конвеєрного або роторного. Основні компоненти і системи установок для вакуумного напилювання представляють собою автономні пристрої, які виконують такі функції:

- створення вакууму;
- випаровування або розпилення матеріалу для утворення плівок;
- транспортування деталей;
- контроль параметрів вакуумного процесу та характеристик плівок;
- подача електроживлення.

Вакуумне напилювання є процесом нанесення плівок або шарів на поверхню деталей або виробів в умовах вакууму (від 10^{-1} до 10^{-7} Па). Цей метод застосовують у планарній технології напівпровідникових мікросхем, в виробництві тонкоплівкових гібридних схем, виробництві виробів п'єзотехніки, акустoeлектроніки та інших галузях. Вакуумне напилювання використовують для нанесення провідних, діелектричних та захисних шарів, масок та інших покриттів у оптиці (включаючи що підсвічують та що відбивають покриття), а також для металізації поверхонь пластмасових і скляних виробів, тонування скла автомобілів. Метод вакуумного напилювання використовується для нанесення металів (таких як Al, Au, Cu, Cr, Ni, V, Ti та інші), сплавів (наприклад, NiCr,

CrNiSi), хімічних сполук (силіцидів, оксидів, боридів, карбідів та інших), скла складного складу, керметів та інших матеріалів.

Вакуумне напилювання полягає у створенні управлінного потоку частинок (атомів, молекул або кластерів) матеріалу, який наноситься на поверхню виробів та конденсується там.

Процес складається з кількох етапів: перехід напилювального матеріалу з конденсованої фази у газоподібну, переміщення молекул газової фази до поверхні виробу, їх конденсація на поверхні, утворення та зростання зародків і нарешті формування плівки.

Зазвичай установка для вакуумного напилювання містить такі основні компоненти:

- робочу камеру, де здійснюється напилювання плівок;
- джерела, що випаровують або розпилюють матеріали, з системами їх живлення та управління;
- вакуумну і газорозподільну системи для створення необхідного вакууму і регулювання газових потоків, які включають насоси, клапани, пастки, фланці й кришки для виміру вакууму та контролю швидкості газових потоків;
- систему живлення й блокування для всіх пристроїв і вузлів установки;
- систему контролю й управління процесом вакуумного напилювання, яка забезпечує налаштування швидкості напилювання, товщини плівок, температури поверхні деталей, температури обпалювання та фізичних властивостей плівок. Ця система включає набір датчиків, що зв'язані з керуючою мікропроцесорною системою з виконавчими механізмами й пристроями для виведення інформації;
- транспортні пристрої для введення й виведення деталей у робочу камеру, точного розміщення їх на позиціях напилювання та переміщення з однієї позиції на іншу для створення багат шарових систем плівок;
- додаткові пристрої і технологічне обладнання, які включають внутрішні екрани, заслінки, маніпулятори, гідро- і пневмоприводи, а також пристрої для очищення газів.

Порівнюючи основні методики фізичного осадження металів і метод електронно-променевого напилювання, важливо відзначити основну перевагу електронного променя – високу точність виконання, яка є ключовою для сучасних технологій і включає три основні складові.

Промислові і дослідницькі електронно-променеві випарники виготовляються таким чином, щоб бути сумісними з системами, які забезпечують рівень передопераційного вакууму в камері не гірше $1 \cdot 10^{-11}$ мм.рт.ст. Це дозволяє поєднувати електронно-променеве напилювання з методиками молекулярно-пучкової епітаксії. Важливо зауважити, що вакуумні системи минулих років забезпечували передопераційний вакуум на рівні $1 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст., використовуючи маршові насоси, такі як дифузійні або турбомолекулярні насоси з мастилом в підшипниках ротора. При типових швидкостях осадження металів від 1 до 10 нм/сек і тиску залишкових газів у камері напилювання на рівні $1 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст., зміст забруднюючих домішок у шарі металу міг досягати до 10%, що є критичним для правильного функціонування мікроелектронного пристрою. У зв'язку з цим використання вакуумних систем з безмасляними відкачувальними агрегатами, які забезпечують рівень передопераційного вакууму не гірше $1 \cdot 10^{-7}$ мм.рт.ст., є необхідним і обґрунтованим.

Тепловий розігрів здійснюється за допомогою електронів, що розганяються електричним полем. На відміну від цього, у магнетронному осадженні частинки мішені вибиваються іонами газу. Цей процес може призводити до викиду домішок з потоку газу на поверхню підкладки і забруднення наносимого покриття.

Найефективніший спосіб контролю осадження водяної пари з атмосфери під час відкачки камери полягає в напуску та підтримці внутрішнього тиску інертного газу під час розгерметизації. Проте навіть за такого підходу поверхня мішеней випарника окутається шаром оксиду, що не повністю усувається. Тому важливо починати процеси з попереднього освіження поверхні мішеней через передрозпилення. Цей підхід призводить до введення кисню в атмосферу камери напилювання і збільшує витрати цінних матеріалів. Щоб забезпечити збереження

чистоти випарника та процесу осадження під час розгерметизації установки під час завантаження та вивантаження зразків, необхідно використовувати шлюзовий пристрій.

Розглянемо електричний контакт на мікрорівні. На поверхні напівпровідника фактично присутній шар оксиду й шар органічних забруднень. Шар оксиду утруднює протікання струму через контакт. Єдиний ефективний метод боротьби з оксидом – це іонне бомбардування поверхні напівпровідника в вакуумі перед напилюванням. Проте в конструкціях установок електронно-променевого напилювання іонна гармата зазвичай розташована в одному об'ємі з випарником, що є не зовсім оптимальним. З одного боку, пучок іонів розбиває оксид на компоненти, які розсіюються по камері і осідають на поверхнях, включаючи мішені випарника. Під час наступного напилювання кисень знову може потрапити на поверхню напівпровідника у перших шарах металізації. З іншого боку, іонна гармата іонізує інертний газ, який має певну чистоту. У результаті домішки газу також осідають на поверхні мішені й пізніше потрапляють в зону контакту.

У висновку важливо відзначити, що виробники установок для електронно-променевого напилювання уважно стежать за сучасними тенденціями в дослідженнях і виробництві мікро- і оптоелектронічних пристроїв, і готові пропонувати обладнання, що відповідає найвищим вимогам технологічного процесу. Також слід відзначити, що акцент на розвиток нанотехнологій значно підвищує значення чистоти та повторюваності окремих технологічних етапів.

1.2 Опис установки напилювання

Установка електронно-променевого напилювання призначена для створення тонких плівок різних матеріалів на підкладці діаметром до 150 мм або на декількох підкладках меншого розміру в умовах високого вакууму.

Установка електронно-променевого напилювання застосовується в фундаментальних і прикладних наукових дослідженнях, дослідно-

конструкторських роботах і в дрібносерійному експериментальному виробництві в галузях напівпровідникової техніки, мікросистемотехніки, нанотехнологій та технологій приладів мікроелектроніки.

Конструкція установки дозволяє по черзі наносити тонкі плівки п'яти різних матеріалів на зразки діаметром до 150 мм (або на кілька зразків, розміщених на тримачі діаметром 150 мм). У стандартній комплектації установка включає шлюз, електронно-променевий випарник і блок живлення потужністю 3 кВт.

В якості маршового використовується дифузійний насос з продуктивністю 400 л/сек. Модель обладнана невеликим електронно-променевим випарником лінійного типу, що має п'ять тиглів об'ємом $2,2\text{см}^3$ кожен. Для завантаження зразків використовуються вакуумні двері швидкого доступу, що визначають граничний передопераційний вакуум у камері (не краще $1\cdot 10^{-9}\text{мм.рт.ст.}$). Для забезпечення чистоти завантаження зразків передбачений бокс з інертною атмосферою, що з'єднується з дверима швидкого доступу.

Можна встановити шлюзовий пристрій для завантаження або вивантаження зразків у системах електронно-променевого напилювання. Використання шлюзового пристрою має дві важливі переваги. По-перше, постійна підтримка низького тиску всередині камери напилювання значно підвищує продуктивність установки. Експерименти показують, що тиск у камері напилювання, який становить менше $1\cdot 10^{-7}\text{мм.рт.ст.}$ після завантаження зразків у шлюзовий пристрій, встановлюється вже за 20 хвилин. По-друге, електронно-променевий випарник і його мішені ізольовані від атмосфери. Це критично важливо, оскільки у перших 15 секунд роботи випарника його деталі можуть неконтрольовано нагріватися до температур, достатніх для випару конденсованої вологи з атмосфери, якщо весь простір камери був відкритий до атмосфери. Пари води можуть потрапляти на поверхню оброблюваних зразків і впливати на контактний опір металізації.

Традиційні системи на основі кварцового резонатора використовуються для контролю швидкості осадження металів. Цей метод простий і надійний, однак

площа датчика складає лише 1см^2 , і під час розміщення в потоці матеріалу він показує лише точкове зображення осадження. Структура факела матеріалу, що летить від випарника, є складною і неоднорідною, і твердження про те, що центр факела завжди збігається з центром зразка (зразків), є неточним. Отже, точковий датчик не здатний повністю відстежити однорідність напилювання по поверхні пластини. Розумним рішенням є розміщення декількох датчиків товщини у формі трикутника або квадрата, охоплюючи зразки. Це дозволить оператору завжди визначити, в якому напрямку потрібно коригувати промінь для досягнення однорідного напилювання по всій поверхні мішені. В сучасних установках електронно-променевого випару досягається рівномірність покриття $\pm 1\%$ на діаметрі 1000 мм.

Основні технічні параметри наведені у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні технічні характеристики установки електронно-променевого напилювання

Найменування параметра	Значення
Максимальний діаметр підкладки	150 мм
Максимальна температура нагрівання підкладки	не менш 200 °C
Температура прогріву камери напилювання	не менш 150 °C
Максимальний залишковий тиск у камері напилювання після прогріву 200°C протягом 48 годин, з відключеними внутрішніми джерелами тепла й без подачі газів	не гірше $1 \cdot 10^{-7}$ 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	$2,2\text{ см}^3$
Відстань від випарника до зразка	від 150 до 300 мм

Вивчення та розробка систем електронно-променевого напилювання для створення надзвичайно чистих покриттів представляє собою не лише нову галузь технічного прогресу, але й ключовий аспект аналітичного приладобудування.

2 ОГЛЯД МЕТОДІВ НАНЕСЕННЯ ОРГАНІЧНИХ ПЛІВОК

2.1 Принципи роботи електродугових і електронно-променевих випаровувачів

Випарні пристрої та системи, що використовують електронно-променевий метод нагрівання, працюють таким чином: потік електронів спрямовується на поверхню металу, сплаву або іншої сполуки, розміщеної в тиглі, швидко нагріваючи її до температури плавлення, а потім і до випаровування. Енергію несе електронний промінь з енергією від $9,6 \cdot 10^{16}$ до $48,0 \cdot 10^{16}$ Дж. У процесі взаємодії електронного променя з поверхнею випаровуваного матеріалу, кінетична енергія електронів перетворюється на теплову. Матеріал нагрівається і випаровується. Цей метод дозволяє підтримувати матеріал при температурі випаровування протягом тривалого часу, що дає можливість наносити шари практично будь-якої товщини [1].

Конструктивно електронно-променеві випарники виготовляють у різних модифікаціях, зокрема з лінійним, кільцевим (аксіальні пушки) або порожнистим (газорозрядні пушки) катодом. Однак усі системи мають типові функціональні вузли (відповідно до рисунка 2.1): джерело електронів "1", прискорюючий анод "2", систему повороту електронного пучка "3" і систему його фокусування "4". Сформований електронний пучок спрямовується в тигель "5" з розплавом.

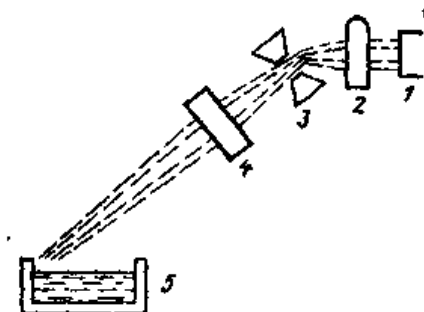


Рисунок 2.1 – Схема електронно-променевої випаровувальної системи

Електронний пучок може бути спрямований у тигель із речовиною, що випаровується, кількома способами: без відхилення пучка (рис. 2.2 (а)) або з відхиленням пучка на 45° , 90° , 180° , або 270° (рис. 2.2 (б, в, г, д) відповідно). Варто зазначити, що використання пушок з відхиленим пучком електронів (рис. 2.2 (в, г, д)) дозволяє вирішувати ширший спектр технологічних задач, проте ефективність пучка знижується: зі збільшенням кута відхилення пучка зростає розсіювання електронів, і потрібна більша потужність.

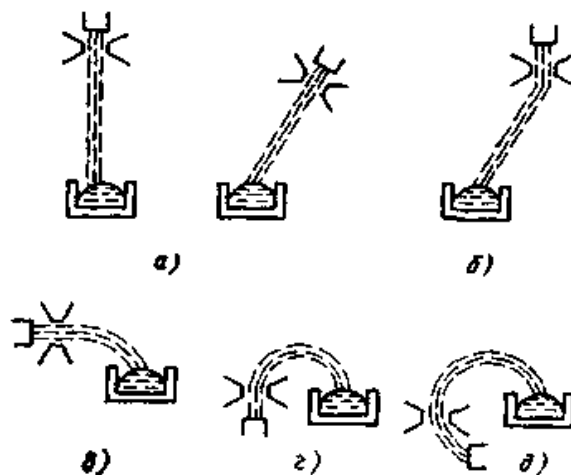


Рисунок 2.2 – Варіанти направлення електронного променя в тигель

Системи відхилення і фокусування мають три основні модифікації: електростатичні, електромагнітні, та системи на постійних магнітах. Найбільш широко використовуються електромагнітні системи.

Вакуумні установки можна розділити на два класи: для нанесення покриттів на окремі вироби і для нанесення покриттів на рулонні матеріали. Переваги електронно-променевого випаровування особливо помітні у вакуумних установках другого класу, де потрібна висока продуктивність випаровуючого пристрою. Електронно-променеві випарники складніші в обслуговуванні порівняно з прямонакальними; потрібна спеціальна підготовка операторів, а також дотримання рекомендацій з обслуговування і експлуатації конкретних вакуумних установок.

Відмінна риса електродугових випарних систем полягає в тому, що крім металевої пари утворюються іонізовані частинки. Ці частинки можна керувати за

допомогою електромагнітних або електростатичних полів, і вони легко вступають у реакції з іншими елементами. Це дозволяє отримувати широкий спектр хімічних сполук за відносно простою технологією.

Можна виділити кілька характерних рис електричної дуги, що визначають процес формування покриттів. Електричний дуговий розряд у вакуумі відбувається в парах металу. На катоді утворюються мікроскопічні ділянки – катодні плями з високою щільністю енергії і температури. У межах катодних плям локалізуються всі заряджені частинки катодної області розряду. До складу продуктів ерозії катода в зоні плями входять краплі розплавленого металу, іони і пари металу. Розмір крапель і їх концентрація в загальному потоці часток, що надходять на підкладку, залежать від властивостей матеріалу катода і щільності струму дугового розряду.

Тиск парів металу в області катодної плями досягає 10^6 Па, тому в зоні плями взаємодії з напускним газом не відбувається. Взаємодія реалізується в інших областях: на катоді в зонах, що залишаються після переміщення катодної плями; безпосередньо на поверхні підкладки, де напиляємий шар реагує з газом; і в розрядному проміжку, якщо його довжина достатня.

Швидкість переміщення катодної плями значною мірою залежить від складу і тиску напускного газу. Ці параметри визначають швидкість випаровування і склад утворюваного покриття.

Конструктивно метод електродугового випаровування є найпростішим; для його практичної реалізації використовують стандартні зварювальні випрямлячі або генератори.

Переваги електронно-променевого випаровування полягають у тому, що цей метод єдиний, при якому енергія подається безпосередньо до поверхні, де утворюється паровий потік.

Цей метод дозволяє:

- досягти значної енергетичної щільності на поверхні, що дозволяє досягти високих швидкостей випару різних матеріалів, включаючи тугоплавкі метали, оксиди та інші з'єднання;

- забезпечити просте регулювання потужності та розподілу енергії по поверхні нагрівання, що спрощує контроль за товщиною і рівномірністю нанесення покриттів;
- отримувати покриття високої чистоти завдяки використанню водоохолоджуваних тиглів;
- значно підвищувати енергетичний ККД процесу у порівнянні з використанням прямонакальних випарників.

