НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра електронних приладів та пристроїв
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

_____Л.Д. Писаренко
“___” червня 2019р.

Дипломний проект

освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр»
(назва ОКР)

з спеціальності: **6.050802- Електроніка**
Спеціалізація: **Електронні прилади та пристрої**
на тему: Система керування струмом газорозрядної гармати

Виконав:
студент IV курсу, гр.ДЕ-51

Гриценко Павло Васильович _____ _____
(прізвище, ім’я, по батькові) (підпис)

Керівник доцент к.т.н. Тугай С.Б. _____ _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультанти:

Нормоконтроль доцент к.т.н. Чадюк В.О. _____ _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент _____ _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет Електроніки
Кафедра Електронні прилади та пристрої
Освітньо-кваліфікаційний рівень: Бакалавр
Спеціальність: 6.050802 – Електроніка
Спеціалізація : Електронні прилади та пристрої

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри, проф., д.т.н.
_____Л.Д.Писаренко «____»_____ 2019 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту
Гриценку Павлу Васильовичу

1. Тема проекту «Система керування струмом газорозрядної гармати»
і керівник проекту **Тугай Сергій Борисович, доцент.**
затверджені наказом по університету від «27»травня 2019 р., № 1405-с

2. Строк подання студентом проекту «4» червня 2019 р.

3. Вихідні дані до проекту: струм розряду - до 2 А, стала часу регулювання – одиниці секунд.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Анотація; вступ; огляд науково-технічної літератури по схемо-технічним принципам побудови та функціонування системи керування струмом газорозрядної гармати; розробка алгоритму функціонування системи; розробка схем: структурної, функціональної, електричної принципової схеми системи керування струмом газорозряднох гармати; розробка конструкторської документації на пристрій; висновки; перелік використаної науково-технічної літератури.

5. Перелік графічного матеріалу: Структурна, функціональна, електрична принципова схеми пристрою та складальне креслення дозуючого пристрою електромагнітного натікача; плакати з рисунками.

7. Дата видачі завдання 20.02.2019

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Огляд науково-технічної літератури та існуючих рішень на тему система керування струмом газорозрядної гармати	20.03.2019–01.04.2019	
2	Розробка алгоритму функціонування системи та розробка структурної схеми	01.04.2019–20.04.2019	
3	Огляд сучасної елементної бази	20.04.2019–25.04.2019	
4	Розробка схем функціональної та електричної принципової	25.04.2019–10.05.2019	
5	Розробка конструкторської документації: друкованої плати та складального креслення	10.05.2019–20.05.2019	
6	Оформлення пояснювальної записки. Підготовка доповіді	20.05.2019–10.05.2019	

Студент гр. ДЕ-51 _____**П. В. Гриценко**

Керівник проекту _____**С. Б. Тугай**

№ з/П	Формат	Позначення	Найменування	Кількість аркушів	Примітка
1	А4		Завдання на дипломний проект	1	
2	А4	БР.6.050802.051.007 ПЗ	Пояснювальна записка	67	
3	А1	БР.6.050802.051.007 Е3	Сист.керув.струмом газорозр. гармати Схема електрична принципова	1	
4	А1	БР.6.050802.051.007 СК	Сист.керув.струмом.газорозр.гармати Складальне креслення	1	
			Плакати з результатами розрахунків, графіками та формулами	1	
5	А4	БР.6.050802.051.007 ПЕ	Перелік елементів	1	
6	А4	БР.6.050802.051.007.01 СП	Специфікація	1	

Зм.	Арк	П.І.Б.	Підп.	Дата	БР.6.050802.051.007 ВДП			
Розроб.		Гриценко			Система керування струмом газорозрядної гармати	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірив		Тугай					1	1
						«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ, ЕПП, гр. ДЕ-51		
Н.контр.		Чадюк						
Затверд.		Писаренко						

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проекту

на тему: **«Система керування струмом газорозрядної гармати»**

Київ – 2019

ЗМІСТ

Р Е Ф Е Р А Т

Система керування струмом газорозрядної гармати

Дипломний проект освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр» спеціальності 6.050802 - Електроніка, спеціалізації – Електронні прилади та пристрої. Гриценко Павло Васильович. КПІ ім. Ігоря Сікорського, Факультет електроніки, кафедра «Електронні прилади та пристрої». Група ДЕ-51. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. –64 с., іл. 21, табл. 3.

