Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет автоматики та енергетики

Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

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

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за ступенем вищої освіти «Магістр»

на тему:

«Автоматизація процесу регулювання тиску в вакуумній камері електронно-променевого випаровувача»
«Automation of the process of pressure regulation in vacuum chamber of the electron beam evaporator»

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

Керівник роботи
проф, д-р.техн.наук
_____В.О. Кондратець
«_____»_____2021 р.

Рецензент _____
_____
«_____»_____2021 р.

м. Кропивницький

ЗМІСТ

Вступ 3

1 Призначення та область застосування установки електронно-променевого напилювання 7

1.1 Вакуумне напилювання 7

1.2 Установка електронно-променевого напилювання 12

2 Огляд існуючих методів нанесення органічних плівок 15

2.1 Основні принципи роботи електронно-променевих і електродугових випаровувачів 15

2.2 Методи одержання іонних покриттів 18

3 Опис та обґрунтування проектних рішень та їх конструкцій 27

3.1 Опис установки синтезу органічних тонкоплівкових структур 27

3.1.1 Конструкція установки та розробка методів осадження плівок 30

3.2 Класифікація та основні параметри вакуумних насосів 32

3.2.1 Форвакуумний пластинчато-роторний насос 2НВР-5ДМ 36

3.2.2 Дифузійний насос НВДМ-160 39

3.3 Електронні іонізаційні вакуумметри 48

3.3.1 Електронний іонізаційний перетворювач ПМИ-12-8 51

3.4 Мікроконтролер ATmega169 52

4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність виробу 57

4.1 Кореляційно-регресійний аналіз 57

4.2 Визначення передаточної функції об’єкта регулювання 63

4.2.1 Побудова математичної моделі ланки першого порядку геометричним методом 65

4.2.2 Побудова моделі ланки другого порядку методом площ 66
4.3 Вибір найкращої апроксимуючої моделі 68
4.4 Дослідження системи автоматичного регулювання 69
4.5 Дослідження системи на стійкість 76
4.6 Оцінка якості регулювання замкнутої системи автоматичного регулювання по логарифмічним частотним характеристкам розімкнутої системи 79
5 Опис організації робіт, що пов’язані із застосуванням установки синтезу органічних тонкоплівкових структур 80
Висновки 86
Перелік скорочень, символів та спеціальних термінів 88
Список літератури 89
Додатки 91
Додаток А Охорона праці 91
Додаток Б Очікувані техніко-економічні показники 109

АНОТАЦІЯ

В даній випускній кваліфікаційній роботі досліджується можливість покращення якості роботи засобів автоматизації в технологічному процесі нанесення органічних плівок.

Охарактеризовані принципи роботи електронно-променевих і електродугових випаровувачів, визначено їх головні недоліки і переваги. З аналізу визначено, що найбільш ефективними є електронно-променеві випаровувачі.

Розглянуто будову і принцип дії вакуумної системи, система регулювання тиску. Основними складовими якої є форвакуумний пластинчато-роторний насос 2НВР-5ДМ та дифузійний паромасляний насос НВДМ-160.

Для забезпечення необхідних хімічних та фізичних властивостей органічних плівок необхідно підтримувати постійний надвисокий вакуум порядку 10^{-7}Па. Для цього запропоновано впровадити контролер регулювання тиску в вакуумній камері на базі процесора Atmega169.

Була розроблена електрична принципова схема мікропроцесорної системи. У склад якої входять такі основні елементи: оперативно-запам’ятовуючий пристрій К155РУ7, порт вводу виводу КР580ВВ79, дешифратор К155ИД4, буферний регістр КР580ИР82/83 та інші.

Вхідним сигналом на контролер є сигнал з іонізаційного манометричного перетворювача ПМИ-12-8. І в залежності від значення тиску, контролер регулює роботу вакуумних насосів (відкриває/закриває клапан; збільшує/зменшує потужність нагрівального елементу).

Проведено кореляційно-регресивний аналіз статистичних даних. Знайдено функціональний зв’язок між вихідним сигналом датчика та потужністю нагрівального елементу насосу; знайдене рівняння прямої регресії та коефіцієнт кореляції. Розроблена структурна та функціональна схеми САР тиску в камері. Виконана оцінка якості регулювання.

Ключові слова: органічні плівки, випаровувач, вакуумна система,

регулювання тиску.

THE ANNOTATION

In this final qualifying work the possibility of improving the quality of automation equipment in the technological process of applying organic films is investigated.

The characterized principles of work of electron beam and electroarc evaporators, are determined their main lacks and advantages. From the analysis it is determined, that the most effective are electron beam evaporators.

The structure and principle of action of vacuum system - system of regulation of pressure is considered. The basic compound which is forvacuum the pump 2НВР-5ДМ and diffusion oil pump НВДМ-160.

For maintenance necessary chemical and physical properties organic it is necessary to support constant ultrahigh vacuum about 10^{-7}Pa. For this purpose it is offered to introduce the controller of regulation of pressure in the vacuum chamber on the basis of processor Atmega169.

There was a developed electric basic circuit of microprocessor system. Which structure includes such basic elements: operative memory К155РУ7, port of input of conclusion КР580ВВ79, decoder К155ИД4, buffer register КР580ИР82/83 and other.

The entrance signal on the controller is a signal from ionization manometrical converter ПМИ-12-8. And depending on value of pressure, the controller adjusts work of vacuum pumps (opens/closes the valve; increases/reduces capacity of a heating element).

The correlation-regressive analysis of the statistical data is carried out. Functional communication between an initial signal of the gauge and capacity of a heating element of the pump is found; the equation of direct regress and factor of correlation is found. Developed structural and functional circuits of pressure in the chamber. The executed estimation of quality of regulation.

Key words: organic baths, evaporator, vacuum system, vise regulation.

ВСТУП

Автоматизація технологічних процесів є вирішальним чинником в підвищенні продуктивності праці, а також поліпшення якісних і техніко-економічних показників.

Використовувані технічні засоби автоматизації морально і технічно застаріли і не можуть забезпечити необхідний рівень управління процесом, тому основною метою створення автоматизованих систем управління є підвищення технологічних і техніко-економічних показників виробництва, при цьому система повинна забезпечувати необхідну якість продукції, що випускається.

Ефективне використання енергоресурсів – додаткова можливість істотно зменшити собівартість вироблюваної продукції. Сучасна автоматизована система управління повинна підтримувати не лише заданий режим, але і максимально ефективно використовувати можливості виконавчих систем.

Нині ведеться активна модернізація об'єктів управління, пов'язана з підвищенням кількості виконавчих систем. І чим більше виконавчих систем має об'єкт, тим важливіше вибір критерію, що визначає стратегію підтримки певного параметра.

Досвід впровадження автоматизованих систем управління показує, що на етапі проектування системи досить складно вибрати єдиний критерій управління. Тому в системі управління повинна існувати можливість оперативно задати критерій під час експлуатації, причому методи його завдання повинні в наочній формі відбивати агрономічні, економічні і технічні вимоги, що пред'являються до системи. Таким чином, сучасна система управління повинна дозволяти задати не лише певний критерій управління, але і будь-який інший, що виникає в процесі виробництва, надаючи технологові широкі можливості у виборі методу підтримки заданого ходу технологічного процесу.

Експериментальні дослідження випару й конденсації, поверхневих явищ, деяких теплових процесів, низьких температур, ядерних і термоядерних реакцій здійснюються у вакуумних установках. Основний інструмент сучасної ядерної фізики – прискорювач заряджених часток – немислимий без вакууму. Вакуумні системи застосовуються в хімії для вивчення властивостей чистих речовин, вивчення складу й поділу компонентів сумішей, швидкостей хімічних реакцій.

У металургії плавка й переплав металів у вакуумі звільняє їх від розчинених газів, завдяки чому вони здобувають високу механічну міцність, пластичність і в'язкість. Плавкою у вакуумі одержують безуглеродисті сорти заліза для електродвигунів, високоелектропровідну мідь, магній, кальцій, тантал, платину, титан, цирконій, берилій, рідкі метали і їхні сплави. У виробництві високоякісних сталей широко застосовується вакуумування. Спікання у вакуумі порошків тугоплавких металів, таких, як вольфрам і молібден, є одним з основних технологічних процесів порошкової металургії. Надчисті речовини, напівпровідники, діелектрики виготовляються у вакуумних кристалізаційних установках. Сплави з будь-яким співвідношенням компонентів можуть бути отримані методами вакуумної молекулярної епітаксії. Штучні кристали алмаза, рубіна, сапфіра одержують у вакуумних установках. Дифузійне зварювання у вакуумі дозволяють одержувати нероз'ємні герметичні з'єднання матеріалів із різними температурами плавлення. Таким способом з'єднують кераміку з металом, сталь із алюмінієм і т.д. Високоякісне з'єднання матеріалів з однорідними властивостями забезпечує електронно-променеве зварювання у вакуумі. У машинобудуванні вакуум застосовується при дослідженнях процесів схоплювання матеріалів і сухого тертя, для нанесення зміцнюючих покриттів на різальний інструмент і зносостійкі покриття на деталі машин, захоплення й транспортування деталей в автоматах й автоматичних лініях.

Хімічна промисловість застосовує вакуумні сушильні апарати при випуску синтетичних волокон, поліамідів, амінопластів, поліетилену, органічних розчинників. Вакуум-фільтри використаються при виробництві целюлози, паперу, мастил. У виробництві барвників і добрив застосовуються кристалізаційні вакуумні апарати.

В електротехнічній промисловості вакуумне просочення як самий економічний метод широко поширений у виробництві трансформаторів, електродвигунів, конденсаторів і кабелів. Підвищуються термін служби й надійність при роботі у вакуумі перемикаючих електричних апаратів.

У харчовій промисловості для тривалого зберігання й консервування харчових продуктів використають вакуумне сушіння. Розфасовка швидкопсувних продуктів, здійснювана у вакуумі, подовжує строки зберігання фруктів й овочів. Вакуумне випарювання застосовується при виробництві цукру, опрісненні морської води, солеварінні. У сільському господарстві широко поширені вакуумні доїльні апарати. У побуті пилосос став нашим незамінним помічником.

На транспорті вакуум використається для подачі палива в карбюраторах, у вакуумних підсилювачах гальмових систем автомобілів. Імітація космічного простору в умовах земної атмосфери необхідна для випробування штучних супутників і ракет.

У медицині вакуум застосовується для збереження гормонів, лікувальних сироваток, вітамінів, при одержанні антибіотиків, анатомічних і бактеріологічних препаратів.

Оптична промисловість при виробництві оптичних і побутових дзеркал перейшла з хімічного сріблення на вакуумне алюмінування. Прояснена оптика, захисні шари й інтерференційні фільтри одержують напилюванням тонких шарів у вакуумі.

Технічне застосування вакууму безупинно розширюється, але з кінця минулого століття й дотепер найбільш важливим його застосуванням

залишається електронна техніка. В електровакуумних приладах вакуум є конструктивним елементом й обов'язковою умовою їхнього функціонування протягом усього терміну служби. Низький і середній вакуум використається в освітлювальних приладах і газорозрядних пристроях. Високий вакуум – у приймально-підсилювальних і генераторних лампах. Найбільш високі вимоги до вакууму пред'являються при виробництві електронно-променевих трубок і надвисокочастотних приладів. Для роботи напівпровідникового приладу вакуум не потрібний, але в процесі його виготовлення широко використається вакуумна технологія.

Особливо широко вакуумна техніка застосовується у виробництві мікросхем, де процеси нанесення тонких плівок, іонного травлення, електролітографії забезпечують одержання елементів електронних схем субмікронних розмірів. Таким чином дослідження і вдосконалення процесів нанесення тонких плівок є актуальною науковою та інженерною задачею. Дана робота присвячена розробці та дослідженню системи автоматичного регулювання тиску у вакуумній системі електронно-променевого випаровувала.

Об'єктом дослідження є процес нанесення полімерних плівок.

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

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

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

1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО НАПИЛЮВАННЯ

1.1 Вакуумне напилювання

Вакуумне напилювання – перенос часток напиляємої речовини від джерела (місця його перетворення в газову фазу) до поверхні деталі здійснюється по прямолінійних траєкторіях при вакуумі 10^{-2}Па й нижче (вакуумний випар) і шляхом дифузійного й конвективного переносу в плазмі при тисках 1Па (катодне розпилення) і від 10^{-1} до 10^{-2}Па (магнетронне й іонно-плазмове розпилення). Доля кожної із часток напиляемої речовини при зіткненні з поверхнею деталі залежить від її енергії, температури поверхні й хімічної спорідненості матеріалів плівки й деталі. Атоми або молекули, що досягли поверхні, можуть або відбитися від неї, або адсорбуватися й через деякий час покинути її (десорбція), або адсорбуватися й утворювати на поверхні конденсат (конденсація). При високих енергіях часток, великій температурі поверхні й малій хімічній спорідненості частка відбивається поверхнею.

Температура поверхні деталі, вище якої всі частки відбиваються від неї й плівка не утворюється, називається критичною температурою вакуумного напилювання; її значення залежить від природи матеріалів плівки й поверхні деталі, і від стану поверхні. При дуже малих потоках часток, що випаровуються, навіть якщо ці частки на поверхні адсорбуються, але рідко зустрічаються з іншими такими ж частками, вони десорбуються й не можуть утворювати зародків, тобто плівка не росте. Критичною щільністю потоку часток, що випаровуються, для даної температури поверхні називається найменша щільність, при якій частки конденсуються й формують плівку.

Структура напиляних плівок залежить від властивостей матеріалу, стану й температури поверхні, швидкості напилювання. Плівки можуть бути аморфними (склоподібними, наприклад оксиди, Si), полікристалічними (метали, сплави, Si)

або монокристалічними (наприклад, напівпровідникові плівки, отримані молекулярно-променевою епітаксією). Для впорядкування структури й зменшення внутрішніх механічних напруг плівок, підвищення стабільності їхніх властивостей і поліпшення адгезії до поверхні виробів відразу ж після напилювання без порушення вакууму роблять обпалювання плівок при температурах, що трохи перевищують температуру поверхні при напилюванні. Часто за допомогою вакуумного напилювання створюють багатошарові плівкові структури з різних матеріалів.

Для вакуумного напилювання використають технологічне устаткування періодичної, напівбезперервної й безперервної дії. Установки періодичної дії здійснюють один цикл нанесення плівок при заданому числі виробів, що завантажують. Установки безперервної дії використають при серійному й масовому виробництві. Вони бувають двох видів: багатокамерні й багатопозиційні однокамерні. Перші складаються з послідовно розташованих напилювальних модулів, у кожному з яких здійснюється напилювання плівок певних матеріалів або їхня термічна обробка й контроль. Модулі об'єднані між собою шлюзовими камерами й транспортуючим конвеєрним пристроєм. Багатопозиційні однокамерні установки містять декілька напилювальних постів (розташованих в одній вакуумній камері), що з'єднують транспортним пристроєм конвеєрного або роторного типу. Основні вузли й системи установок для вакуумного напилювання являють собою самостійні пристрої, що виконують задані функції:

- створення вакууму;
- випар або розпилення матеріалу плівок;
- транспортування деталей;
- контроль режимів вакуумного напилювання й властивостей плівок;
- електроживлення.

Напилювання вакуумне – нанесення плівок або шарів на поверхню деталей або виробів в умовах вакууму (від 10^{-1} до 10^{-7}Па). Напилювання вакуумне використають у планарній технології напівпровідникових мікросхем, у виробництві тонкоплівкових гібридних схем, виробів п’єзотехніки, акустоелектроніки й інші

(нанесення провідних, діелектричних, захисних шарів, масок й інші), в оптиці (нанесення що підсвічують, що відбивають й інші покриттів), обмежено – при металізації поверхні пластмасових і скляних виробів, тонуванні скла автомобілів. Методом вакуумного напилювання наносять метали (Al, Au, Cu, Cr, Ni, V, Ti й інші), сплави (наприклад, NiCr, CrNiSi), хімічні сполуки (силіциди, оксиди, бориды, карбіди й інші), скла складного складу, кермети та інші.

Напилювання вакуумне засноване на створенні спрямованого потоку часток (атомів, молекул або кластерів) матеріалу що наноситься на поверхню виробів й їхньої конденсації.

Процес включає кілька стадій: перехід напиляємої речовини або матеріалу з конденсованої фази в газову, перенос молекул газової фази до поверхні виробу, конденсацію їх на поверхню, утворення й ріст зародків, формування плівки.

Звичайно установка для вакуумного напилювання включає наступні вузли:

- робочу камеру, у якій здійснюється напилювання плівок;

- джерела що випаровують або матеріалів, що розпорошують, із системами їхнього енергоживлення й пристроями керування;

- відкачувальну й газорозподільну системи, що забезпечують одержання необхідного вакууму й організацію газових потоків (складаються з насосів, клапанів, пасток, фланців і кришок, для виміру вакууму й швидкості газових потоків);

- систему електроживлення й блокування всіх пристроїв і робочих вузлів установки;

- систему контролю й керування установкою вакуумного напилювання, що забезпечує задані швидкість напилювання, товщину плівок, температуру поверхні деталей, температуру обпалювання, фізичні властивості плівок (містить набір датчиків, зв'язаних через керуючу мікропроцесорну ЕОМ з виконавчими механізмами й пристроями виводу інформації);

- транспортуючі пристрої, що забезпечують введення й вивід деталей у робочу камеру, точне розміщення їх на постах напилювання й переклад з однієї позиції напилювання на іншу при створенні багатошарової системи плівок;

- систему допоміжних пристроїв і технологічне оснащення (складаються із внутрікамерних екранів, заслінок, маніпуляторів, гідро- і пневмоприводів, пристроїв очищення газів).

Порівнюючи основні методики фізичного осадження металів з методом електронно-променевого напилювання, необхідно виділити основну перевагу електронного променя – прецизійна чистота виконання, що має три найважливіші для сучасних технологій складові.

Конструкції промислових і дослідницьких електронно-променевих випарників сумісні із системами, що забезпечують рівень передопераційного вакууму в камері не гірше $1 \cdot 10^{-11}$мм.рт.ст., що дозволяє сполучати електронно-променеве напилювання з методиками молекулярно-пучкової епітаксії. Варто відзначити, що вакуумні системи минулих років забезпечували передопераційний вакуум на рівні $1 \cdot 10^{-6}$мм.рт.ст., як маршовий насос використалися відкачувальні агрегати: дифузійний або турбомолекулярний насоси зі змащенням підшипників ротора. При типових швидкостях осадження металів – від 1 до 10нм/сек і тиску залишкових газів у камері напилювання – $1 \cdot 10^{-6}$мм.рт.ст., зміст забруднюючих домішок у шарі металу могло досягати до 10%, що критично для коректного функціонування контакту мікроелектронного приладу. У цьому зв'язку використання разом з електронно-променевим випарником вакуумних систем з безмасляними відкачувальними агрегатами з рівнем передопераційного вакууму не гірше $1 \cdot 10^{-7}$мм.рт.ст. необхідно й виправдано.

При електронно-променевому впливі матеріал випаровується тільки із центральної частини мішені. Стінки ж тигля інтенсивно прохолоджуються, і різниця температур перешкоджає обміну матеріалу тигля й мішені. Як наслідок, на відміну від терморезистивного осадження, де тигель (або нагрівач) і випаровуєма навіска, що, мають однакову температуру, забруднення матеріалу не відбувається.

Джерелом розігріву служать розігнані електричним полем електрони. Для порівняння – при магнетронному осадженні використовується вибивання часток мішені іонами газу. У результаті можливі влучення часток домішок з потоку газу на поверхню підкладки можуть приводити до забруднення покриття, що осаджується.

Дані результати досліджень компанії ЗАТ "Наукове й технологічне встаткування" по відпрацьовуванню омічних контактів гетероструктурних транзисторів на основі гетеропереходу AlGaN/GaN. Експерименти проводилися з використанням декількох вакуумних установок осадження металевих покриттів. Відзначено, що опір контактів, отриманих на установках з дифузійними насосами (навіть удосконаленого типу з вакуумним маслом Santovac) і терморезистивними випарниками, був в сто разів більше, ніж у контактів, отриманих за допомогою установки електронно-променевого напилювання.

Найефективніший спосіб боротьби з осадженням водяної пари з атмосфери при відкачці камери складається в напуску й підтримці усередині камери напилювання під час розкриття надлишкового тиску інертного газу. Однак уникнути повністю окислювання мішеней навіть таким способом не вдається. Іншими словами, після розгерметизації системи чиста поверхня мішеней випарника покривається шаром оксиду. У цьому зв'язку процеси доцільно починати з попереднього освіження поверхні мішеней за допомогою передрозпилення. Це, у свою чергу, приводить до забруднення атмосфери камери напилювання киснем і до витрати дорогих матеріалів. Забезпечити схоронність чистоти випарника й процесу осадження від впливу розгерметизації установки при завантаженні й вивантаженні зразків може тільки шлюзовий пристрій.

Розглянемо електричний контакт на мікрорівні. У реальності на поверхні напівпровідника перебуває шар оксиду й шар органічних забруднень. Шар оксиду є бар'єрним для протікання струму через контакт. Єдиний діючий спосіб боротьби з оксидом – іонне бомбардування поверхні напівпровідника у вакуумі перед напилюванням. Однак у конструкціях установок електронно-променевого напилювання іонна гармата звичайно розташована в одному обсязі з випарником, що не зовсім правильно. З одного боку, пучок іонів розкладає оксид на складові, які розлітаються по камері, осідаючись на поверхнях, у тому числі на мішенях випарника. (При наступному напилюванні кисень знову виявиться на поверхні напівпровідника в складі перших шарів металізації). З іншого боку,

іонна гармата іонізує інертний газ, що має певну чистоту. У результаті домішка газу так само осідає на поверхні мішені й пізніше попадає в зону контакту.

У висновку необхідно відзначити, що виробники установок електронно-променевого напилювання уважно відслідковують сучасні тенденції в дослідженнях і виробництві приладів мікро- і оптоелектроніки й готові запропонувати устаткування, що відповідає самим прецизійним вимогам технологічного маршруту. Слід зазначити також, що націленість на розвиток нанотехнологій багаторазово підвищує важливість чистоти й відтворюваності окремих технологічних етапів.

1.2 Установка електронно-променевого напилювання

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

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

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

Можливе використання тиглів – проставок, виконаних із графіту або кераміки. Завантаження напиляємих зразків здійснюються через технологічні фланці камери напилювання. Товщина й швидкість напилювання матеріалів прецизійно контролюються за допомогою водоохолоджуємого двохканального кварцового датчика. Базова модифікація установки дозволяє нагрівати зразки в

камері напилювання до температури 200°С. Можливе ведення обертання тримача зразків у процесі напилювання.

У якості маршового використовується дифузійний насос продуктивністю 400л/сек. Модель має невеликий електронно-променевий випарник лінійного типу з п'ятьма тиглями ємністю 2,2см^3. кожний. Завантаження зразків здійснюється через вакуумні двері швидкого доступу, що і визначає граничний передопераційний вакуум у камері (не краще $1\cdot10^{-9}$мм.рт.ст.). Для забезпечення чистоти завантаження зразків передбачений бокс із інертною атмосферою, що приєднується до дверей швидкого доступу.

Для завантаження або вивантаження зразків існує можливість установки шлюзового пристрою. Слід зазначити дві істотних переваги використання шлюзового пристрою в установках електронно-променевого напилювання. По-перше, постійна підтримка низького тиску усередині камери напилювання збільшує продуктивність установки. Практика свідчить, що використовуваний у камері напилювання рівень тиску нижче $1\cdot10^{-7}$мм.рт.ст. після завантаження зразків у шлюзовий пристрій установлюється вже через 20 хвилин. По-друге, електронно-променевий випарник і безпосередньо мішені ізольовані від атмосфери. Це важливо, тому що на початку роботи випарника протягом перших 15 секунд його деталі неконтрольовано розігріваються до температур, достатніх для випару сконденсованої з атмосфери вологи, якщо перед цим вся камера установки розкривалася на атмосферу. Пари води попадають, у тому числі, і на поверхню оброблюваних зразків і впливають на контактний опір металізації.

Для контролю швидкості осадження металів використаються традиційні системи на основі кварцового резонатора. Така методика проста й надійна. Однак площа датчика становить не більше 1см^2, і при розміщенні в потік матеріалу він відображає точкову картину осадження. Структура факела матеріалу, що летить від випарника, складна й неоднорідна, причому твердження, що центр факела в будь-який момент часу збігається із центром зразка (зразків), невірно. Отже, точковий датчик не може повністю відстежити

однорідність напилювання по поверхні пластини. Розумне рішення – розмістити декілька датчиків товщини по трикутнику, що описує зразки, (або квадрату). У результаті оператор завжди зможе визначити, у яку сторону для досягнення однорідного напилювання необхідно змістити промінь по поверхні мішені. У сучасних установках електронно-променевого випару досягається рівномірність покриття ±1% на діаметрі 1000мм.

Основні технічні характеристики наведені в 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 ^{o}C
Температура прогріву камери напилювання	не менш 150 ^{o}C
Максимальний залишковий тиск у камері напилювання після прогріву 200^{o}C протягом 48 годин, з відключеними внутрішніми джерелами тепла й без подачі газів	не гірше $1 \cdot 10^{-7}$ 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 см^{3}
Відстань від випарника до зразка	від 150 до 300 мм

Проведення досліджень з метою розробки систем електронно-променевого напилювання для осадження надчистих покриттів не просто нова область розвитку техніки, але й найважливіший напрямок аналітичного приладобудування.

2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ НАНЕСЕННЯ ОРГАНІЧНИХ ПЛІВОК

2.1 Основні принципи роботи електронно-променевих і електродугових випаровувачів

Випарні пристрої і системи, засновані на електронно-променевому способі нагрівання. Він полягає в тому, що на поверхню металу, сплаву або якого-небудь з'єднання, поміщеного в тигель, направляють потік електронів, що досить швидко нагріває речовину до температури плавлення, а потім і випаровування. Носієм енергії є електронний промінь з енергією від $9{,}6 \cdot 10^{16}$ до $48{,}0 \cdot 10^{16}$Дж. У результаті взаємодії електронного променя з поверхнею матеріалу, що випаровується, кінетична енергія електронів перетвориться в теплову. Матеріал нагрівається і випаровується. При такому способі існує принципова можливість підтримки речовини при температурі випаровування протягом досить тривалого періоду. Відповідно практично немає обмежень по товщині шарів, що наносяться [20].

Конструктивно електронно-променеві випарники виконують у різних модифікаціях – з лінійним, кільцевим (аксіальні пушки) або порожнім (газорозрядні пушки) катодом. Однак для всіх систем характерна наявність типових функціональних вузлів (відповідно до рисунку 2.1): джерела електронів "1", що прискорює анод "2", системи повороту електронного пучка "3" і системи його фокусування "4". Сформований електронний пучок спрямований у тигель "5" з розплавом.