2.2 Методи нанесення іонних покриттів

Було створено значну кількість установок, що реалізують різноманітні варіації методу іонного осадження [1].

Існує кілька типів джерел іонів, які можна розділити на наступні чотири групи:

- а) плазма самостійного тліючого розряду між випаровувачем і підкладкою;
- б) плазма несамостійного розряду, яку можна створити за допомогою додаткових катодів, магнітного поля, високочастотних електродів і інших засобів. Шиллер С. і Хайзинг В. використали плазмотрон, в якому, порівняно з джерелами першої групи, використання перехресних електричних і магнітних полів дозволило більш ніж в декілька разів зменшити тиск у камері і збільшити щільність іонного струму;
- в) автономні іонні джерела;
- г) джерела пар, частково іонізуючі випаровувану речовину, такі як електронно-променеві й іонні пушки, планарний магнетрон з випаровуванням з рідкої фази.

В установках іонного осадження можна застосовувати резистивні й електронно-променеві випаровувачі, а також хімічні джерела пару як випаровувачі.

При застосуванні технології іонного осадження з використанням резистивно нагріваємих випаровувачів, матеріали високої температури плавлення,

такі як вольфрам, молібден, тантал та інші, не відрізняються від звичайного термічного напилювання. Після очищення вакуумної камери інертним газом і іонним очищенням підкладки, метал у випаровувачі нагрівають до температури плавлення і випаровування, щоб провести осадження покриття. Невід'ємною частиною технологічного процесу є пристрій для іонізації парів випаровуваного металу. Резистивне нагрівання успішно використовується при іонному осадженні різних металів і сплавів з низькою і середньою температурою плавлення.

На рисунку 2.3 показана схема установки, яку використовували Тиром Т. і Халінгом Дж. під час вивчення процесу іонного осадження. Для випаровування металу застосували резистивний випаровувач з напругою 12 В і силою струму 100 А. Система напуску аргону забезпечувала стабільну роботу при тиску до 10^{-2} Па. Для створення аномального тліючого розряду на підкладку подавали негативний потенціал від 2 до 5 кВ. Час очищення підбирали експериментально шляхом зменшення сили струму. Після завершення процесу очищення збільшували силу струму випаровувача до досягнення температури випаровування й проводили нанесення покриття; протягом всього процесу осадження між підкладкою й випаровувачем підтримували розряд.

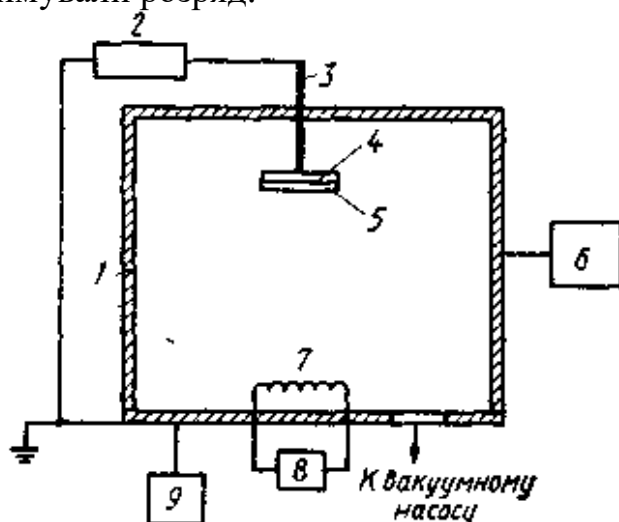


Рисунок 2.3 – Принципова схема установки для іонного осадження з резистивним випаровуванням

- 1 – Камера вакуумна ; 2 – блок живлення катода; 3 – катод; 4 – тримач підкладки; 5 – підкладка;
6 – система контролю тиску в системі; 7 – резистивний випаровувач; 8 – Блок живлення випаровувача; 9 – Система подачі аргону.

Для забезпечення одержання плівки рівномірної товщини необхідно розташувати заземлений екран на відстані, при якій не виникає електричного поля [2]. Екран є необхідною складовою високовольтного електродного пристрою, що запобігає спалаху розряду між електродом і діелектриком, а також уникненню осадження парів металу на поверхні діелектрика, що захищає його від пробою. Схеми електрода з заземленим екраном показані на рис. 2.4.

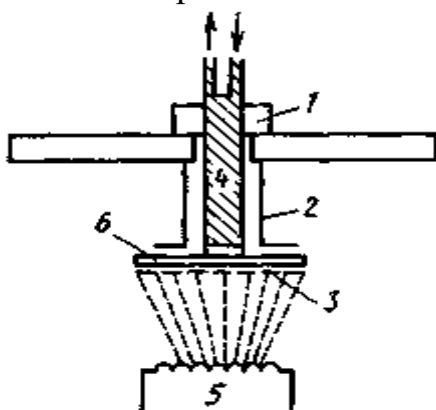


Рисунок 2.4 – Схема електрода з заземленим екраном

1 – Ущільнювач фторопластовий; 2 – екран заземлений; 3 – Сітка; 4 – Катод; 5 – осередок випаровування; 6 – Полімерна підкладка на основі катода.

Одним з основних недоліків найбільш поширених конструкцій електродів у іонному осадженні є те, що контактні деталі, які піддаються покриттю, мають високовольтний електрод. Це призводить до того, що окремі ділянки деталі можуть залишатися без покриття. Цей недолік можна уникнути за допомогою пристроїв барабанного типу, які використовуються для переміщення деталей під час процесу нанесення покриттів.

Резистивні випаровувачі використовуються для одержання тонких плівок, які характеризуються невеликою масою випаровуваної речовини. Для випаровування значних мас матеріалу протягом тривалого часу, а також для тугоплавких матеріалів, таких як сплави, оксиди, карбіди, нітриди, зазвичай використовують електронно-променеві випаровувачі. Проте безпосереднє використання електронно-променевих випаровувачів з розжарюваними катодами в установках іонного осадження неможливе через швидке виходження ниток катода з ладу при робочому вакуумі в камері (від 0,1 до 6,0 Па). Цю проблему

можна вирішити за допомогою диференціальної відкачки робочого об'єму та блоку випаровування, що значно ускладнює конструкцію установки. У більшості випадків використовують двокамерні вакуумні ємності. Типова конструкція такої установки зображена на рисунку 2.5. Важливою особливістю установки є перехідна перегородка з невеликим отвором (діаметром від 3 до 8 мм). Установки цього типу використовувалися К. Уеном і Д. Чемберсом для нанесення іонних покриттів зі срібла, кварцу, корозійно-стійкої сталі, алюмінію, сплаву Fe-Cr-Al-Y. Напруга на підшарі варіюється від 0,8 до 2,0 кВ, щільність струму від 0,4 до 0,6 мА/см²; а тиск від 0,13 до 4,0 Па. Ресурс вольфрамового розжарюваного катода в таких умовах становить 50 годин при потужності до 10 кВт.

З технологічної точки зору ефективним є використання газорозрядних пушок з порожнім катодом для нанесення покриттів. Цей тип випаровувача може працювати при низькому тиску тліючого розряду і відрізняється простотою конструкції та виготовлення. Серед недоліків пушок з порожнім катодом можна відмітити забруднення підшару матеріалом стінок катода через його розпилення під час іонного бомбардування.

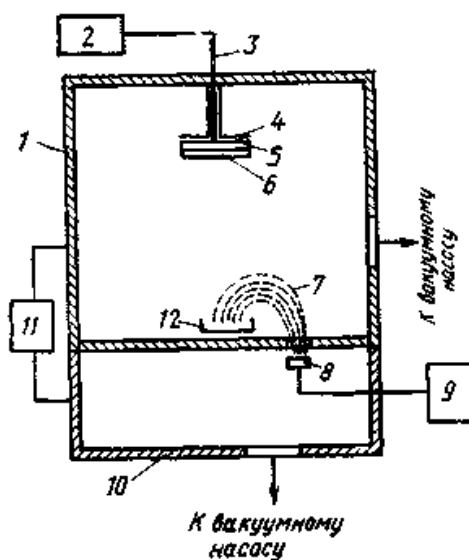


Рисунок 2.5 – Принципова схема установки для іонного осадження з електронно-променевим випаровувачем

1 – Камера вакуумна для випаровування; 2 – блок живлення катода; 3 – Катод; 4 – екран заземлений; 5 – тримач підкладки; 6 – підкладка; 7 – промінь електронний; 8 – електронно-променева пушка (ЕПП); 9 – блок живлення ЕПП; 10 – вакуумна камера ЕПП; 11 – система контролю тиску у вакуумній системі; 12 – тигель.

Для вирішення цієї проблеми доцільно виготовляти катоди пушок з порожнім катодом з того ж матеріалу, що й саме покриття. Газорозрядні пушки з порожнім катодом можуть працювати як у високовольтному, так і у дуговому режимі. На рис. 2.6 показана схема установки іонного осадження з використанням пушки з порожнім катодом, що працює у високовольтному режимі (за даними Д. Чемберса). Катод пушки має форму порожнього циліндра з отворами на бічній поверхні і виготовлений з корозійностійкої сталі. Розміри катода: довжина 10,2 см, діаметр 5,08 см, діаметр отворів 0,64 см. В процесі іонного осадження тиск у камері (від 0,13 до 6,6 Па) підтримується контрольованим напуском аргону і безперервною відкачкою. На підкладку подається негативний потенціал, анодом розряду і електронно-променевої пушки є металева підстава камери. Режим роботи катода залежить від його діаметра, тиску, прозорості бічної поверхні і діаметру вихідного отвору. Пушка такої конструкції працює при прискорювальній напрузі 17 кВ і силі струму 0,3 А; при цих параметрах режим роботи є найбільш стабільним [3].

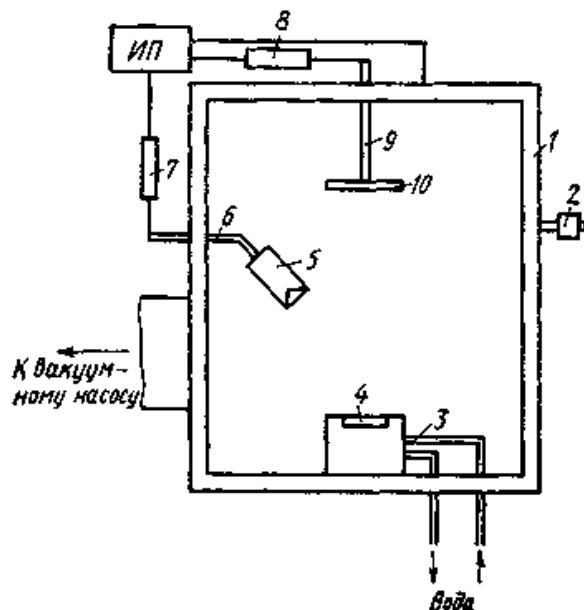


Рисунок 2.6 – Принципова схема установки для іонного осадження

1 – камера вакуумна; 2 – натікач напуску аргону; 3 – мідний тигель водоохолодження;
 4 – матеріал випаровуємий; 5 – пустотілий катод; 6 – ввід пушки високовольтний ($U=20\text{кВ}$, $I=0,2\text{А}$); 7, 8 – регулювальні резистори; 9 – ввід підкладки високовольтний ($U=5\text{кВ}$, $I=0,2\text{А}$);
 10 – підкладка.

Використання дугових пушок з порожнім катодом в установках іонного осадження призводить до значного підвищення ступеня іонізації пар металу у порівнянні з високовольтними пушками. Це зумовлено тим, що максимальна іонізація пари відбувається за участю електронів з енергією від 50 до 150 еВ. Проте властивості покриттів від цього значно не поліпшуються, оскільки енергія, яку підкладка отримує в обох випадках, залишається в одному порядку. Підвищення коефіцієнта іонізації суттєво впливає на рівномірність іонних покриттів на складних деталях, оскільки осадження іонів на підшарі відбувається вздовж силових ліній поля. Основні параметри дугових пушок і процесу іонного осадження різних металів наведені в таблиці 2.1.

Для одночасного випару та іонізації матеріалу можна використовувати іонні пушки. При цьому не потрібно використовувати аргон або інший інертний газ, оскільки тиск у вакуумній камері може бути нижче 10^{-4} Па. Конструктивно такий випаровувач реалізований у вигляді, показаному на рис. 2.7. Усередині котушки, до якої підведена високочастотна напруга, розташований індуктивно розігрітий тигель. Між котушкою та тиглем встановлений екран з окису алюмінію, який пропускає високочастотний сигнал, але зменшує теплові втрати. Такий випаровувач успішно використовували Дж. Уайт і Дж. Мейл у процесі отримання іонних покриттів з Al, Cu, Si, SiO₂, Si₃N₄, Al₂O₃ та інших матеріалів.

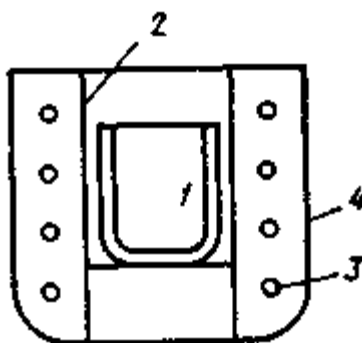


Рисунок 2.7 – Схема іонної пушки

1 – тигель; 2 – екран тепловий; 3 – котушка індукційна; 4 – металевий екран.

Таблиця 2.1 – Параметри дугових пушок і процесу іонного осадження покриттів

Параметр	Значення параметра за даними		
	Дж. Морлі, Х. Сміта	С. Коман, Р. Цурнока	Г. Маху, П. Мелеода, Д. Вільямса
Тиск, Па	$6,7 \cdot 10^{-2}$	10^{-3}	–
Потужність випаровувача, кВт	12–14	6,5	3,0–7,5
Прискорювальна напруга: на катоді пушки на підкладці	60–95 50–100	50 100–400	30 80
Сила струму пушки, А	150–250	130	100–240
Щільність іонного струму, мА/см ²	2–8	0,3–1,7	120
Випаровуємий матеріал	Мідь, кварц	Золото, мідь, хром	Срібло
Відстань від випаровувача до підкладки, см	50	15	25
Швидкість конденсації покриття, мкм/хв	0,14–0,38	0,15–0,46	2–30

Примітка. Матеріал катода – тантал.

Цікавим методом є кластерне іонне осадження. Кластери, які складаються зі 100 до 1000 атомів, формуються шляхом адіабатичного розширення матеріалу, який викидається в вакуумну камеру через малий отвір у нагрітому тиглі. Після цього кластери іонізуються засобами іонного бомбардування і прискорюються полем підкладки. Таким чином, отримують частинки з низьким відношенням заряду до маси, що зменшує накопичення заряду на підкладці під час осадження товстих покриттів на діелектричних матеріалах. Кластери мають більшу площу перерізу для іонізації порівняно з атомами, що робить їх легкоіонізованими у розряді. Схема пристрою показана на рис. 2.8.

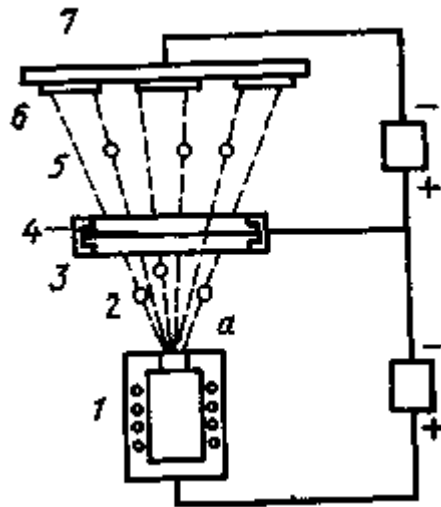


Рисунок 2.8 – Схема установки кластерного іонного осадження

1 – тигель; 2 – кластери; 3 – елемент фокусууючий ; 4 – дріт накаливання; 5 – іонізовані кластери; 6 – підкладка; 7 – тримач підкладки; а – отвір діаметром від 10 до 20мкм.

Використання окремого джерела іонів дозволяє проводити процес іонного осадження при вакуумному тиску близько 10^{-4} Па, що значно знижує вплив атомів примісей на склад і властивості плівок. Крім того, цей підхід дає змогу легко контролювати вміст іонів у потоці нейтральних часток і іонів, енергію іонів, а також швидкість осадження нейтральних часток. Іншими словами, з точки зору керування процесом, це найбільш прогресивний метод [4].