Ключові слова: високовольтний тліючий розряд, газорозрядна електронно-променева гармата, система керування струмом газорозрядної гармати, електронний блок керування, дозуючий пристрій, електромагнітний натікач.

Короткий зміст роботи: У даному дипломному проекті представлено огляд науково-технічної літератури та статей на тему системи керування струмом газорозрядної гармати використовуючи сучасну елементну базу. Показано системи, що використовуються нині та їх недоліки для якісного виконання поставленої задачі.

Розроблений алгоритм оптимального керування електромагнітним на тікачем для забезпечення необхідних параметрів струму та тиску в камері газорозрядної гармати.

Показана сучасна елементна база, котру можна використати для забезпечення оптимальних параметрів напуску тиску та наявного струму, забезпечуючи стабільне робоче середовище для виконання технологічних завдань.

Розроблено конструкторську документацію на пристрій. Розроблено електричну принципову схему та складальне креслення електронного пристрою.

АНОТАЦІЯ

Метою даного дипломного проекту є розрахунок основних параметрів дозуючого вузла, розробка електронного блоку керування виконуючим пристроєм регулятора та дослідження системи керування струмом газорозрядної електронної гармати з холодним катодом.

При роботі газорозрядних гармат, що використовуються у промисловості для нанесення плівок, модифікації поверхні, плавлення, зварювання металів і т.п., необхідне мало інерційне керування струмом ГРЕГ або його якісна стабілізація для відповідного проведення технологічного процесу. Для цього використовується автоматичний регулятор струму розряду. Точність підтримування заданого значення струму гармати складає приблизно 3%.

SUMMARY

The purpose of this diploma project is to calculate the main parameters of the dosing unit, to develop an electronic control unit for the controller and to study the current control system of a gas-discharge electronic gun with a cold cathode.

When working with gas-discharge guns used in industry for film application, surface modification, melting, welding of metals, etc., it is necessary to have little inertial current control GREG or its qualitative stabilization for the proper conduct of the technological process. For this purpose, an automatic discharge controller is used. The accuracy of maintaining a given gun current value is approximately 3%.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ВТР – високовольтний тліючий розряд;

ГРЕПГ – газорозрядна електронно-променева гармата

ВАХ – вольт-амперна характеристика

ККД – коефіцієнт корисної дії

ДП – дозуючий пристрій

ЕН – електромагнітний натікач

СК – система керування

ВСТУП

У сучасних технологічних процесах для виконання багатьох термічних операцій в вакуумі широко застосовуються електронні гармати на основі високовольтного тліючого розряду (ВТР) з холодним катодом, які характеризуються тривалим терміном служби катода, стійкістю роботи в різних діапазонах газів та роботою у широкому діапазоні тисків, можливістю формування пучків різної потужності, відносної простотою і надійністю роботи. Так як струм ВТР сильно залежить від тиску в розрядному проміжку, то керування ним здійснюють, змінюючи тиск в області горіння розряду за допомогою регульованого напуску газу в пушку при її безперервній відкачці. Таку систему керування струмом газорозрядної електронно-променевої гармати називають газодинамічною Цей спосіб керування забезпечує зміну струму гармати в усьому її робочому діапазоні. Напуск газу здійснюють з газових магістралей за допомогою натікачів, що працюють в ручному або в автоматичному режимі, із застосуванням електронних блоків керування. Для більшості технологічних процесів, де використовуються газорозрядні електронні гармати, потрібно автоматичне керування їх струмом з високою точністю і малим часом регулювання у всьому робочому діапазоні гармати. При цьому натікач, який використовується в якості виконавчого пристрою, повинен мати малоінерційний електричнокерований привід, що працює в аналоговому режимі.