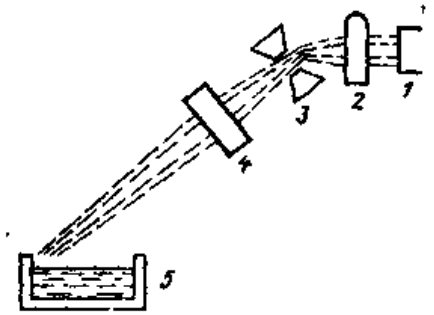


Рисунок 2.1 – Схема електронно-променевої випаровувальної системи

Електронний пучок може бути спрямований у тигель з речовиною, що випаровується, декількома способами: без відхилення пучка – рис. 2.2 (а) і з відхиленням пучка на 45; 90; 180; 270°, відповідно рис. 2.2 (б, в, г, д). Слід зазначити, що використання пушок з пучком електронів, що відхиляється, рис. 2.2 (в, г, д), дозволяє вирішувати більш широкий діапазон технологічних задач, але при цьому ефективність пучка знижується: зі збільшенням кута відхилення пучка зростає розсіювання електронів і потрібна підвищена потужність.

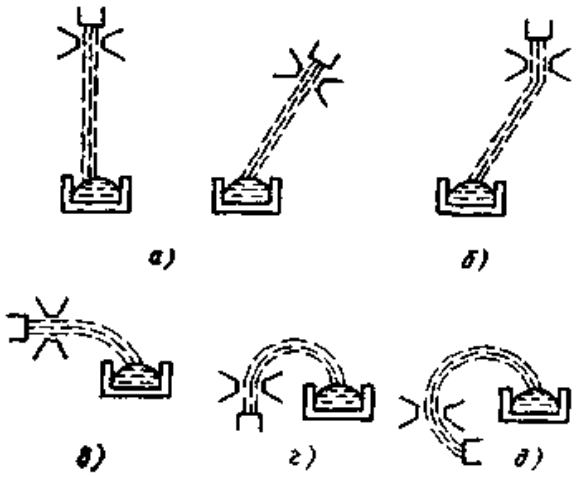


Рисунок 2.2 – Варіанти направлення електронного променя в тигель

Системи відхилення і фокусування мають три основні модифікації – електростатичні, електромагнітні і на постійних магнітах. Найбільше широко використовують електромагнітні системи.

Можна виділити два класи вакуумних установок – для нанесення покрить на окремі вироби і для нанесення покрить на рулонні матеріали. Перевага електронно-променевого випару особливо помітно виявляється для вакуумних установок другого класу, у яких потрібна висока продуктивність випаровуючого пристрою. Електронно-променеві випарники складніше обслуговувати, ніж прямонакальні; потрібна спеціальна підготовка операторів, причому необхідно враховувати рекомендації з обслуговування й експлуатації конкретних вакуумних установок.

Відмінна риса електродугових випарних систем полягає в тому, що крім пар металу виникають іонізовані частки. Ці частки піддаються керуванню

електромагнітними або електростатичними полями і легко вступають у реакції з іншими елементами. Останнє дозволяє одержати широкий спектр хімічних сполук по досить простій технології.

Можна виділити деякі характерні риси електричної дуги, що визначають процес формування покриттів. Електричний дуговий розряд у вакуумі відбувається в парах металу. На катоді формуються мікроскопічні ділянки – катодні плями з високими щільністю енергії і температурою. У межах катодних плям локалізуються всі заряджені частки катодної області розряду. До складу продуктів ерозії катода в зоні плями входять краплі розплавленого металу, іони і пари металу. Розмір крапель і їхня концентрація в загальному потоці часток, що надходять на підкладку, визначаються властивостями матеріалу катода і щільністю струму дуги розряду.

Тиск парів металу в області катодної плями досягає 10^6Па, тому в зоні плями не відбувається взаємодії з газом, що напускається. Взаємодія реалізується в наступних областях: на катоді в зонах, що залишаються після переміщення катодної плями; безпосередньо на поверхні підкладки, де відбувається реакція напиляємого шару з газом; у розрядному проміжку за умови його достатньої довжини.

Швидкість переміщення катодної плями в значній мірі залежить від складу і тиску газу, що напускається. Ці параметри визначають швидкість випару і склад формованого покриття.

Конструктивно метод електродугового випару найбільш простий; для його практичної реалізації використовують стандартні зварювальні випрямлячі або генератори.

Переваги електронно-променевого випаровування обумовлені насамперед тим, що це – єдиний спосіб, при якому енергія підводиться безпосередньо до поверхні, де формується потік пари.

Метод дозволяє:

- досягти значної поверхневої щільності енергії, завдяки чому можуть бути реалізовані високі швидкості випару різних матеріалів, у тому числі тугоплавких металів, оксидів і інших з'єднань;

- забезпечити просте регулювання потужності і розподілу енергії по поверхні нагрівання, що дозволяє відносно легко регулювати товщину і рівномірність нанесення покрить;

- одержувати покриття високої чистоти завдяки застосуванню водоохолоджуємих тиглів;

- істотно підвищити енергетичний ККД процесу в порівнянні з використанням прямонакальних випарників.

2.2 Методи одержання іонних покриттів

Створено велику кількість установок, у яких реалізовані різні варіанти методу іонного осадження [20].

Джерела іонів можна об'єднати в 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 й інші. Шиллер С. і Хайзинг В. застосували плазмотрон, у якому (у порівнянні із джерелами першої групи) завдяки використанню перехресних електричних і магнітних полів удалося більш ніж на порядок зменшити тиск у камері при збільшенні щільності іонного струму в кілька разів;

в) автономні іонні джерела;

г) Джерела пари, частково іонізуючі випаровуєму речовину, (електронно-променеві й іонні пушки, планарний магнетрон з випаром з рідкої фази).

В якості випаровувачів в установках іонного осадження можна використати резистивний й електронно-променевий випаровувачі, а також хімічні джерела пару.

За технологією іонне осадження з використанням резистивно нагріваємих випаровувачів, з тугоплавких матеріалів (вольфраму, молібдену, танталу й інші) не відрізняється від звичайного термічного напилювання. Після

обробки вакуумної камери інертним газом й іонним очищенням підкладки, метал у випаровувачу нагрівають до температури плавлення й випаровування й проводять осадження покриття. Обов'язковий елемент технологічного процесу – пристрій для іонізації пару випаруваного металу. Резистивне нагрівання успішно застосовують при іонному осадженні різних металів і сплавів з низкою й середньою температурою плавлення.

На рис. 2.3 наведена схема установки, використаної Тиром Т. і Халінгом Дж. при вивченні процесу іонного осадження. Для випаровування металу використаний резистивний випаровувач (напруга 12В, сила струму 100А). Система напуску аргону забезпечувала стабільну роботу при тиску до 10^{-2}Па. Для створення аномального тліючого розряду на підкладку подавали негативний потенціал порядку від 2 до 5кВ. Час очищення підбирали експериментально по зменшенню сили струму. По закінченні процесу очищення силу струму випаровувача збільшували до досягнення температури випаровування й проводили нанесення покриття; протягом усього процесу осадження між підкладкою й випаровувачем підтримували розряд.

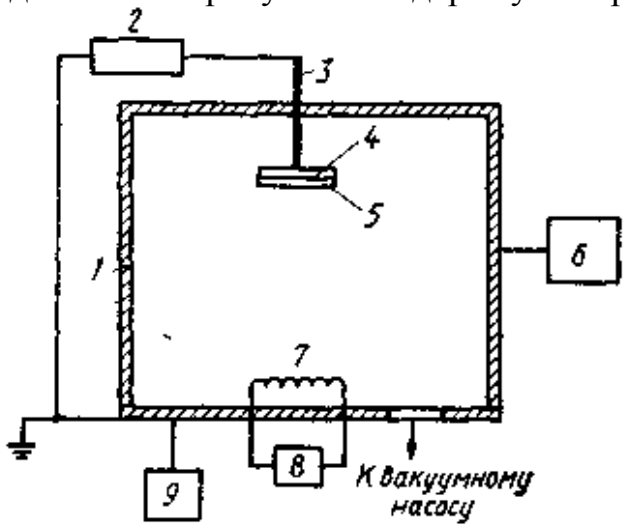


Рисунок 2.3 – Принципова схема установки для іонного осадження з резистивним випаровуванням

1 – Вакуумна камера; 2 – Високовольтний блок живлення катода;3 – Катод; 4 – Тримач підкладки; 5 – Підкладка; 6 – Система виміру і контролю тиску у вакуумній системі; 7 – Резистивний випаровувач; 8 – Блок живлення випаровувача; 9 – Система контролю подачі аргону.

Для одержання плівки рівномірної товщини заземлений екран повинен бути розташований на такій відстані від зразка, щоб не збуджувалося електричне поле [5]. Екран є обов'язковою частиною високовольтного електродного пристрою. Він запобігає горінню розряду в проміжку між електродом і діелектриком і виключає можливість осадження парів металу на поверхні діелектрика, захищаючи його від пробою. Схеми електрода із заземленим екраном наведені на рис. 2.4.

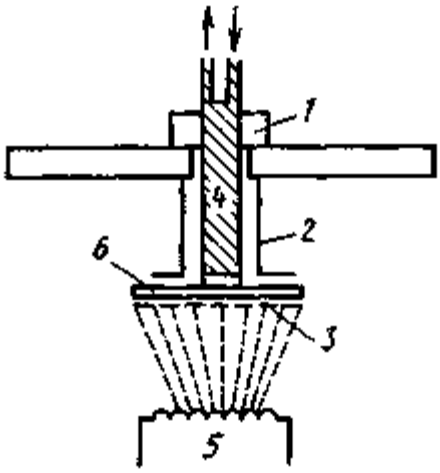


Рисунок 2.4 – Схема електрода з заземленим екраном

1 – Фторопластовий ущільнювач; 2 – Заземлений екран; 3 – Сітка; 4 – Катод; 5 – Джерело випаровування; 6 – Полімерна підкладка на основі катода.

Загальний недолік найбільш часто застосовуваних конструкцій електродів при іонному осадженні – контакт деталей, що покривають, з високовольтним електродом; у результаті окремі ділянки деталі залишаються без покриття. Цей недолік виключають використанням пристроїв барабанного типу для переміщення деталей у процесі нанесення покриттів.

Резистивні випаровувачі використовують для одержання тонких плівок; маса речовини, що випаровується, невелика. Для випаровування більших мас речовини протягом тривалого часу, а також тугоплавких матеріалів (сплавів, окислів, з'єднань типу карбідів, нітридів) звичайно використають електронно-променеві випаровувачі. Безпосереднє застосування електронно-променевих випаровувачів з розжарюваними катодами в установках іонного осадження

неможливо, тому що при робочому вакуумі в камері (від 0,1 до 6,0 Па) нитки катода швидко виходять із ладу. Проблему можна вирішити диференціальною відкачкою робочого об'єму й блоку випаровування, що помітно ускладнює конструкцію установки. Частіше використовують двокамерну вакуумну ємність. Типова конструкція установки такого типу показана на рисунку 2.5. Відмітна деталь установки – перехідна перегородка з невеликим отвором (діаметр від 3 до 8мм). Установка подібного типу використана К. Уеном і Д. Чемберсом при нанесенні іонних покриттів зі срібла, кварцу, корозійно-стійкої сталі, алюмінію, сплаву Fe-Cr-A1-Y. Прискорювальна напруга на підшарі від 0,8 до 2,0кВ; щільність струму від 0,4 до 0,6мА/см^2; тиск від 0,13 до 4,0Па. Ресурс вольфрамового розжарюваного катода в цих умовах – 50 годин при потужності до 10кВт.

З погляду технології одержання покриттів ефективне застосування газорозрядних пушок з порожнім катодом. Перевагою такого випаровувача є здатність роботи при тиску тліючого розряду, а також простота конструкції й виготовлення. До недоліків пушок з порожнім катодом можна віднести забруднення підшару матеріалом стінок катода через його розпилення в процесі іонного бомбардування.

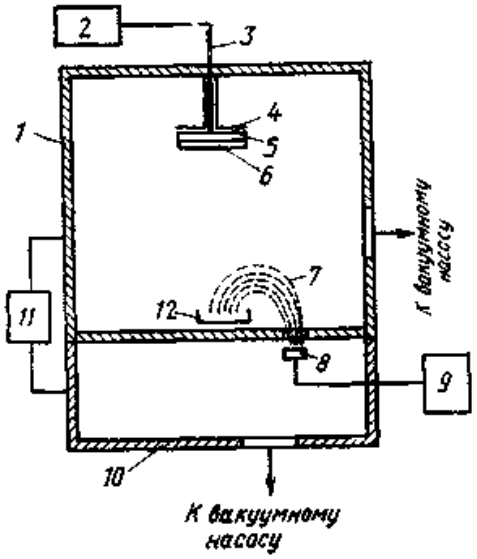


Рисунок 2.5 – Принципова схема установки для іонного осадження з електронно-променевим випаровувачем

1 – Вакуумна камера для випаровування; 2 – Високовольтний блок живлення катода; 3 – Катод; 4 – Заземлений екран; 5 – Тримач підкладки; 6 – Підкладка; 7 – Електронний промінь; 8 – Електронно-променева пушка; 9 – Блок живлення пушки; 10 – Вакуумна камера електронно-променевої пушки; 11 – Система виміру і контролю тиску у вакуумній системі; 12 – Тигель.

Для усунення цього недоліку катоди пушок такого типу доцільно виготовляти з того ж матеріалу, що й покриття. Робота пушок з порожнім катодом можлива як у високовольтному, так й у дуговому режимі. На рис. 2.6 наведена принципова схема установки іонного осадження з випаровувачем у вигляді пушок з порожнім катодом, що працює у високовольтному режимі (Д. Чемберс). Катод пушки являє собою порожній циліндр із корозійностійкої сталі з отворами на бічній поверхні. Розміри катода: довжина 10,2см; діаметр 5,08см; діаметр отворів 0,64см. У процесі іонного осадження тиск у камері (від 0,13 до 6,6Па) підтримується контрольованим напуском аргону й безперервною відкачкою. На підкладку подається негативний потенціал; анодом розряду й електронно-променевої пушки є металева підстава камери. Режим роботи катода залежить від його діаметра, тиску, прозорості бічної поверхні й діаметру вихідного отвору. Пушка такої конструкції працює при прискорювальній напрузі 17кВ і силі струму 0,3А; при цих параметрах режим роботи найбільш стабільний [20].

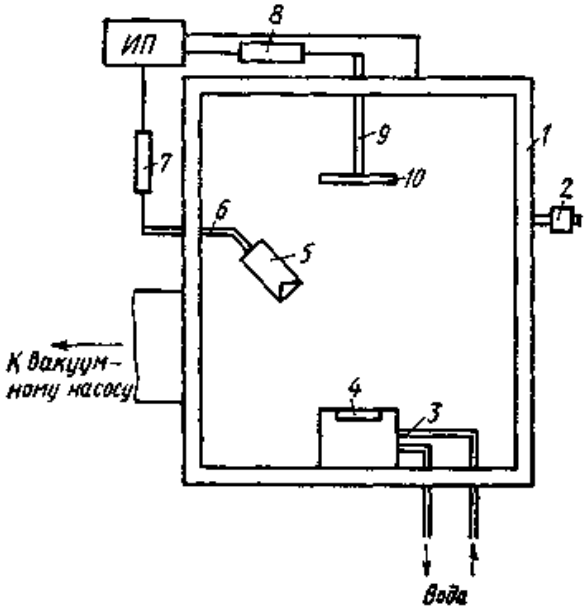


Рисунок 2.6 – Принципова схема установки для іонного осадження

1 – Вакуумна камера; 2 – Натікач для напуску аргону; 3 – Мідний водоохолоджуючий тигель; 4 – Випаровуємий матеріал; 5 – Полий катод; 6 – Високовольтний ввід пушки (U=20кВ, I=0,2А); 7, 8 – Регулювальні резистори; 9 – Високовольтний ввід підкладки (U=5кВ, I=0,2А); 10 – Підкладка.

Використання дугових пушок з порожнім катодом в установках іонного осадження дозволяє підвищити ступінь іонізації пар металу в кілька разів у порівнянні з її значенням для високовольтних пушок. Це обумовлено тим, що максимальна іонізація пари електронами відбувається при енергії первинних електронів від 50 до 150еВ. Властивості покриттів при цьому істотно не поліпшуються, тому що енергія котра прикладається до підкладки в обох випадках має один порядок. Підвищення коефіцієнта іонізації істотно впливає на рівномірність іонних покриттів на складних деталях, тому що осадження іонів на підшарі відбувається по силових лініях поля. У табл. 2.1 наведені основні параметри дугових пушок і процесу іонного осадження різних металів.

Для одночасного випару й іонізації матеріалу можна використати так називані іонні пушки. При цьому відпадає необхідність у використанні аргону або іншого інертного газу, тиск у вакуумній камері може бути нижче 10^{-4}Па. Конструктивно такий випаровувач виконаний у такий спосіб (рис. 2.7). Усередині котушки, до якої підведене високочастотна напруга, перебуває індуктивно розігрітий тигель. Між котушкою й тиглем установлений екран з окису алюмінію, що є "прозорим" для високої частоти, але зменшує теплові втрати. Такий випаровувач застосований Дж. Уайтом і Дж. Мейлом при одержанні іонних покриттів з Al, Cu, Si, SiO_2, Si_3N_4, $A1_2O_3$ й інших матеріалів.

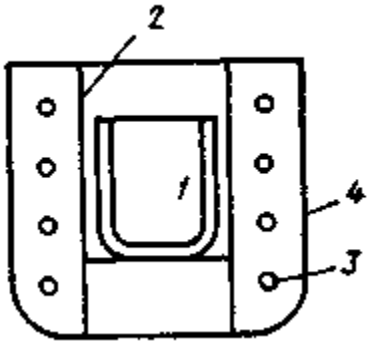


Рисунок 2.7 – Схема іонної пушки

1 – Тигель; 2 – Тепловий екран; 3 – Індукційна котушка; 4 – Металевий екран.

Таблиця 2.1 – Основні параметри дугових пушек 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	$6{,}7\cdot10^{-2}$	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.

Для одночасного випару й іонізації матеріалу можна використати так називані іонні пушки. При цьому відпадає необхідність у використанні аргону або іншого інертного газу, тиск у вакуумній камері може бути нижче 10^{-4}Па. Конструктивно такий випаровувач виконаний у такий спосіб (рис. 2.7). Усередині котушки, до якої підведене високочастотна напруга, перебуває індуктивно розігрітий тигель. Між котушкою й тиглем установлений екран з окису алюмінію, що є "прозорим" для високої частоти, але зменшує теплові втрати. Такий випаровувач застосований Дж. Уайтом і Дж. Мейлом при одержанні іонних покриттів з Al, Cu, Si, SiO_2, Si_3N_4, $A1_2O_3$ й інших матеріалів.

Заслуговує на увагу так називане кластерне іонне осадження. Кластери, що складаються з кількості від 100 до 1000 атомів, утворяться в результаті адіабатичного розширення речовини, ежектуємого у вакуумну камеру через невеликий отвір у нагрітому тиглі. Потім кластери іонізуються іонним бомбардуванням і прискорюються полем підкладки. У такий спосіб одержують

частки з малим відношенням заряду до маси, що зменшує заряд, що накопичується на підкладці, при осадженні товстих покриттів на діелектриках. Перетин іонізації кластерів значно більше перетину атомів, тому вони легко іонізуються в розряді. Схема пристрою наведена на рис. 2.8.

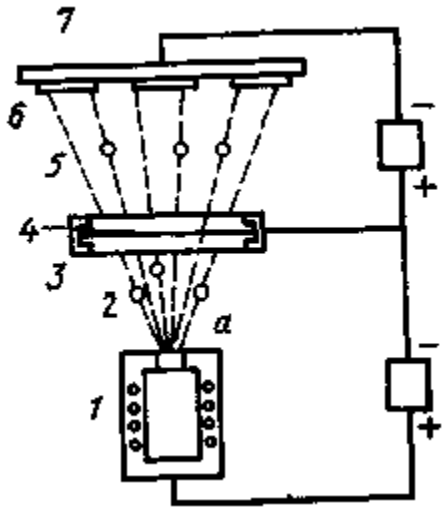


Рисунок 2.8 – Схема установки для кластерного іонного осадження

1 – Тигель; 2 – Кластери; 3 – Фокусуючий елемент; 4 – Дріт накалювання; 5 – Іонізовані кластери; 6 – Підкладка; 7 – Тримач підкладки; а – Отвір діаметром від 10 до 20мкм.

Застосування окремого джерела іонів дозволяє реалізувати процес іонного осадження при тиску порядку 10^{-4}Па, що значно зменшує вплив атомів примісей на склад і властивості плівок. Крім того, у цьому випадку можна легко регулювати вміст іонів у потоці нейтральних часток й іонів, енергію іонів, а також швидкість осадження нейтральних часток. Інакше кажучи, з погляду керування процесом це найбільш досконалий спосіб [14].

Становить інтерес порівняння методу іонного осадження з іншими процесами поверхневої обробки матеріалів, зокрема зі звичайним методом випару й конденсації у вакуумі. Один з варіантів такого порівняння наведений у табл. 2.2. Характеристиками, що зіставляють, обрані властивості одержуваних покриттів, особливості технології нанесення, матеріали покриттів і вартість устаткування.

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 виконана по п'ятибальній системі, причому вищий бал відповідає оптимальному значенню аналізованого параметра. Аналіз показує, що найбільш простий і дешевий з погляду технології – спосіб термічного напилювання з резистивним нагріванням матеріалу. Однак по властивостях покриттів незаперечна перевага має електронно-променеве іонне осадження, особливо за такими показниками, як адгезія, однорідність і можливість одержання покриттів зі сплавів. Метод іонного осадження в цілому задовольняє всім вимогам, пропонованим до сучасних технологічних процесів.

3 ОПИС ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ ТА ЇХ КОНСТРУКЦІЙ

3.1 Опис установки синтезу органічних тонкоплівкових структур

Установка являє собою високовакуумну систему ВУП–5 з паромасляною відкачкою. Всі фланцеві з'єднання установки виконано з нержавіючої сталі. Відкачка камери напилювання забезпечується на попередньому етапі форвакуумним і дифузійним промасляним насосом НВДМ-160, призначений для отримання вакууму порядку 10^{-7}Па (МР-151.21.0107.01.00.ВЗ).

Завантаження зразка здійснюється через шлюз. У шлюзову камеру може бути вбудована система іонного очищення зразків перед напилюванням. Система іонного очищення дозволяє провести травлення поверхні зразків перед напилюванням у плазмі аргону для видалення окисів, залишків органічних сполук і поліпшення адгезії плівок [14]. Можливе використання інших, у тому числі й у агресивних газах з доробкою вакуумного конструктиву.

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

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

Камера напилювання постачена стаціонарною системою прогріву до 150^{o}С.

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

Камера напилювання постачена оглядовим вікном для контролю завантаження підкладки й візуального контролю процесу плавлення мішені за

допомогою дзеркала, розташованого усередині камери. Система автоматизації технологічного процесу здійснює автоматичне керування процесом напилювання за допомогою оригінального програмного забезпечення. Конструкція установки забезпечує однорідність напиляємих плівок не гірше 5% для діаметра зразка 150мм.

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

Функціональна схема установки синтезу органічних тонкоплівкових структур наведена на рис. 3.1.

Установка складається з вакуумної камери "1", в якій проводиться напилення барвника та знімання спектру за допомогою спектрометра "20". Повітря відкачується з вакуумної камери за допомогою вакуумної установки "25", яка складається з форвакуумного насоса і насоса високого вакууму. До вакуумної установки під'єднується спектрометр за допомогою світловодів "10". У вакуумній камері знаходиться випаровувач барвника "7", який являє собою металічну пластинку. В цей випаровувач ми закладаємо барвник у кристалічному стані, який внаслідок великої напруги, що до нього прикладається, розплавляється і починає випаровуватись.

Орієнтуючі електроди "8" забезпечують точний і потрібний нам напрям випаровування. Барвник потрапляє на скляну пластину-підкладку (в нашому випадку, а загалом на підкладку з матеріалу, який нам необхідно використати). Дана підкладка (диск) приводиться в рух за допомогою двигунів системи транспортування "4". Контролер системи транспортування "21", контролер випаровувача барвника і контролер "16" кварцових датчиків "9" забезпечують рівномірне нанесення барвника і потрібну нам товщину шару. Заслінки "5" слугують для контролю своєчасного початку і закінчення напилення барвника і полімеру-підкладки (в нашому експерименті не використовується).

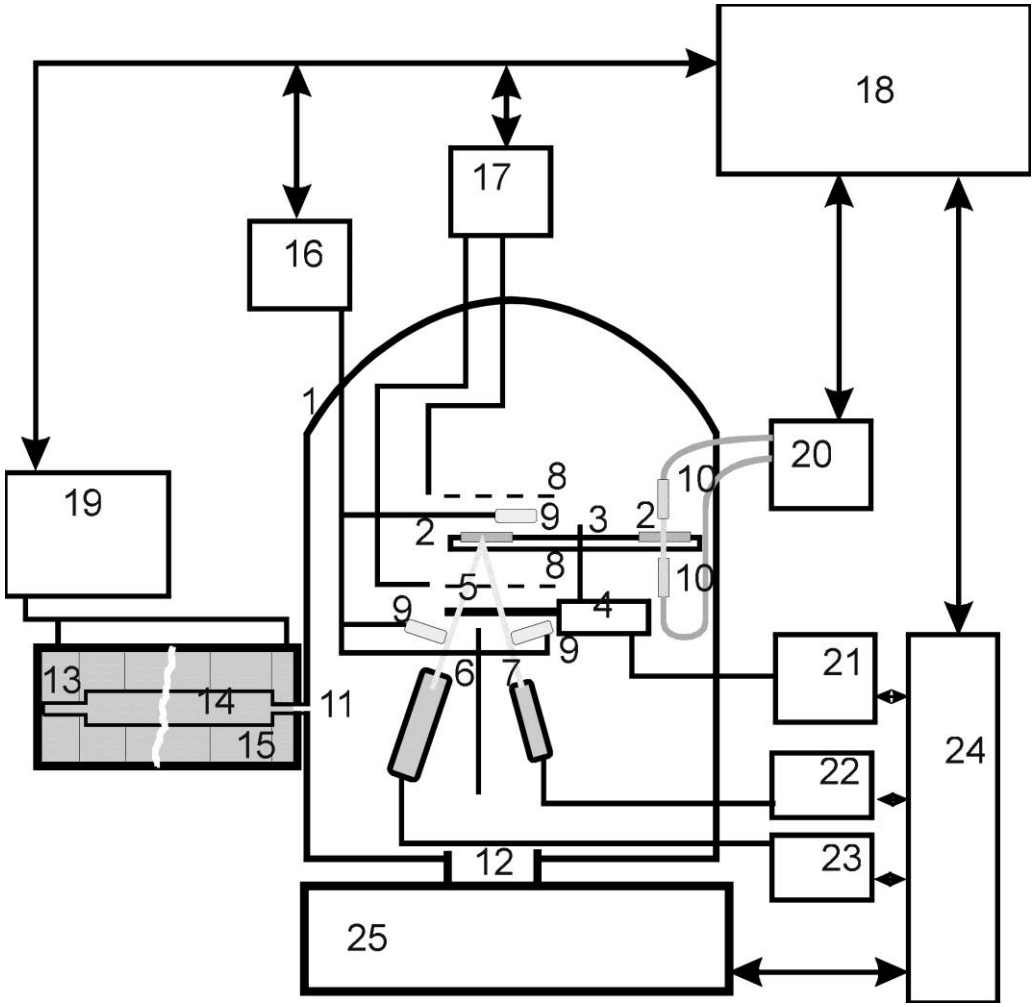


Рисунок 3.1 – Функціональна схема установки синтезу органічних тонкоплівкових структур

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

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

Електронна стійка керування складається з таких основних елементів:

- блок розподілу електроживлення;

- кнопка аварійного відключення установки;

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

- блок живлення робочого насоса;

- блок керування нагрівачами;

- блоки керування електронно-променевим випарником.