Цікавим є порівняння методу іонного осадження з іншими процесами поверхневої обробки матеріалів, зокрема зі звичайним методом випару і конденсації у вакуумі. Один з варіантів такого порівняння представлений у табл. 2.2. У порівнянні використані характеристики властивостей отриманих покриттів, особливості технології нанесення, матеріали покриттів і вартість обладнання.

Таблиця 2.2 – Порівняння термічного напилення і іонного осадження покриттів у вакуумі

Основні характеристики порівнюваних методів	Оцінка в балах методу			
	термічного напилення з нагріванням		іонного осадження з нагріванням	
	резистивним	Електронно променевим	резистивним	Електронно променевим
Властивості покриттів:				
- ступінь чистоти	3,0	4,0	3,0	4,0
- густина	3,0	3,5	4,0	4,0
- адгезія	3,0	3,0	5,0	5,0
- однорідність	3,5	3,5	5,0	5,0
- можливість захисту складних деталей	2,0	2,0	5,0	5,0
- можливість отримання покриттів зі сплавів	1,0	3,0	1,0	3,0
Особливості технології:				
- розмір підкладки	5,0	5,0	4,5	4,5
- тримач підкладок	3,5	3,5	3,0	3,0
- застосування масок	5,0	5,0	4,0	4,5
- швидкість осадження	4,0	5,0	4,5	3,5
- переміщення підкладки	5,0	5,0	1,0	2,0
- температура підкладки	2,5	2,5	5,0	5,0
- тривалість циклу	3,5	3,5	5,0	5,0
Матеріал покриття:				
- необхідні форма й вид	5,0	5,0	5,0	5,0
- коефіцієнт використання матеріалу	2,5	3,0	2,5	3,0
- вартість	5,0	5,0	5,0	5,0
Вартість обладнання	5,0	3,0	4,0	3,0
Середній бал	3,7	3,8	3,9	4,1

Оцінка здійснювалась за п'ятибальною системою, де найвищий бал відповідає оптимальному значенню аналізованого параметра. Дослідження показало, що найпростіший і технологічно найбільш доступний метод - термічне напилювання з резистивним нагріванням матеріалу. Проте, з точки зору властивостей покриттів, беззаперечну перевагу має електронно-променеве іонне осадження, особливо за такими параметрами, як адгезія, однорідність і можливість отримання покриттів зі сплавів. Метод іонного осадження в цілому відповідає усім вимогам, що пред'являються до сучасних технологічних процесів.

3 ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ ТА КОНСТРУКЦІЙ

3.1 Опис установки синтезу тонкоплівкових структур

Установка є високовакуумною системою типу ВУП–5 з використанням паромасляної відкачки. Усі з'єднання установки виготовлені з нержавіючої сталі. Для відкачування камери напилювання використовується форвакуумний і дифузійний промасляний насос НВДМ-160, призначений для досягнення вакууму на рівні близько 10^{-7} Па (креслення 01.00).

Зразок завантажується через шлюзову камеру, яка може бути оснащена системою іонного очищення. Ця система дозволяє провести обробку поверхні зразків перед напилюванням у плазмі аргону для видалення окисів, залишків органічних сполук і покращення адгезії плівок [4]. Також можливе використання інших агресивних газів з врахуванням вакуумного середовища.

Шлюзова камера обладнана лінійним магнітним маніпулятором, вікном швидкого завантаження і широкодіапазонним вакуумметром. Відкачка камери здійснюється за допомогою паромасляного насоса зі швидкістю відкачки 700 л/с. Також в камері передбачено підключення до магістралі чистого газу для розкриття.

Фланець швидкого завантаження шлюзової камери має спеціальну конструкцію, яка дозволяє встановлювати герметичний бокс. Цей бокс наповнюється інертною атмосферою, щоб уникнути експозиції зразків, які завантажуються в установку, на повітря.

В камері напилювання є система, яка підтримує сталу температуру до 150°C.

Шлюз і камера напилювання обладнані окремими системами відкачки, які з'єднані між собою за допомогою шиберного клапана.

Камера напилювання оснащена оглядовим вікном для контролю завантаження підкладки і візуального спостереження за процесом плавлення мішені з використанням внутрішнього дзеркала. Система автоматизації

технологічного процесу забезпечує автоматичне управління процесом напилювання за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Конструкція установки забезпечує однорідність напилюваних плівок з точністю не гірше 5% для діаметра зразка 150 мм.

Відкрита архітектура установки дозволяє користувачам на етапі формування замовлення вибирати компоненти і агрегати, що входять до складу, а також додаткове аналітичне обладнання за їхніми потребами. Крім того, установку можна доповнювати новими компонентами протягом експлуатації.

На рисунку 3.1 показана функціональна схема установки для синтезу органічних тонкоплівкових структур.

Установка містить вакуумну камеру "1", де відбувається напилення барвника та збір спектра за допомогою спектрометра "20". Повітря з вакуумної камери відкачується вакуумною установкою "25", що включає форвакуумний і високовакуумний насоси. Спектрометр з'єднаний з вакуумною установкою за допомогою світловодів "10". У вакуумній камері розміщений випаровувач барвника "7", який складається з металічної пластинки. Барвник у кристалічному стані введено до цього випаровувача і, під дією великої напруги, розплавляється та випаровується.

Орієнтуючі електроди "8" регулюють напрямок випаровування. Барвник наноситься на скляну пластину-підкладку (або на підкладку з іншого матеріалу, який використовується). Дана підкладка (диск) рухається завдяки двигунам системи транспортування "4". Контролер системи транспортування "21", контролер випаровувача барвника і кварцові датчики "9" (датчики товщини) "16" забезпечують однорідне нанесення барвника і досягнення потрібної товщини шару. Заслінки "5" використовуються для точного контролю часу початку і закінчення напилення барвника і підкладки з полімеру (в даному експерименті не використовуються).

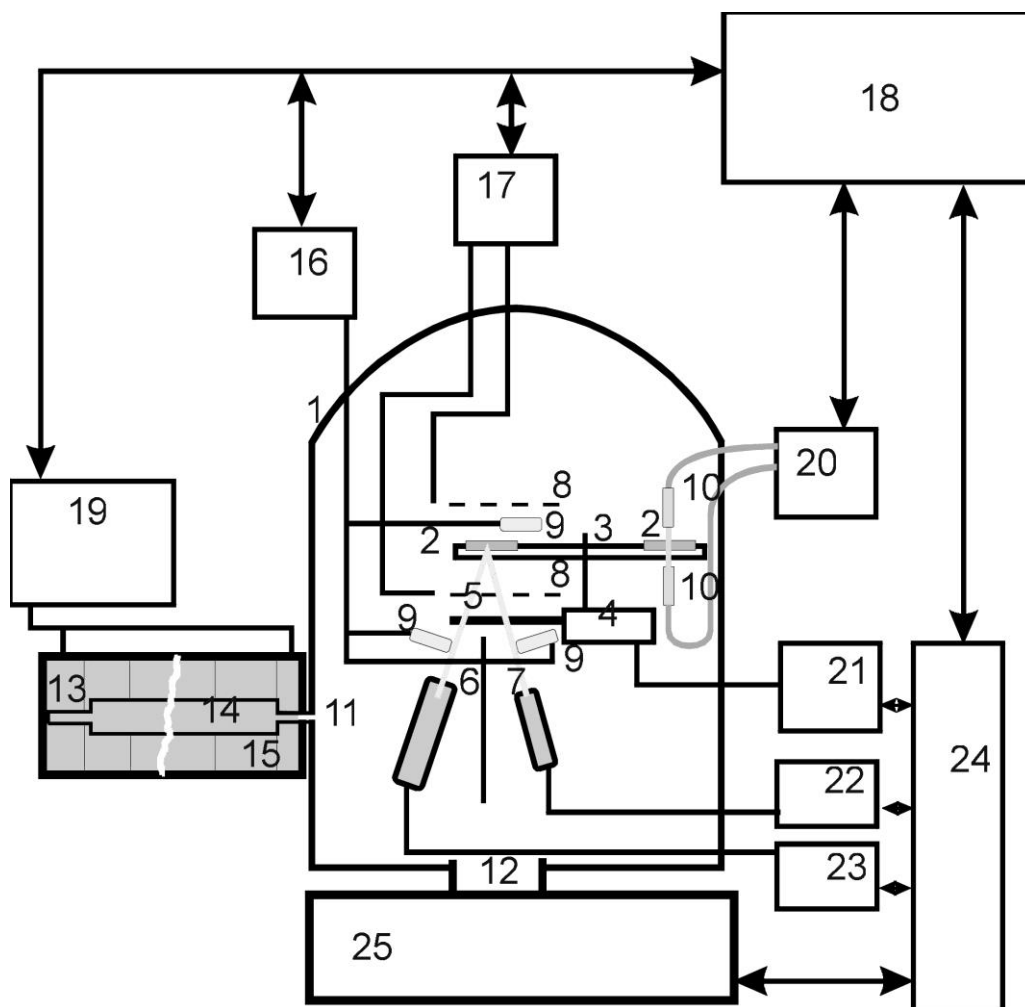


Рисунок 3.1 – Функціональна схема установки синтезу органічних тонкоплівкових структур

Багатозонна піч "15" використовується для нагрівання полімеру, який застосовується як підкладка. Терморегулятор "19" підключений до пічі для забезпечення потрібної температури. У печі розташовані субліматор діпараксилілена "13" і активатор параксилілена "14". Активований діпараксилен виводиться через з'єднання "11". Контролер випаровувача-активатора "23" і всі інші контролери підключені до аналогово-цифрового пристрою і цифро-аналогового перетворювача "24". Основне джерело високої напруги для цієї установки використовується для її нормальної роботи [5].

Комп'ютер керування "18" використовується для запису результатів експерименту (спектра даного барвника) та інших необхідних параметрів для цього дослідження.

Електронна стійка керування складається з таких основних елементів:

- персональний комп'ютер;
- блок розподілу електроживлення;
- кнопка аварійного відключення установки;
- блок керування нагрівачами;
- блок живлення робочого насоса;
- блоки керування електронно-променевим випарником.

Блоки керування випарником містять:

- силовий блок живлення;
- блок керування фокусуванням променя;
- виносний блок керування розжаренням катода;
- блок пересування позицій променя.

Конструкція установки та розробка методів осадження плівок

Згідно з попередніми дослідженнями, зокрема аналізом спектрів оптичного поглинання у розчині толуолу та у плівці, встановлено, що не всі органічні барвники у плівці зберігають свої властивості, адже вони піддаються руйнуванню під час напилення [6]. Для того, щоб отримати пряме уявлення про процес випаровування речовини, була розроблена програма, яка моніторить тиск у камері, швидкість наростання плівки, температуру та струм випаровувача. Особливо було виявлено, що при напиленні деяких органічних барвників відбувається виділення газу. Це підтверджує, що під певними умовами температури випаровувача відбувається деградація органічних речовин (креслення 02.01).

На рисунку 3.1 показана конфігурація установки, що використовувалась у даному дослідженні.

Випаровувач був інтегрований під ковпаком універсального вакуумного посту ВУП-5, який структуровано на рисунку 3.2.

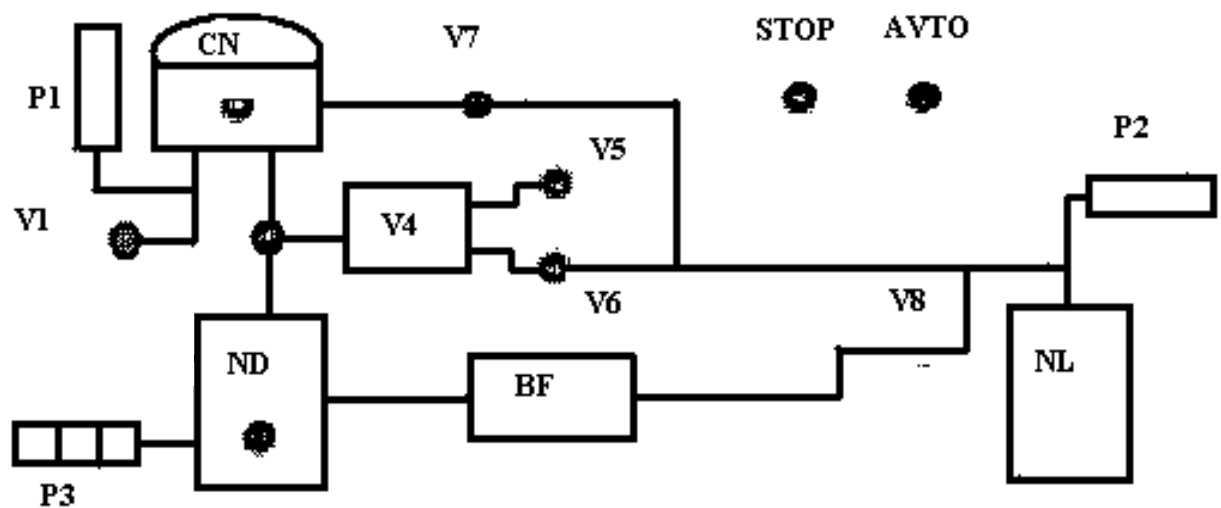


Рисунок 3.2 – Схема вакуумної системи

NL - це форвакуумний насос, який створює вакуум на рівні близько 10^{-4} Па. ND - це дифузійний насос НВДМ-160, який призначений для досягнення вакууму на рівні приблизно 10^{-7} Па. Він наповнений оливою, і під час відкачування перебуває у стані кипіння (температура близько 150°C). BF - це бустерна ємність для відкачки повітря дифузійним насосом, яка допомагає подолати різкі зміни тиску при роботі ND. V1, V4, V5, V6, V7, V8 - це клапани системи, які забезпечують зв'язок між окремими незалежними частинами. Клапан V1 використовується для накачування повітря в камеру CN після проведення досліду. Клапан V4 відкриває шлюз між дифузійним насосом та камерою CN, враховуючи значну різницю тиску по обидва боки. Клапани V5 та V6 допомагають відкривати клапан V4. CN - це камера, де проводяться досліди. P1, P2, P3 - це датчики; P1 та P2 - термопарні, P3 - іонізаційний.

Вакуумна система (рис. 3.2) складається з механічного форвакуумного насоса, дифузійного насоса, електромагнітних соленоїдальних клапанів для перемикання каналів системи, а також трьох датчиків для контролю та моніторингу вакууму (креслення 02.02).

Клапан V7 відкривається, щоб відкачати повітря форвакуумним насосом з камери CN. Потім відкривається клапан V8, і повітря починає відкачуватись через лінію дифузійного насосу. Після цього відкривається клапан V4, і дифузійний насос створює вакуум вищого рівня порівняно з вакуумом, що забезпечує NL.

У процесі експерименту для вимірювання товщини плівок використовувався кварцовий датчик, який здійснює вимірювання за допомогою зміни частоти коливання кварцової пластинки. Цей прилад включає кварцову пластинку до електричного кола [6] і працює на резонансній частоті 8 МГц. Зміна частоти на кілька герц відповідає нарощенню плівки на один адсорбційний шар.

3.2 Основні параметри та класифікація вакуумних насосів

Вакуумні насоси можна класифікувати за принципом їх дії на наступні типи:

- насоси об'ємної дії здійснюють процес відкачки шляхом періодичної зміни об'єму робочої камери. Це включає водокільцеві насоси, механічні насоси і двохроторні насоси;

- ежекторні насоси здійснюють відкачку за рахунок захоплення газу струменем робочої рідини або пара. Це можуть бути пароструминні насоси або пароежекторні насоси;

- молекулярні насоси здійснюють відкачку шляхом надання молекулам відкачуємого газу додаткової швидкості в певному напрямку. Вони можуть бути струминними, де ця додаткова швидкість передається молекулам безупинно стікаючим струменем пари або газу, або молекулярними, де цю швидкість передають поверхні, що рухаються, твердого тіла;

- сорбційні насоси здійснюють відкачку за рахунок здатності матеріалів поглинати гази і пари. Це включає адсорбційні, гетерні, випарні, іонно-гетерні і магнітні електророзрядні насоси;

- криогенні насоси здійснюють відкачку шляхом конденсації газів і парів при низьких температурах. Це можуть бути конденсаційні або кріосорбційні насоси.

При виборі насоса для конкретної вакуумної системи зазвичай керуються наступними основними характеристиками: максимальним робочим тиском на вході, максимальним випускним тиском, максимально досяжним залишковим тиском, швидкістю відкачування та продуктивністю.