Плавність регулювання потоку газу, що напускають в гармату, а також стабільність параметрів натікача, багато в чому залежать від конструкції і геометричних розмірів дозуючого пристрою. Тому було знайдено оптимальні параметри та конструкцію дозуючого пристрою, а також описано та досліджено безпосередньо систему керування ГРЕПГ.

РОЗДІЛ 1. РОЗГЛЯД ГАЗОРОЗРЯДНИХ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ ГАРМАТ ВИСОКОВОЛЬНОГО ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ

1.1 Класифікація газорозрядних гармат

Газорозрядна електронно-променева гармата – це електронний пристрій, за допомогою якого отримують сфокусований потік прискорених електронів певної конфігурації.

В залежності від призначення електронні гармати відрізняються конструктивними, електронно-оптичними і енергетичними характеристиками. Але за способом виникнення електронного пучка існує дві групи гармат. Їх поділяють на гармати з термокатодом (катоди прямого та непрямого накалу) та гармати з холодним катодом.

У першій групі виникнення електронного пучка відбувається прямим чи не прямим нагріванням катоду. Тобто в результаті нагрівання до високої температури катоду, з нього емітуються вільні електрони. Це явище називається *термоелектронною емісією.* У другій групі гармат створюється електронний потік не нагріванням катоду, а бомбардуванням його позитивними іонами плазми, яка у свою чергу виникає завдяки високовольтному тліючому розряді у газі. Таке явище називається *вторинною електронно-іонною емісією.*

В результаті численних досліджень умов оптимальної роботи технологічних електронних гармат з термокатодами стало можливим запровадити електронно-променеву технологію у промисловість. З досвіду експлуатації встановлено, що для їх стійкої роботи необхідно виконання наступних вимог:

1) Конструкція і матеріал деталей електронної гармати повинні бути стійкими у вакуумі при високій температурі, великій напруженості електричного поля, іонному бомбардуванні та напиленні.

2) Електронно- та іонно-оптична системи електронної гармати повинні забезпечувати формування необхідного потоку електронів і захист катода від нерівномірному інтенсивному бомбардуванню іонами та атомами оброблюваного матеріалу і газу.

3) Простір, в якому формується та прискорюється пучок електронів і область його використання зазвичай повинні бути максимально розділені по тиску газу і мати автономні системи відкачування і електричного живлення.

4) Електронна гармата повинна мати систему автоматичної стабілізації та управління основними параметрами. Ці вимоги через специфіку технологічних операцій не завжди можна повністю виконати, але якщо їх врахувати, то стало можливим створити ефективні промислові електронно-променеві установки.

Недоліком термокатодів – їх висока робоча температура. Це призводить до нагрівання навколишніх деталей та нестабільності геометричних розмірів емісійної системи, складності конструкції, електричного живлення та керування, складності отримання фігурних пучків та пучків великого поперечного перерізу. Вони стабільно працюють лише при тиску газу $\leq 5 \times$ Па і мають малий термін служби та невисоку надійність. Тому поряд з удосконаленням гармат з термокатодами досліджують і розробляють плазмові джерела електронів з холодними катодами, які не мають основних недоліків термокатодів. У цих джерелах інтенсивний потік електронів формується з поверхні холодного катода або поверхні високоіонізованої плазми, що утворюється в розрядному проміжку між холодними електродами [1].

Газорозрядні електронно-променеві гармати високовольтного тліючого розряду, розроблені ПРАТ «НВО« Червона Хвиля », представлені на *рис. 1.1*

Рис. 1.1 Газорозрядні електронно-променеві гармати ВТР-100 (100 кВт), ВТР-300 (300 кВт) і ВТР-450 (450 кВт) відповідно