Блоки керування електронно-променевим випарником включають:

- силовий блок живлення;

- виносний блок керування розжаренням катода;

- блок керування фокусуванням променя;

- блок пересування позицій променя.

3.1.1 Конструкція установки та розробка методів осадження плівок

За даними попередніх досліджень, зокрема спектрів оптичного поглинання у розчині толуолу та у плівці, було показано, що не всі органічні барвники у плівці зберігають свої властивості, вони руйнуються у процесі напилення [11]. Для того, щоб можна було зрозуміти та побачити “на власні очі”, як відбувається процес випаровування речовини була розроблена програма, могла відстежувати за тиском у камері, швидкістю росту плівки, температурою та струмом випаровувача. Зокрема було помічено, що при напиленні деяких органічних барвників відбувається газовиділення. Це дало змогу припустити, що при певній температурі випаровувача відбувається деградація (руйнування) органічної речовини (МР-151.21.0107.02.01.В2).

Установка, що використовувалась в даній роботі зображена на рис. 3.1. Випаровувач був розміщений під ковпаком універсального вакуумного посту ВУП-5, схема якого наведена на рис. 3.2.

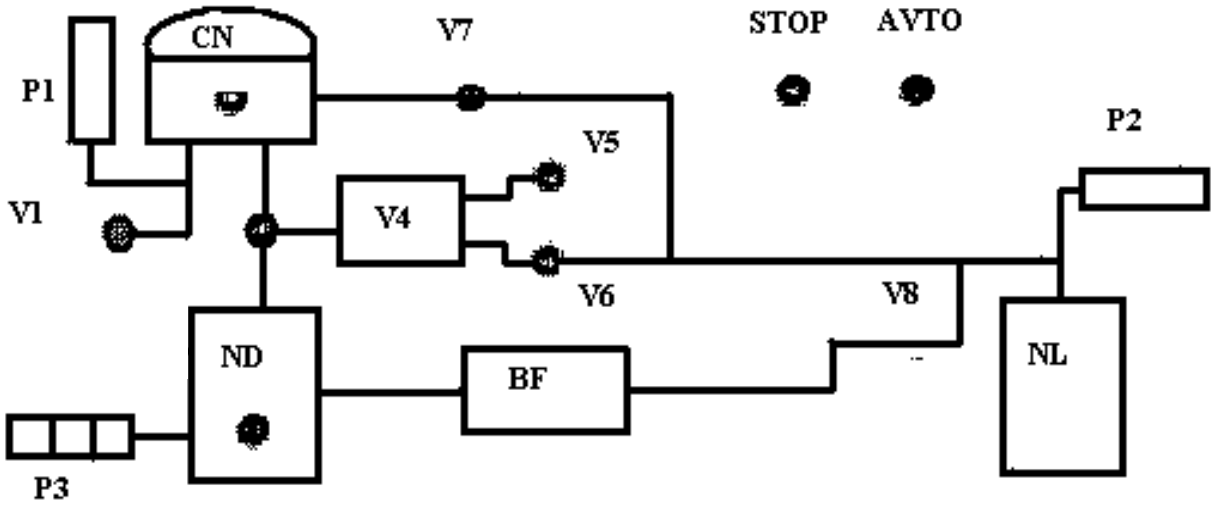


Рисунок 3.2 – Схема вакуумної системи

NL – форвакуумний насос. Створює вакуум низького порядку (близько 10^{-4} Па); ND – дифузійний насос НВДМ-160, призначений для отримання вакууму порядку 10^{-7}Па. Ємність заповнена маслом, під час відкачки перебуває у стані кипіння ($t \approx 150^0$C); BF – бустерна ємність для відкачки повітря дифузійним насосом, яка допомагає подолати стрибки тиску при роботі ND; V1, V4, V5, V6, V7, V8 – клапани системи, для зв'язку окремих незалежних частин. Клапан V1 використовується для накачки повітря в камеру CN після проведення досліду. Клапан V4 відкриває затворку між дифузійним насосом та камерою CN, так як різниця тисків по різні боки велика, то клапани V5 та V6 допомагають відкрити клапан V4; CN – камера, з якої проводиться відкачка повітря, місце проведення досліду; P1, P2, P3 – датчики; P1, P2 – термопарні; P3 – іонізаційний.

Вакуумна система (рис. 3.2) складається з механічного форвакуумного та дифузійного насосів, електромагнітних соленоїдальних клапанів для перемикання каналів системи, три датчика для контролю та моніторингу вакууму (МР-151.21.0107.02.02.В3).

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

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

3.2 Класифікація та основні параметри вакуумних насосів

Вакуумні насоси за принципом дії можна класифікувати [20]:

- насоси об'ємної дії, які здійснюють процес відкачки за рахунок періодичної зміни обсягу робочої камери (водокільцеві, механічні, двохроторні);

- насоси ежекторні, які здійснюють відкачку за рахунок захоплення газу струменем робочої рідини або пара (пароструминні насоси, пароежекторні насоси);

- насоси молекулярні, які здійснюють процес відкачки за рахунок повідомлення молекулам відкачуємого газу додаткової швидкості в певному напрямку. Насоси цього типу можуть бути струминними, у яких спрямована додаткова швидкість повідомляється молекулам відкачуємого газу безупинно стікаючим струменем пари або газу, і молекулярними, у яких ця швидкість повідомляється поверхнями, що рухаються, твердого тіла;

- насоси сорбційні, які здійснюють процес відкачки за рахунок здатності ряду матеріалів поглинати гази й пари (адсорбційні, гетерні, випарні, іонно-гетерні, магнітні електророзрядні насоси);

- насоси криогенні, які здійснюють процес відкачки за рахунок конденсування відкачуємих газів і парів при низьких температурах (конденсаційні й кріосорбційні насоси).

При виборі насоса для конкретної вакуумної системи звичайно керуються наступними основними параметрами: найбільшим тиском запуску, найбільшим випускним тиском, граничним залишковим тиском, швидкістю дії й продуктивністю.

Найбільший тиск запуску $p_{поч}$ – тиск у вхідному перетині вакуумного насоса, при якому насос може почати роботу [18]. По цьому параметрі всі насоси можна підрозділити на дві великі групи:

а) насоси, які відкачують пари й гази з обсягу з первісним атмосферним тиском; до них відносяться механічні вакуумні, пароежекторні, водоструминні й подібні їм насоси;

б) насоси, які для своєї роботи вимагають попереднього розрідження всієї вакуумної системи, включаючи сам насос; це молекулярні, сорбційні й інші насоси.

Попереднє розрідження для цих насосів зазвичай створюється насосами першої групи, для яких найбільший тиск запуску $p_{поч}$ дорівнює атмосферному. Для зручності експлуатації насосів другої групи їх часто поєднують в агрегати з насосами першої групи.

Найбільший випускний тиск $p_{макс}$ – тиск у вихідному перетині вакуумного насоса, при якому насос ще може нормально працювати. Цей параметр особливо важливий для високовакуумних дифузійних насосів, у яких перевищення найбільшого випускного тиску 10^2Па може привести до руйнування парового струменя й занесення великої кількості пари у відкачуємий об’єм. Відмітимо, що найбільший випускний тиск дифузійних насосів практично збігається з найбільшим тиском запуску.

У двохроторних і турбомолекулярних насосів відбувається плавна зміна впускного тиску залежно від випускного, і поняттям найбільшого випускного тиску для цих насосів зазвичай не користуються.

Граничний залишковий тиск $p_{зал}$ – гранично низький тиск, що досягається насосом при роботі без навантаження, тобто коли на вхід насоса не надходять ззовні гази або пари [18].

Неможливість безмежного зниження тиску обумовлена тим, що в кожному реальному насосі завжди існує зворотний потік газів і пар з боку випускного патрубка на вхід насоса. Зворотний потік може складатися з пару робочої рідини, газів, що виділяються з конструкційних матеріалів, робочої рідини, що проривається

через механізм насоса, і газів, що натікають із навколишнього середовища через нещільності. Зі зниженням тиску потік відкачуємого газу в насос зменшується, у той же час зворотний потік залишається практично незмінним; тому наступає момент, коли ці потоки стають однаковими й тиск на вході насоса перестає знижуватися. Це і є граничний залишковий тиск, що досягається насосом.

У більшості насосів при досягненні залишкового тиску, крім залишкових газів, на вході є й пари, що конденсуються, у зв'язку із чим розрізняють повний залишковий тиск, тобто суму парціальних тисків залишкових газів і пару, і тиск залишкових газів.

У насосів, що використовують робочі рідини (насоси з масляним ущільненням, паромасляні), повний залишковий тиск визначається складом і станом робочої рідини й звичайно на порядок вище тиску залишкових газів, що залежить від конструкції і якості виготовлення насоса. Для таких насосів у паспорті вказуються обидва значення. Очевидно, якщо відкачуємий обсяг не захищений від проникнення пар робочої рідини насоса якою-небудь пасткою, граничний залишковий тиск відкачуємій системі не може бути нижче повного залишкового тиску насоса.

У насосів без робочої рідини (турбомолекулярні, сорбційні, конденсаційні) залишковий тиск пару, що конденсуються, як правило, знехтувально малий в порівнянні з тиском залишкових газів, і для таких насосів у паспорті приводиться повний залишковий тиск, вимірюваний без захисту манометрів охолоджуваними пастками.

Швидкість дії $S_н$ визначається обсягом газу, що проходить через перетин впускного патрубка насоса в одиницю часу при певному впускному тиску. Вона не є постійною величиною й звичайно зменшується зі зменшенням впускного тиску. Якість насоса тим краще, чим ширше діапазон тисків, у межах якого швидкість дії насоса мало змінюється. При досягненні граничного залишкового тиску швидкість дії стає рівної нулю. Для кожного типу насосів існує крива залежності швидкості дії насоса $S_н$ від тиску p яка визначається співвідношенням (3.1):

$$S_н = f(p) \qquad (3.1)$$

Продуктивність насоса $Q'_н$ визначається кількістю газу, що видаляється насосом в одиницю часу при певному впускному тиску.

Продуктивність насоса, так само як і швидкість дії, залежить від впускного тиску й при досягненні граничного тиску наближається до нуля.

Продуктивність і швидкість дії насоса пов'язані співвідношенням (3.2):

$$S_н = \frac{Q'_н}{p_н}, \qquad (3.2)$$

де $p_н$ – тиск у вхідному перетині насоса.

Вакуум-фактор Хо визначається відношенням фактичної швидкості дії насоса $S_н$ до теоретичної максимально можливої швидкості дії $S_{теор}$, рівність (3.3):

$$Xo = \frac{S_н}{S_{теор}} \qquad (3.3)$$

Теоретична швидкість дії для повітря при молекулярному режимі $S_{теор}$=11,6л/с.

Коефіцієнт Хо дасть можливість оцінити, наскільки фактична швидкість дії відрізняється від можливого граничного значення.

Для добре сконструйованого пароструминного дифузійного насоса коефіцієнт Хо становить від 0,3 до 0,5. У сорбційних насосах коефіцієнт Хо сильно залежить від роду відкачуємих газів. Так, у титанових насосах при відкачці кисню, Хо близький до одиниці. При відкачці азоту, парів води й вуглекислого газу коефіцієнт Хо від 0,2 до 0,5, а при відкачці інертних газів Хо – від 10^{-4} до 10^{-2}.

При виборі насосів варто також ураховувати й такі їхні характеристики, як економічна ефективність, споживання енергії, охолодження водою, витрати робочої рідини, маса, габарити, частота обертання, рівень шуму, вібрацій і інші, а також особливості поводження насосів у різних умовах їхньої експлуатації. Звичайно економічна ефективність оцінюється вартістю, віднесеної до швидкості дії (первісні витрати), і вартістю експлуатації, також віднесеної до швидкості дії.

Часто при проектуванні вакуумних систем необхідно знати здатність насоса відкачувати не тільки повітря, але й інші гази й пари, що конденсуються; стійкість насоса до різких підвищень тиску на впусканні та випусканні й проривам атмосферного повітря.

У вакуумних установках застосовують два види вакуумних насосів: форвакуумні (механічні, сорбційні, рідинно-струменеві й інші) і високовакуумні (пароструминні, магнітні електророзрядні, гетерно-іонні, осьові й відцентровані вакуумні турбонасоси й інші).

У якості форвакуумних найпоширеніші вакуумні насоси з масляним ущільненням. По конструкції механічні насоси підрозділяються на пластинчато-роторні й пластинчато-статорні. У насосах цього типу процес відкачки складається з періодичної зміни обсягу робочої камери, у яку надходять відкачуємі гази. Процес відкачки включає: всмоктування газу за рахунок розширення робочої камери насоса; зменшення обсягу робочої камери й стиск газу, що перебуває в ній; видалення стисненого газу з робочої камери в атмосферу.

3.2.1 Форвакуумний пластинчато-роторний насос 2НВР-5ДМ

Принцип роботи одноступінчастого пластинчато-роторного насоса (рисунок 3.3) полягає в наступному [20]. У циліндрі "3" у напрямку, зазначеному стрілкою, обертається ексцентрично встановлений ротор "4". У прорізі ротора поміщені пластини "5", що притискають пружинами "6" до поверхні циліндра "3". При обертанні ротора пластини сковзають по поверхні циліндра. Камера, утворена циліндром, ротором і торцевими кришками, ділиться пластиною на дві порожнини. При обертанні ротора порожнина "а" періодично збільшується й у неї надходить газ через клапан "2" з відкачуємої системи. Порожнина "б" періодично зменшується: у ній відбувається стиск газу. Стиснений газ викидається назовні через клапан "1" (МР-151.21.0107.03.01.В1).

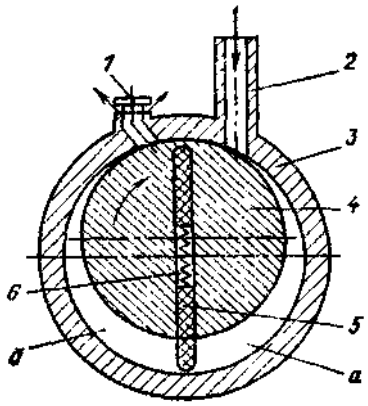


Рисунок 3.3 – Схема пластинчато-роторного вакуумного насоса 2НВР-5ДМ

У насосі двоступінчастого виконання вихід першого ступеня з'єднаний каналом із входом другого ступеня. Стиснутий газ послідовно проходить обидві ступені й викидається через клапан другого ступеня. Ущільнення між порожнинами всмоктування "а" й стиску "б" створюється масляною плівкою. Вихлопні клапани працюють під шаром масла.

У табл. 3.1 наведені основні характеристики 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 ВМ-4 ВМ-5 ВМ-6	 0,013/0,067/2,6 0,067/3,9/10,4 0,013/0,67/2,6 0,013/0,13/0,67
Об'єм наливаємого в насос масла $V_н \cdot 10^3$, $м^3$	не більше 1,2

Умовне позначення насосів: насос 2НВР-5ДМ – насос вакуумний пластинчато-роторний, швидкість дії $5 \cdot 10^{-3} м^3/с$, двоступінчастий.

Швидкість відкачки насоса можна підвищити збільшенням обсягу робочої камери насоса, провідності вхідного патрубка й кутової швидкості електродвигуна. Варто враховувати, що частота циклів відкачки повинна бути оптимальною; перевищення цього параметра супроводжується перегрівом насоса, недостатнім заповненням робочої камери відкачуємим газом. Газовиділення насоса є сумою обсягів газів, що виділяються з деталей конструкції насоса, з робочої рідини й, ті що натікають ззовні через нещільності в корпусі насоса. Для підвищення швидкості дії механічних насосів рекомендується з'єднувати паралельно два однакових насоси.

Основний недолік всіх вакуумних обертальних насосів з масляним ущільненням – можливість проникнення пар масла у відкачуємий вакуумний сосуд через термічне розкладання масла в місцях контакту поверхонь тертя елементів насоса. У таких умовах відбувається крекінг масла з утворенням легких вуглеводнів, що зменшують граничний тиск насоса. Для виключення влучення в відкачуємий сосуд парів робочої рідини встановлюють пастки, які, зменшуючи зворотну дифузію, чинять додатковий опір потоку пар газу і тим самим зменшують швидкість відкачки.

При тривалій роботі насоса в області підвищених тисків насос може перегрітися. У результаті чого інтенсивно випаровується масло, вакуумна система забруднюється парами масла й водяних парів, що утримувалися в ньому, різко зменшується в'язкість масла й порушується герметичність масляного ущільнення.

Найчастіше в механічних насосах використають нафтові масла ВМ-4 і ВМ-6. Масло ВМ-6 має ряд переваг у порівнянні з маслом ВМ-4: малий тиск насичених пар (0,1мПа при Т = 293К; для масла ВМ-4 – 1мПа); відсутність легко летучих домішок; більша (у кілька разів) швидкість окислювання; повільне зменшення в'язкості при підвищенні температури; більш високі температури спалаху (від 493до 503К) і вологостійкість.

3.2.2 Дифузійний насос НВДМ-160

Пароструменеві насоси підрозділяють на паромасляні й парортутні [4]. Принцип роботи пароструменевого насоса (рис. 3.4) полягає в наступному: робоча рідина "1" нагрівається кип'ятильником "8". Пари, що утворяться при цьому, по паропроводу "6" надходять у сопла "5" і з великою швидкістю випливають із них. Відкачуємий газ захоплюється струменями пари з послідовно розташованих сопел "3", "4" паропроводи й подається по трубопроводу "7" у форвакуумний насос. Пари масла, потрапляючи на охолоджувану водою стінку "2" корпуси насоса, конденсуються; конденсат стікає в кип'ятильник, де знову випаровується. Для зменшення втрат робочої рідини через випускний патрубок на виході з нього встановлена охолоджувана водою пастка (МР-151.21.0107.03.02.В1).

Дифузійні насоси застосовують для відкачки вакуумних систем до залишкових тисків від 10^{-1} до 10^{-7}Па й нижче. При таких тисках довжина вільного шляху молекул відкачуємого газу практично завжди більше діаметра впускного отвору насоса, тому в ньому виникає молекулярний режим витікання газу. При тепловому русі через впускний отвір насоса молекули газу направляються до парового струменя. Механізм видалення газу в дифузійних насосах обумовлений дифузійними процесами.

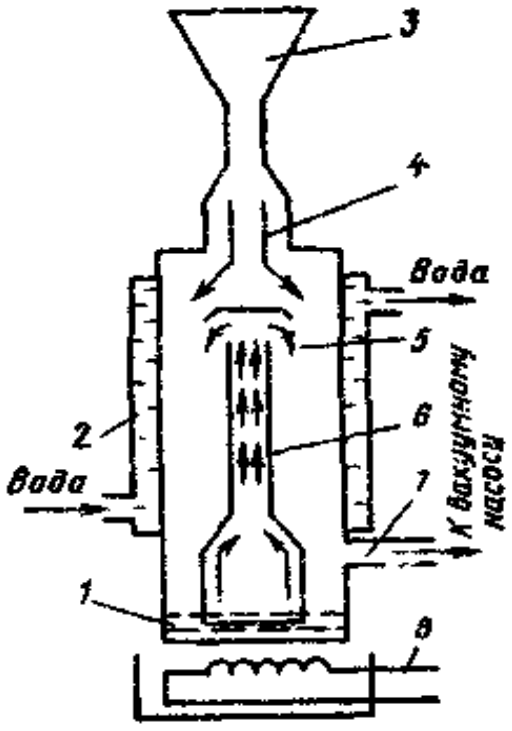


Рисунок 3.4 – Схема пароструменевого насосу

Під дією різниці концентрацій газу над паровим струменем й у струмені (концентрація газу в струмені поблизу сопла дуже мала) відбувається дифузія газу в струмінь. Потрапивши в струмінь, молекули газу одержують імпульси від молекул пари в напрямку парового потоку, і несуться разом зі струменем до стінки, корпуса насоса: при цьому пара конденсується на

охолоджуваній стінці, а газ, стисків у струмені до випускного тиску щабля, перетікає уздовж стінки в простір над наступним щаблем насоса.

Поряд із прямою дифузією газу відбувається й зворотна дифузія в струмінь із боку форвакууму. Однак у цьому випадку молекули газу, що рухаються у зворотному напрямку, зіштовхуються з молекулами, що рухаються їм назустріч, пари й відтискуються назад убік форвакууму; лише невелика частина молекул може продифундувати через струмінь у зворотному напрямку. Число молекул газу, що дифундують через струмінь у зворотному напрямку, при оптимальному режимі роботи насоса дуже мало в порівнянні із числом молекул газу, що дифундують у струмінь із боку впускного отвору насоса. Однак у деяких випадках, наприклад при відкачці легких газів насосом, режим роботи якого оптимальний для відкачки повітря, вплив зворотної дифузії може помітно позначатися на характеристиках насоса.

Дифузійні насоси є багатоступінчастими системами із соплами зверненого зонтичного типу. Залежно від роду робочої рідини, використовуваної в, насосі, сучасні дифузійні насоси підрозділяють на паромасляні й пароротутні. У паромасляних насосах використають різні робочі рідини органічного походження з низьким тиском пари при нормальній температурі. Як правило, це – суміші фракцій з різними тисками пари й молярних мас [4].

У робочому діапазоні тисків швидкість дії дифузійного насоса не залежать від впускного тиску (рис. 3.5, ділянка II) і зменшується в області низьких (ділянка I) і високих (ділянка III) тисків.

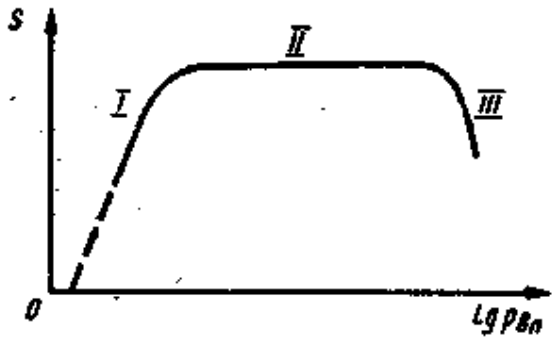


Рисунок 3.5 – Залежність швидкості дії дифузійного насоса від впускного тиску

Зменшення швидкості дії при низьких тисках обумовлене тим, що в цій області проявляється зворотна дифузія газу через паровий струмінь. Крім того, істотну роль починають грати гази, що наносяться з паровим струменем з кип'ятильника насоса й виділяються стінками насоса. При конденсації парового струменя на стінках насоса деяка кількість газу, стислого нею до підвищеного тиску (особливо й області форвакууму), розчиняється в конденсаті й попадає разом з газом у кип'ятильник насоса. Цей газ поряд зі зворотною дифузією й газовиділенням стінок насоса значною мірою визначає граничний залишковий тиск p_0 насоса й зменшує швидкість дії S. При $p = p_0$ швидкість дії $S = 0$.

Із збільшенням впускного тиску маса газу, що видаляється насосом з відкачуємого сосуду, збільшується в порівнянні з масою газу, що повертається внаслідок протидифузії, газовиділення і зі струменем з кип'ятильника. Коли ці маси стають непорівнянні, швидкість дії перестає залежати від впускного тиску (ділянка II).

Зі збільшенням впускного тиску підвищується випускний тиск насоса, регламентований швидкістю дії форвакуумного насоса. Збільшення випускного тиску приводить до виникнення стрибка ущільнення в струмені, переміщенню його до сопла й відриву струменя від стінок насоса, що супроводжується перетоком газу з області форвакууму в область високого вакууму. При цьому швидкість дії насоса зменшується до швидкості дії форвакуумного насоса. Швидкість дії насоса залежить від потужності нагрівача, роду відкачуємого газу і його температури, роду робочої рідини.

Механізм захоплення газу струменем у високовакуумному насосі обумовлений двома основними процесами (дифузією газу в струмінь, що залежить від щільності струменя, і переносом газу струменем, що залежить від швидкості струменя), тому швидкість дії насоса залежить від сукупної зміни зазначених параметрів. Якщо, наприклад, збільшувати швидкість парового потоку $V_п$ при незмінній щільності $p_п$, то швидкість, дії збільшиться; якщо збільшувати щільність $p_п$ при незмінній швидкості $V_п$, то швидкість дії зменшиться. При одночасному збільшенні $p_п$ й $V_п$ максимум швидкості дії відповідає деякому оптимальному співвідношенню

між $p_п$ й $V_п$. Тому що ці параметри пропорційні потужності нагрівача, то крива залежності швидкості дії від цієї потужності має максимум (рис. 3.6).

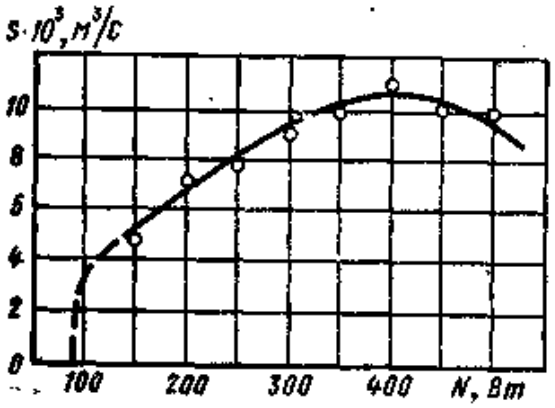


Рисунок 3.6 – Залежність швидкості дії дифузійного насоса від потужності нагрівача

Аналіз рівняння дифузії показує, що швидкість дії дифузійного насоса повинна бути обернено пропорційна кореню квадратному з молярної маси газу, співвідношення (3.4):

$$\frac{S_1}{S_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \qquad (3.4)$$

Однак внаслідок зворотної дифузії молекул газу через струмінь із боку форвакууму в область високого вакууму без зміни режиму роботи насоса співвідношення (3.4) практично ніколи не досягається [4].

Для досягнення найбільшої швидкості дії дифузійного насоса по газах з різними молярними масами необхідно встановлювати оптимальний режим підігріву насоса для відкачки кожного газу. Залежно від конструкції насоса відношення оптимальних значень швидкості дії для різних газів може тією чи іншою мірою наближатися до обумовленого рівнянням (3.5).

$$\frac{N_{opt_г}}{N_{opt_воз}} = 0{,}78 + \frac{1{,}17}{\sqrt{M_г}}, \qquad (3.5)$$

де $N_{opt_г}$ й $N_{opt_воз}$ – потужності нагрівача, оптимальні для відкачки відповідно даного газу й повітря;

$M_г$ – молярна маса газу.