У вакуумних установках застосовуються два типи вакуумних насосів: форвакуумні, до яких входять механічні, сорбційні, рідинно-струменеві та інші види; та високовакуумні, до яких відносяться пароструминні, магнітні електророзрядні, гетерно-іонні, осьові, відцентровані вакуумні турбонасоси та інші.

Форвакуумні вакуумні насоси з масляним ущільненням є найбільш поширеними вакуумними насосами. За своєю конструкцією механічні насоси поділяються на пластинчато-роторні й пластинчато-статорні. Ці насоси здійснюють процес відкачки шляхом періодичної зміни обсягу робочої камери, у яку потрапляють відкачувані гази. Процес включає наступні етапи: газ всмоктується завдяки розширенню робочої камери насоса; зменшення обсягу робочої камери й стиск газу в ній; видалення стисненого газу з робочої камери в атмосферу.

3.2.1 Пластинчато-роторний насос 2НВР-5ДМ

Принцип роботи одноступінчастого пластинчато-роторного насоса (рисунок 3.3) описується наступним чином [7]. У циліндрі "3", як показано на стрілці, ексцентрично рухається ротор "4". У прорізі ротора знаходяться пластини "5", які пружинами "6" притиснуті до поверхні циліндра "3". Під час обертання ротора пластини зсовуються по поверхні циліндра. Камера, утворена циліндром, ротором і торцевими кришками, поділена пластиною на дві частини. Під час обертання ротора порожнина "а" періодично збільшується, і через клапан "2" з вакуумної системи в неї потрапляє газ. Порожнина "б" періодично зменшується, що призводить до стиску газу в ній. Стиснений газ викидається назовні через клапан "1" (креслення 03.01).

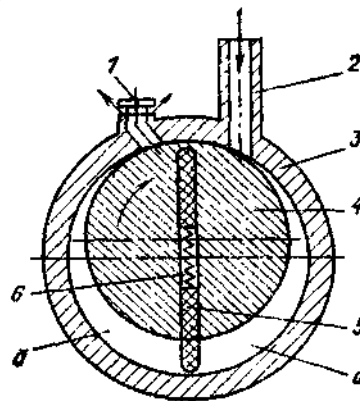


Рисунок 3.3 – Схема пластинчато-роторного вакуумного насоса 2НВР-5ДМ

У насосі двоступінчастого виконання вихід першого ступеня з'єднаний каналом з входом другого ступеня. Стиснутий газ послідовно проходить через обидві ступені і викидається через клапан другого ступеня. Ущільнення між всмоктувальною порожниною "а" і стискувальною порожниною "б" забезпечується масляною плівкою. Вихлопні клапани працюють в середовищі масла.

Таблиця 3.1 містить основні параметри вакуумних насосів з масляним ущільненням.

Таблиця 3.1 – Основні характеристики форвакуумного пластинчато-роторного насосу 2НВР-5ДМ

Параметр	Значення параметра
Швидкодія $Q \cdot 10^3$ при вхідному тиску 133,3Па, м ³ /с	5
Межа залишкового тиску, Па, не більше при використанні масла:	
ВМ-1	0,013/0,067/2,6
ВМ-4	0,067/3,9/10,4
ВМ-5	0,013/0,67/2,6
ВМ-6	0,013/0,13/0,67
Об'єм наливаємого в насос масла $V_n \cdot 10^3$, м ³	не більше 1,2

Умовне позначення насоса 2НВР-5ДМ означає, що це двоступінчастий вакуумний пластинчато-роторний насос зі швидкістю дії $5 \cdot 10^{-3}$ м³/с.

Швидкість відкачки насоса можна збільшити шляхом збільшення обсягу робочої камери насоса, провідності вхідного патрубку і кутової швидкості електродвигуна. Важливо враховувати, що оптимальна частота циклів відкачки має бути збережена; перевищення цього параметра може призвести до перегріву насоса і недостатнього заповнення робочої камери відкачуємим газом. Газовиділення насоса включає суму газів, що виділяються з деталей конструкції насоса, з робочої рідини і тих, що надходять ззовні через нещільності в корпусі

насоса. Для підвищення швидкості дії механічних насосів рекомендується паралельно з'єднувати два однакових насоси.

Основний недолік всіх вакуумних обертальних насосів з масляним ущільненням полягає в можливості проникнення парів масла у відкачувальний вакуумний посуд через термічне розкладання масла на поверхнях тертя елементів насоса. У таких умовах відбувається крекінг масла з утворенням легких вуглеводнів, що призводить до зниження граничного тиску насоса. Для уникнення потрапляння парів робочої рідини у вакуумний посуд встановлюють пастки, які зменшують зворотну дифузію і створюють додатковий опір для потоку пар газу, що зменшує швидкість відкачки.

При тривалій роботі в умовах підвищених тисків насос може перегрітися. Це спричиняє інтенсивне випаровування масла, що призводить до забруднення вакуумної системи паром масла та водяних парів, які раніше були утримані в ньому. Це також призводить до різкого зниження в'язкості масла і порушення герметичності масляного ущільнення.

3.2.2 Насос дифузійний НВДМ-160

Пароструменеві насоси поділяються на паромасляні та парортутні [7]. Принцип роботи пароструменевого насоса (рис. 3.4) полягає в такому: робоча рідина "1" нагрівається в кип'ятильнику "8". Пари, які утворюються при цьому процесі, подаються по паропроводу "6" до сопел "5" і виходять з них з високою швидкістю. Відкачуваний газ захоплюється струменями пари з послідовно розташованих сопел "3" та "4", а потім подається по трубопроводу "7" до форвакуумного насоса. Пари масла, коли вони досягають охолоджуваної водою стінки "2" корпусу насоса, конденсуються; утворений конденсат повертається в кип'ятильник, де знову випаровується. Для зменшення втрат робочої рідини через вихідний патрубок насоса встановлена охолоджувана водою пастка на виході (креслення 03.02).

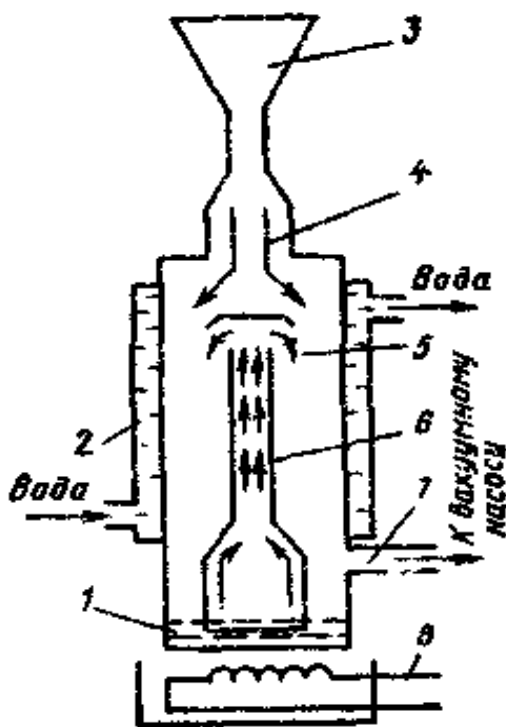


Рисунок 3.4 – Схема пароструменевого насоса

Дифузійні насоси використовуються для відкачки вакуумних систем до залишкових тисків від 10^{-1} до 10^{-7} Па і нижче. При таких тисках довжина вільного пробігу молекул відкачуваного газу майже завжди більша за діаметр впускного отвору насоса, що призводить до встановлення молекулярного режиму витікання газу в ньому. Під час теплового руху молекули газу направляються через впускний отвір насоса до парового струменя. Механізм видалення газу в дифузійних насосах зумовлений дифузійними процесами.

Під впливом різниці концентрацій газу над паровим струменем і в самому струмені (де концентрація газу дуже мала), відбувається процес дифузії газу у струмінь. Попадаючи у струмінь, молекули газу отримують імпульси від молекул пари, що рухаються в напрямку парового потоку, і переносяться разом зі струменем до стінки або корпусу насоса. Під час цього процесу пара конденсується на охолодженій стінці, а газ, що залишився в струмені, досягає випускного тиску і перетікає вздовж стінки до простору над наступним елементом насоса.

Попереду проста дифузія газу через струмінь також може відбуватися зворотна дифузія у напрямку форвакууму. Проте в цьому випадку молекули газу, що рухаються у зворотньому напрямку, зіштовхуються з молекулами, що рухаються назустріч, тобто з паровими молекулами, і часто відбиваються назад у бік форвакууму. Лише малий відсоток молекул газу може успішно пройти через струмінь у зворотньому напрямку. В оптимальному режимі роботи насоса кількість молекул газу, які дифундують у струмінь зі сторони впускного отвору насоса, значно переважає кількість тих, які дифундують у зворотньому напрямку. Однак у деяких випадках, наприклад при відкачці легких газів насосом, який має

оптимальний режим для відкачки повітря, вплив зворотної дифузії може помітно вплинути на характеристики насоса.

Дифузійні насоси складаються з кількох ступенів із соплами у формі зонтика. Залежно від типу робочої рідини, використовуваної в насосі, сучасні дифузійні насоси класифікуються на паромасляні й парортутні. У паромасляних насосах використовуються різні органічні робочі рідини з низьким тиском насиченої пари при нормальних умовах температури, які часто представляють собою суміші фракцій з різними тисками пари і молярними масами [4].

У робочому діапазоні тисків швидкість дії дифузійного насоса залишається стабільною при впускних тисках (див. рис. 3.5, ділянка II), але зменшується в областях низьких (ділянка I) і високих (ділянка III) тисків.

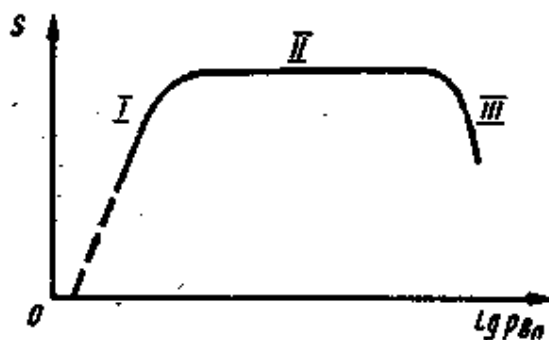


Рисунок 3.5 – Залежність швидкості дії дифузійного насоса від впускного тиску

Зниження швидкості дії при низьких тисках пояснюється зворотною дифузією газу через паровий струмінь в цій області. Крім того, значну роль починають відігравати гази, які наносяться паровим струменем з кип'ятильника насоса і виділяються стінками насоса. Під час конденсації парового струменя на стінках насоса частина газу, стиснутого до підвищеного тиску, особливо в області форвакууму, розчиняється в конденсаті й потрапляє разом з газом у кип'ятильник насоса. Цей газ разом із зворотною дифузією й газовиділенням стінок насоса значно впливає на граничний залишковий тиск p_0 насоса й призводить до зменшення швидкості дії S . При досягненні рівня $p = p_0$ швидкість дії $S = 0$.

З інкрементом впускного тиску кількість газу, що насос видаляє з відкачуємого сосуду, збільшується у порівнянні з масою газу, яка повертається через протидифузію, газовиділення і струмені з кип'ятильника. Коли ці маси

стають непорівнянними, швидкість дії насоса перестає залежати від впускного тиску (ділянка II).

З підвищенням впускного тиску зростає випускний тиск насоса, який контролюється швидкістю дії форвакуумного насоса. Це підвищення випускного тиску призводить до виникнення різкого збільшення тиску в струмені, його переміщення до сопла і відокремлення від стінок насоса, що супроводжується перетоком газу з області форвакууму в область високого вакууму. В такому випадку швидкість дії насоса зменшується до рівня швидкості дії форвакуумного насоса. Швидкість дії насоса залежить від потужності нагрівача, виду відкачуємого газу і його температури, а також від типу робочої рідини.

Механізм захоплення газу струменем у високовакуумному насосі обумовлений двома основними процесами: дифузією газу в струмені, що залежить від щільності струменя, та переносом газу струменем, що залежить від швидкості струменя. Тому швидкість дії насоса залежить від комплексної зміни цих параметрів. Наприклад, якщо збільшувати швидкість парового потоку $V_{\text{п}}$ при незмінній щільності $\rho_{\text{п}}$, то швидкість дії збільшиться. З іншого боку, якщо збільшувати щільність $\rho_{\text{п}}$ при незмінній швидкості $V_{\text{п}}$, то швидкість дії зменшиться. При одночасному збільшенні $\rho_{\text{п}}$ й $V_{\text{п}}$ максимальна швидкість дії відповідає оптимальному співвідношенню між $\rho_{\text{п}}$ й $V_{\text{п}}$. Оскільки ці параметри пропорційні потужності нагрівача, крива залежності швидкості дії від цієї потужності має максимум (рис. 3.6).

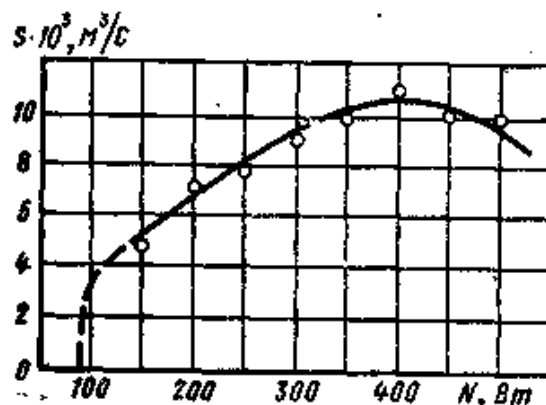


Рисунок 3.6 – Залежність швидкості дії дифузійного насоса від потужності нагрівача

Для визначення оптимальної потужності нагрівача насоса при відкачці різних газів можна використовувати емпіричне рівняння з достатньою точністю для практичних потреб.

На практиці часто виникає необхідність відкачувати суміші різних газів із вакуумних систем. Якщо склад суміші відомий, то швидкість дії та продуктивність насоса для таких газових сумішей можна розрахувати з прийнятною для практики точністю за допомогою формул, отриманих на основі стандартних взаємозв'язків для газових сумішей.

Швидкість дії насоса пропорційна кореню квадратному з абсолютної температури відкачуваного газу. Зміни температури відкачуваного газу, які зазвичай спостерігаються на практиці, мають незначний вплив на швидкість дії насоса. Наприклад, для збільшення швидкості дії насоса на 10%, температуру відкачуваного газу слід підвищити з 293 до 353 К.

Перенесення парів робочої рідини з насоса до відкачуваного сосуда є небажаним з різних причин, таких як забруднення вакуумної системи та втрати робочої рідини в самому насосі. Крім того, перенесення парів масла зі струменя насоса до відкачуваного сосуда може суттєво змінювати залишковий тиск у системі.

Зворотний потік парів масла з насоса до вакуумної системи в більшості випадків складає від 0,1 до 0,01% від загального потоку пари, що виходить з верхнього сопла насоса; в середньому по площі вхідного отвору зворотний потік становить від $1 \cdot 10^{-2}$ до $5 \cdot 10^{-2}$ мг/(год·см²).

При сталому режимі роботи насоса зворотний потік масла залишається майже незмінним. Збільшення впускного тиску в широкому діапазоні робочих тисків не впливає на зворотний потік масла. У діапазоні впускних тисків від 10^{-4} до 10^{-2} Па зворотний потік практично залишається стабільним, але при тисках більше 10^{-2} Па зменшується (рис. 3.7). Це пояснюється тим, що надлишковий напуск повітря в насос при тисках вище 10^{-2} Па сприяє переходу газового потоку у молекулярно-в'язкісний режим, де ймовірність зворотного потоку масла зростає внаслідок збільшення числа зіткнень масляних молекул з газовими молекулами,

що рухаються назустріч. Враховуючи це, підвищення впускного тиску до рівня, за якого досягається максимальний випускний тиск насоса, може спричинити порушення робочого режиму насоса, і після цього нормалізації режиму супроводжується значним збільшенням зворотного потоку масла.