1.2 Конструкція електронних гармат високовольтного тліючого розряду

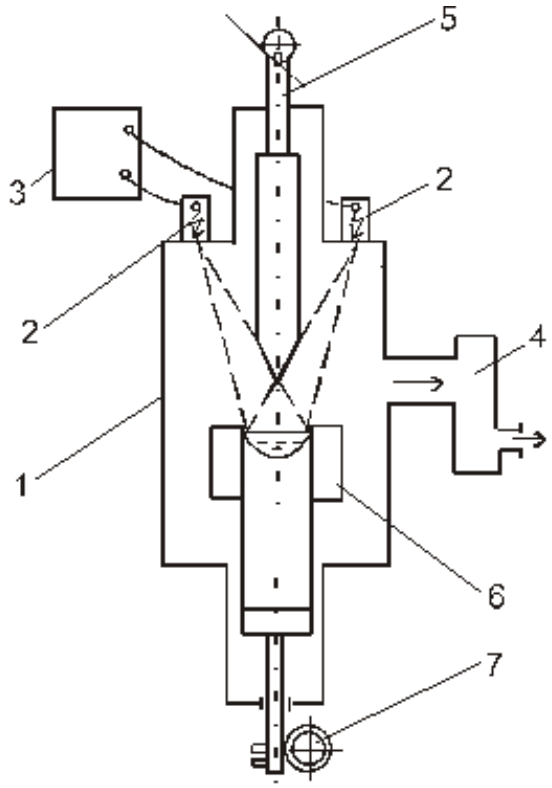

Рис.1.2 Принципова схема електронно-променевої установки

1) вакуумна камера;

2) електронно-променеві гармати;

3) джерело високої напруги і система керування розгорток променів;

4) вакуумная система;

5) система завантаження заготовки, що плавиться, яка подає заготовку в зону плавки;

6) технологічна оснастка установки, що містить у собі при прямом плавленні кристалізатор з поддоном;

7) механізм витягування злитка.

Конструктивно будь-яка газорозрядна електронно-променева гармата складається з наступних вузлів та частин:

- Катодний вузол, зокрема і катод

- Анодний вузол
- Ізолятор
- Променепровід (дві фокусуючи катушки та одна катушка відхилення)

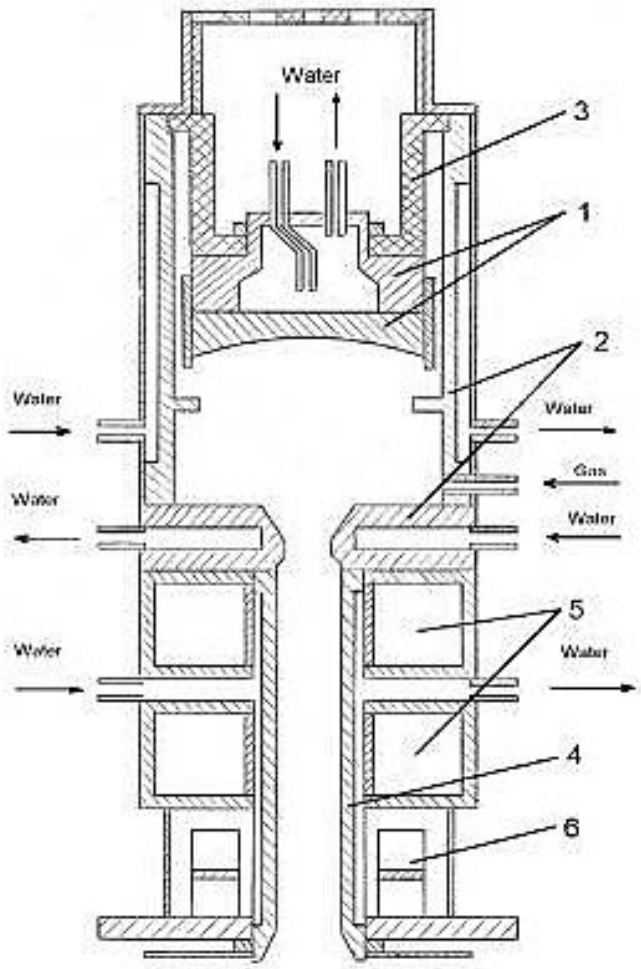

Рис.1.3 Конструктивна схема газорозрядної електронно-променевої гармати серії ВТР

1- катодний вузол;

2– анодний вузол;

3 – ізолятор;

4 – променепровід;

5 – фокусуючі катушки;

6 – катушка відхилення)

1.2 Принцип роботи ГРЕПГ ВТР

Газовий тліючий розряд – це самостійний електричний розряд у газах, який являє собою проходження електричного струму у просторі між катодом та анодом, коли між електродами прикладена напруга. Як правило такі розряди відбуваються при низькому тиску газового середовища. Під час такого явища проходить малий електричний струм. Якщо струм буде більшим, то тліючий розряд перетвориться на дуговий.