Для вибору оптимальної потужності нагрівача насоса при відкачці різних газів можна із задовільної для практики точністю користуватися емпіричним рівнянням.

На практиці часто необхідно відкачувати із вакуумних систем суміші різних газів. Якщо склад суміші відомий, то швидкість дії й продуктивність насоса для суміші газів можна розрахувати із задовільної для практики точністю по формулах, отриманим зі звичайних співвідношень для газових сумішей. Якщо значення швидкості дії насоса для окремих газів, що входять у суміш, невідомі, то для орієнтовних розрахунків по формулах (3.6) і (3.7) значення S_i можна визначити з рівняння (3.4).

$$S_{opt_см} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i \cdot p_i \cdot M_i)}{\sum_{i=1}^{n}(c_i \cdot M_i)\sum_{i=1}^{n} p_i}; \qquad (3.6)$$

$$Q_{opt_см} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i \cdot p_i \cdot M_i)}{\sum_{i=1}^{n}(c_i \cdot M_i)}, \qquad (3.7)$$

де $S_{opt_см}$ й $Q_{opt_см}$ – швидкість дії й продуктивність насоса для суміші газів при оптимальній потужності нагрівача;

S_i – швидкість дії насоса для і-го газу, що входить у суміш;

p_i – парціальний тиск газу в суміші;

M_i – молярна маса газу;

c_i – об'ємна частка газу в суміші.

Оптимальну потужність нагрівача насоса при відкачці сумішей газів вибирають за допомогою емпіричної залежності (3.8):

$$\frac{N_{opt_см}}{N_{opt_воз}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{N_{i_opt_г}}{N_{opt_воз}} \cdot c_i, \qquad (3.8)$$

де $\frac{N_{i_opt_г}}{N_{opt_воз}}$ – відношення, визначене по рівнянню (3.5).

Швидкість дії насоса прямо пропорційна кореню квадратному з абсолютної температури відуачуємого газу. Зміни температури відуачуємого газу, які спостерігають зазвичай на практиці, незначно впливають на швидкість дії насоса. Так, щоб швидкість дії збільшилася на 10%, температуру відуачуємого газу варто підвищити з 293 до 353 К.

Швидкість дії залежить від роду робочої рідини. Якщо в дифузійний насос заливати різні робочі рідини, то при однаковій потужності нагрівача швидкість дії насоса буде істотно змінюватися. Залежність швидкості дії насоса від роду робочої рідини можна пояснити тим, що рідини мають різні термодинамічні й фізико-хімічні характеристики, що обумовлюють різні режими роботи кип'ятильника, витікання пари із сопла й відповідно різні структури струменів, а також різного кількісного співвідношення при взаємодії молекул відкачуємого газу з молекулами пари. Оскільки число факторів, що обумовлюють вплив робочої рідини на роботу насоса велике, залежність швидкості дії від роду робочої рідини не можна виразити простим співвідношенням. Крім того, для багатьох робочих рідин (вакуумних масел) невідомі деякі важливі характеристики, наприклад показник адіабати k, що визначає залежність режиму витікання пари із сопла від роду робочої рідини. У зв'язку із цим теоретичне дослідження залежності швидкості дії від роду робочої рідини ускладнене. До вибору робочої рідини для насоса підходять звичайно із практичної точки зору. Так, якщо у відкачуємій системі неприпустима присутність вуглеводнів, застосування органічних сполук як робочої рідини виключається; у таких випадках звичайно використають ртуть. Якщо потрібно одержати більш низький граничний залишковий тиск без застосування низькотемпературних пасток, то як робоча рідина використають вакуумне масло з низьким тиском пари.

Конструювання й відпрацьовування насоса виконують звичайно для певної робочої рідини, тому характеристики насоса оптимальні для цієї рідини. Для роботи на іншій робочій рідині необхідно підбирати (зміною потужності) новий оптимальний режим роботи насоса.

Міграція пар робочої рідини з насоса у відкачуємий сосуд небажана з ряду причин (наприклад, забруднення відкачуємої системи, втрати робочої рідини в насосі). Крім того, міграція пар масла зі струменя насоса у відкачуємий сосуд може в значній мірі змінювати залишковий тиск у системі.

Зворотний потік пар масла з насоса у відкачуєму систему для більшої частини насосів становить від 0,1 до 0,01% потоку пари, що витікає з верхнього сопла насоса; у середньому по перетині вхідного отвору зворотний потік становить від $1 \cdot 10^{-2}$ до $5 \cdot 10^{-2}$мг/(год·см^2).

При сталому режимі роботи насоса зворотний потік масла практично постійний. Збільшення впускного тиску в широкому діапазоні робочих тисків не приводить до зміни зворотного потоку масла. Зворотний потік практично не міняється в діапазоні впускних тисків від 10^{-4} до 10^{-2}Па, а при тиску більше 10^{-2}Па зменшується (рис. 3.7). Це пояснюється тим, що напуск повітря в насос до тисків більше 10^{-2}Па приводить до переходу молекулярного режиму плину газу в молекулярнов'язкістний, при якому ймовірність повернення молекул масла в насос зростає в результаті збільшення числа зіткнень із молекулами, що рухаються назустріч, газу. Однак варто враховувати, що підвищення впускного тиску до значення, при якому досягається найбільший випускний тиск насоса, може привести до порушення режиму роботи насоса; при цьому наступне відновлення нормального режиму роботи супроводжується значним збільшенням, зворотного потоку масла.

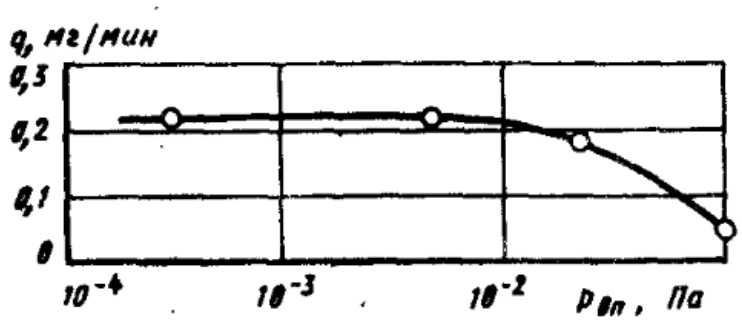


Рисунок 3.7 – Залежність потоку масла з дифузійного насоса у відкачуєму систему від впускного тиску

Підвищена міграція пар робочої рідини відбувається при пуску й зупинці насоса. Після включення нагрівача (протягом 15 хвилин) зворотний потік дорівнює нулю (рис. 3.8), тому що відбувається розігрів кип'ятильника, і температура масла ще низька (цей період відповідає підведенню теплоти, що компенсує теплові втрати в насосі). Далі температура масла швидко підвищується, із сопла минає несформований ще дозвуковой потік, що приводить до різкого збільшення зворотного потоку масла з насоса. Через якийсь час потік формується, швидкість його стає надзвуковий, а зворотний потік масла різко зменшується до мінімального значення. Після цього температура в кип'ятильнику ще якийсь час підвищується до робочої, і зворотний потік масла зростає в результаті збільшення щільності пари на виході із сопла. Далі при сталій робочій температурі пари в кип'ятильнику зворотний потік практично не міняється. При вимиканні нагрівача насоса в міру зниження температури пари в кип'ятильнику зворотний потік масла спочатку убуває внаслідок зменшення щільності парового струменя; потім по досягненні температури в кип'ятильнику, при якій статичний тиск пари на виході із сопла стає менше тиску газу на вході в насос, відбувається стрибок ущільнення в соплі. При цьому швидкість парового струменя стає дозвуковой, а щільність зростає, і зворотний потік масла різко збільшується. Після переміщення фронту стрибка ущільнення в критичний перетин сопла зворотний потік масла починає убувати внаслідок зменшення щільності потоку в міру зниження, температури пари в кип'ятильнику.

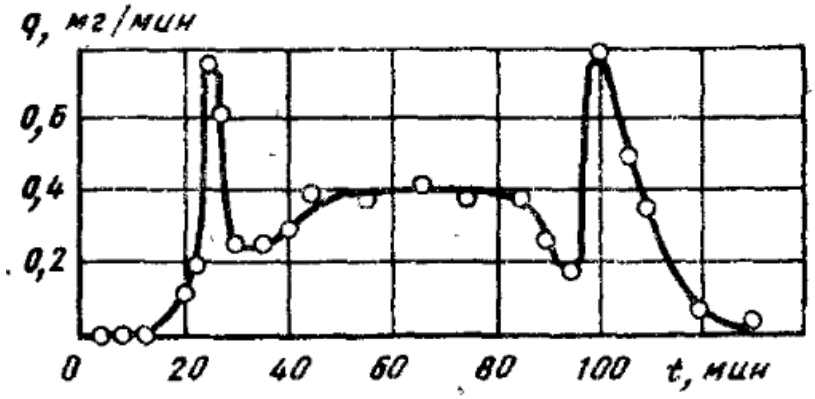


Рисунок 3.8 – Крива зміни потоку масла з дифузійного насоса в процесі циклу (пуск-робота-зупинка)

Описаний характер зміни зворотного потоку пар робочої рідини з насоса при значному збільшенні впускного тиску під час пуску й зупинки насоса часто є причиною забруднення відкачуємої системи робочою рідиною, навіть якщо міграція пари з насоса при нормальному сталому режимі роботи дуже мала.

Схема вакуумного дифузійного паромасляного насоса НВДМ-160 наведена на рис. 3.9.

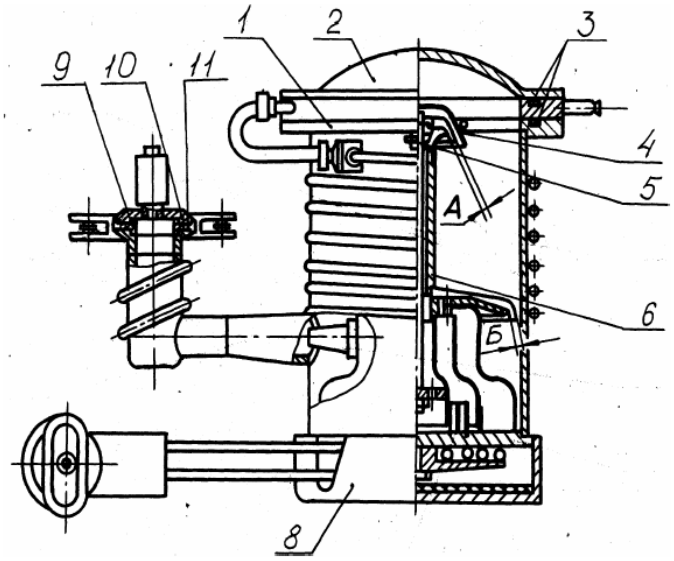


Рисунок 3.9 – Насос вакуумний дифузійний паромасляний НВДМ-160

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

Технічні характеристики:

1 Швидкість дії в діапазоні робочих тисків від $6{,}6\cdot10^{-7}$ до $1{,}3\cdot10^{-1}$Па – 700±100л/с;

2 Граничний залишковий тиск, при температурі навколишнього повітря:

– від плюс 10 до плюс 25^0С – не більш $6{,}6\cdot10^{-7}$Па ($5\cdot10^{-7}$мм рт.ст.),

– від плюс 25 до плюс 45^0С – не більш $6{,}6\cdot10^{-6}$Па ($5\cdot10^{-6}$мм рт.ст.);

3 Найбільший випускний тиск – не менше 33,3Па (0,25мм рт.ст.);

4 Споживана потужність при номінальній напрузі 220В – 800Вт;

5 Умовний прохід на вході – 160мм;

6 Габаритні розміри: висота – 380мм, довжина – 425мм, ширина – 260мм;

7 Маса – 16кг.

3.3 Електронні іонізаційні вакуумметри

При виробництві підкладок для мікроелектронних пристроїв, оптичних компонентів, а також у ході проведення хімічних й інших технологічних процесів необхідно вимірювати дуже низькі тиски. Термін вакуум означає тиск нижче атмосферного, але, як правило, він уживається у випадках практичної повної відсутності тиску газів. Абсолютний вакуум одержати неможливо, навіть у космічному просторі немає жодної зони, де б повністю була відсутня матерія [6].

Вакуум можна вимірювати й традиційними датчиками, при цьому будуть реєструватися негативні значення тиску відносно атмосферного, але це дуже неефективний підхід. Звичайні датчики тиску не можуть визначати дуже низькі концентрації газів через низьке відношення сигнал/шум. На відміну від традиційних датчиків тиску вимірювачі вакууму працюють на зовсім інших принципах, які ґрунтуються на деяких фізичних властивостях молекул газів і полягають у визначенні числа молекул у заданому обсязі. До таких фізичних властивостей відносяться теплопровідність, в'язкість, іонізація й інші.

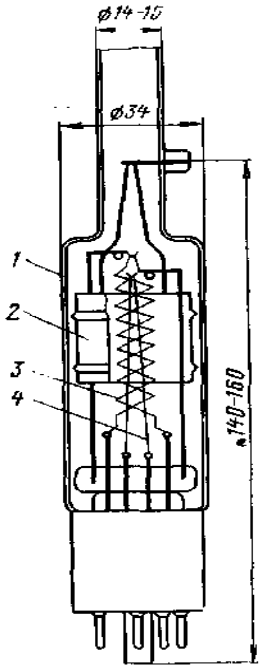


Рисунок 3.10 – Електродний іонізаційний манометричний перетворювач

Робота іонізаційних манометричних перетворювачів основана на іонізації газу електронним потоком і вимірі іонного струму, по величині якого судять про тиск [18].

Конструкція і принцип дії електронного іонізаційного манометричного перетворювача показана на рисунку 3.10. У скляному балоні перетворювача "1" змонтована електродна система, що складається з колектора іонів "2", анодної сітки "3" і прямонакального катоди "2". На

анодну сітку щодо катода подається напруга плюс 200В, а на циліндричний колектор іонів мінус 50В. Анодна сітка перетворювача виконана з вольфрамового дроту діаметром 0,2мм у вигляді біфілярної спіралі. При прогріві перетворювача для обезгазування по спіралі пропускається струм.

Вольфрамовий катод перетворювача випускає електрони, які рухаються до анода. Частина електронів пролітає крізь анодну сітку й попадає в простір, укладений між анодом і колектором. Тому що колектор має негативний потенціал щодо катода, електрони не можуть потрапити на колектор. У точці простору з нульовим потенціалом електрони зупиняються й починають рух у протилежному напрямку – до позитивно зарядженої анодної сітки. У результаті в сітки безупинно коливаються електрони, причому перш ніж потрапити на анод, електрони роблять у середньому до п'яти коливань. При зіткненні електронів з молекулами газу відбувається їхня іонізація. Позитивні іони, що утворилися, збираються на колекторі, що перебуває під негативним потенціалом, створюючи в його ланцюзі іонний струм [18]. Іонний струм I_i пропорційний струму електронів I_e й тиску $p_м$ у порожнині манометричного перетворювача визначається формулою (3.9):

$$I_i = s_м I_e p_м, \tag{3.9}$$

де $s_м$ – чутливість перетворювача, $Па^{-1}$.

Для одержання однозначної залежності іонного струму від тиску електронний іонізуючий струм перетворювача підтримують постійним. Добуток $s_м \cdot Ie$ характеризує величину іонного струму на одиницю тиску, ("струмова" чутливість).

Чутливість іонізаційних перетворювачів залежить від роду газу.

Відносна чутливість іонізаційних вакуумметрів є величиною адитивною і для суміші газів може бути визначена по рівнянню (3.10):

$$\alpha_{г.см} = \alpha_{г1}\beta_{г1} + \alpha_{г2}\beta_{г2} + \alpha_{г3}\beta_{г3} + \ldots, \tag{3.10}$$

де $\alpha_{г1}, \alpha_{г2}, \alpha_{г3}\ldots$ – відносні чутливості; $\beta_{г1}, \beta_{г2}, \beta_{г3}\ldots$ – відносні концентрації газів.

Нижня межа робочого діапазону електронних іонізаційних манометричних перетворювачів визначається фоновим струмом, що не залежить

від тиску. Це насамперед фоновий струм фотоелектронної емісії з колектора й струм іонно-електронної десорбції з анода. Фоновий струм фотоелектронної емісії утвориться при опроміненні колектора іонів м'яким рентгенівським випромінюванням з анода, що виникає при бомбардуванні його електронним потоком. Фоновий струм фотоелектронної емісії визначається рівнянням (3.11):

$$I_{ф.е.} = k_{ф.е.} \cdot I_e \cdot Z_a \cdot U_{а.к.}^n \cdot \varphi, \qquad (3.11)$$

де $k_{ф.е.}$ – коефіцієнт пропорційності; I_e –струм електронів на анод; Z_a – атомний номер матеріалу анода; n – показник ступеня; за різним даними його величина перебуває в межах від 1,4 до 2,0; $U_{а.к.}$ – напруга на аноді щодо катода; φ – тілесний кут, під яким колектор проглядається з анода.

Нижня теоретична межа вимірюваних тисків $p_{м.мин}$, обумовлена умовою $I_i=I_{ф.е.}$ визначається формулою (3.12):

$$p_{мин} = \frac{R_{ф.е.}}{S_м}, \qquad (3.12)$$

де $S_м$ – чутливість; $R_{ф.е.}$ – фонова постійна.

Фонова постійна $R_{ф.е.}$, обумовлена фоновим струмом фотоелектронної емісії, визначається формулою (3.13):

$$R_{ф.е.} = k_{ф.е.} \cdot Z_a \cdot U_{а.к.}^n \cdot \varphi \qquad (3.13)$$

Для зниження фонової фотоелектронної постійної зменшують насамперед тілесний кут φ, для цього колектор перетворювачів надвисоковакуумного діапазону виконується у вигляді тонкої нитки або стрижня.

Можливе ще одне джерело значної похибки при вимірі низьких тисків. Електронний потік на анод поряд з десорбцією газу з його поверхні робить часткову його іонізацію. Разом з іонами з газової фази іони десорбуючогося газу також надходять на колектор і спотворюють відлік тиску.

Забруднення анодної сітки може бути як внутрішнього характеру за рахунок дифузії домішки з металу під час прогріву, так і зовнішнього – при сорбції поверхнею анода деяких компонентів газової атмосфери.

При тисках вище 10^{-5}Па ефектами іонно-електронної десорбції можна знехтувати. При більш низьких тисках зниження струмів іонної десорбції вимагає потужного й тривалого прогріву анодної сітки перетворювача.

3.3.1 Електронний іонізаційний перетворювач ПМИ-12-8

Для виміру тиску до 10^{-8}Па промисловістю випускається серія електронних іонізаційних манометричних перетворювачів з осьовим колектором іонів (МР-151.21.0107.04.01.ВЗ). Колектор іонів перетворювачів ПМИ-12-8 (рис. 3.11) встановлений по осі анодної сітки й виконаний у вигляді тонкого вольфрамового стрижня, що має в основі діаметр 0,1мм і поступово тоншає до вершини [18].

Перетворювач ПМИ-12-8 має змінний катод, розташований із зовнішньої сторони анодної сітки. Як й у перетворювачі ПМИ-2, електрони коливаються по обох сторони анодної сітки. На колектор попадають тільки ті іони, які утворилися всередині неї. Анодна сітка "2" перетворювача ПМИ-12-8 може бути обезгазована електронним бомбардуванням або пропущенням струму по ній. В останньому випадку вона може бути нагріта до 1100В.

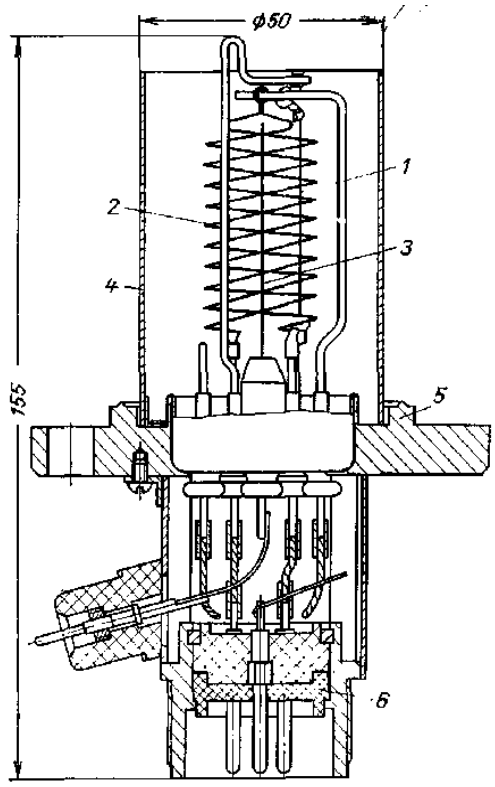


Рисунок 3.11 – Електронний іонізаційний перетворювач ПМИ-12-8
1 – катод; 2 – анодна сітка;
3 – колектор; 4 – екран;
5 – фланець; 6 – цоколь.

Електроди перетворювача ПМИ-12-8 розміщаються безпосередньо у вакуумному об’ємі [4]. Для виключення впливу навколишніх металевих конструкцій вакуумної системи на метричні характеристики перетворювача й впливу різного роду наведень електродна система оточена металевим екраном "4". У перетворювачі ПМИ-12-8 екран електрично з'єднаний з корпусом

(фланцем) перетворювача. При тисках вище 10^{-2}Па екран відключається від загального мінуса й використається як анод. Колектором іонів служить у цьому випадку анодна сітка перетворювача. Основні технічні характеристики іонізованого датчика ПМИ-12-8 наведені в табл. 3.2 (МР-151.21.0107.04.02.ТБ).

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

Найменування параметра	Значення
Струм електронів (I_e), мА	5
Напруга між анодом і катодом ($U_{а.к.}$), В	200
Напруга між іонним колектором і катодом ($U_{к.к.}$), В	–100
Чутливість (К), $Па^{-1}$	$5{,}6 \cdot 10^{-2}$
Діапазон вимірювання, Па	$7 \cdot 10^{-8}$ ... 10^{-3}
Габаритні розміри, мм	Ø90х150
Маса, кг	0,6
З’єднання з вакуумною системою	Фланцеве (D_y50)

3.4 Мікроконтролер ATmega169

Характеристики:

1. Розвита RISC архітектура: 130 команд, що виконуються, більшість за один машинний такт; 32×8 робочих регістра загального призначення; цілком статичний режим роботи; продуктивність до 4 MIPS при 4 Мгц; вбудований двох-тактовий помножувач.

2. Енергонезалежна пам'ять програм і даних: 16Кбайт внутрішньої самопрограмувальної FLASH пам'яті з кількістю циклів перепрограмування до10000; опціонна секція з незалежними ключовими бітами, внутрішнього програмування вбудованої, правильне читання в процесі запису; 512 байт EEPROM із припустимою кількістю циклів стирання запису до 100000; 1Кбайт внутрішньої SRAM; програмувальний ключ захисту програм.

3. JTAG (IEEE1149.1 сумісний) інтерфейс:

- сканування пам'яті відповідно до JTAG стандарту;

- вбудована підтримка наладчика;

- програмування FLASH, EEPROM, охоронних і ключових біт через JTAG інтерфейс.

4. Периферійні функції:

- 4×25 LCD драйвер;

- два 8-бітних таймери-лічильника з програмувальним переддільником і режимом порівняння;

- один 16-бітний таймер/лічильник із програмувальним переддільником, режимом порівняння і захоплення;

- лічильник реального часу з програмувальним генератором;

- Master/Slave SPI послідовний інтерфейс;

- універсальний послідовний інтерфейс із виявленням початку посилок;

- програмуємий Watchdog таймер із програмувальним генератором;

- вбудований аналоговий компаратор;

- переривання по зміні потенціалів виводів.

5. Спеціальні функції:

- Reset по включенню харчування і вимикання при зниженні напруги живлення;

- внутрішній калібрований генератор;

- зовнішні і внутрішні джерела переривання;

- п'ять економічних режимів: Idle, придушення шумів АЦП, економічний, Выкл.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.

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

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

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

Port B (PB7 – PB0) – 8-разрадний двонаправлений порт з вбудованими навантажувальними резисторами, що забезпечують струм 20мА. При використанні виводів порту як входи і установці зовнішнього сигналу в низький стан, струм буде протікати тільки при підключених вбудованих навантажувальних резисторах.

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

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

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

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

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

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

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

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

Виводи порту F підключені через аналоговий мультиплексор до аналогово-цифрового перетворювача. Виводи порту F, крім виконання функцій аналогових входів, можуть бути використані і як цифрові входи. Це дозволяє

користувачеві одночасно використовувати частину виводів порту F як цифрові входи, а іншу частину – як аналогові входи.

Електрична принципова схема мікроконтролера ATmega169 наведена на кресленні (МР-151.21.0107.05.00.Е3).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Vcc – напруга живлення.

GND – земля.

Узагальнений алгоритм роботи мікропроцесорної системи наведений на (МР-151.21.0107.08.01.ТК).

4 РОЗРАХУНКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ВИРОБУ

4.1 Кореляційно-регресійний аналіз

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

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

Інакше, коли за значеннями незалежних величин можна установити лише деяку "середню" тенденцію в значеннях залежної змінної. Подібного роду зв'язку називають кореляційними, а задачею встановлення математичної форми кореляційного зв'язку займається регресійний аналіз [1]. Залежна змінна в при цьому розглядається як випадкова величина, а незалежні змінні можна прямо або побічно контролювати [МР-8091402.09.0125.06.01.ТК]. Кореляційний аналіз вивчає спільний розподіл усіх вимірюваних змінних з аналізом точності оцінювання одних величин через інші.