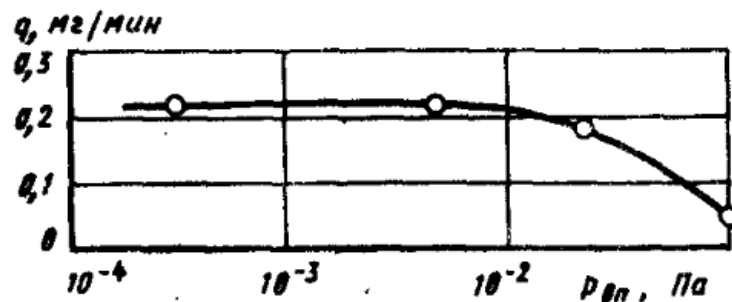


Рисунок 3.7 – Залежність потоку масла з дифузійного насоса у відкачуєму систему від впускного тиску

Підвищена міграція пар робочої рідини відбувається під час запуску та зупинки насоса. Після включення нагрівача (протягом 15 хвилин) зворотний потік масла дорівнює нулю (рис. 3.8), оскільки кип'ятильник починає нагріватися, і температура масла ще низька (цей період відповідає підведенню теплоти, яка компенсує теплові втрати в насосі). Далі температура масла швидко підвищується, із сопла виходить ще несформований дозвуковий потік, що приводить до різкого збільшення зворотного потоку масла з насоса. Після формування потоку його швидкість стає надзвуковою, і зворотний потік масла різко зменшується до мінімуму. Після цього температура в кип'ятильнику ще певний час підвищується до робочого рівня, і зворотний потік масла знову зростає внаслідок збільшення щільності пари на виході з сопла. При сталій робочій температурі пари в кип'ятильнику зворотний потік майже не змінюється. При вимиканні нагрівача насоса зворотний потік масла спочатку зменшується через зниження щільності парового струменя. Після досягнення температури в кип'ятильнику, при якій статичний тиск пари на виході з сопла стає менше тиску газу на вході в насос, відбувається стрибок ущільнення в соплі. При цьому швидкість парового струменя стає дозвуковою, щільність зростає, і зворотний потік масла різко збільшується. Після того, як фронт стрибка ущільнення перейде критичний

перетин сопла, зворотний потік масла знову почне зменшуватися внаслідок зниження щільності потоку зі зменшенням температури пари в кип'ятильнику.

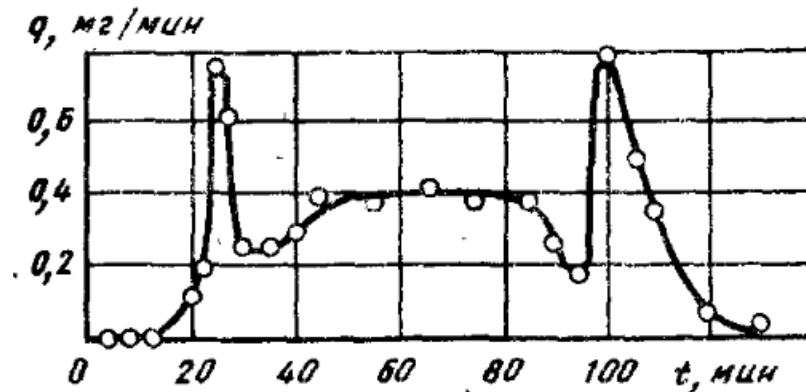


Рисунок 3.8 – Крива зміни потоку масла з дифузійного насоса в процесі циклу (пуск-робота-зупинка)

Зміни зворотного потоку пар робочої рідини з насоса при значному збільшенні впускного тиску під час запуску та зупинки насоса часто призводять до забруднення відкачуємої системи робочою рідиною, навіть якщо в інший час міграція пари з насоса залишається дуже мала при сталому режимі роботи.

На рисунку 3.9 зображено схему вакуумного дифузійного паромасляного насоса НВДМ-160.

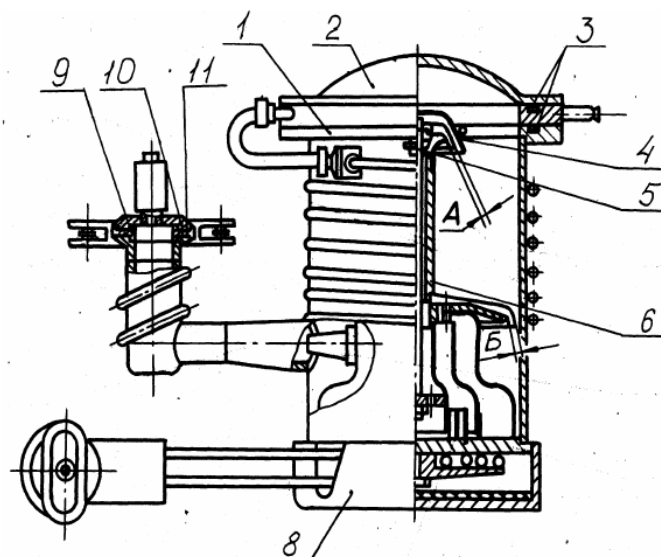


Рисунок 3.9 – Насос вакуумний дифузійний паромасляний НВДМ-160

1 – корпус; 2, 10 – заглушка; 3, 11 – прокладка; 4 – масловідбивач; 5 – пристрій заземлення; 6 – паропровід; 8 – нагрівач; 9 – кільце.

3.3 Іонізаційні вакуумметри

При виготовленні підкладок для мікроелектронних пристроїв, оптичних компонентів та під час проведення хімічних та інших технологічних процесів потрібно працювати з дуже низькими тисками. Термін "вакуум" означає тиск, який нижче атмосферного, але у практичних умовах він використовується для позначення практичної повної відсутності газів. Досягнення абсолютного вакууму неможливе: навіть у космічному просторі відсутня будь-яка зона, де б повністю не було б матерії [6].

Вимір вакууму за допомогою традиційних датчиків можливий, проте це не надто ефективний метод. Зазвичай такі датчики реєструють негативні значення тиску відносно атмосферного, але їхні можливості обмежені для вимірювання дуже низьких концентрацій газів через низьке відношення сигнал/шум. Наприклад, звичайні датчики тиску не здатні точно визначати низькі концентрації газів через це низьке відношення. Натомість, вимірювачі вакууму працюють за зовсім іншими принципами, які базуються на фізичних властивостях молекул газів, таких як теплопровідність, в'язкість, іонізація та інші.

Принцип функціонування іонізаційних манометричних перетворювачів полягає в іонізації газу електронним потоком та вимірі іонного струму, який використовується для визначення тиску [8].

На рисунку 3.10 показана конструкція та принцип дії електронного іонізаційного манометричного перетворювача. У скляному балоні перетворювача "1" розташована електродна система, яка включає в себе колектор іонів "2", анодну сітку "3" і

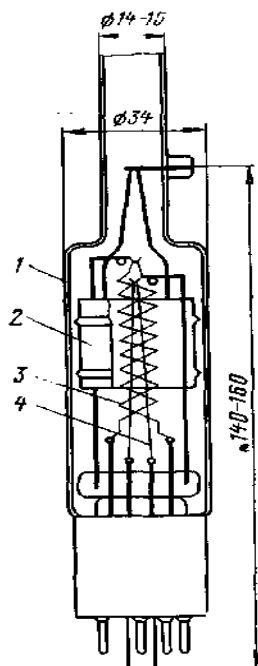


Рисунок 3.10 – Електродний іонізаційний манометричний перетворювач

прямонакальний катод "2". На анодну сітку подається напруга плюс 200 В, а на циліндричний колектор іонів - мінус 50 В. Анодна сітка перетворювача виготовлена з вольфрамового дроту діаметром 0,2 мм у вигляді біфілярної спіралі. Під час прогрівання перетворювача для обезгазування струм проходить по спіралі.

Вольфрамовий катод перетворювача випускає електрони, які направляються до анода. Частина електронів проходить через анодну сітку і потрапляє в простір між анодом і колектором. Оскільки колектор має негативний потенціал відносно катода, електрони не можуть досягти колектора. В точці простору з нульовим потенціалом електрони зупиняються і починають рух у зворотному напрямку - до позитивно зарядженої анодної сітки. Це призводить до безперервних коливань електронів між анодом і колектором, зазвичай до п'яти разів, перш ніж вони потрапляють на анод. При зіткненні електронів з молекулами газу відбувається їхня іонізація. Утворені позитивні іони збираються на колекторі, який знаходиться під негативним потенціалом, утворюючи іонний струм у його ланцюгу [8]. Ще одним джерелом значної похибки при вимірюванні низьких тисків є електронний потік на анод, який разом із десорбцією газу з його поверхні призводить до часткової іонізації газу. Утворені іони з газової фази, разом з іонами від десорбції газу, також потрапляють на колектор і впливають на точність вимірювання тиску.

Анодна сітка може забруднюватись внутрішнім шляхом через дифузію домішок з металу під час прогріву, або зовнішнім шляхом через сорбцію деяких компонентів газової атмосфери на поверхні анода.

При тисках вище 10^{-5} Па ефекти іонно-електронної десорбції можна ігнорувати. Однак при нижчих тисках зниження іонних струмів від десорбції вимагає значного та тривалого прогріву анодної сітки перетворювача.

Електронний іонізаційний перетворювач ПМИ-12-8. Для вимірювання тиску до 10^{-8} Па промисловість випускає серію електронних іонізаційних манометричних перетворювачів з осьовим колектором іонів (креслення 04.01). Колектор іонів у перетворювачах ПМИ-12-8 (рис. 3.11) розташований вздовж осі анодної сітки і виготовлений з тонкого вольфрамового стрижня, який має діаметр 0,1 мм в основі і стає поступово тоншим до вершини [8].

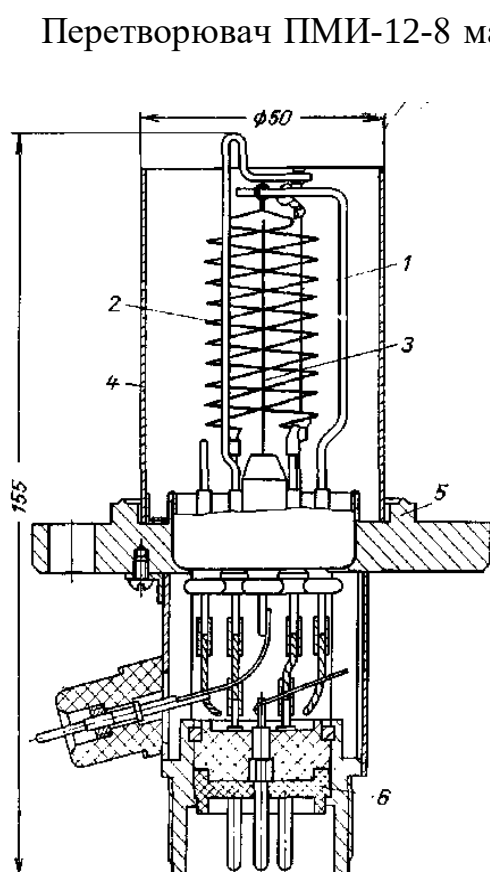


Рисунок 3.11 – Електронний іонізаційний перетворювач ПМИ-12-8

- 1 – катод; 2 – анодна сітка;
- 3 – колектор; 4 – екран;
- 5 – фланець; 6 – цоколь.

Перетворювач ПМИ-12-8 має змінний катод, розташований ззовні анодної сітки. Як і у перетворювачі ПМИ-2, електрони перебувають з обох сторін анодної сітки. На колектор попадають лише ті іони, які утворилися всередині неї. Анодна сітка "2" перетворювача ПМИ-12-8 може бути очищена від газів електронним бомбардуванням або проходженням струму через неї. У випадку проходження струму вона може бути нагріта до 1100В.

Електроди перетворювача ПМИ-12-8 розташовані безпосередньо у вакуумному просторі [4]. Щоб уникнути впливу навколишніх металевих конструкцій вакуумної системи на метричні характеристики перетворювача і врахувати різноманітні електричні

наведення, електродна система оточена металевим екраном "4". У перетворювачі ПМИ-12-8 цей екран електрично з'єднаний з корпусом (фланцем) перетворювача. При тисках вище 10^{-2} Па екран відключається від загального нуля і використовується як анод. У цьому випадку анодна сітка перетворювача служить колектором іонів. Основні технічні характеристики іонізаційного датчика ПМИ-12-8 наведені в таблиці 3.2 (креслення 04.02).

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики іонізованого датчика ПМИ-12-8

Найменування параметра	Значення
Струм електронів (I_e), мА	5
Напруга між анодом і катодом ($U_{a.k.}$), В	200
Напруга між іонним колектором і катодом ($U_{k.k.}$), В	–100
Чутливість (K), Па ⁻¹	$5,6 \cdot 10^{-2}$
Діапазон вимірювання, Па	$7 \cdot 10^{-8} \dots 10^{-3}$
Габаритні розміри, мм	Ø90x150
Маса, кг	0,6
З'єднання з вакуумною системою	Фланцеве (D _y 50)

3.4 Мікроконтролер ATmega169

Особливості даного пристрою включають наступне:

1. Високоєфективна RISC архітектура з 130 командами, що виконуються за один машинний такт, та 32×8 робочими регістрами загального призначення. Процесор працює в цілком статичному режимі, здатний досягати продуктивності до 4 MIPS при частоті 4 МГц. Також має вбудований двох-тактовий помножувач.

2. Високоєфективна, енергонезалежна пам'ять програм і даних, включаючи 16 Кбайт внутрішньої самопрограмувальної FLASH пам'яті з можливістю до 10000 циклів перепрограмування. Опціональний розділ з незалежними ключовими бітами дозволяє внутрішнє програмування та правильне читання в процесі запису. Додатково містить 512 байт EEPROM із до 100000 циклів стирання запису, а також 1 Кбайт внутрішньої SRAM. Програмувальний ключ забезпечує захист програм від несанкціонованого доступу.

3. JTAG (IEEE1149.1 сумісний) інтерфейс:

- вбудована підтримка наладчика;
- сканування пам'яті відповідно до JTAG стандарту;
- програмування FLASH, EEPROM, охоронних і ключових біт через JTAG інтерфейс.

4. Периферійні функції:

- два 8-бітних таймери-лічильника з програмувальним переддільником і режимом порівняння;
- 4×25 LCD драйвер;
- один 16-бітний таймер/лічильник із програмувальним переддільником, режимом порівняння і захоплення;
- Master/Slave SPI послідовний інтерфейс;
- лічильник реального часу з програмувальним генератором;
- універсальний послідовний інтерфейс із виявленням початку посилок;
- вбудований аналоговий компаратор;
- програмуємий Watchdog таймер із програмувальним генератором;
- переривання по зміні потенціалів виводів.

5. Спеціальні функції:

- Reset по включенню харчування і вимикання при зниженні напруги живлення;
- зовнішні і внутрішні джерела переривання;
- внутрішній калібрований генератор;
- п'ять економічних режимів: Idle, придушення шумів АЦП, економічний, Вкл. і режим чекання.

6. Входи-виходи і корпуси

7. 53 програмувальних виводів вхід-вихід і один вхід

8. 64 вивідний корпус TQFP

9. Напруга живлення: - 1,8В до 3,6В для Atmega169V; - 2,7В до 3,6В для Atmega169L.

10. Ультрамале споживання: в активному режимі - 1МГц, 1,8В – 300мкА; - 32КГц, 1,8В – 20мкА (включаючи генератор); у режимі ВИКЛ. - 0,5мкА при 1,8В.

Порт А (РА7 – РА0) є восьмирозрядним двонаправленим портом. Вбудовані навантажувальні резистори можуть бути підключені до виводів цього порту. Вихідні буфери здатні надавати струм до 20мА, що дозволяє безпосередньо керувати світлодіодними індикаторами. Якщо виводи порту використовуються як входи і зовнішній сигнал встановлено в низький стан, струм буде витікати тільки при активованих вбудованих навантажувальних резисторах.

При використанні порту А зовнішньої пам'яті даних він використовується для мультиплексування шини адреси/даних.

Взаємодія з портом А відбувається за допомогою трьох реєстрів, розташованих у просторі вводу-виводу (пам'яті даних): реєстр порту даних PORTA, реєстр напрямку даних DDRA і реєстр вхідних даних PINA. Реєстр вхідних даних дозволяє тільки читання, в той час як реєстри порту даних і напрямку даних забезпечують можливість як читання, так і запису.

Виводи порту А можуть використовуватися для альтернативної функції, яка включає формування молодших розрядів мультиплексованої шини адреси/даних при взаємодії з зовнішньою пам'яттю даних. Для активації цієї альтернативної функції потрібно встановити біт SRE у регістрі MCUCR; при цьому налаштування регістра напрямку даних ігноруються.

Порт В (PB7 – PB0) є восьмиразрядним двонаправленим портом з вбудованими навантажувальними резисторами, які здатні надавати струм до 20мА. Якщо виводи порту використовуються як входи і зовнішній сигнал встановлено в низький стан, струм буде тікати тільки при підключених вбудованих навантажувальних резисторах.