При газовому тліючому розряді електричне поле розподіляється нерівномірно на певні області, про що свідчить різна яскравість цих зон, в яких проходить електричний струм. Найбільше падіння напруги при тліючому газовому розряді спостерігається поблизу катоду. Таке явище *називається катодне падіння потенціалу.*

Для роботи газорозрядної електронно-променевої газорозрядної гармати в її розрядну камеру подається робоча газова суміш водню та кисню в певній пропорції. Під впливом прискорюючого електричного поля між катодом і анодом виникає високовольтний тліючий розряд з плазмою, локалізованою в площині катодно-анодного вузла і окремою від катода областю катодного падіння потенціалу.

Плазма емітує позитивні іони, які прискорюються полем в області катодного падіння потенціалу і бомбардують катод, викликаючи емісію електронів. Це ж поле прискорює електрони і формує електронний промінь, що сходиться кроссовером, який розміщений в площині отвору у дні аноду.

Магнітне поле, що утворене першою фокусуючою катушкою, формує електронний промінь за формою подібний до циліндричного, внаслідок чого він проходить в технологічну камеру через променепровід практично без енергетичних втрат. За допомогою другої фокусуючої катушки промінь фокусується на поверхні, що нагрівається, а за допомогою катушки відхилення відбувається програмна розгортка електронного променя [2].

Керування струму променя забезпечується регулюванням тиску робочого газу в розрядній камері гармати. Для ефективного керування струмом променя і стабілізації режиму роботи гармати застосовується мало інерційна система напуску газу, в якій регулювання потоку газу відбувається за допомогою електромагнітного регулятора росходу.

1.3 Технічні характеристики газорозрядних гармат ВТР

	ВТР-100	ВТР-300	ВТР-450	ВТР-600
Максимальна потужність, кВт	100	300	450	600
Границі регулювання потужності, кВт	0...100	0...300	0...450	0...600
Максимальна прискорююча напруга, кВ	30			
Кут відхилення електронного променя від осі гармати, не більше	30^0			
Діапазон робочого тиску в площині гармати, Па	10…0,01			
Максимальний розхід рабочого газу (водню технічного) при тиску 0,1 МПа, л/с , l/sec	$3•10^{-3}$	$8•10^{-3}$	$11•10^{-3}$	$14•10^{-3}$
Час роботи катода, годин, не менше, hours	300			
Росхід охолоджуючої рідини, води, л/с	0.15	0.5	0.75	1.0
Висота, мм	460	480	550	650
Маса, кг	22	40	55	80

Табл.1.1

1.4 Системи комплексу забезпечення роботи газорозрядної електронно-променевої гармати високовольтного тліючого розряду

Для забезпечення роботи газорзрядної електронної гармати необхідна наявність ряду систем, а саме:

- високовольтне джерело живлення;
- система підготовки і подачі робочого газу;
- система охолодження гармати;
- система керування гарматою;
- контрольно-вимірювальна апаратура.