Під час проведення експерименту отримані значення вихідного сигналу датчика I_i та потужності нагрівального елементу насосу (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1 – Експериментальні дані

i	x_i	y_i	i	x_i	y_i	i	x_i	y_i
1	3,16	684	18	2,39	708	35	3,76	745
2	3,29	687	19	2,96	708	36	1,76	673
3	2,32	651	20	2,69	727	37	2,8	716
4	3,12	674	21	1,91	688	38	3,2	701
5	1,87	672	22	3,4	701	39	1,94	665
6	2,59	671	23	1,13	666	40	1,47	675
7	4,16	781	24	4,05	753	41	3,4	712
8	1,05	620	25	4,49	755	42	2,7	710
9	1,81	688	26	4,27	715	43	1,3	647
10	2,71	689	27	3,3	731	44	3,04	686
11	2,89	731	28	4,46	732	45	1,47	628
12	1,45	633	29	3,5	701	46	1,93	688
13	3,87	770	30	3	699	47	1,86	675
14	3,84	768	31	3,92	715	48	1,5	626
15	1,12	678	32	1,3	654	49	4,08	707
16	4,16	769	33	1,16	668	50	2,06	653
17	3,69	694	34	1,38	686	-	-	-

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

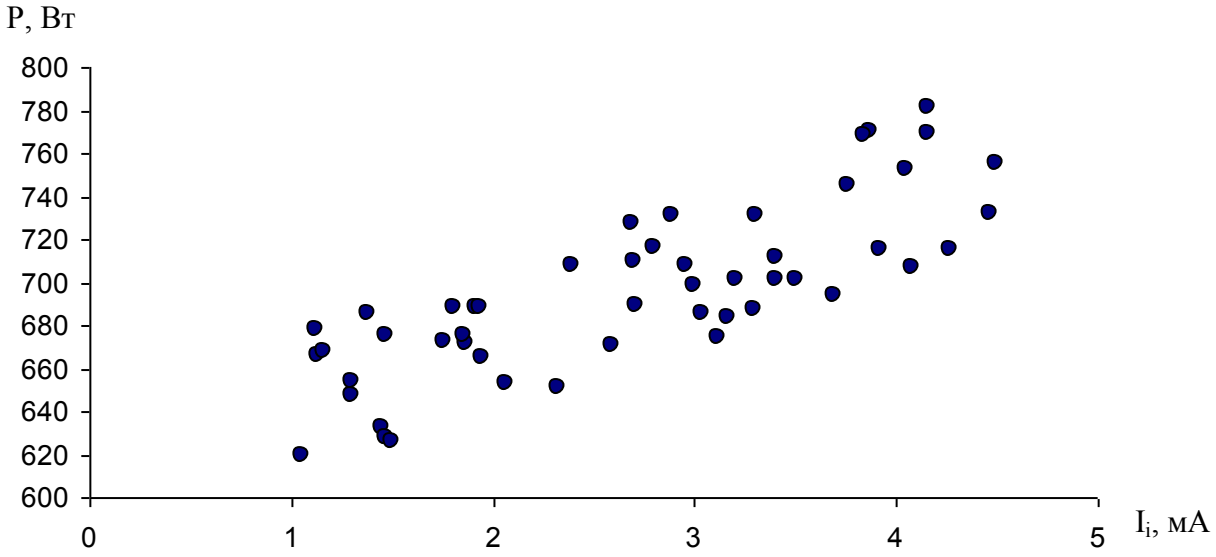


Рисунок 4.1 – Кореляційне поле статистичних даних

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

Нехай залежність між х и у має вигляд (4.1):

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

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

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

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

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

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

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

де ε_i – незалежні і розподілені так само, як е.

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

Як ми вже знаємо, кожна задача оцінювання зв'язана з деяким критерієм якості. У викладається нами теорії таким критерієм є критерій найменших квадратів: $\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i^2 - \min$.

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

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

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

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

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

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

Після перетворень одержуємо систему (4.7):

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

Позначимо вибіркові середні:

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

$$\bar{x} = \frac{1}{50} \cdot \sum_{i=1}^{50} x_i = 2{,}69, \qquad \bar{y} = \frac{1}{50} \cdot \sum_{i=1}^{50} y_i = 695,$$

$$\overline{\bar{x}\bar{y}} = \frac{1}{50} \cdot \sum_{i=1}^{50} x_i \cdot y_i = 1905{,}29, \qquad \overline{x^2} = \frac{1}{50} \cdot \sum_{i=1}^{50} x^2{}_i = 8{,}33.$$

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

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

а її рішення (шукані оцінки коефіцієнтів рівняння регресії) буде (4.9) [1]:

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

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

$$\hat{a}_0 = \frac{8{,}33 \cdot 695 - 1905{,}29 \cdot 2{,}69}{8{,}33 - 2{,}69^2} = 615{,}18,$$

$$\hat{a}_1 = \frac{1905{,}29 - 2{,}69 \cdot 695}{8{,}33 - 2{,}69^2} = 29{,}81.$$

Пряма регресії має вигляд (рисунок 4.2), обчислюється за формулою (4.10):

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

$$\hat{y}(x) = 615{,}18 + 29{,}81 \cdot x.$$

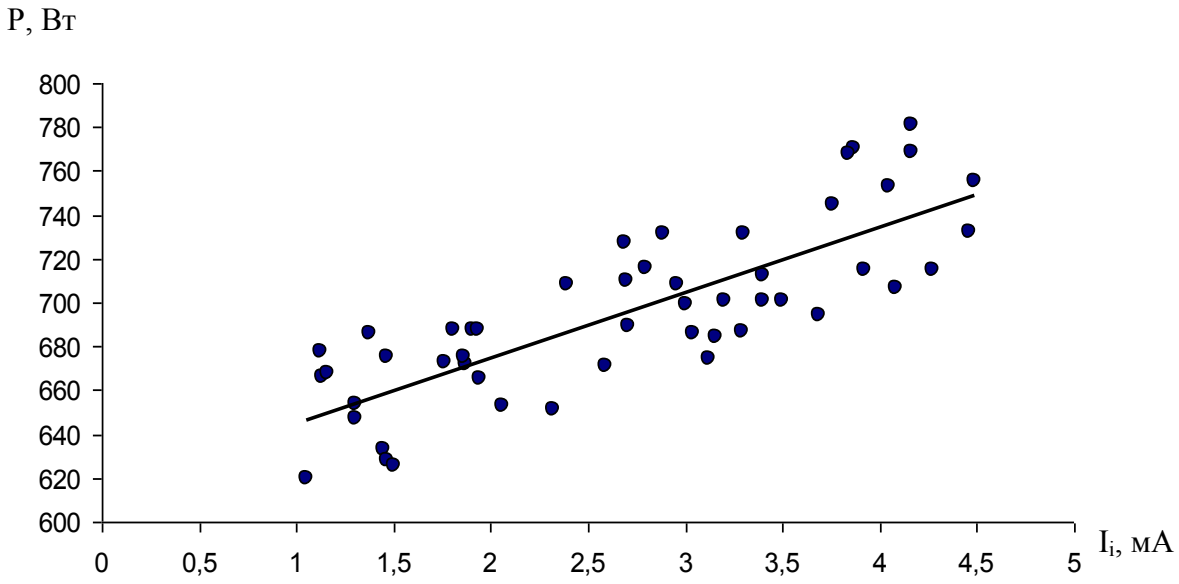


Рисунок 4.2 – Кореляційне поле статистичних даних і пряма регресії

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

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

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

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

$$\bar{r} = \frac{1905{,}29 - 2{,}69 \cdot 695}{\sqrt{1{,}07} \cdot \sqrt{1463}} = 0{,}807$$

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

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

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

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

n – кількість вимірів;

k=n–2 – число ступенів вільності;

α – рівень істотності.

Якщо обчислене значення критерію Стьюдента не менше, ніж критичне значення $t_{кр}(k;a)$ [12], то знайдений коефіцієнт кореляції істотно оцінює зв'язок між змінними x та y.

$$t_{теор} = \frac{0{,}807\sqrt{50-2}}{\sqrt{1-0{,}807^2}} = 9{,}468$$

Порівнюємо з табличним значенням критичних точок розподілу Стьюдента [12], для рівня істотності α=0,05 визначаємо, що $t_{кр}(48;0{,}05)=2{,}01$.

Умова виконується: $t_{теор} = 9{,}468 > t_{кр} = 2{,}01$.

Визначимо істотність рівняння регресії, використовуючи критерій Фішера [16]. Для підтвердження істотності лінії регресії повинно виконуватись нерівність (4.13):

$$F_{теор} > F_{табл}(k_1;k_2;\alpha), \qquad (4.13)$$

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

n – кількість вимірів;

α=0,05 – рівень істотності;

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

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

$$F = \frac{\sigma_1^{\,2}}{\sigma_2^{\,2}} = \frac{\sum_{i=1}^{50} y_i^{\,2} - \frac{1}{50}\cdot\left(\sum_{i=1}^{50} y_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{50}(y_i-\bar{y})^2}\cdot\frac{50-2}{50-1} = 1{,}87$$

$$F_{теор} = 1{,}87 > F_{табл}(49;48;0{,}05) = 1{,}61$$

Таким чином рівняння регресії описує результати вимірів в 1,6 рази краще ніж середнє значення $\bar{y}$, тобто адекватно відображає результати експерименту. Істотність зв'язку в кореляційно-регресійному аналізі підтверджена.

4.2 Визначення передаточної функції об'єкта регулювання

Для побудови математичної моделі об'єкта керування використовувався метод відновлення параметрів моделі по емпіричним даним. Для цього використані експериментальні дані для дослідження об'єкта керування і побудови його математичної моделі. Іонний струм I_i пропорційний електронному струму I_e й тиску P у порожнині манометричного перетворювача. Для одержання однозначної залежності іонного струму від тиску електронний іонізуючий струм перетворювача підтримують постійним. Експериментальні дані: величина іонного струму I_i виміряна в певні моменти часу. Отримані дані були апроксимовані в середовищі наукових досліджень MatLab. Для побудови перехідного процесу використовуються значення I_i та t наведені в табл. 4.2 (МР-151.21.0107.06.01.ТК). Експериментальний перехідний процес наведено на рис. 4.3, де по осі ординат відкладена сила іонного струму I_i в міліамперах, а по осі абсцис – час у мілісекундах. При цьому на самому графіку точками позначені безпосередньо експериментальні значення, визначені в дискретні моменти часу.

Таблиця 4.2 – Значення I_i та t для побудови перехідного процесу

t, мс	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270
I_i, мА	0,35	0,5	0,8	1,2	1,6	2,1	2,5	2,8	3,1	3,4
t, мс	300	330	360	390	420	450	480	510	540	570
I_i, мА	3,7	3,9	4,1	4,2	4,3	4,4	4,45	4,5	4,5	4,5

Нормований перехідний процес представлений на рисунку 4.4.

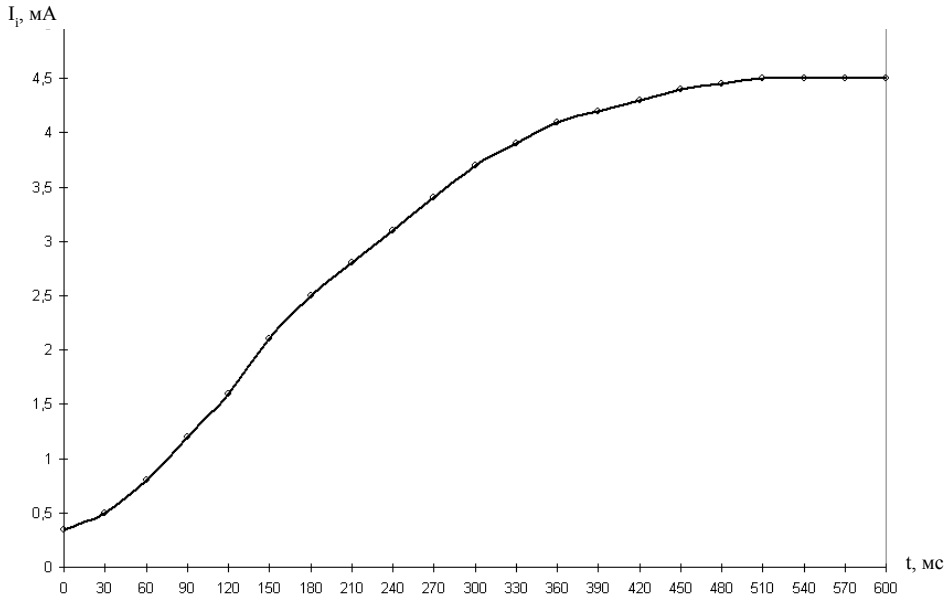


Рисунок 4.3 – Експериментальний перехідний процес

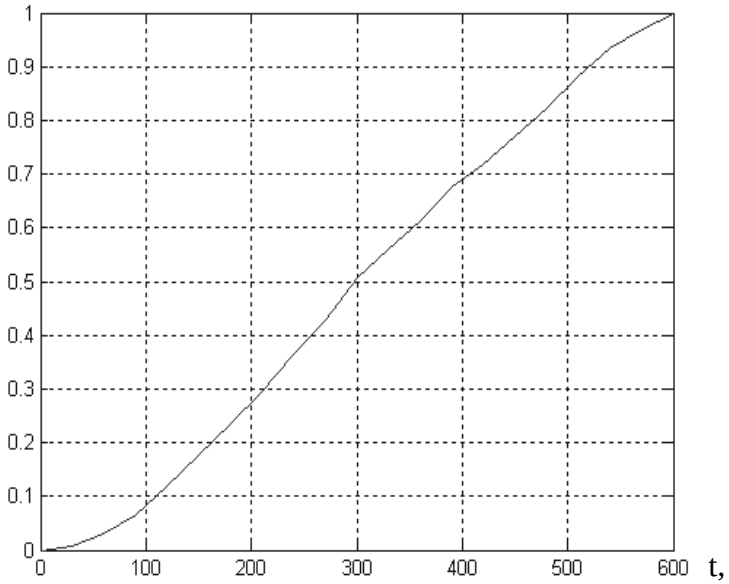


Рисунок 4.4 – Нормований перехідний процес

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

$$W(p) = \frac{ke^{-p\tau}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)^q} \qquad (4.14)$$

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

Коефіцієнт підсилення може бути визначений з наступного співвідношення:

$y_\infty(I_i) = k \cdot c, \quad де\ c = 0{,}35(мА),\ а\ y_\infty(I_i)$ – усталене значення виходу (сили струму).

Звідси одержуємо, $k = \dfrac{4{,}5}{0{,}35} = 12{,}86$.

4.2.1 Побудова математичної моделі ланки першого порядку геометричним методом

Ланка першого порядку з запізнюванням визначається за формулою [13]:

$$W(p) = \frac{k\ e^{-p\tau}}{T\ p + 1} \tag{4.15}$$

Для визначення величини запізнювання і постійної часу звернемося до графіка перехідного процесу (рис. 4.3). Для знаходження постійної часу необхідно провести дотичну до графіку (рис. 4.5).

Постійна часу T = 0,33с. Побудуємо перехідний процес для такої ланки і подивимося наскільки він збігається з експериментальним. Передаточна функція об’єкта в даному випадку має наступний вигляд:

$$W(p) = \frac{12{,}86\ e^{-0{,}02\,p}}{0{,}33p + 1} \tag{4.16}$$

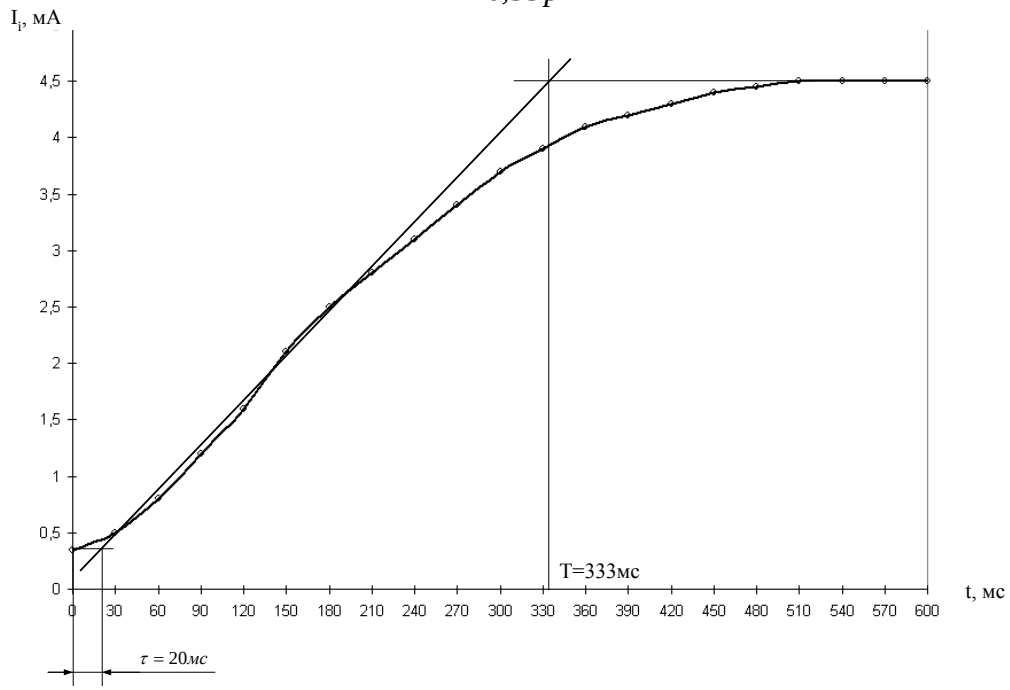


Рисунок 4.5 – Визначення постійної часу по графіку перехідного процесу

4.2.2 Побудова моделі ланки другого порядку методом площ

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

$$W(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \qquad (4.17)$$

Перехідний процес, отриманий за даною передаточною функцією (рис. 4.6).

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

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

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

S_1 = 309,8824; S_2 = 5,9162e+004

Графіки даних функцій приведені на рисунках 4.7 і 4.8 відповідно.

Тепер необхідно перевірити співвідношення S_2 / S_1^2. Якщо $(S_2 / S_1^2) < 0{,}75$, то метод площ застосовувати не можна, необхідно використовувати метод грубих площ. У нашому випадку $\frac{S_2}{S_1^2} = 0{,}6161$. Отже, застосуємо метод грубих площ. Для цього потрібно знайти точку перегину графіка перехідного процесу. Точка перегину має координати: t = 90 мс, $y(t_n)$ = 0,09.

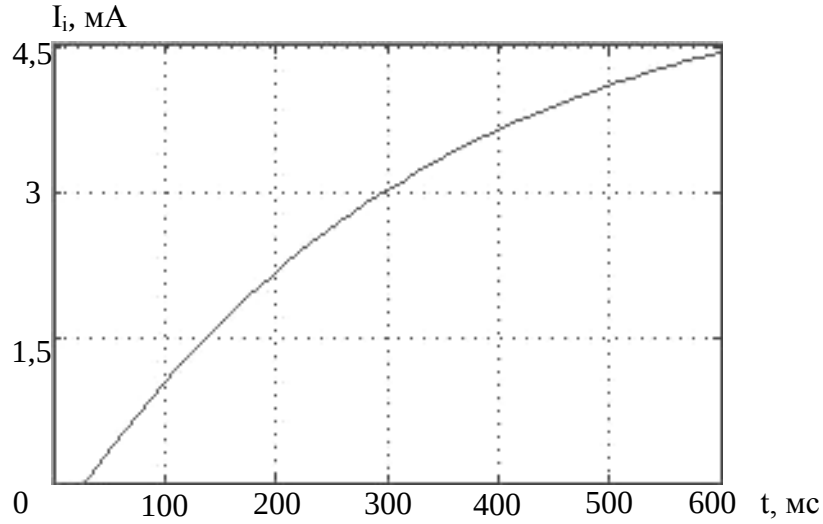


Рисунок 4.6 – Перехідний процес, отриманий за передаточною функцією першого порядку

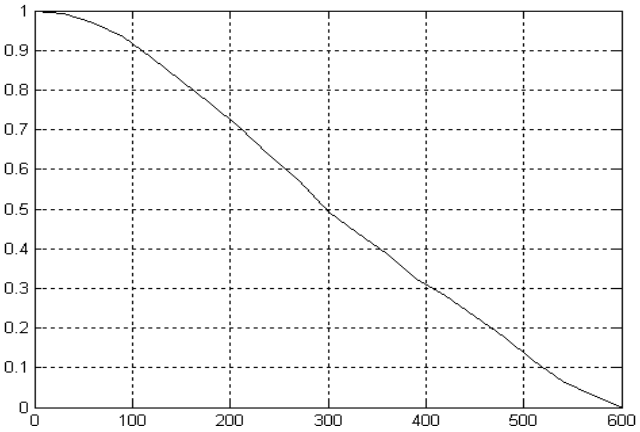


Рисунок 4.7 – Графік функції δ(t).

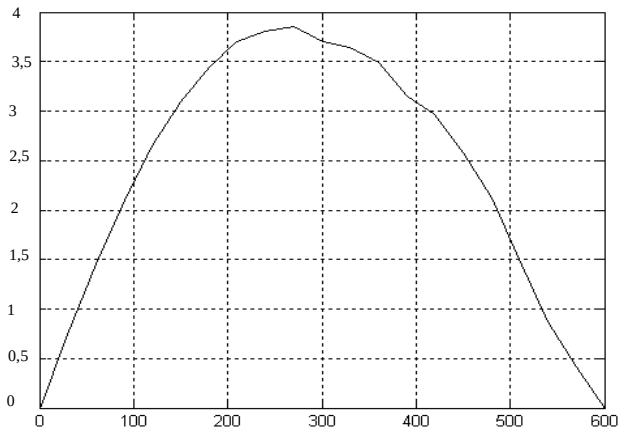


Рисунок 4.8 – Графік функції $\delta_2(t)$.

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

$$T_1 = \varepsilon(t)^{-1}\int_t^{\infty}\varepsilon(\tau)d\tau\,, \qquad (4.18)$$

де $\int_t^{\infty}\varepsilon(\tau)d\tau$ – площа кривої після точки перегину (межі інтегрування: від 90(t_n) до 600(∞)), причому, $\varepsilon(\tau)=k\cdot\delta(t)$, де $\delta(t)=1-h(t)$, отже: $T_1 = \frac{1}{k\cdot\delta(t_n)}\cdot I_n$, $T_2=S_1 - T_1$.

Таким чином, реалізуючи даний алгоритм, отримані наступні результати:

T_1 = 237,2624мс = 0,24с, T_2 = 72,6200мс = 0,07с.

Передаточна функція визначається за формулою 4.19:

$$W(p) = \frac{12{,}86}{(0{,}24p+1)(0{,}07p+1)} \qquad (4.19)$$

Графік перехідного процесу для такої ланки наведений на рис. 4.9.

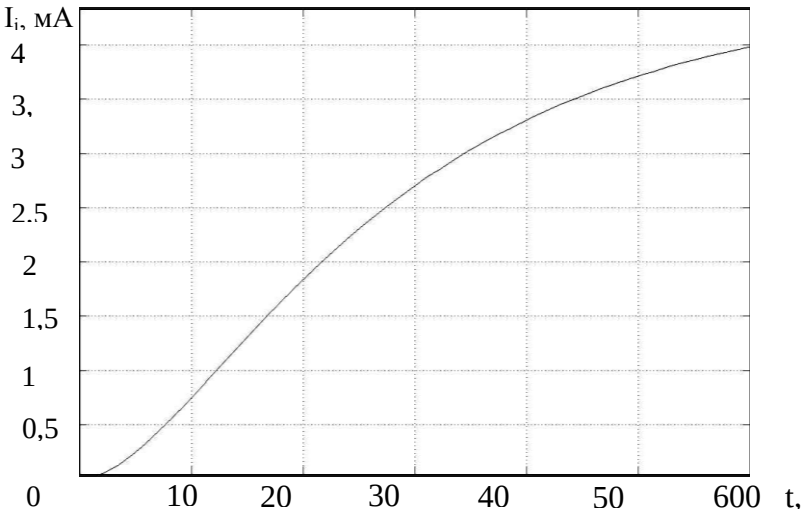


Рисунок 4.9 – Графік перехідного процесу для ланки другого порядку, розрахованого за методом площ

4.3 Вибір найкращої апроксимуючої моделі

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

$$\chi^2 = \frac{1}{k}\sqrt{\sum_{1}^{6}(yi - yi_real)^2} \tag{4.20}$$

Розрахунок похибок:

```
k = 12,86;
y_real = [24,44  60  93,33  125,5  154,44  180];
y1 = [32  72  101  122  136  146];
y2 = [31,1  73,3  106,67  131,11  148,89  160];
tmp = 0;
for i = 1:6
tmp = tmp + (y_real(i) – y1(i))2;
end
x1 = sqrt(tmp)/k
tmp = 0;
for i = 1:6
tmp = tmp + (y_real(i) – y2(i))2;
end
x2 = sqrt(tmp)/k
x1 = 0,0518
x2 = 0,0871.
```

x1 – відповідає оцінці ланки з запізнюванням; x2 – відповідає аперіодичній ланці другого порядку, розрахованій методом площ. Оскільки найменша оцінка x1 вийшла для ланки першого порядку з запізнюванням, розрахованого геометричним методом, то цю ланку було прийнято як модель розроблюваної системи. Передаточна функція об’єкта керування має вигляд:

$$W(p) = \frac{12{,}86\, e^{-0{,}02p}}{0{,}33p + 1}. \tag{4.21}$$

4.4 Дослідження системи автоматичного регулювання

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

Функціональна схема САР представлена на рисунку 4.10.

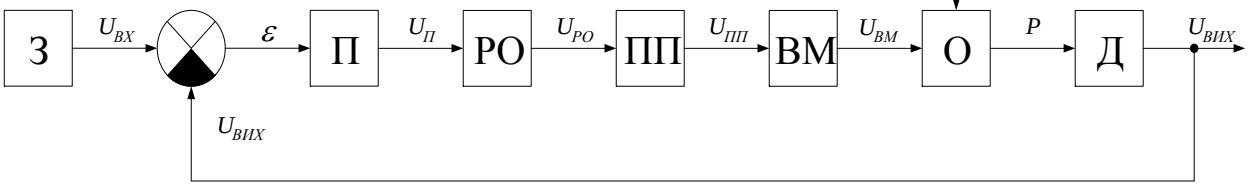


Рисунок 4.10 – Функціональна схема САР:

З – задаючий пристрій; П – підсилювач; РО – регулювальний орган (мікроконтролер ATmega169); ПП – підсилювач потужності; ВМ – виконавчий механізм – регулятор потужності (РМ1); О – об’єкт регулювання; Д – іонізуючий датчик; $U_{ВИХ}$ – вихідна напруга датчика; $U_{ВХ}$ – задаюче діяння (напруга); $U_П$ – вихідна напруга підсилювача; $U_{ВМ}$ – вихідна напруга регулятора потужності РМ1; $U_{ПП}$ – вихідна напруга підсилювача потужності; $U_{РО}$ – вихідна напруга мікроконтролера ATmega169; Р – тиск; ε – вхідна напруга.

Рівняння елементів системи (МР-151.21.0107.06.02.ТК):

- підсилювач:

$$U_П = k_П \cdot \varepsilon;$$

- регульований орган (мікроконтролер ATmega169):

$$U_{РО} = k_{РО} \cdot U_П;$$

- підсилювач потужності:

$$U_{ПП} = k_{ПП} \cdot U_{РО};$$

- виконавчий механізм:

$$T_В \cdot \frac{dU_{ВМ}}{dt} + U_{ВМ} = k_В \cdot U_{ПП};$$

- елемент порівняння:

$$\varepsilon = U_{ВХ} - U_{ВИХ}.$$

Вихідні дані:

$T_В$ = 0,03с; $T_Д$ = 0,02с; $T_О$ = 0,33 с; $k_Д$ = 0,5; $k_{РО}$ = 1; $k_{ПП}$ = 2; $k_В$ = 0,5; $k_О$ = 12,86; $k_П$ = 2.