Для взаємодії з портом В використовуються три реєстри, розташовані у просторі вводу-виводу (пам'яті даних): реєстр порту даних PORTB, реєстр напрямку даних DDRB і реєстр вхідних даних PINB. Реєстр вхідних даних дозволяє лише читання, в той час як реєстри порту даних і напрямку даних забезпечують як читання, так і запис.

Порт С (PC7 – PC0) є 8-розрядним вихідним портом з вихідними буферами, які здатні надавати струм до 20мА. При наявності пам'яті даних, цей порт використовується для організації шини адрес.

Окрім основної функції, виводи порту С можуть виконувати альтернативну функцію під час роботи з зовнішньою пам'яттю даних. В цьому режимі через лінії порту С передається старший байт адреси зовнішньої пам'яті.

Порт D (PD7 – PD0) є 8-розрядним двонаправленим портом з вбудованими навантажувальними резисторами. Вихідні буфери цього порту забезпечують

струм до 20мА. Якщо виводи порту використовуються як входи і зовнішній сигнал встановлено в низький стан, струм буде витікати лише при підключених вбудованих навантажувальних резисторах.

Для взаємодії з портом D використовуються три реєстри, які розташовані у просторі вводу/виводу (пам'яті даних): реєстр порту даних PORTD, реєстр напрямку даних DDRD і реєстр вхідних даних PIND. Реєстр вхідних даних дозволяє лише читання, тоді як реєстри порту даних і напрямку даних забезпечують можливість як читання, так і запису.

Порт E (PE7 – PE0) є 8-розрядним двонаправленим портом з вбудованими навантажувальними резисторами. Вихідні буфери цього порту забезпечують струм до 20мА. Якщо виводи порту використовуються як входи і зовнішній сигнал встановлено в низький стан, струм, який витікає через них, буде забезпечений тільки при підключених вбудованих навантажувальних резисторах.

Для взаємодії з портом E використовуються три реєстри, розташовані у просторі вводу/виводу (пам'яті даних): реєстр порту даних PORTE, реєстр напрямку даних DDRE і реєстр вхідних даних PINE. Реєстр вхідних даних дозволяє лише читання, в той час як реєстри порту даних і напрямку даних забезпечують можливість як читання, так і запису.

Порт F (PF7 – PF0) є 8-розрядним вхідним портом. Його входи можуть використовуватися як аналогові входи для аналого-цифрового перетворювача.

Виводи порту F підключені через аналоговий мультиплексор до аналогово-цифрового перетворювача. Окрім того, виводи порту F можуть використовуватися як цифрові входи. Це означає, що користувач може одночасно використовувати деякі виводи порту F як цифрові входи і інші як аналогові входи.

Електрична принципова схема мікроконтролера ATmega169 зображена на кресленні під номером MP-151.21.0107.05.00.E3.

Вхід RESET призначений для скидання. Щоб виконати скидання, необхідно тримати низький рівень на цьому вході протягом не менше ніж 50нс.

XTAL1 і XTAL2 — входи і виходи підсилювача генератора, який формує інвертований тактовий сигнал.

TOSC1 і TOSC2 — вхід і вихід підсилювача генератора, який інвертує сигнал для таймера/лічильника.

WR і RD — сигнали, що використовуються для запуску запису і читання зовнішньої пам'яті даних.

ALE — це сигнал строба, який використовується для фіксації молодшого байта адреси зовнішньої пам'яті. Під час першого циклу звертання строб ALE активується для фіксації адреси, яка формується на виводах AD0 – AD7 в момент засувки адреси. Протягом другого циклу звертання виводи AD0 – AD7 використовуються для передачі даних.

AVCC є напругою живлення для аналого-цифрового перетворювача. Цей вивід з'єднується з Vcc через низькочастотний фільтр.

AREF — це вхід, на який подається опорна напруга для аналогово-цифрового перетворювача. Ця напруга знаходиться в діапазоні між AGND і AVCC.

AGND — цей вихід повинен бути підключений до окремої аналогової землі у випадку її наявності на платі. Якщо аналогова земля відсутня, то AGND можна з'єднати з загальною землею.

PEN — це вивід, який дозволяє програмування через послідовний інтерфейс. Якщо утримувати сигнал на цьому виводі в низькому рівні після увімкнення живлення, пристрій переходить у режим програмування через послідовний канал.

Vcc - це напруга живлення.

GND - це земля.

4 РОЗРАХУНКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ВИРОБУ

4.1 Розробка функціональної схеми системи

У цій схемі використовується принцип регулювання за відхиленням, що базується на різниці між фактичним значенням вихідної величини об'єкта і його заданим значенням [9]. Для реалізації цього принципу керування САР повинен бути замкнутим. Основною особливістю і перевагою цієї схеми є те, що САР реагує на відхилення фактичного значення регульованої величини від заданого значення незалежно від причин, що їх спричинили.

На рисунку 4.10 зображено функціональну схему системи автоматичного регулювання (САР).

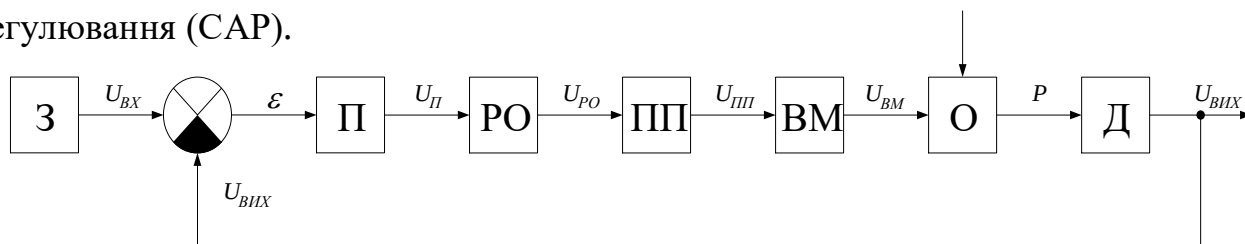


Рисунок 4.10 – Функціональна схема САР:

П – підсилювач; З – задаючий пристрій; РО – регулювальний орган (мікроконтролер АТmega169); ВМ – виконавчий механізм – регулятор потужності (РМ1); ПП – підсилювач потужності; Д – іонізуючий датчик; О – об'єкт регулювання; $U_{BИX}$ – вихідна напруга датчика; U_{BX} – задаюче діяння (напруга); $U_{BМ}$ – вихідна напруга регулятора потужності РМ1; U_{Π} – вихідна напруга підсилювача; $U_{\Pi\Pi}$ – вихідна напруга підсилювача потужності; ε – вхідна напруга; U_{PO} – вихідна напруга мікроконтролера АТmega169; P – тиск; .

Рівняння елементів системи:

- регульований орган (мікроконтролер АТmega169):

$$U_{PO} = k_{PO} \cdot U_{\Pi};$$

- підсилювач:

$$U_{\Pi} = k_{\Pi} \cdot \varepsilon;$$

- підсилювач потужності:

$$U_{\Pi\Pi} = k_{\Pi\Pi} \cdot U_{PO};$$

- елемент порівняння:

$$\varepsilon = U_{BX} - U_{BИX}.$$

- виконавчий механізм:

$$T_B \cdot \frac{dU_{BM}}{dt} + U_{BM} = k_B \cdot U_{III};$$

Вихідні дані:

$T_B = 0,015$ с; $T_D = 0,12$ с; $T_O = 0,6$ с; $k_D = 5$; $k_{PO} = 1,8$; $k_{III} = 2$; $k_B = 0,3$; $k_O = 9,5$; $k_{II} = 2$.

При створенні структурної схеми системи автоматичного регулювання використовувалися диференціальні рівняння компонентів схеми. Диференціальні рівняння цих компонентів було перетворено на їх передаточні функції.

Передаточна функція елемента визначається як відношення зображення за Лапласом вихідної величини до зображення за Лапласом вхідної величини за умови нульових початкових умов [9].

Після аналізу математичної моделі об'єкту регулювання була визначена його передаточна функція (4.8):

$$W_B(p) = \frac{k_B e^{-\tau p}}{T_B p + 1}$$

Рівняння виконавчого механізму має вигляд:

$$T_B \cdot \frac{dU_{BM}}{dt} + U_{BM} = k_B \cdot U_{III}.$$

При переході від оригіналу до зображення за Лапласом отримаємо:

$$T_B \cdot p \cdot \overline{U_{BM}} + \overline{U_{BM}} = k_B \cdot \overline{U_{III}}.$$

Передаточна функція виконавчого механізму має вигляд:

$$W_{BM}(p) = \frac{\overline{U_{BM}}}{\overline{U_{III}}} = \frac{k_B}{T_B \cdot p + 1}.$$

Рівняння іонізаційного датчика виглядає так:

$$T_D \cdot \frac{dU_{BIX}}{dt} + U_{BIX} = k_D \cdot P.$$

При переході від оригіналу до зображення за Лапласом отримаємо:

$$T_D \cdot p \cdot \overline{U_{BIX}} + \overline{U_{BIX}} = k_D \cdot \overline{P}.$$

Передаточна функція іонізаційного датчика має вигляд:

$$W_D(p) = \frac{\overline{U_{BIX}}}{\overline{P}} = \frac{k_D}{T_D \cdot p + 1}.$$

Рівняння підсилювача потужності наступне:

$$U_{III} = k_{III} \cdot U_{PO}.$$

При переході від оригіналу до зображення за Лапласом отримаємо:

$$\overline{U_{III}} = k_{III} \cdot \overline{U_{PO}}.$$

Передаточна функція підсилювача потужності має вигляд:

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

Рівняння регулювального органу наступне:

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

При переході від оригіналу до зображення за Лапласом отримаємо:

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

Передаточна функція регулювального органу має вигляд:

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

Рівняння підсилювача має вигляд:

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

При переході від оригіналу до зображення за Лапласом отримаємо:

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

Передаточна функція підсилювача має вигляд:

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

Рівняння елемента порівняння має вигляд:

$$\varepsilon = U_{BX} - U_{ВИХ}.$$

При переході від оригіналу до зображення за Лапласом отримаємо:

$$\overline{\varepsilon} = \overline{U_{BX}} - \overline{U_{ВИХ}}.$$

На рисунку 4.11 показана структурна схема системи автоматичного регулювання (САР).

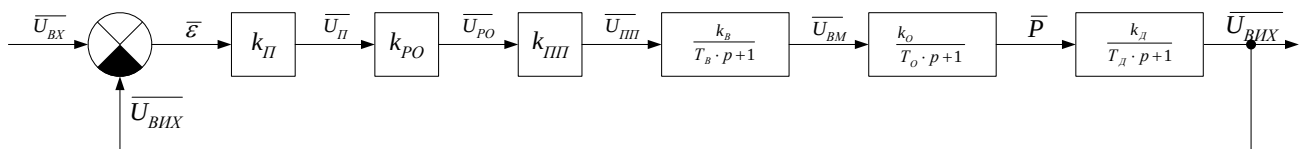


Рисунок 4.11 – Структурна схема системи автоматичного регулювання

Введемо припущення, що $\tau = 0$. Якщо елементи системи з'єднані послідовно, то передаточна функція системи є добутком передаточних функцій всіх її елементів.

$$W_p(p) = W_{\Pi}(p) \cdot W_{PO}(p) \cdot W_{III}(p) \cdot W_B(p) \cdot W_O(p) \cdot W_D(p) = \frac{k_{\Pi} \cdot k_{PO} \cdot k_{III} \cdot k_B \cdot k_O \cdot k_D}{(T_B \cdot p + 1) \cdot (T_O \cdot p + 1) \cdot (T_D \cdot p + 1)}$$

Позначимо:

$$K = k_{\Pi} \cdot k_{PO} \cdot k_{III} \cdot k_B \cdot k_O \cdot k_D.$$

Отже, передаточну функцію відкритої системи можна записати:

$$W_p(p) = \frac{K}{(T_B \cdot p + 1) \cdot (T_O \cdot p + 1) \cdot (T_D \cdot p + 1)}$$

Передаточна функція замкнутої системи при $W_{зз}(p) = 1$ має мигляд:

$$W_3(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p) \cdot W_{зз}(p)} = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{K}{(T_B \cdot p + 1) \cdot (T_O \cdot p + 1) \cdot (T_D \cdot p + 1) + K}$$

Рівняння характеристичних коренів наступне:

$$(T_B \cdot p + 1) \cdot (T_O \cdot p + 1) \cdot (T_D \cdot p + 1) + K = 0$$

Розкриємо дужки, отримаємо:

$$(T_B p \cdot T_O p + T_B p + T_O p + 1) \cdot (T_D p + 1) + K = 0$$

$$T_B p \cdot T_O p \cdot T_D p + T_B p \cdot T_O p + T_B p \cdot T_D p + T_B p + T_O p \cdot T_D p + T_O p + T_D p + 1 + K = 0$$

$$(T_B \cdot T_O \cdot T_D) \cdot p^3 + (T_B \cdot T_O + T_B \cdot T_D + T_O \cdot T_D) \cdot p^2 + (T_B + T_O + T_D) \cdot p + 1 + K = 0$$

Амплітудно-фазова характеристика (АФЧХ) представляє собою криву, яка описує положення кінця вектора передаткової функції $W(j\omega)$ на комплексній площині при зміні частоти від 0 до нескінченності [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 $p(\omega) = j \cdot \omega$;
- ввести вираз передаточної функції;
- виділити дійсну і уявну частини передаточної функції, підставивши замість оператора Лапласа p вираз $j \cdot \omega$.

$$\begin{aligned}
W_p(j\omega) &= \frac{K}{(T_B \cdot j\omega + 1) \cdot (T_O \cdot j\omega + 1) \cdot (T_D \cdot j\omega + 1)} = \\
&= \frac{K}{-T_B \cdot T_O \cdot T_D \cdot j\omega^3 - (T_B \cdot T_O + T_B \cdot T_D + T_O \cdot T_D) \cdot \omega^2 + (T_B + T_O + T_D) \cdot j\omega + 1} = \\
&= \frac{K}{(T_B + T_O + T_D - T_B \cdot T_O \cdot T_D \cdot \omega^2) \cdot j\omega - ((T_B \cdot T_O + T_B \cdot T_D + T_O \cdot T_D) \cdot \omega^2 - 1)} = \\
&= -\frac{K \cdot [(T_B + T_O + T_D - T_B \cdot T_O \cdot T_D \cdot \omega^2) \cdot j\omega + ((T_B \cdot T_O + T_B \cdot T_D + T_O \cdot T_D) \cdot \omega^2 - 1)]}{(T_B + T_O + T_D - T_B \cdot T_O \cdot T_D \cdot \omega^2)^2 \cdot \omega^2 + ((T_B \cdot T_O + T_B \cdot T_D + T_O \cdot T_D) \cdot \omega^2 - 1)^2}
\end{aligned}$$

Для побудови амплітудно-фазової характеристики використовуються значення функцій $P(\omega)$ та $Q(\omega)$.

АФЧХ відкритої системи показана на рисунку 4.12.

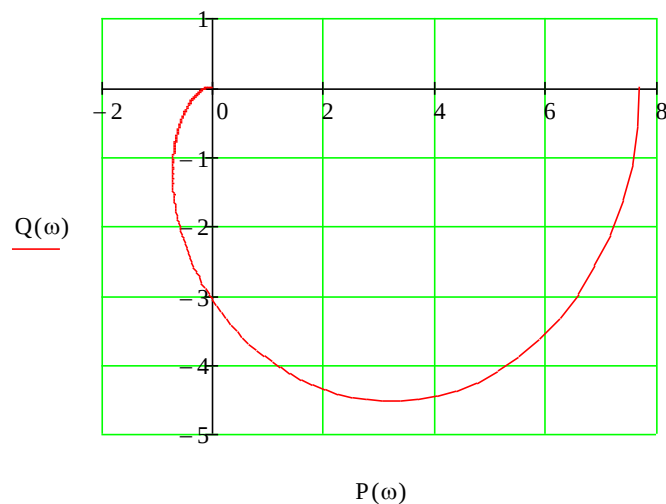


Рисунок 4.12 – АФЧХ розімкнутої системи

Побудову ЛАЧХ починають з області низьких частот [9]. Оскільки в розглядуваній системі немає інтегруючої ланки, побудову починають з нахилом 0 дБ/дек. Ця пряма має ординату, рівну $20 \cdot \lg K = 22,185$ дБ. В області середніх і високих частот нахил змінюється порівняно з попереднім значенням на -20 дБ/дек.

Спрягаючі частоти для сталих часу динамічних ланок визначаються наступним чином:

$$\omega_B = \frac{1}{T_B} = \frac{1}{0,03} = 33,33 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_D = \frac{1}{T_D} = \frac{1}{0,02} = 50 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_o = \frac{1}{T_o} = \frac{1}{0,33} = 3,03 \text{ с}^{-1};$$

Частоти ω_B , ω_D , ω_O є частотами аперіодичних ланок.

ЛАЧХ відкритої системи показана на рисунку 4.13.

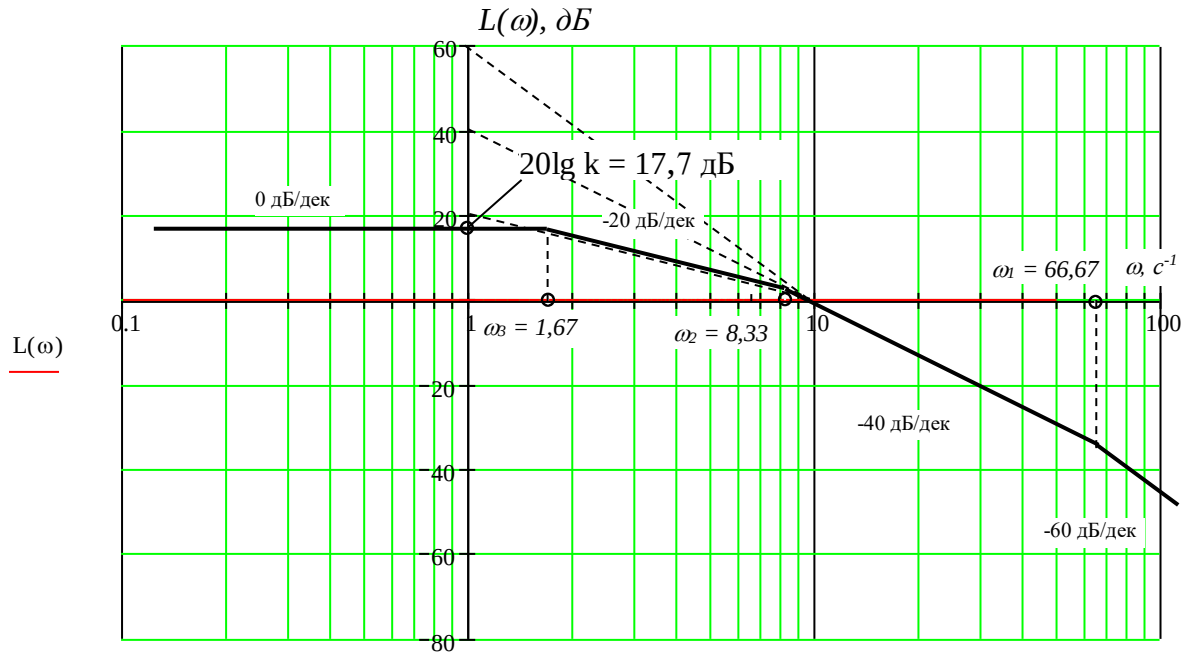


Рисунок 4.13 – ЛАЧХ розімкнутої системи $L(\omega)$

ЛФЧХ розімкнутої системи формується шляхом сумування значень ординат фазових характеристик динамічних ланок [10]:

$$\varphi(\omega) = (-\arctg(\omega \cdot T_B) - \arctg(\omega \cdot T_O) - \arctg(\omega \cdot T_D)) \cdot \frac{180}{\pi}$$

На рисунку 4.14 показана фазово-частотна характеристика розімкнутої системи.

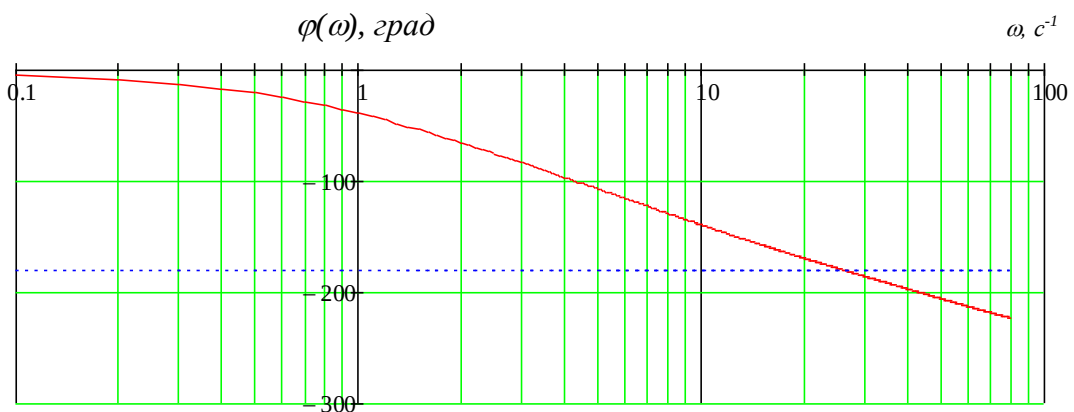


Рисунок 4.14 – ЛФЧХ розімкнутої системи $\varphi(\omega)$

4.2 Дослідження системи на стійкість

Аналіз стійкості системи та визначення запасів стійкості за модулем і фазою проводиться за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова.

Цей критерій дозволяє оцінювати стійкість замкнутої системи на основі АФЧХ стійкої розімкнутої системи [9]. Для того, щоб замкнута система автоматичного регулювання була стійкою, необхідно і достатньо, щоб АФЧХ розімкнутої системи не містила на комплексній площині точку з координатами $(-1;j\cdot 0)$.

Дійсний запас стійкості по модулю визначається як відстань між точкою з координатами $(-1;j\cdot 0)$ і точкою перетину характеристики $W_p(j\omega)$ з горизонтальною віссю.

Запас стійкості по фазі визначається як різниця між кутом π і максимально допустимим кутом обертання вектора, при якому зберігається запас стійкості по модулю. Це положення вектора в точці перетину характеристики $W_p(j\omega)$ з одиничним колом. На рисунку 4.15 показано визначення запасів стійкості за модулем і фазою з використанням частотного критерію Найквіста-Михайлова.

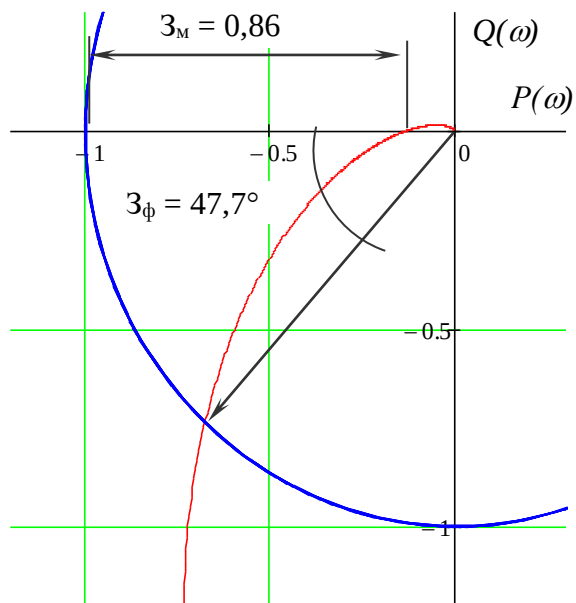


Рисунок 4.15 – Визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова

За цим критерієм система виявляється стійкою. Запас стійкості по модулю складає $3_m = 0,86$; за фазою – $3_\phi = 47,7^\circ$.

Аналіз стійкості системи та визначення області стійкості за допомогою методу D-розбиття виконується в площині одного параметра.

У комплексній площині параметра k_{Π} встановлюється межа стійкості. Коефіцієнт k_{Π} визначається з характеристичного рівняння:

$$(T_B \cdot p + 1) \cdot (T_O \cdot p + 1) \cdot (T_D \cdot p + 1) + k_{\Pi} \cdot k_{PO} \cdot k_{\Pi\Pi} \cdot k_B \cdot k_O \cdot k_D = 0$$

$$K_{\Pi}(p) = - \frac{(T_B \cdot p + 1) \cdot (T_O \cdot p + 1) \cdot (T_D \cdot p + 1)}{k_{PO} \cdot k_{\Pi\Pi} \cdot k_B \cdot k_O \cdot k_D}$$

Необхідно розділити вираз на його дійсну та уявну частини, підставивши замість оператора Лапласа p вираз $j \cdot \omega$:

$$K_{\Pi}(\omega) = - \frac{(T_B \cdot j\omega + 1) \cdot (T_O \cdot j\omega + 1) \cdot (T_D \cdot j\omega + 1)}{k_{PO} \cdot k_{\Pi\Pi} \cdot k_B \cdot k_O \cdot k_D} =$$

$$= - \frac{(T_B + T_O + T_D - T_B \cdot T_O \cdot T_D \cdot \omega^2) \cdot j\omega - ((T_B \cdot T_O + T_B \cdot T_D + T_O \cdot T_D) \cdot \omega^2 - 1)}{k_{PO} \cdot k_{\Pi\Pi} \cdot k_B \cdot k_O \cdot k_D}$$

Для створення D-розбиття використовуються значення $P(\omega)$ та $Q(\omega)$.

На рисунку 4.16 показане D-розбиття в площині параметра k_{Π} .

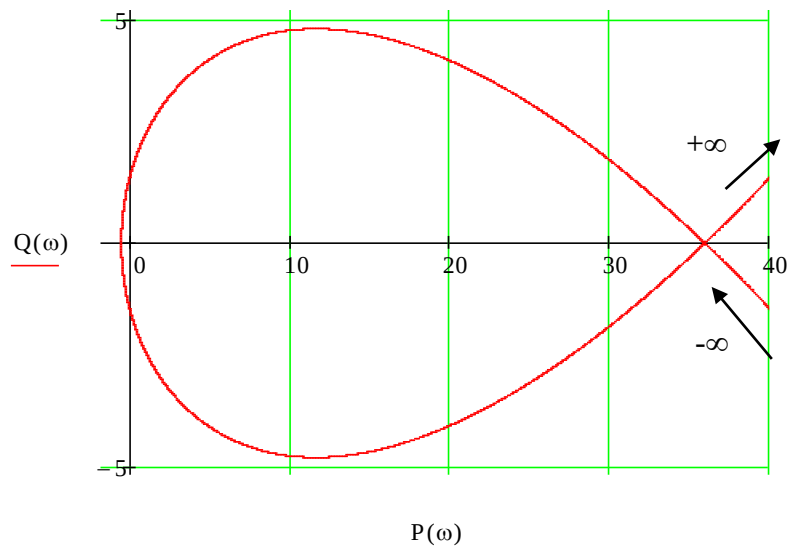


Рисунок 4.16 – D-розбиття в площині параметру k_{Π}

Ділянка стійкості знаходиться зліва від кривої D-розбиття при просуванні по ній від $-\infty$ до $+\infty$ [10]. Критичне значення параметру k_{Π} становить $k_{\Pi\text{кр}} = 35,9$. Значення $k_{\Pi} = 5$, яке вказане у завданні, належить до зони стійкості.

4.3 Оцінка якості регулювання замкнутої системи по логарифмічним частотним характеристикам розімкнутої системи

Оцінка якості регулювання замкнутої системи автоматичного регулювання здійснюється шляхом визначення запасу стійкості по модулю і по фазі, що представлено на рисунку 4.17 (креслення 06.02).

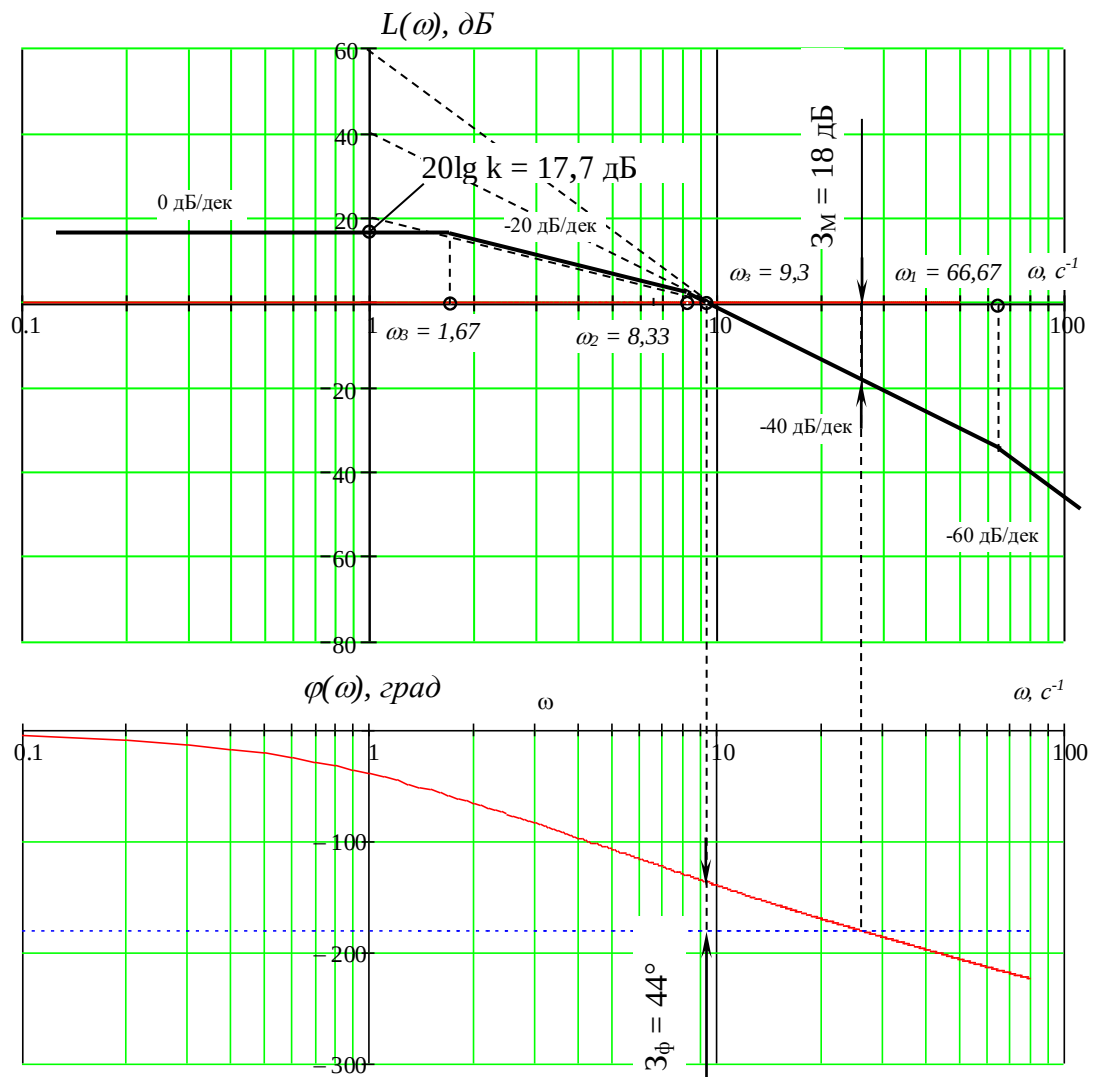


Рисунок 4.17 – Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи

На основі рисунку 4.17 визначаються запаси стійкості системи. Запас стійкості по амплітуді $Z_A = 18 \text{ dB}$, по фазі – $Z_\phi = 44^\circ$.