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

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

В результаті аналізу математичної моделі об'єкту регулювання його передаточна функція (4.8):

$$W_В(p) = \frac{k_В\ e^{-\tau p}}{T_В p + 1}$$

Рівняння виконавчого механізму:

$$T_В \cdot \frac{dU_{ВМ}}{dt} + U_{ВМ} = k_В \cdot U_{ПП}.$$

При переході від оригіналу до зображення за Лапласом:

$$T_В \cdot p \cdot \overline{U_{ВМ}} + \overline{U_{ВМ}} = k_В \cdot \overline{U_{ПП}}.$$

Передаточна функція виконавчого механізму:

$$W_{ВМ}(p) = \frac{\overline{U_{ВМ}}}{\overline{U_{ПП}}} = \frac{k_В}{T_В \cdot p + 1}.$$

Рівняння іонізаційного датчика:

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

При переході від оригіналу до зображення за Лапласом:

$$T_Д \cdot p \cdot \overline{U_{ВИХ}} + \overline{U_{ВИХ}} = k_Д \cdot \overline{P}.$$

Передаточна функція іонізаційного датчика:

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

Рівняння підсилювача потужності:

$$U_{ПП} = k_{ПП} \cdot U_{РО}.$$

При переході від оригіналу до зображення за Лапласом:

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

Передаточна функція підсилювача потужності:

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

Рівняння регулювального органу:

$$U_{РО} = k_{РО} \cdot U_{П}.$$

При переході від оригіналу до зображення за Лапласом:

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

Передаточна функція регулювального органу:

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

Рівняння підсилювача:

$$U_{П} = k_{П} \cdot \varepsilon.$$

При переході від оригіналу до зображення за Лапласом:

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

Передаточна функція підсилювача:

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

Рівняння елемента порівняння:

$$\varepsilon = U_{ВХ} - U_{ВИХ}.$$

При переході від оригіналу до зображення за Лапласом:

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

Структурна схема САР наведена на рис. 4.11 (МР-151.21.0107.07.01.ТК).

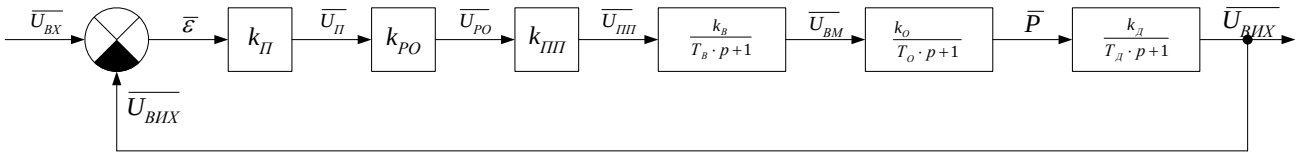


Рисунок 4.11 – Структурна схема системи автоматичного регулювання

Введемо припущення, що $\tau = 0$. При послідовному з'єднанні елементів системи передаточна функція системи дорівнює добутку передаточних функцій всіх її елементів.

$$W_P(p) = W_П(p) \cdot W_{РО}(p) \cdot W_{ПП}(p) \cdot W_В(p) \cdot W_О(p) \cdot W_Д(p) = \frac{k_П \cdot k_{РО} \cdot k_{ПП} \cdot k_В \cdot k_О \cdot k_Д}{(T_В \cdot p + 1) \cdot (T_О \cdot p + 1) \cdot (T_Д \cdot p + 1)}$$

Введемо позначення:

$$K = k_П \cdot k_{РО} \cdot k_{ПП} \cdot k_В \cdot k_О \cdot k_Д .$$

Звідси передаточну функцію розімкнутої системи можна записати:

$$W_P(p) = \frac{K}{(T_В \cdot p + 1) \cdot (T_О \cdot p + 1) \cdot (T_Д \cdot p + 1)}$$

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

$$W_З(p) = \frac{W_P(p)}{1 + W_P(p) \cdot W_{ЗЗ}(p)} = \frac{W_P(p)}{1 + W_P(p)} = \frac{K}{(T_В \cdot p + 1) \cdot (T_О \cdot p + 1) \cdot (T_Д \cdot p + 1) + K}$$

Характеристичне рівняння:

$$(T_В \cdot p + 1) \cdot (T_О \cdot p + 1) \cdot (T_Д \cdot p + 1) + K = 0$$

Розкриємо дужки:

$$(T_В p \cdot T_О p + T_В p + T_О p + 1) \cdot (T_Д p + 1) + K = 0$$

$$T_В p \cdot T_О p \cdot T_Д p + T_В p \cdot T_О p + T_В p \cdot T_Д p + T_В p + T_О p \cdot T_Д p + T_О p + T_Д p + 1 + K = 0$$

$$(T_В \cdot T_О \cdot T_Д) \cdot p^3 + (T_В \cdot T_О + T_В \cdot T_Д + T_О \cdot T_Д) \cdot p^2 + (T_В + T_О + T_Д) \cdot p + 1 + K = 0$$

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

Для побудови АФЧХ необхідно:

- ввести діапазон зміни частоти ω від 0 до 100;

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

- ввести значення оператора Лапласа $p(\omega) = j \cdot \omega$;

- ввести вираз передаточної функції;

- виділити дійсну і уявну частини передаточної функції, підставивши замість оператора Лапласа p вираз $j \cdot \omega$.

$$W_P(j\omega) = \frac{K}{(T_В \cdot j\omega + 1)\cdot(T_О \cdot j\omega + 1)\cdot(T_Д \cdot j\omega + 1)} =$$

$$= \frac{K}{-T_В \cdot T_О \cdot T_Д \cdot j\omega^3 - (T_В \cdot T_О + T_В \cdot T_Д + T_О \cdot T_Д)\cdot\omega^2 + (T_В + T_О + T_Д)\cdot j\omega + 1} =$$

$$= \frac{K}{(T_В + T_О + T_Д - T_В \cdot T_О \cdot T_Д \cdot \omega^2)\cdot j\omega - ((T_В \cdot T_О + T_В \cdot T_Д + T_О \cdot T_Д)\cdot\omega^2 - 1)} =$$

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

Дійсна частина:

$$P(\omega) = -\frac{K\cdot\left[(T_В \cdot T_О + T_В \cdot T_Д + T_О \cdot T_Д)\cdot\omega^2 - 1\right]}{(T_В + T_О + T_Д - T_В \cdot T_О \cdot T_Д \cdot \omega^2)^2 \cdot \omega^2 + ((T_В \cdot T_О + T_В \cdot T_Д + T_О \cdot T_Д)\cdot\omega^2 - 1)^2} =$$

$$= -\frac{12{,}86\cdot\left[(0{,}03\cdot 0{,}33 + 0{,}03\cdot 0{,}02 + 0{,}33\cdot 0{,}02)\cdot\omega^2 - 1\right]}{(0{,}03 + 0{,}33 + 0{,}02 - 0{,}03\cdot 0{,}33\cdot 0{,}02\cdot\omega^2)^2 \cdot \omega^2 + ((0{,}03\cdot 0{,}33 + 0{,}03\cdot 0{,}02 + 0{,}33\cdot 0{,}02)\cdot\omega^2 - 1)^2}$$

Уявна частина:

$$Q(\omega) = -\frac{K\cdot\left[(T_В + T_О + T_Д - T_В \cdot T_О \cdot T_Д \cdot \omega^2)\cdot\omega\right]}{(T_В + T_О + T_Д - T_В \cdot T_О \cdot T_Д \cdot \omega^2)^2 \cdot \omega^2 + ((T_В \cdot T_О + T_В \cdot T_Д + T_О \cdot T_Д)\cdot\omega^2 - 1)^2} =$$

$$= -\frac{12{,}86\cdot\left[(0{,}03 + 0{,}33 + 0{,}02 - 0{,}03\cdot 0{,}33\cdot 0{,}02\cdot\omega^2)\cdot\omega\right]}{(0{,}03 + 0{,}33 + 0{,}02 - 0{,}03\cdot 0{,}33\cdot 0{,}02\cdot\omega^2)^2 \cdot \omega^2 + ((0{,}03\cdot 0{,}33 + 0{,}03\cdot 0{,}02 + 0{,}33\cdot 0{,}02)\cdot\omega^2 - 1)^2}$$

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

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

ω, $с^{-1}$	0,01	0,1	1	5	10	30	50	100	200	∞
P(ω)	12,86	12,84	11,38	1,92	-0,68	-0,76	-0,3	-0,04	-0,001	0
Q(ω)	-0,05	-0,048	-4,4	-6,27	-3,44	-0,32	0,042	0,04	0,001	0

АФЧХ розімкнутої системи наведена на рис. 4.12.

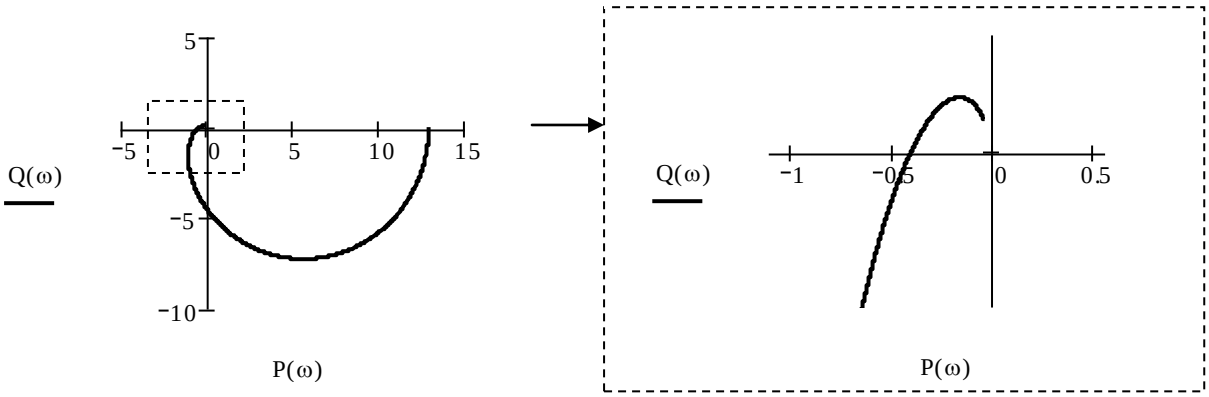


Рисунок 4.12 – АФЧХ розімкнутої системи

Побудову ЛАЧХ розпочинають з області низьких частот [9]. Так як система, що розглядається не містить інтегруючу ланку побудову починають під нахилом 0дБ/дек. Ця пряма має ординату рівну 20·lg K = 22,185 дБ. На області середніх і високих частот нахил змінюється порівняно з попереднім значенням на -20дБ/дек.

Спрягаючі частоти за сталими часу динамічних ланок визначаються:

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

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

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

Частоти $\omega_В$, $\omega_Д$, $\omega_О$ – частоти аперіодичних ланок.

ЛАЧХ розімкнутої системи наведено на рисунку 4.13.

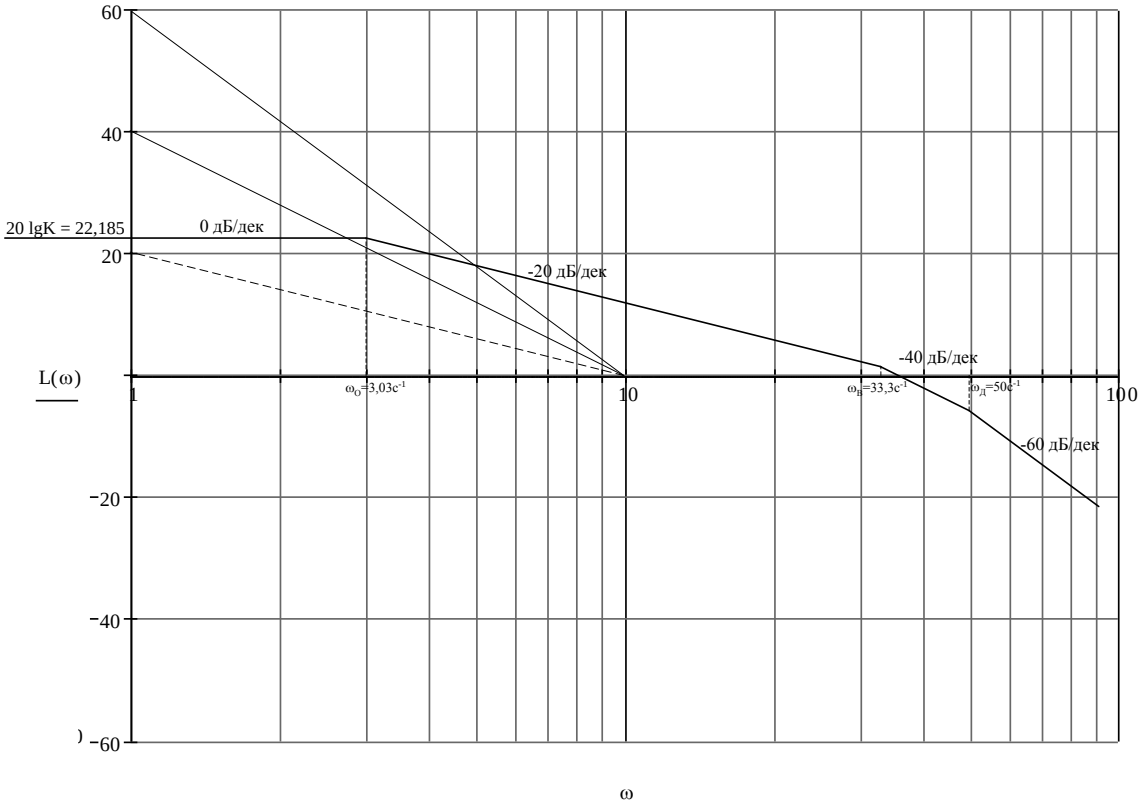


Рисунок 4.13 – ЛАЧХ розімкнутої системи

ЛФЧХ розімкнутої системи отримується в результаті складання ординат фазових характеристик динамічних ланок [19]:

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

Для побудови ЛФЧХ використовується значення φ(ω) наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Значення φ(ω) для побудови ЛФЧХ

ω, $с^{-1}$	0,01	0,1	0,5	1	2	5	10	20	50	100
φ(ω)	-0,22	-2,18	-10,8	-21,1	-39,1	-73	-101	-134	-188	-223

ЛФЧХ розімкнутої системи наведено на рисунку 4.14.

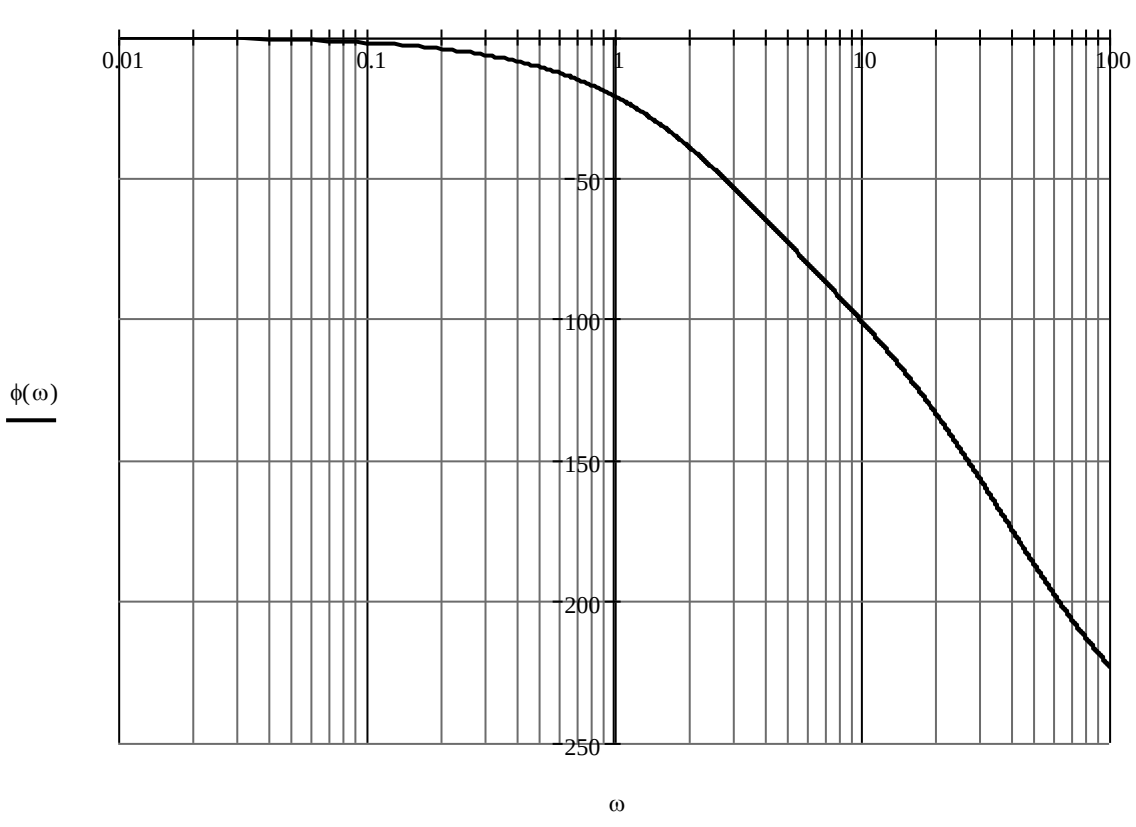


Рисунок 4.14 – ЛФЧХ розімкнутої системи

4.5 Дослідження системи на стійкість

Всі корені характеристичного рівняння

$(T_В \cdot T_О \cdot T_Д) \cdot p^3 + (T_В \cdot T_О + T_В \cdot T_Д + T_О \cdot T_Д) \cdot p^2 + (T_В + T_О + T_Д) \cdot p + 1 + K = 0$ матимуть від'ємні частини, якщо при додатному знаку всіх коефіцієнтів будуть додатними головний визначник Гурвіца $\Delta_Г > 0$ і його діагональні мінори будуть більше 0 [9].

Правила знаходження визначника Гурвіца:

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

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

3 При відсутності відповідного коефіцієнта записують 0.

$$0{,}000198 \cdot p^3 + 0{,}017 \cdot p^2 + 0{,}38 \cdot p + 13{,}76 = 0$$

$$\Delta_Г = \begin{pmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} 0{,}017 & 13{,}86 \\ 0{,}000198 & 0{,}38 \end{vmatrix} = 0{,}003754$$

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

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

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

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

Запас стійкості по фазі визначається як різниця між кутом π і максимально допустимим кутом обертання вектора, при якому зберігається

запас стійкості по модулю. Він визначається положенням вектора в точці перетину характеристики $W_P(j\omega)$ з колом одиничного вектора.

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

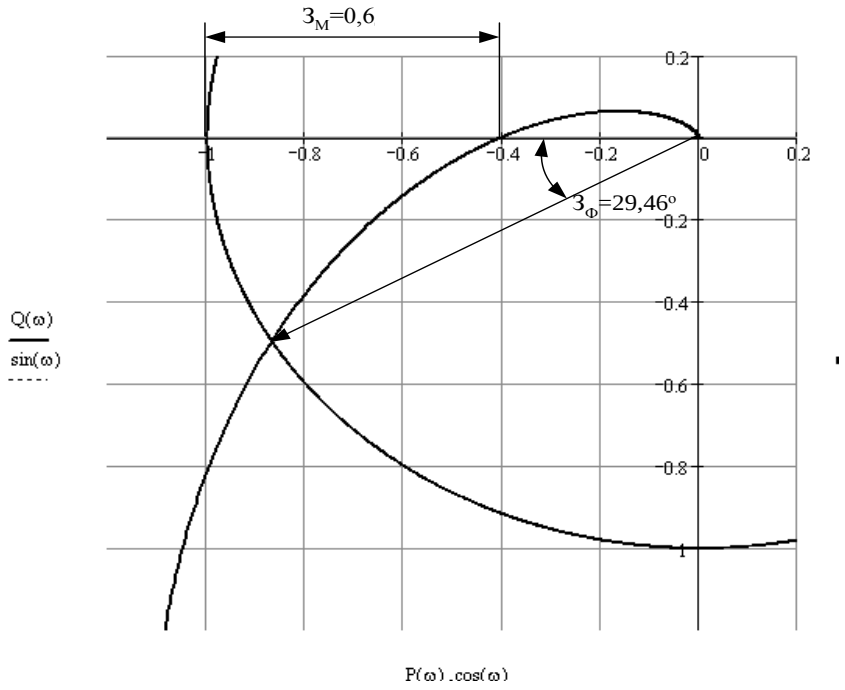


Рисунок 4.15 – Визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова

За даним критерієм система стійка. Запас стійкості по модулю $З_М$ = 0,6. Запас стійкості по фазі $З_Ф$ = 29,46°.

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

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

$$(T_В \cdot p+1)\cdot(T_О \cdot p+1)\cdot(T_Д \cdot p+1)+k_П \cdot k_{РО} \cdot k_{ПП} \cdot k_В \cdot k_О \cdot k_Д = 0$$

$$K_П(p) = -\frac{(T_В \cdot p+1)\cdot(T_О \cdot p+1)\cdot(T_Д \cdot p+1)}{k_{РО} \cdot k_{ПП} \cdot k_В \cdot k_О \cdot k_Д}$$

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

$$K_П(\omega) = -\frac{(T_В \cdot j\omega + 1)\cdot(T_О \cdot j\omega + 1)\cdot(T_Д \cdot j\omega + 1)}{k_{РО}\cdot k_{ПП}\cdot k_В \cdot k_О \cdot k_Д} =$$

$$= -\frac{(T_В + T_О + T_Д - T_В \cdot T_О \cdot T_Д \cdot \omega^2)\cdot j\omega - ((T_В \cdot T_О + T_В \cdot T_Д + T_О \cdot T_Д)\cdot \omega^2 - 1)}{k_{РО}\cdot k_{ПП}\cdot k_В \cdot k_О \cdot k_Д}$$

Дійсна частина:

$$P(\omega) = \frac{(T_В \cdot T_О + T_В \cdot T_Д + T_О \cdot T_Д)\cdot \omega^2 - 1}{k_{РО}\cdot k_{ПП}\cdot k_В \cdot k_О \cdot k_Д} = \frac{(0{,}03\cdot 0{,}33 + 0{,}03\cdot 0{,}02 + 0{,}33\cdot 0{,}02)\cdot \omega^2 - 1}{1\cdot 2\cdot 0{,}5\cdot 12{,}86\cdot 0{,}5}.$$

Уявна частина:

$$Q(\omega) = -\frac{(T_В + T_О + T_Д - T_В \cdot T_О \cdot T_Д \cdot \omega^2)\cdot \omega}{k_{РО}\cdot k_{ПП}\cdot k_В \cdot k_О \cdot k_Д} = \frac{(0{,}03 + 0{,}33 + 0{,}02 - 0{,}03\cdot 0{,}33\cdot 0{,}02\cdot \omega^2)\cdot \omega}{1\cdot 2\cdot 0{,}5\cdot 12{,}86\cdot 0{,}5}.$$

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

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

ω, $с^{-1}$	-50	-30	-10	-1	1	10	30	50
P(ω)	6,5	2,2	0,1	-0,15	-0,15	0,1	2,2	6,5
Q(ω)	-0,9	0,9	0,6	0,06	-0,06	-0,6	-0,9	0,9

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

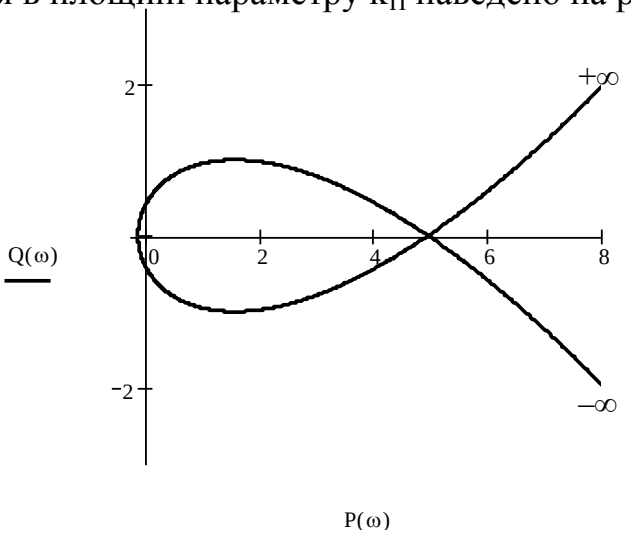


Рисунок 4.16 – D-розбиття в площині параметру $k_П$

Ділянка стійкості буде ліворуч від кривої D-розбиття, якщо рухатись по ній від –∞ до +∞ [10]. Критичне значення параметру $k_П$ дорівнює: $k_{Пкр}$ =4,92. Значення, що задане умовою $k_П$ = 2 входить в зону стійкості (МР-151.21.0107.06.03.ТК).

4.6 Оцінка якості регулювання замкнутої системи автоматичного регулювання по логарифмічним частотним характеристкам розімкнутої системи

Оцінка якості регулювання замкнутої системи автоматичного регулювання полягає у визначенні запасу стійкості по модулю і по фазі наведена на рис. 4.17 (МР-151.21.0107.07.02.ТК).

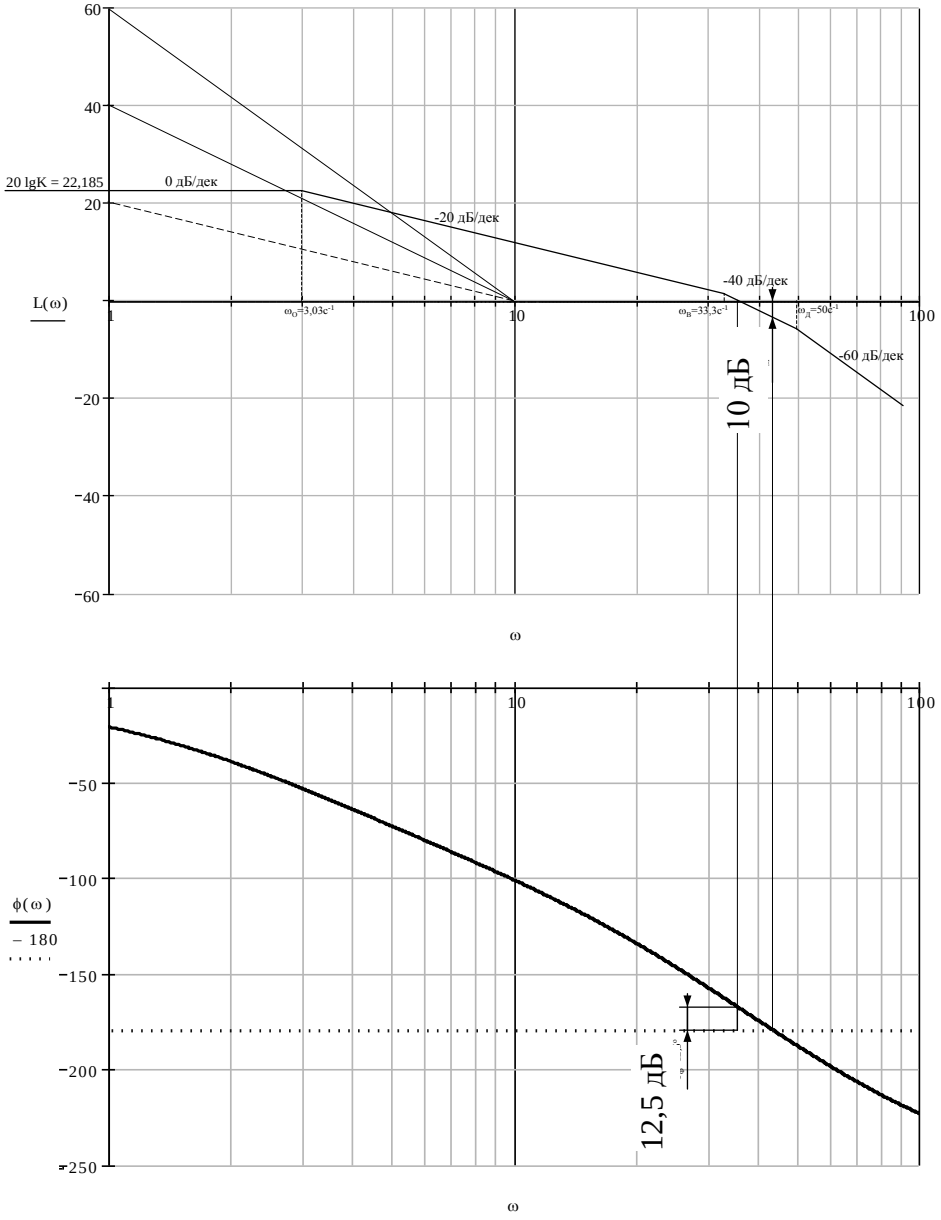


Рисунок 4.17 – Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи

З рисунку 4.17 визначаються запаси стійкості. Запас стійкості по модулю $З_М$ = 10 дБ. Запас стійкості по фазі $З_Ф$ = 12,5°.