Перехідний процес є функцією, що відображає, як змінюється вихідна величина відносно стрибкоподібної зміни вхідної величини на одиницю за умови нульових початкових умов. Перехідний процес системи автоматичного регулювання (рисунок 4.18) описується вказаною залежністю [10]:

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

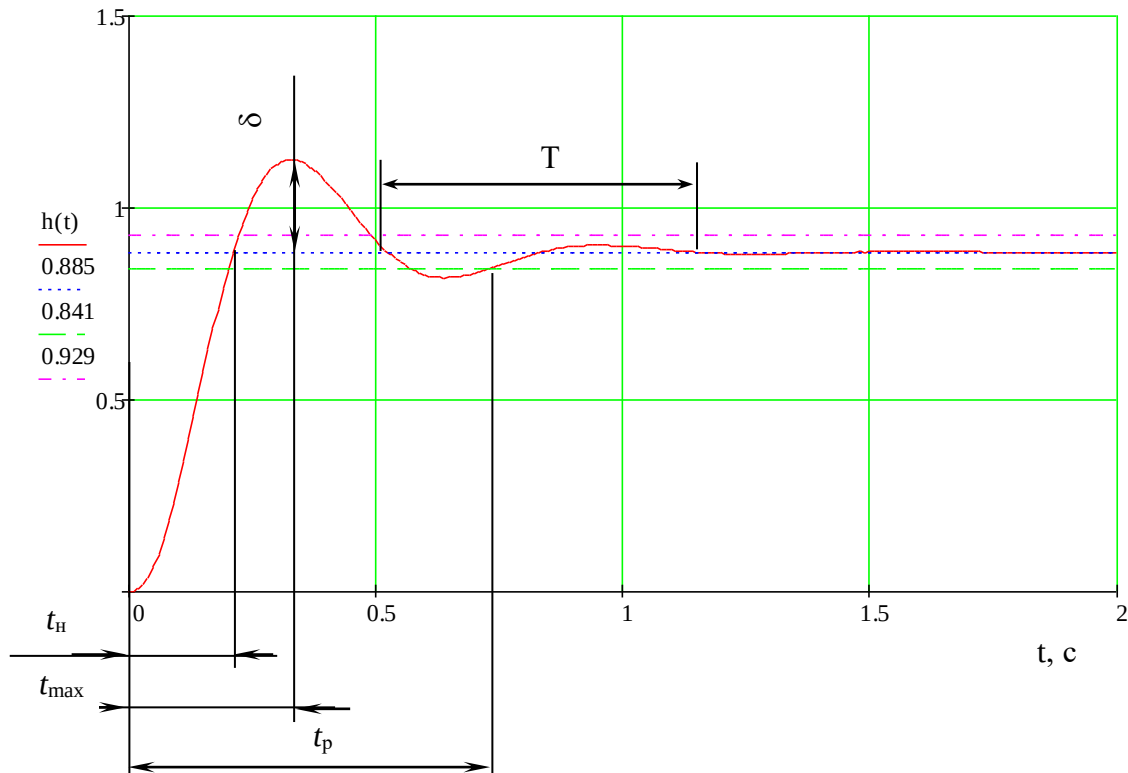


Рисунок 4.18 – Графік перехідного процесу вихідної системи

На рисунку 4.18 показаний аперіодичний перехідний процес з перерегулюванням. Можна оцінити такі показники якості системи автоматичного регулювання:

- час наростання перехідного процесу $t_H = 0,06$ с;
- час регулювання $t_p \approx 0,74$ с (задовольняє вимогам, що висуваються для розглядуваних технологічних процесів);
- перерегулювання $\delta = 14$, %;
- час досягнення першого максимуму $t_{max1} = 0,33$ с;
- декремент затухання перехідного процесу $d = 6,99$.

5 ОПИС РОБІТ, ПОВ'ЯЗАНИХ З ЕКСПЛУАТАЦІЄЮ УСТАНОВКИ СИНТЕЗУ ТОНКОПЛІВКОВИХ СТРУКТУР

Номінальні значення кліматичних параметрів під час експлуатації установки мають відповідати вимогам ГОСТ 15.150 – 76, а саме:

- відносна вологість повітря має бути від 45% до 80%;
- температура навколишнього середовища повинна знаходитись у межах від 15 до 35 градусів Цельсія;
- атмосферний тиск повинен бути в діапазоні від 84,0 до 106,7 кПа.

Поблизу установки має бути відсутність джерел вібрації і значного пилоутворення. Концентрація пилу в повітрі робочої зони не повинна перевищувати 6мг/м^3 . Для забезпечення нормальної експлуатації установки необхідно регулярно проводити профілактичні заходи щодо очищення пристроїв програмного управління і механізмів вакуумної системи від пилу. Частота профілактичних робіт повинна визначатися з урахуванням рівня запиленості повітря робочої зони і не може бути рідше одного разу на місяць [11].

Висока вологість повітря, пил та бруд знижують ізоляційний опір і можуть порушити нормальну роботу приладів. Присутність агресивних газів у повітрі спричиняє окислення контактних поверхонь. Сильні магнітні поля у місцях розташування датчиків та вторинних пристроїв, а також у місцях прокладки з'єднувальних ліній від датчика до вторинного приладу, можуть значно ускладнити їх роботу.

У разі підвищеної вологості та високого рівня пилу в приміщенні необхідно ретельно перевірити та підігнати ущільнювальні прокладки та заглушки.

Також необхідно приділити увагу заземленню приладів, оскільки неправильне заземлення може призвести до додаткових помилок в показаннях вторинних приладів. Не рекомендується використовувати водопровідні або опалювальні системи як заземлення. Розрахунок захисного заземлення наведено в розділі охорони праці.

Основна лінія живлення, яка подає енергію на силові електричні пристрої, піддається значним коливанням напруги внаслідок змін навантаження. Крім того, у такій лінії можуть виникати перешкоди через струми високої частоти, що виникають при дугових розрядах в силових агрегатах. Тому для живлення пристроїв рекомендується використовувати спеціальні КВП-лінії. В певних випадках підключення пристроїв до мережі здійснюється через розподільчі трансформатори. Один кінець вторинної обмотки розподільчого трансформатора слід заземлити для зменшення навантажень промислової частоти на вихідні ланцюги електронних пристроїв, особливо важливо для пристроїв з високоомним входом та для приладів з вимірювальними схемами, які живляться від мережних стабілізованих джерел. Розподільчий трансформатор має мати достатню потужність, оскільки перевантаження може спричинити зниження напруги на вторинній обмотці та спотворення форми струму. Підключення розподільчого трансформатора до мережі повинно виконуватись через двополюсний рубильник і плавкі запобіжники. Не рекомендується використання автотрансформаторів для підключення приладів до мережі, оскільки вони не забезпечують достатнього рівня захисту від перешкод. В разі використання понижуючого автотрансформатора обривання його обмотки може призвести до подачі повної напруги мережі на прилад.

Напруга до установки подається за допомогою дроту з прорезиненою водонепроникною ізоляцією, діаметр якого повинен бути не менше 1мм^2 . Щоб запобігти механічному пошкодженню дротів, рекомендується прокладати їх в гнучких металевих шлангах або трубах, які повинні бути надійно заземлені. Вводи дротів до шафи герметизуються спеціальними ущільнюючими втулками. Варто уникати нарощування дротів, а в разі необхідності нарощування, місця стиків обов'язково пропаюються. Після завершення прокладки дротів необхідно перевірити опір ізоляції щодо землі, який повинен бути не менше 10 МОм. Вимоги до дротів, що з'єднують датчики з вторинним приладом, залежать від типу датчиків і приладу. Основною вимогою до більшості приладів є прокладення

дротів від датчика до приладу в сталевих захисних трубах, окремо від дротів мережі.

При проведенні технічних оглядів та профілактичних робіт, які включають зняття кожухів і кришок, за якими розташовані рухомі елементи, установку слід відключити від мережі за допомогою перемикача вводу. Не допускається працювати на обладнанні з відкритими клемними коробками електроапаратури.

Установку слід захищати від прямого впливу теплового випромінювання. У приміщеннях з установленою технікою не дозволяється використовувати зварювальні апарати та інші джерела сильних електромагнітних полів.

Зварювальні апарати і механізми з електродвигунами, що мають великі пускові потужності, не слід підключати до електромережі, яка живить установки для синтезу органічних тонкоплівкових структур.

Установку доставляють до місця призначення упакованою в ящик або без упаковки, з частковим захистом окремих вразливих деталей і вузлів вологозахисним матеріалом.

При транспортуванні автотранспортом з установки відсікаються і упаковуються окремо такі компоненти: вакуумна система, багатозонна піч, ЕОМ і підключаємі датчики. Установка у транспортній упаковці може зберігатися у приміщенні без опалення. Короткочасне зберігання установки у відкритому транспортному тарі допускається, але довготривале зберігання на відкритій площі заборонено.

Усі компоненти системи мають зберігатись в сухому закритому приміщенні при температурі від 5 до 40 градусів Цельсія і відносній вологості не більше 80%. У приміщенні не повинно бути пилу, газів і парів, які можуть призводити до забруднення і корозії під час зберігання. Зберігання установки понад встановлений строк без переконсервування забороняється.

При транспортуванні установки без упаковки гарантійний строк без переконсервування не перевищує п'ять днів, виключно на час транспортування. Після переконсервування установку необхідно зберігати в сухому закритому приміщенні.

При відкриванні упаковки необхідно уникати пошкодження деталей установки розпакувальним інструментом. Також важливо перевірити комплектність установки та наявність всіх постачальних елементів згідно з пакувальним листом.

При транспортуванні розпакованої установки важливо уникати пошкоджень покриття, захищаючи її від зіткнень з установкою-стопором та забезпечуючи захист окремих виступаючих частин. Транспортування до місця встановлення установки повинно бути здійснене таким чином, щоб уникнути сильних поштовхів.

Для забезпечення стабільності та точності роботи, установку слід встановлювати на рівний фундамент.

Установка на фундаменті фіксується за допомогою чотирьох регулюючих гвинтів або сталевих клинів. Гвинти для фундаменту та кришка для покриття виготовляються користувачем установки відповідно до монтажної схеми.

Точність функціонування установки залежить від коректності її монтажу. Точність монтажу в поздовжньому та поперечному напрямках визначається рівнем.

Відхилення не має перевищувати 0,04 мм на 1000 мм у обох напрямках.

Перед підключенням установки до електромережі перевірте, щоб напруга мережі відповідала вимогам електрообладнання установки. Переконайтеся, що всі перемикачі з фіксованим положенням "0" встановлені у це положення до подачі напруги на мережу.

Персонал, який має право обслуговувати установку для синтезу органічних тонкоплівкових структур, повинен бути атестований комісією на право проведення робіт на обладнанні з напругою до 1000 В та мати кваліфікацію не нижче II групи згідно з Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПІТ РМ-016-2001, РД 153-34.0-03.150-00). Цей персонал також повинен пройти інструктаж з безпечної експлуатації системи і мати дозвіл на роботу з вакуумним обладнанням.

Перевірку блоків потрібно проводити перед монтажем, під час профілактичного ремонту і при виявленні пошкоджень під час експлуатації приладу. Перевірці підлягають основна похибка показань вторинного приладу, основна похибка запису, варіація та поріг чутливості приладу, робота механізму установки робочого струму, сигналізація "обривання в ланцюжку приладу", час проходження стрілкою всієї шкали, рівень перешкод на вході електронного підсилювача, і ступінь нагріву деталей під час тривалої роботи приладу. Перевірка приладів має проводитись за таких умов: температура навколишнього повітря $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$, напруга живлення не повинна відрізнятись від номінальної більш ніж на $\pm 3\%$, частота живлення $50 \pm 0,5\text{Гц}$, і відсутність зовнішніх магнітних полів.

При належних умовах експлуатації автоматичні електронні прилади можуть безперебійно функціонувати протягом значного періоду. Під час експлуатації необхідно забезпечувати сталі умови, що відповідають нормальному режиму роботи приладу на весь термін його служби, уникати перевищення допустимих меж напруги живлення мережі.

При перевищенні температури понад 35°C важливо підсилити вентиляцію приміщення. В холодний період необхідно враховувати опалення приміщення. В приміщеннях з підвищеною вологістю і запиленістю важливо регулярно перевіряти стан ущільнювачів. При використанні хімічних сушників слід відслідковувати їх ефективність.

Під час експлуатації вторинних вимірювальних приладів важливо стежити за тим, як стрілка приладу реагує на коливання при наближенні до встановленого показника. Крім того, регулярно необхідно проводити огляд та планово-попереджувальний ремонт приладів. Під час огляду блоки відсікаються від установки й відправляються на майстерню, де вони очищаються від пилу та бруду за допомогою ганчірки та продування повітрям. Також проводиться інспекція всієї електропроводки для перевірки надійності затискувачів.

ВИСНОВКИ

Випускна кваліфікаційна робота спрямована на дослідження можливостей підвищення якості роботи системи автоматизації у технологічному процесі нанесення органічних плівок.

У роботі розглянуті принципи функціонування електронно-променевих та електродугових випаровувачів, виявлені їх основні плюси та мінуси. З аналізу стало відомо, що найбільш ефективність проявляють електронно-променеві випаровувачі.

Вивчено структуру та принцип роботи вакуумної системи, яка включає систему регулювання тиску з такими ключовими компонентами, як форвакуумний пластинчато-роторний насос 2НВР-5ДМ та дифузійний паромасляний насос НВДМ-160. Для забезпечення необхідних хімічних та фізичних властивостей органічних плівок потрібно підтримувати стабільний високий вакуум на рівні приблизно 10^{-7} Па. Для цього використовується контролер регулювання тиску в вакуумній камері, що базується на мікропроцесорі Atmega169.

Була розроблена основна електрична схема мікропроцесорної системи, яка включає такі ключові компоненти: оперативно-запам'ятовуючий пристрій K155PY7, порт вводу-виводу КР580ВВ79, дешифратор K155ИД4, буферний регістр КР580ИР82/83 та інші елементи. Сигнал з іонізаційного манометричного перетворювача ПМИ-12-8 служить входним сигналом для контролера. Відповідно до значення тиску, контролер виконує регулювання роботи вакуумних насосів: відкриває або закриває клапан, змінює потужність нагрівального елемента.

Розроблена структурна та функціональна схеми системи автоматичного регулювання тиску в камері. Проведена оцінка якості регулювання включала аналіз перехідного процесу, в результаті чого були отримані наступні показники якості: час наростання перехідного процесу $t_H = 0,06$ с; час регулювання $t_p \approx 0,74$ с (задовольняє вимогам, що висуваються для розглядуваних технологічних процесів); перерегулювання $\delta = 14$, %; час досягнення першого максимуму $t_{max1} = 0,33$ с; декремент затухання $d = 6,99$.. Запас стійкості системи складає: запас стійкості по фазі $z_\phi \approx 44^\circ$; запас стійкості по амплітуді $z_m \approx 18$ дБ.

Перелік скорочень, символів та спеціальних термінів

- AVR – сімейство восьмибітних мікроконтролерів Atmel;
- CPU(céntral prócessing únit) – центральний процесор;
- RISC (Reduced Instruction Set Computing) — обчислення із скороченим набором команд;
- CMOS (Complementary-symmetry/metal-oxide semiconductor) – комплементарна логіка на транзисторах метал-оксид-напівпровідник;
- RTC (Real Time Clock) – Контролер реального часу;
- EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) – електрично стираємий перепрограмуємий постійний запам'ятовуючий пристрій;
- SPI (Serial Peripheral Interface) – послідовний периферійний інтерфейс;
- UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) – Універсальний асинхронний приймач-передавач;
- SRAM (Static Random Access Memory) – статична оперативна пам'ять з довільним доступом
- АЛП – арифметико-логічний пристрій;
- АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;
- АФЧХ – амплітудно-фазова частотна характеристика;
- ВАХ – вольт-амперна характеристика;
- КВП – Конвертори вторинного перетворення;
- ВУП – вакуумний універсальний пост;
- ІМС – інтегральна мікросхема;
- ЦАП – цифрово-аналоговий перетворювач;

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бондаренко Ю.Н. Методичні вказівки до економічного обґрунтування дипломних проєктів. – Кіровоград: КНТУ, 2005. – 20с
2. Жидецький В. Ц., Джигерей В. С., Мельников О. В., Основи охорони праці. – Львів: Афіша, 2000. – 352с.
3. Кондратець В.О. Теорія і технічні засоби систем: Підручник. – К.: Вища шк., 1993. – 319с.
4. Кондратець В.О. Автоматика та автоматизація виробництва сільськогосподарських машин. ч.1. - Київ: “Вища школа”, 1993. – 320 с.
5. Зеркалов Д. В. Енергозбереження в Україні. [Електронний ресурс] Монографія. – К.: Основа, 2012. – 582 с.
6. Лобода В.Б. Фізичні основи вакуумної техніки: навч. посіб. Суми: ВТД «Університетська книга», 20012. – Ч.1. 296 с.
7. Арендаренко В.М., Іванов О.М. Вакуумна техніка та технології. Навчальний посібник. Полтава, 2019. 69.с.
8. Чумаченко І.В., Кошовий М.Д., Лопатин В.В. Мікроконтролерні прилади: структура і використання: Навчальний посібник. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «ХАІ», 2001. –277с.
9. Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю., Севастьянов В.М. Основи мікропроцесорної техніки. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2006. - 226 с.
10. Програмування мікроконтролерів AVR : [навчальний посібник] / С. М. Цирульник, О. Д. Азаров, Л. В. Крупельницький, Т. І. Трояновська. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 111 с.
11. Справочник по наладке автоматических устройств контроля и регулирования. – Киев: “Наукова думка”, 1981. – 940 с.