Перехідний процес – функція, що визначає зміну величини на виході при стрибкоподібній зміні вхідної величини на одиницю і при нульових початкових умовах (МР-151.21.0107.07.03.ТК). Перехідний процес САР (рис. 4.18) описується залежністю [10]:

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

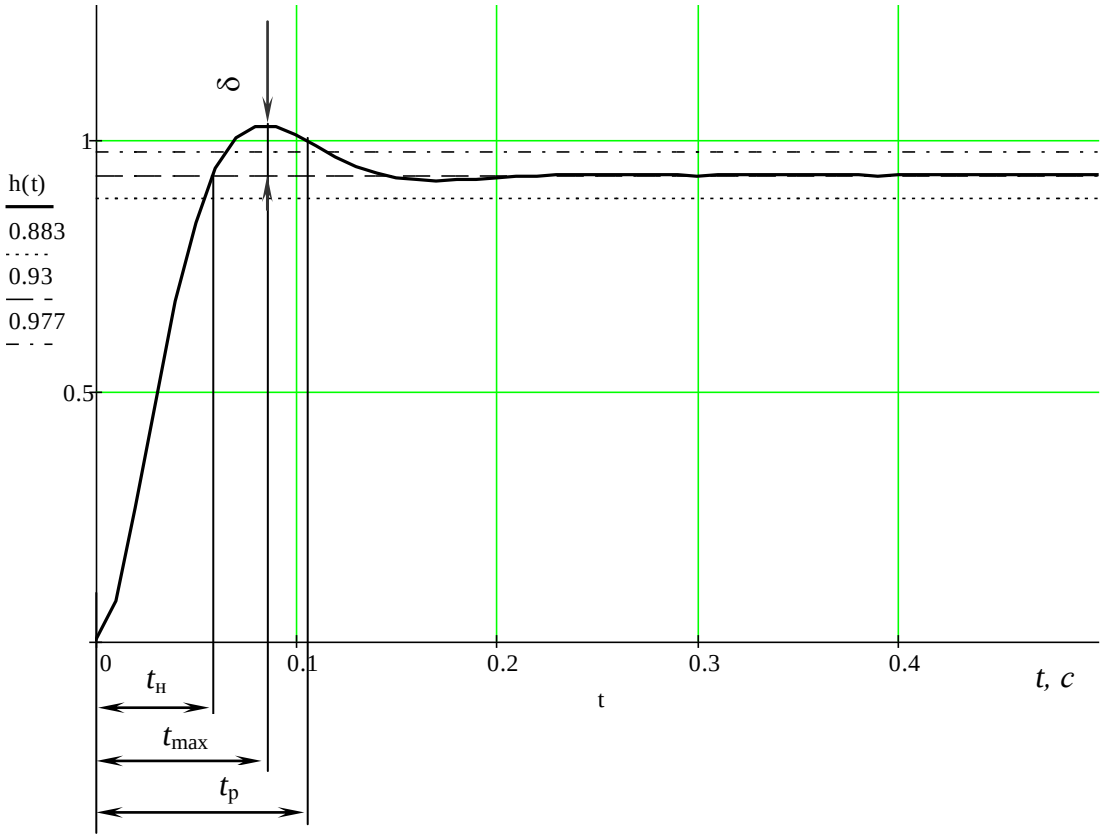


Рисунок 4.18 – Перехідний процес системи.

Перехідний процес показаний на рисунку 4.18 аперіодичний з перерегулюванням. Можна визначити такі показники якості САР:

- час регулювання $t_Р$ = 0,11 с (задовольняє вимогам, що висуваються для розглядуваних технологічних процесів);

- час наростання перехідного процесу $t_Н$ = 0,06 с;

- перерегулювання δ = 10,3 %;

- час досягнення першого максимуму t_{max1} = 0,08 с.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ВИСНОВКИ

Метою даної випускної кваліфікаційної роботи було проведення досліджень можливості підвищення показників якості роботи системи автоматизації в технологічному процесі нанесення органічних плівок.

Охарактеризовані принципи роботи електронно-променевих і електродугових випаровувачів, визначено їх головні недоліки і переваги. З аналізу визначено, що найбільш ефективними є електронно-променеві випаровувачі.

Розглянуто будову і принцип дії вакуумної системи – система регулювання тиску. Основними складовими якої є форвакуумний пластинчато-роторний насос 2НВР-5ДМ та дифузійний паромасляний насос НВДМ-160.

Для забезпечення необхідних хімічних та фізичних властивостей органічних плівок необхідно підтримувати постійний надвисокий вакуум порядку 10^{-7}Па. Для цього впроваджено контролер регулювання тиску в вакуумній камері на базі процесора Atmega169.

Була розроблена електрична принципова схема мікропроцесорної системи. У склад якої входять такі основні елементи: оперативно-запам’ятовуючий пристрій К155РУ7, порт вводу виводу КР580ВВ79, дешифратор К155ИД4, буферний регістр КР580ИР82/83 та інші.

Вхідним сигналом на контролер є сигнал з іонізаційного манометричного перетворювача ПМИ-12-8. І в залежності від значення тиску, контролер регулює роботу вакуумних насосів (відкриває/закриває клапан; збільшує/зменшує потужність нагрівального елементу).

Розроблена структурна та функціональна схеми САР тиску в камері. Виконана оцінка якості регулювання. В ході виконання проекту побудований перехідний процес, за яким визначено наступні показники якості: час регулювання $t_Р$ = 0,11 с (задовольняє вимогам, що висуваються для розглядуваних технологічних процесів); час наростання перехідного процесу

t_H = 0,06с; перерегулювання δ = 10,3% (задовольняє вимогам, що висуваються для розглядуваних технологічних процесів); час досягнення першого максимуму t_{max1} = 0,08с; запас стійкості системи автоматичного регулювання тиску у вакуумній камері: по модулю $З_М$ = 10 дБ, по фазі $З_Ф$ = 12,5°.

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

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

Перелік скорочень, символів та спеціальних термінів

AVR – сімейство восьмибітних мікроконтролерів Atmel;

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

CPU(céntral prócessing únit) – центральний процесор

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

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

RTC (Real Time Clock) – Контролер реального часу;

SPI (Serial Peripheral Interface) – послідовний периферійний інтерфейс;

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

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

АЛП – арифметико-логічний пристрій;

АФЧХ – амплітудно-фазова частотна характеристика;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

ВАХ – вольт-амперна характеристика;

ВУП – вакуумний універсальний пост;

ЕОМ – електронна обчислювальна машина;

ІМС – інтегральна мікросхема;

КВП – Конвертори вторинного перетворення;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

НДДКР - науково-дослідна та дослідно-конструкторська робота;

ЦАП – цифрово-аналоговий перетворювач;

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А ОХОРОНА ПРАЦІ

А.1 Законодавчі та нормативні акти України з питань охорони праці

Охорона праці – це зведення законодавчих актів і правил, відповідних їм гігієнічних, організаційних, технічних, і соціально-економічних заходів, що забезпечують безпеку, збереження здоров'я і працездатність людини в процесі праці (ГОСТ 12.0.002-80).

Законодавчими актами, що визначають основні положення про охорону праці, є загальні Закони України, а також спеціальні законодавчі та нормативні акти. До загальних Законів, що визначають основні положення про охорону праці належать: Конституція України, Закони України «Про охорону праці», «Про охорону здоров'я», «Про пожежну безпеку», «Про використання ядерної енергії та радіаційний захист», «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення», «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності» і Кодекс законів про працю України (КЗпП) [7].

Спеціальними нормативними актами в галузі охорони праці є Нормативно-правові акти з охорони праці (НПАОП), Державні стандарти Системи стандартів безпеки праці, Будівельні норми та правила, Санітарні норми, Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів та інші нормативні документи [7, 8].

У ст. 43 Конституції України записано: «Кожен має право на працю, що включає можливість заробляти собі на життя роботою, що він вільно вибирає, або на яку вільно погоджується». «Кожен має право на належні, безпечні й здорові умови роботи, на заробітну плату, не нижчу від певної, визначеної законом», «Використання роботи жінок і неповнолітніх на небезпечні для їхнього здоров'я роботах забороняється».

У тексті ст. 46 Конституції України зазначено, що громадяни мають право

на соціальний захист, яке включає право забезпечення їх у випадку повної, часткової або тимчасової втрати працездатності, втрати годувальника, безробіття по незалежним від них обставинам, а також у старості та в інших випадках, передбачених законом.

Після набуття незалежності Україна одна з перших серед республік колишнього Радянського Союзу прийняла 14 жовтня 1992 року Закон України «Про охорону праці» [8].

Закон України «Про охорону праці» визначає основні положення щодо реалізації конституційного права працівників на охорону їх життя і здоров'я у процесі трудової діяльності, на належні, безпечні і здорові умови праці та регулює, за участю відповідних державних органів, відносини між власником підприємства, установи, організації або уповноваженим ним орган і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні.

Закон України «Про охорону здоров'я» регулює відносини у сфері охорони здоров'я і висвітлює питання щодо організації та управління процесами охорони здоров'я, створення безпечних умов життя, забезпечення медичного обслуговування необхідною організаційною базою та ліками, загальних умов медичного втручання, охорони материнства та дитинства, регулювання виконання медичної експертизи. Закон також визначає медичну та фармацевтичну діяльність, професійні права та обов'язки медичних і фармацевтичних працівників.

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

Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційний захист» є основоположним у ядерному законодавстві України. Він встановлює пріоритет безпеки людини та навколишнього природного середовища, права і обов'язки громадян у сфері використання ядерної енергії, регулює діяльність, пов'язану з

використанням ядерних установок та джерел іонізуючого випромінювання, встановлює також правові основи міжнародних зобов'язань України щодо використання ядерної енергії.

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

Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності», відповідно до Конституції України та Основ законодавства України про загальнообов'язкове державне соціальне страхування, визначає правову основу, економічний механізм та організаційну структуру загальнообов'язкового державного соціального страхування громадян від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які призвели до втрати працездатності або загибелі на виробництві застрахованих. Окрім того, він створює правове поле, фінансові й організаційні механізми для успішного розв'язання триєдиного завдання: запобігання нещасним випадкам і професійним захворюванням, відновлення здоров'я та працездатності потерпілих на виробництві, компенсації потерпілим матеріальних збитків внаслідок ушкодження здоров'я.

КЗпП України регламентує всі моменти щодо організації взаємодії працівника і роботодавця під час прийому на роботу, в процесі роботи, способи переривання трудових відносин та інше. В КЗпП зазначені наступні положення: забороняється залучати до надурочних робіт вагітних жінок і жінок, які мають дітей віком до трьох років (ст. 176), а також осіб молодших 18 років (ст. 192); забороняється застосовувати праці жінок на важких роботах і роботах із шкідливими або небезпечними умовами праці, а також на підземних роботах (ст. 174). В статті 153 КЗпП зазначено про створення безпечних та нешкідливих умов праці.

НПАОП, які до початку 2003 року носили назву Державні нормативні акти про охорону праці (ДНАОП), – це правила, норми, положення, стандарти, інструкції та інші документи, обов'язкові до виконання. Законодавством передбачено, що залежно від сфери дії НПАОП можуть бути міжгалузевими і галузевими.

Вимоги щодо охорони праці регламентуються також Державними стандартами Системи стандартів безпеки праці України (ГОСТ ССБТ), будівельними та санітарними нормами і правилами, правилами улаштування електроустановок (ПУЕ), нормами технічного проектування та іншими нормативними актами, виходячи із сфери їх дії. ГОСТ ССБТ застосовуються на території України до їх заміни іншими нормативними документами, якщо вони не суперечать чинному законодавству України.

Складовою частиною права в галузі гігієни праці є постанови та положення (норми) затверджені Міністерством охорони здоров'я України (наприклад «Положення про медичний огляд працівників певних категорій», «Перелік важких робіт і робіт з шкідливими і небезпечними умовами праці, на яких забороняється застосування праці неповнолітніх»), санітарні правила і норми (СанПіН) стосовно окремих факторів виробничого середовища, певних технологічних процесів і конкретних виробництв та інші нормативні документи.

Правила охорони праці поширюються на всі підприємства, установи й організації незалежно від підпорядкування та форми власності, на підприємців, фермерів та інших юридичних і фізичних осіб. Правила встановлюють вимоги безпеки праці до організації й виконання технологічних процесів по вирощуванню, збиранню і первинній обробці сільськогосподарських культур, виробництву і первинній обробці продукції тваринництва й птахівництва, а також під час виконання вантажно-розвантажувальних робіт та транспортування вантажів.

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

Держава виступає гарантом створення безпечних і нешкідливих умов роботи для працівників підприємств, установ і організацій всіх форм власності.

А.2 Шкідливі та небезпечні фактори виробництва в процесі експлуатації установки синтезу органічних тонкоплівкових структур

Шкідливий виробничий фактор (чинник) – це фактор, вплив якого за певних умов може призвести до захворювання, зниження працездатності і (або) негативного впливу на здоров'я нащадків [17].

Небезпечний виробничий фактор (чинник) – це фактор, вплив якого на працівника в певних умовах призводить до травм, отруєння, іншого раптового різкого погіршення здоров'я або до смерті [17].

Небезпечні та шкідливі чинники за природою дії поділяються на такі групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні.

До фізичних небезпечних та шкідливих виробничих факторів належать: рухомі машини та механізми; пересувні частини виробничого устаткування; підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищена чи понижена температура поверхонь устаткування, матеріалів чи повітря робочої зони; підвищений рівень шуму, вібрацій, інфразвукових коливань, ультразвуку, іонізуючих випромінювань, статичної електрики, електромагнітних випромінювань, ультрафіолетової чи інфрачервоної радіації; підвищені чи понижені барометричний тиск, вологість, іонізація та рухомість повітря; небезпечне значення напруги в електричному колі; підвищена напруженість електричного чи магнітного полів; відсутність чи нестача природного світла; недостатня освітленість робочої зони; підвищена яскравість світла; пряме та відбите випромінювання, що створює засліплювальну дію та ін.

До хімічних небезпечних та шкідливих виробничих чинників належать хімічні речовини, які за характером дії на організм людини поділяються на загальнотоксичні, подразнювальні, сенсибілізуючі, канцерогенні, мутагенні та

такі, що впливають на репродуктивну функцію.

До біологічних небезпечних та шкідливих виробничих факторів належать патогенні мікроорганізми (бактерії, віруси, грибки та ін.) та продукти їх життєдіяльності, а також макроорганізми (рослини та тварини).

До психофізіологічних небезпечних та шкідливих виробничих факторів належать фізичні (статичні та динамічні) і нервово-психічні перевантаження (розумове перенапруження, монотонність праці, перенапруження органів чуття, емоційні перевантаження).

Один і той же небезпечний і шкідливий виробничий фактор (чинник)за природою своєї дії може належати одночасно до різних груп.

У процесі використання спроектованого виробу на працівників найбільше впливають такі шкідливі та небезпечні фактори: недостатня вентиляція, наявність шкідливих речовини у повітрі робочої зони, нераціональне (недостатнє) освітлення, вібрація, шум, можливість враження електричним струмом.

Вентиляція. Під вентиляцією розуміють сукупність заходів та засобів призначених для забезпечення на постійних робочих місцях та зонах обслуговування виробничих приміщень метеорологічних умов та чистоти повітряного середовища, які відповідають гігієнічним та технічним вимогам. Основне завдання вентиляції – вилучити із приміщення забруднене, вологе або нагріте повітря та подати чисте свіже повітря, тобто забезпечити в приміщеннях метеорологічні умови (температуру, відносну вологість та швидкість руху повітря), що відповідають нормативним вимогам, а також виключити можливість можливість вмісту в повітрі шкідливих речовин, які перевищують гранично допустимі концентрації.

Вплив шкідливих речовин. Шкідлива речовина – це речовина, що контактуючи з організмом людини, може викликати захворювання чи відхилення у стані здоров’я як під час впливу речовин, так і в подальший період життя теперішнього і наступного поколінь. Шкідливі речовини можуть потрапити в організм людини через органи дихання, ограни травлення, а також шкіру та слизові оболонки. Хімічні речовини, які впливають на працівників під

час синтезу органічних тонкоплівкових структур – це оксид вуглецю та сірки.

Освітлення. Серед чинників зовнішнього середовища, що впливають на організм людини в процесі праці, світло займає одне з перших місць. Адже відомо, що 90% всієї інформації про довкілля людина одержує через органи зору. Світло впливає не лише на функцію органів зору, а й на діяльність організму в цілому. При поганому освітленні людина швидко втомлюється, працює менш продуктивно, зростає потенційна небезпека помилкових дій і нещасних випадків. Згідно із статистичними даними, до 5% травм можна пояснити недостатнім або нераціональним освітленням, а в 20% воно сприяло виникненню травм. Врешті, погане освітлення може призвести до професійних захворювань, наприклад, короткозорість, спазм акомодації.

Для створення оптимальних умов зорової роботи слід враховувати не лише кількість та якість освітлення, а й кольорове оточення.

Вібрація. Під вібрацією розуміють механічні коливання твердого тіла. Вібрації виникають при роботі машин та механізмів, які мають неврівноважені і незбалансовані частини, що обертаються чи здійснюють зворотно-поступальний рух. При роботі даного устаткування вібрація відіграє негативну роль.

Шум. Шумом прийнято вважати звуки, які негативно виливають на організм людини, заважають його роботі та відпочинку. Шум у виробничих умовах негативно впливає на працівника: послаблює увагу, посилює розвиток втоми, сповільнює реакцію на небезпеку. Внаслідок цього знижується працездатність та підвищується імовірність нещасних випадків. Тому питання боротьби з шумом на сьогоднішній день є актуальним.

Найбільше шум впливає на слуховий апарат людини. Крім безпосереднього впливу на орган слуху шум впливає на різні відділи головного мозку, змінюючи при цьому нормальні процеси вищої нервової діяльності; процеси травлення і кровообігу.

Можливість враження електричним струмом. Це найбільш значимий серед небезпечних і шкідливих факторів виробництва. Оскільки у сучасному

виробничому устаткуванні застосовують змінний струм напругою 220 В або 380 В, а у випадку пошкодження ізоляції чи аварійної ситуації з електрообладнанням під напругою можуть виявитись не струмопровідні частини і корпуси, необхідно передбачити захист персоналу від ураження електричним струмом.

Вплив електромагнітних полів та електромагнітних випромінювань радіочастотного діапазону. Розрізняють природні та штучні джерела електромагнітних полів (ЕМП). В процесі еволюції біосфера постійно знаходилась та знаходиться під впливом ЕМП природного походження (природний фон): електричне та магнітне поля Землі, в першу чергу ті, що генеруються Сонцем. У період науково-технічного прогресу людство створило і все ширше використовує штучні джерела ЕМП. Електромагнітні поля характеризуються певною енергією, яка поширюють: в просторі у вигляді електромагнітних хвиль. Основними параметрами електромагнітних хвиль є: довжина хвилі λ, *м*; частота коливання *f, Гц;* швидкість поширення радіохвиль *c*, яка практично дорівнює швидкості світла $c = 3 \cdot 10^8$ *м/с.* Ці параметри пов'язані між собою залежністю

$$\lambda = c / f \,. \qquad \text{(А.1)}$$

Ступінь впливу ЕМП на організм людини залежить від діапазону частот, інтенсивності та тривалості дії, характеру випромінювання (неперервне чи модульоване), режиму опромінення, розміру опромінюваної поверхні тіла, індивідуальних особливостей організму.

ЕМП можуть викликати біологічні та функціональні несприятливі ефекти в організмі людини. Функціональні ефекти проявляються у передчасній втомлюваності, частих болях голови, погіршенні сну, порушеннях центральної нервової системи (ЦНС) і серцево-судинної системи. При систематичному опроміненні ЕМП, сповільнення пульсу, нервово-психічні захворювання, деякі трофічні явища (випадання волосся, ламкість нігтів та ін.). Сучасні дослідження показують на те, що радіочастотне випромінювання, впливаючи на ЦНС, є вагомим чинником.

Нині достатньо вивченою можна вважати лише теплову дію ЕМП, яка

призводить до підвищення температури тіла та місцевого вибіркового нагрівання органів тканин організму внаслідок переходу електромагнітної енергії у теплову. Таке нагрівання особливо небезпечне для органів із слабкою терморегуляцією (головний мозок, нирки, шлунок, кишківник, сім'яники). Наприклад, випромінювання сантиметрового вазону призводять до появи катаракти, тобто до поступової втрати зору.

Механізм та особливості нетеплової дії ЕМП радіочастотного діапазону ще не з'ясовані. Частково таку дію пояснюють специфічним впливом радіочастотного випромінювання на деякі біофізичні явища: біоелектричну активність, що може звести до порушення усталеного протікання хімічних та ферментативних реакцій.

Змінне ЕМП являє собою сукупність магнітного та електричного полів і поширюється в просторі у вигляді електромагнітних хвиль. Основним параметром характеризує магнітне та електричне поля є напруженість.

Простір навколо джерела ЕМП умовно поділяють на ближню зону (зону індукції) та дальню зону (зону випромінювання). Для оцінки ЕМП у цих зонах використовують різні підходи.

Дотримання допустимих значень ЕМП контролюють шляхом вимірювання напруженостей *H* та *E* на робочих місцях і в місцях можливого знаходження персоналу, з яких є джерела ЕМП. Контроль необхідно проводити періодично, однак не рідше, ніж один раз на рік, а також при введенні в експлуатацію нових чи модернізованих установок з джерелами ЕМП, після їх ремонту, переналагодження, а також при організації нових робочих місць.

А.3 Заходи з усунення чи зменшення впливу небезпечних та шкідливих факторів виробництва в процесі експлуатації установки синтезу органічних тонкоплівкових структур

Безпечність виробничого устаткування – це властивість виробничого

устаткування відповідати вимогам безпеки праці під час монтажу (демонтажу) і експлуатації в умовах, установлених нормативною документацією.

Вентиляція. Видалення забрудненого повітря здійснюється через вентиляційні отвори, фрамуги, дефлектори. Також застосовують різноманітні відсмоктувачі.

Природна та штучна вентиляції повинні відповідати наступним санітарно-гігієнічним вимогам:

- створювати в робочій зоні приміщень нормовані метеорологічні умови праці (температуру, вологість і швидкість руху повітря);
- повністю усувати з приміщень шкідливі гази, пари, пил та аерозолі або розчиняти їх до допустимих концентрацій;
- не вносити у приміщення забруднене повітря ззовні або шляхом засмоктування із суміжних приміщень;
- не створювати на робочих місцях протягів чи різкого охолодження;
- бути доступними для керування та ремонту під час експлуатації;
- не створювати під час експлуатації додаткових незручностей (наприклад, шуму, вібрацій, попадання дощу. снігу тощо).

Необхідна чистота повітря у виробничих приміщеннях може бути досягнута шляхом:

- удосконалення технологічних процесів та устаткування, в результаті чого виключається або зменшується виділення шкідливих парів, газів та пилу в повітря виробничих приміщень;
- використання ефективної та надійної вентиляції.

Захист від шкідливих речовин. До загальних заходів та засобів попередження забруднення повітряного середовища на цукровому виробництві та захисту працюючих належать:

- удосконалення технологічних процесів та устаткування;
- автоматизація і дистанційне керування технологічними процесами;
- герметизація виробничого устаткування;

- нормальне функціонування систем опалення, загально обмінної вентиляції, кондиціонування повітря;

- попередні та періодичні медичні огляди працівників, дотримання правил особистої гігієни;

- контроль за вмістом шкідливих речовин у повітрі робочої зони;

- використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ).

Освітлення. Для створення сприятливих умов зорової роботи, які б виключали швидку втомлюваність очей, виникнення професійних захворювань, нещасних випадків і сприяли підвищенню продуктивності праці та якості продукції, виробниче освітлення повинно відповідати наступним вимогам:

- створювати на робочій поверхні освітленість, що відповідає характеру зорової роботи і не є нижчою за встановлені норми;

- забезпечити достатню рівномірність та постійність рівня освітленості у виробничих приміщеннях, щоб уникнути частої переадаптації органів зору;

- не створювати засліплю вальної дії як від самих джерел освітлення, так і від інших предметів, що знаходяться в полі зору;

- не створювати на робочій поверхні різких та глибоких тіней (особливо рухомих);

- повинен бути достатній для розрізнення деталей контраст поверхонь, що освітлюються;

- не створювати небезпечних та шкідливих виробничих чинників (шум, теплові випромінювання, небезпека ураження струмом, пожежо- та вибухонебезпека світильників);

- повинно бути надійним та простим в експлуатації, економічним та естетичним.

Залежно від джерела світла виробниче освітлення може бути: *природним,* що створюється прямими сонячними променями та розсіяним світлом небосхилу; *штучним,* що створюється електричними джерелами світла та суміщеним, при якому недостатнє за нормами природне освітлення

доповнюється штучним.

При проектуванні штучного освітлення необхідно вирішити наступне: вибрати систему освітлення, тип джерела світла, тип світильників, визначити розташування світлових приладів, виконати розрахунки штучного освітлення та визначити потужності світильників та ламп. Вибираючи джерела світла, слід надавати перевагу люмінесцентним лампам, які енергетично більш економічні. Окрім того, вони за спектральними характеристиками максимально наближаються до природного світла, що важливо при використанні суміщеного освітлення.

Вібрація. Зменшення вібрації в джерелі її виникнення досягається шляхом застосування таких кінематичних та технологічних схем, які усувають чи мінімально знижують дію динамічних сил. Так, вібрація ослаблюється при заміні кулачкових та кривошипних механізмів на механізми, що обертаються з рівномірною швидкістю, механічних приводів – на гідравлічні тощо. Зменшення вібрації досягається також статичним та динамічним зрівноважуванням механізмів та об’єктів, що обертаються. Слід зазначити, що дія динамічних сил може посилитись внаслідок спрацювання окремих механізмів, появи зазорів та люфтів, поганого зчеплення деталей, що призводить до посилення вібрації. При проектуванні устаткування важливо передбачити недопущення резонансних режимів його роботи. Це досягається раціональним вибором маси та жорсткості коливальної системи або частоти змушувальної сили.

Контакту працівника з віброоб’єктом, а відтак і шкідливої дії вібрації можна уникнути шляхом використання дистанційного керування, автоматичного контролю та сигналізації, а також застосування захисного огородження. Якщо цього досягти неможливо, то необхідно при контакті працівника з віброоб’єктом домогтися зменшення параметрів вібрації на шляху її поширення від джерела змушувальної сили. Це можна досягти за допомогою вібропоглинання, віброгасіння та віброізоляції.

Найбільш ефективним та технічно доцільним методом зниження вібрації є зниження неврівноважених сил, тобто динамічних навантажень, котрі

створюються машинами.

Динамічні навантаження, котрі виникають у машинах, можуть бути знижені наступними шляхами:

- ретельним динамічним балансуванням обертових частин агрегатів;
- центруванням муфтових з'єднань вентилятора або насоса з електродвигуном;
- ліквідацією перекосів та великих зазорів у підшипниках;
- надійним закріпленням рознімних частин обладнання (кришок підшипників тощо).

Якщо неможливо забезпечити необхідне зниження шуму, котрий виникає при роботі машин, за допомогою наведених вище методів, тоді необхідно вдатись до віброізоляції.

Віброізоляція агрегатів досягається встановленням їх на спеціальні віброізолятори (пружні елементи, котрі мають невелику жорсткість), застосуванням гнучких елементів у системах комунікацій, з'єднаних з вібруючим обладнанням, застосуванням м'яких еластичних прокладок.

Шум. Заходи та засоби захисту від шуму поділяються на колективні та індивідуальні, причому останні застосовуються лише тоді, коли заходами та засобами колективного захисту не вдається знизити рівні шуму на робочих місцях до допустимих значень.

Зменшення шуму у самому джерелі – найбільш радикальний засіб боротьби з шумом, що створюється устаткуванням. Досвід показує, що ефективність заходів щодо зниження шуму устаткування, що вже працює, досить невисока, тому необхідно прагнути до максимального зниження шуму в джерелі ще на стадії проектування устаткування. Це досягається за допомогою наступних заходів та засобів: удосконалення кінематичних схем та конструкцій устаткування; проведення статичного та динамічного зрівноважування і балансування; виготовлення деталей, що співударяються та корпусних деталей з неметалевих матеріалів (пластмас, текстоліту, гуми); чергування металевих та

неметалевих деталей; підвищення точності виготовлення деталей та якості складання вузлів і устаткування; зменшення зазорів у з'єднаннях шляхом зменшення припусків; застосування мащення деталей, що труться і т. п.

Для зменшення шкідливого впливу виробничого шуму на працівників шумних виробництв, послаблення передавання його в сусідні приміщення застосовують звуко- і віброізоляцію, звуко- і вібропоглинання та глушники шуму.

Звукоізоляція є ефективним засобом зменшення рівня шуму на шляху його поширення, що реалізується шляхом встановлення звукоізоляційних перешкод (перегородок, кабін, кожухів, екранів). Принцип звукоізоляції базується на тому, що більша частина звукової енергії, яка потрапляє на перешкоду, відбивається і лише незначна її частина проникає через неї.

До ЗІЗ від шуму належать навушники, протишумові вкладки, шумозаглушувальні шоломи. Вибір ЗІЗ обумовлюється різновидом та характеристикою шуму на робочому місці, зручністю використання засобу при виконанні даної робочої операції та конкретними кліматичними умовами.

Можливість враження електричним струмом. Для захисту робочого персоналу від ураження електричним струмом застосовують 3 методи:

- захисне заземлення;
- захисне занулення;
- захисне відключення.

Кожен з цих методів може бути застосований як окремо, така і у поєднанні з іншими (в залежності від специфіки виробництва і наявної електронебезпеки).

Захист від ЕМП та електромагнітних випромінювань радіочастотного діапазону. Засоби та заходи захисту від ЕМП випромінювань радіочастотного діапазону поділяються на індивідуальні та колективні. Останні можна підрозділити на організаційні, технічні та лікувально-профілактичні. До організаційних заходів колективного захисту належать:

- розміщення об'єктів, які випромінюють ЕМП таким чином, щоб звести

до мінімуму можливе опромінення людей;

- «захист часом» – перебування персоналу у зоні дії ЕМП обмежується мінімально необхідним для проведення робіт часом;

- «захист відстанню» – віддалення робочих місць на максимально допустиму відстань від джерел ЕМП;

- виділення зон випромінювання ЕМП відповідними знаками безпеки;

- проведення дозиметричного контролю.

Технічні засоби колективного захисту передбачають:

- екранування джерел випромінювання ЕМП;

- екранування робочих місць;

- дистанційне керування установками, до складу яких входять джерела ЕМП;

- застосування попереджувальної сигналізації.

Захист часом передбачає обмеження часу перебування людини в робочій зоні, якщо інтенсивність опромінення перевищує встановлені норми. Цей метод використовується, коли немає можливості знизити інтенсивність опромінення до допустимих значень і лише для електричного поля частотою 50 *Гц* та випромінювань в діапазоні 300 *МГц* – 300 *ГГц*. Допустимий час перебування залежить від інтенсивності опромінення.

Якщо інтенсивність опромінення в діапазоні 300 *МГц* – 300 *ГГц* знаходиться між двома нормованими рівнями, то допустиме значення часу опромінення визначається за формулою:

$$t_{ДОП} = T\frac{1+0.005\psi/\psi_{ДОП}}{0{,}65+0{,}355\psi/\psi_{ДОП}}, \qquad (А.2)$$

де ψ – інтенсивність опромінення, *Вт/м²;*

$\psi_{ДОП}$ – допустима інтенсивність опромінення, *Вт/м²*.

За допомогою цієї формули можна визначити допустимий час опромінення при значеннях ψ в інтервалі 10—1000 *мкВт/см²*.

Захист відстанню застосовується тоді, коли неможливо послабити

інтенсивність опромінення за допомогою інших методів. В цьому випадку збільшують відстань між джерелом випромінювання та обслуговуючим персоналом. В ближній зоні прямо напрямленому випромінюванні цей метод не застосовується, оскільки в цій зон щільність поверхневої енергії не залежить від відстані.

Передбачено також влаштування санітарно-захисних зон. Земельні ділянки, що входять в санітарно-захисну зону, не вилучаються у землекористувачів і можуть використовуватись як сільськогосподарські угідь, а також для розміщення на них виробничих споруд, що належать радіотехнічному об'єкту або іншим відомствам, з дотриманням діючих санітарних норм і правил.

Зниження випромінювання в джерелі виникнення досягається шляхом застосування спеціальних пристроїв – поглиначів потужності, атенюаторів напрямлених відгалужувачів, підсилювачів потужності, хвилевих послаблювачів.

Виділення зон випромінювання. Межі зони, де ψ перевищує гранично-допустимі значення, експериментально визначають для кожного випадку розташувань. апаратури при її роботі на максимальну потужність випромінювання.

Екранування джерел випромінювання використовується для зниженню інтенсивності електромагнітного поля на робочому місці. Застосовуються екран з металевих листів або сіток у вигляді замкнених камер, шаф або кожухів.

Розрахуємо ефективність екранування джерел електромагнітних випромінювань радіочастотного діапазону в процесі експлуатації установки синтезу органічних тонкоплівкових структур.

А.4 Розрахунок ефективності екранування джерел електромагнітних випромінювань радіочастотного діапазону в процесі експлуатації установки синтезу органічних тонкоплівкових структур

Основною характеристикою екрана є ступінь послаблення електромагнітного поля, тобто ефективність екранування, котра є відношенням

E, H, ψ в даній точці при відсутності екрана до E_e, H_e, ψ_e в тій же точці з екраном.

Ступінь послаблення електромагнітного поля залежить від глибини проникнень високочастотного струму в товщу екрана. Чим більша магнітна проникність екрану, і чим вища частота екранованого поля, тим менша глибина проникнення і необхідна товщина екрана. Джерело випромінювань або робоче місце екрануються за допомогою відбивальних або поглинальних екранів.

Знаючи характеристики металу, можна розрахувати товщину екрана δ, *мм,* котра забезпечує необхідне послаблення електромагнітних полів на даній відстані.

$$\delta = \frac{\ln E_x}{\sqrt{\frac{\varpi \cdot \mu \cdot \gamma}{2}}}, \qquad \text{(А.3)}$$

де $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – кутова частота змінного струму, *рад/ с*;

μ – магнітна проникність металу захисного екрана, *Г/м*;

γ – електрична провідність металу екрана, $(Ом \cdot м)^{-1}$;

E_x – ефективність екранування на робочому місці, що виражається із співвідношення

$$E_X = \frac{H_X}{H_{XE}}, \qquad \text{(А.4)}$$

де H_x і H_{XE} – максимальні значення напруженості магнітної складової поля на віддалі X, *м,* від джерела відповідно без екрана і з екраном, *А/м.*

Напруженість H_x може бути визначена з виразу

$$H_X = \frac{\varpi \cdot I \cdot \alpha^2}{4 \cdot X^2} \cdot \beta_m, \qquad \text{(А.5)}$$

де ϖ та α – відповідно число витків та радіус котушки, *м*;

I – сила струму в котушці, *А*;

X – відстань від джерела (котушки) до робочого місця, *м*;

β_m – коефіцієнт, що визначається співвідношенням $\frac{X}{\alpha}$ (при $\frac{X}{\alpha} > 10$, $\beta_m = 1$).

Якщо регламентується допустима електрична складова поля $E_Д$,, магнітна складова може бути визначена з виразу

$$H_Д = 1{,}27 \cdot 10^5 \frac{E_Д}{Xf}\ , \qquad (А.6)$$

де f – частота поля, *Гц*.

Розрахуємо ефективність екрана радіусом R = 0,35 *м*, якщо задано:

$f = 6 \cdot 10^4$ *Гц*; $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ *Г/м*; $\gamma_c = 3{,}55 \cdot 10^7 (Ом \cdot м)^{-1}$; $\mu = 1$; $I = 380$ *А*; $\varpi = 1{,}4$; $\alpha = 0{,}1$ *м*; $l = 0{,}3$ *м*; $X = 0{,}8$ *м*.

Розв'язок

Всі розрахунки проведемо у відповідності з методикою, викладеною у [17].

Визначаємо допустиму величину магнітної складової поля з врахуванням, що допустима напруженість поля $E_{ПД}$ = 5 *В/м* (за санітарними нормами):

$$H_{ПД} = 1{,}27 \cdot 10^5 \cdot \frac{E_{ПД}}{X \cdot f} = 1{,}27 \cdot 10^5 \cdot \frac{5}{0{,}8 \cdot 6 \cdot 10^4} = 13{,}2\ А/м\,.$$

Напруженість на робочому місці при відсутності екрана

$$H_X = \frac{\varpi \cdot I \cdot \alpha^2}{4 \cdot X^2} = \frac{14 \cdot 380 \cdot 0{,}1^2}{4 \cdot 0{,}8^2} = 20{,}7\ А/м\,.$$

Необхідна ефективність екранування на робочому місці

$$E_{ХД} = \frac{H_X}{H_{ПД}} = \frac{20{,}7}{13{,}2} = 1{,}57\,.$$

Дійсна ефективність екранування на робочому місці

$$E_{ХД} = \frac{R \cdot e^{\frac{d}{\delta}}}{2 \cdot \sqrt{2 \cdot \delta \cdot \mu_c'}} = \frac{0{,}35 \cdot 0{,}3^{\frac{1}{0{,}32}}}{2 \cdot \sqrt{2 \cdot 3{,}2 \cdot 10^{-4} \cdot 1}} = 10{,}5\ ,$$

де d – товщина екрана, *мм*;

δ – глибина проникнення поля в екран, *м*:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\mu_c \cdot \gamma_c \cdot \varpi \cdot f}} = \frac{1}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 3{,}55 \cdot 10^7 \cdot 314 \cdot 6 \cdot 10^4}} = 0{,}32\ \ мм\,;$$

μ_c' – відносна магнітна проникність екрана ($\mu_c' = \frac{\mu_c}{\mu_0}$).

З конструктивних міркувань приймаємо d = 1 *мм*.

Обраний екран забезпечує необхідний захист на даному робочою місці, оскільки $E_{ХД} > E_{ХН}$ (10,5 > 1,57).

ДОДАТОК Б ОЧІКУВАНІ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ

Б.1 Техніко-економічне обґрунтування розробки системи

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

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

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

В результаті впровадження контролеру вакуумної системи ATmega169 зменшилась кількість бракованих виробів, зменшились витрати на напиляємий матеріал – полі-n-ксилілен. Підвищилась якість та надійність системи. Так як зменшився час роботи насосу – нормативний строк служби системи збільшився, витрати на електроенергію знизилися на 20%. Технічні характеристики установки електронно-променевого напилення наведено в табл. Б.1.

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

Показники, їх одиниці вимірювання	Позначення	Величина за вартостями	
		Базовими	Новими
Річний об’єм випуску, шт	$N_н$	5	5
Процент браку	$П_Б$	18	3
Споживаєма потужність системи, кВт	M	3	3
Зменшення витрат на електроенергію, %	E	-	20
Нормативний строк служби, років	$T_{СЛ}$	10	12
Кількість відказів за рік	n_B	3	1
Годин відновлення після відмови	t_B	5	3

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

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

Таблиця Б.2 – Трудоємкість виконання НДДКР

Статті витрат та зміст робіт	Трудоємкість в людино-днях	Питома вага в загальному обсязі, %
Постановка задачі, збір інформації, формулювання технічного завдання	5	8
Аналіз діючої системи виявлення недоліків, розробка заходів по її модернізації	9	15
Розробка ескізного проекту та блок-схем	2,5	6
Розробка принципіальних електричних схем, виконання розрахунків	15	30
Розробка печатних плат та печатних схем	12,5	26
Складання специфікацій та розробка робочої документації	6	15
Всього витрат часу	$T_{НД}$=50	100

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

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

$$З_{НД} = 60 \cdot 100 \cdot (1+0{,}01 \cdot 20) \cdot (1+0{,}01 \cdot 37) = 9864 \text{ грн},$$

де $Q_{НД} = 60$ грн – середньоденний оклад конструктора;

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

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

Величина витрат по кожній статті кошторису НДДКР визначається методом прямого розрахунку і заноситься до таблиці Б.3. Витрати за статтею “Матеріали, купівельні вироби та напівфабрикати” включають вартість матеріалів, які використовуються для виготовлення макетів, зразків, допоміжних матеріалів, пов’язаних з виконанням НДДКР. Витрати по статті “Спеціальне обладнання” розраховуються за балансовою вартістю стендів, приладів, установок, які необхідні для проведення НДДКР.

Таблиця Б.3 – Кошторис витрат на виконання НДДКР

Найменування статтей	Позначення	Величина, грн
Матеріали, купівельні вироби та напівфабрикати	$М_{НД}$	400
Спеціальне обладнання	$О_{НД}$	300
Заробітна плата науково-виробничого персоналу	$З_{НД}$	9864
Витрати на наукові відрядження	$В_{НД}$	200
Послуги сторонніх організацій	$П_{НД}$	300
Загальногосподарські (накладні) витрати	$Н_{АК}$	250
Всього	$К_{НД}$	11314

Б.3 Матеріальні витрати на виготовлення виробу

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

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

$$М_О = Н_М \cdot Ц_М \cdot К_{ТЗ}$$

де $Н_М$ – норма витрат матеріалу на один виріб,

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

$К_{ТЗ}$ – коефіцієнт транспортно-заготівельних витрат, $К_{ТЗ}$=1,1.

Таблиця Б.4 – Матеріальні витрати на виріб

Найменування матеріалів, одиниці виміру	Позначення	Норма витрат на виріб, $Н_М$	Вартість одиниці, грн., $Ц_М$	Витрати на один виріб, грн.
1.Основні матеріали, кг	$М_О$			
- чорні метали, кг		5	3,2	17,6
- кольорові метали, кг		10	9,5	104,5
- кабельні матеріали, м (дріт)		3	5	16,5
Всього витрат				138,6
2.Покупні матеріали	$М_П$			
- мікропроцесор ATmega103		1	790	869
- мікросхеми, шт		10	461	5071
- радіодеталі, шт		30	5	1650
Всього витрат				7590
3. Допоміжні матеріали, грн	$М_В$	-	-	463,7
4. Зворотні вітходи	$О_В$	-	-	409,6

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

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

$$М_В = \frac{(138,6 + 7590) \cdot 6}{100} = 463,7 \text{ грн},$$

$$О_В = \frac{(138,6 + 7590 + 463,7) \cdot 5}{100} = 409,6 \text{ грн}.$$

Б.4 Заробітна плата основних робочих за виготовлення виробів

Розрахунки по заробітній платі, таблиця Б.5, для непрямих витрат проводяться за нормативами того підприємства на якому виготовляються аналогічні вироби. Розрахунок зарплати по виготовленню виробу виконується з урахуванням трудомісткості робіт, годинних тарифних ставок, а також нормативів доплат до заробітної плати.

Таблиця Б.5 – Основна заробітна плата

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

Основна заробітна плата за виготовлення одного виробу по всіх стадіях виробництва:

$$З_О = \sum_{1}^{4} О_i ,$$

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

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

Додаткова зарплата на виготовлення одного виробу:

$$З_Д = З_О \cdot \frac{Н_Д}{100},$$

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

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

Відрахування у соціальні фонди:

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

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

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

Б.5 Розробка калькуляції собівартості установки електронно-променевого напилення

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

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

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

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

$$T_{ЕЛ} = \frac{3000}{1000} \cdot 10 \cdot 0{,}56 = 16{,}8 \text{ грн},$$

де M =3000 – споживаєма потужність виробу, Вт

$T_{РЕГ}$ =10 – норма часу для регулювання виробу під навантаженням, годин.

$Ц_{ЕЛ}$ =0,56 – ціна електроенергії за кіловат-годину.

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

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

Статті витрат	Позначення	Величина витрат, грн.
1. Витрати цільового призначення	$З_{НД}$	214,32
2. Сировина та основні матеріали	$М_{О}$	138,6
3. Покупні вироби	$М_{П}$	7590
4. Допоміжні матеріали	$М_{В}$	463,7
5. Зворотні вітходи (віднімаються)	$О_{В}$	-409,6
6. Паливо і енергія для технологічних цілей	$Т_{ЕЛ}$	16,8
7. Основна зарплата основних робітників	$З_{О}$	2679,04
8. Додаткова зарплата	$З_{Д}$	536
9. Відрахування в соціальні фонди	$О_{С}$	1189,56
Всього повна собівартість	$С_{П}$	12418,42

Витрати цільового призначення складають 8% від основної заробітної плати:

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

Б.6 Визначення ціни установки електронно-променевого напилення

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

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

$$Ц_Н = 12418{,}42 \cdot (1 + 0{,}01 \cdot 18) = 14653{,}74 \text{ грн.}$$

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

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

Таблиця Б.7 – Експлуатаційні витрати

Статті витрат	Позначення	Сума витрат за варіантами, грн.	
		Базовий	Новий
1. Матеріали для технологічних цілей: полі-n-ксилілен заготовки Всього витрат	$З_{МТ}$	 5376 70800 76176	 4800 61800 66600
2. Електроенергія	$З_{ЕЛ}$	4780,8	3665,3
3. Поточні ремонти	$З_Р$	528,8	162,2
4. Амортизація	$З_{АМ}$	-	4029,78
Всього витрат на експлуатацію	$З_{ЕК}$	$З^Б_{ЕК}$=157661,6	$З^Н_{ЕК}$=141057,3

Витрати на напиляєму речовину – полі-n-ксилілен:

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

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

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

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

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

для базової системи з врахуванням втрат:

$$З^{Б}_{МТ} = 0{,}1 \cdot 1 \cdot 240 \cdot 200 \cdot 1{,}12 = 5376 \text{ грн.},$$

для нової системи:

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

Визначимо витрати на заготовки:

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

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

для базової системи з врахуванням втрат:

$$З^{Б}_{МТ} = 5 \cdot 1 \cdot 240 \cdot 50 \cdot 1{,}18 = 70800 \text{ грн.},$$

для нової системи:

$$З^{Н}_{МТ} = 5 \cdot 1 \cdot 240 \cdot 50 \cdot 1{,}03 = 61800 \text{ грн.}$$

Витрати за електроенергію визначаються з урахуванням споживаємої системою потужності ($М = 3$) в кіловатах, та річного фонду роботи ($Ф_Р = 240 \cdot 4 = 960$ годин для базової та $Ф_Р = 230 \cdot 4 = 920$ годин для нової системи):

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

для базової системи:

$$З^{Б}_{ЕЛ} = 3 \cdot 960 \cdot 1{,}66 = 4780{,}8 \text{ грн.},$$

для нової системи:

$$З^{Н}_{ЕЛ} = 3 \cdot 920 \cdot 1{,}66 \cdot 0{,}8 = 3665{,}3 \text{ грн.},$$

де $Ц_{ЕЛ}$=1,66 грн – ціна за кіловат-годину електроенергії.

Витрати на поточні планові ремонти визначаються в залежності від конкретних умов експлуатації системи. При цьому враховуються матеріальні витрати ($M_{РЕМ}=100$ грн для базової та $M_{РЕМ}=80$ грн для нової системи) для проведення одного ремонту (запасні частини та інші матеріали), час проведення одного ремонту в годинах ($t_р=2$ та $t_р=1$ для базової та нової системи відповідно), середньогодинна тарифна ставка ремонтного працівника ($l_р$=50):

$$З_Р = П_Р \cdot (M_{РЕМ} + t_р \cdot l_р \cdot (1+0{,}01 \cdot H_Д) \cdot (1+0{,}01 \cdot H_С)),$$

для базової системи:

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

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

Для нової системи:

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

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

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

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

Для нової системи:

$$З_{АМ}^Н = \frac{25 \cdot 14653{,}74 \cdot 1{,}1}{100} = 4029{,}78 \text{ грн.}$$

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

Б.8 Визначення економічного ефекту від підвищення надійності роботи системи

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

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

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

Від підвищення надійності, основними з яких можуть бути:

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

- зниження витрат на відновлення працездатності технічної системи після відмови;

- скорочення матеріальних витрат на виробництво при використанні високонадійної техніки;

- зменшення часу незапланованого простою устаткування внаслідок відмов.

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

$$E_{ЗЧ} = Зб_{Б} - Зн_{Н}$$

$$E_{ЗЧ} = 500 - 200 = 300 \text{ грн.}$$

$Зб_{Б} = 500, Зн_{Н} = 200$ – вартість запасних частин за базовим та новим варіантами відповідно, грн.

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

$$E_{ВІДМ} = n_в^б \cdot s_в^б - n_в^н \cdot s_в^н,$$

$$E_{ВІДМ} = 3 \cdot 342{,}08 - 1 \cdot 588{,}25 = 438 \text{ грн.}$$

де $n_в^б = 3, s_в^б = 1$ – кількість відмов за рік відповідно базової і нової системи;

$n_в^н = 342{,}08, s_в^н = 588{,}25$ – середні витрати на усунення однієї відмови, за порівнюваними варіантами, грн.

$$S_В = Ц_В + I_Ч \cdot t_В (1 + K_{ДС} / 100),$$

для базової системи:

$$S_В^Б = 200 + 25{,}6 \cdot 5(1 + 11/100) = 342{,}08 \text{ грн.}$$

де $Ц_В$=200 – балансова вартість замінених елементів, грн.

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

для нової системи:

$$S_В^Н = 500 + 25{,}6 \cdot 3(1 + 11/100) = 588{,}25 \text{ грн.}$$

де $Ц_В$=500 – балансова вартість замінених елементів, грн.

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

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

$K_{ДС} = 11\%$ – процент додаткової зарплати та відрахування на соціальні заходи.

Загальна величина економії від підвищення надійності роботи технічної системи:

$$E_{НАД} = (E_{ЗЧ} + E_{ВІДМ})$$

$$E_{НАД} = (300 + 438) = 738 \text{ грн.}$$

Б.9 Визначення економічної ефективності при виготовленні виробу

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

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

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

$$E_{ВИТ} = [14653{,}74 - 12418{,}42] \cdot 5 - 0{,}25 \cdot 25967{,}74 = 4684{,}67 \text{ грн.}$$

де $Ц_Н = 14653{,}74$ – ціни модернізованого виробу, грн.,

$C_Н = 12418{,}42$ – повна собівартість модернізованого виробу, грн.,

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

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

$K_М$ – об'єм додаткових капітальних вкладень в освоєння випуску виробів, грн.

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

$$K_М = K_{НД} + Ц_М$$

$$K_М = 11314 + 14653{,}74 = 25967{,}74 \text{ грн.}$$

Період окупаємості додаткових капітальних вкладень у виробника нової системи:

$$T_{ВИГ} = \frac{K_М}{[Ц_М - C_Б] \cdot N_М} \text{ (років),}$$

$$T_{ВИГ} = \frac{25967{,}74}{11176{,}6} = 2{,}3 \text{ року.}$$

Період окупаємості додаткових капітальних вкладень у виробника нової системи 2,3 року.

Б.10 Визначення економічної ефективності у сфері експлуатації системи

При експлуатації системи (виробу) сукупний економічний ефект складають:

$$E_{ЕКС} = (З^{Б}_{ЕК} - З^{Н}_{ЕК}) + E_{НАД} - E_{Н} \cdot Б^{Н}_{АЛ},$$

$$E_{ЕКС} = (157661,6 - 141057,3) + 738 - 0,25 \cdot 16119,11 = 13312,5 \text{ грн.},$$

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

$E_{ЕКС}$ – величина економії від підвищення надійності роботи системи (розділ Б.8), грн.

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

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

$$T_{ЕКС} = \frac{16119,11}{(157661,6 - 141057,3) + 738} = 0,93 \text{ (років)},$$

$Б^{Н}_{АЛ} = Ц_{Н} \cdot 1,1 = 16119,11$ – балансова вартість модернізованої системи, грн.

$З^{Б}_{АЛ} = 2238,2$ – залишкова вартість діючої системи, грн.

Період окупаємості додаткових капітальних вкладень у споживача нової системи 0,93 року.

Б.11 Зведені техніко-економічні показники

Заключним етапом роботи по економічному обґрунтуванню випускної кваліфікаційної роботи є розробка зведених техніко-економічних показників системи за порівнювальними варіантами у вигляді табл. 7.8 (МР-151.21.0107.08.02.ТБ). Склад показників залежить від призначення виробів, широти нововведень, конкретних виробничих умов експлуатації.

Таблиця Б.8 – Зведені техніко-економічні показники системи

№	Найменування показників	Одиниці виміру	Величина по варіантах	
			Базовий	Новий
1.	Річний випуск систем	шт.	5	5
2.	Процент браку	%	18	3
3.	Процент зменшення витрат напилюваного матеріалу	%	-	20
4.	Повна собівартість системи	грн.	-	12418,42
5.	Ціна реалізації виробу	грн.	-	14653,74
6.	Економічний ефект: - виробничий - споживчий	грн.	-	 4684,67 13312,5
7.	Період окупаємості капітальних вкладень: - у виробника - у споживача	років		 2,3 0,93

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

Таким чином, розрахунок показників економічної ефективності установки електронно-променевого напилення підтверджує доцільність її розробки і впровадження на виробництвах.