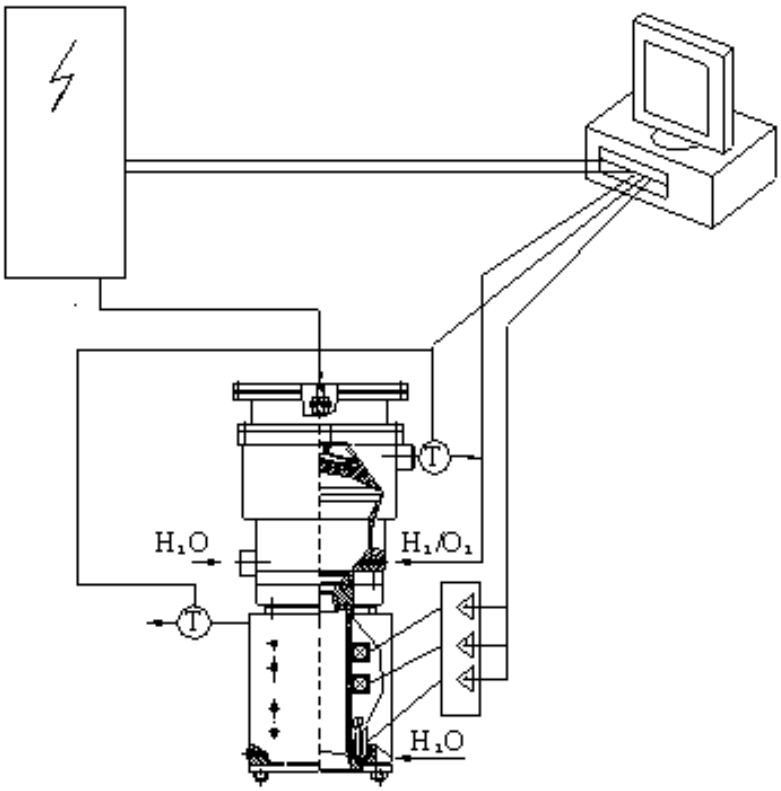

Рис.1.4 Системи комплексу забезпечення роботи газорозрядної електронно-променевої гармати високовольтного тліючого розряду

Система підготовки і подачі робочого газу і система охолодження гармати комплектуються серійним промисловим обладнанням, призначеним для виконання задач такого роду.

Високовольтне джерело живлення може бути будь-яким, що забезпечує захист від короткого замикання. Також воно повинне забезпечувати швидке відновлення параметрів вихідного струму і напруги у випадку розряду в електронній гарматі.

Система керування гарматою повинна забезпечувати керування фокусуванням і траєкторіями переміщення електронних променів, регуляторами розходу робочих газів (фактично – керування потужністю променя), а також приймати та обробляти результати вимірів контролю параметрів гармати.

1.5 Застосування електронно-променевих технологій. Призначення та використання ГЕПГ

Область використання потоків заряджених частинок в техніці та наукових дослідах неперервно розширюється. Найбільше розповсюджені пристрої, що засновані на застосуванні енергії прискорених пучків електронів, які генеровані електронними гарматами. Потоки електронів застосовують в промисловості для плавки , зварювання, пайки, отжига, випаровування, розмірної та поверхневої обробки різних матеріалів. Їх все більше все більше використовують і в інших областях: в лазерній техніці, у потужних комутаторах, в установках для нагріву та отримання плазми, у прискорюючій техніці, радіаційних технологіях, у плазмохімії, а також у наукових дослідах при моделюванні теплових процесів, вивченні теплофізичних властивостей нових матеріалів, дослідженні високотемпературних конструкцій та ін.

Проте одна із самих перспективних областей застосування – використання потоків електронів для проведення різних технічних операцій, де застосовують джерела електронів з широким діапазоном зміни робочого струму, напруги, питомої потужності. При цьому для всіх типів джерел вакуум, як робоче і захисне середовище при проведенні технологічних операцій і генерації потужного потоку електронів, ці аспекти визначають такі параметри електронно-променевої установки як надійність і стабільність роботи, термін служби, продуктивність, вартість та ін.

Газорозрядні електронно-променеві гармати знаходять все більше застосування в різних галузях промисловості, головним чином завдяки їх здатності стабільно працювати в важких вакуумних умовах, характерних для ряду технологічних процесів. Досвід експлуатації газорозрядних електронно-променевих гармат потужністю від 60 до 450 кВт підтверджує не тільки можливість, а й доцільність їх промислового застосування в таких процесах, як електронно-променева плавка титану, ніобію, танталу, молібдену, електронно-променевого рафінування кремнію, певних видів зварювання , напилення покриттів та іншого.

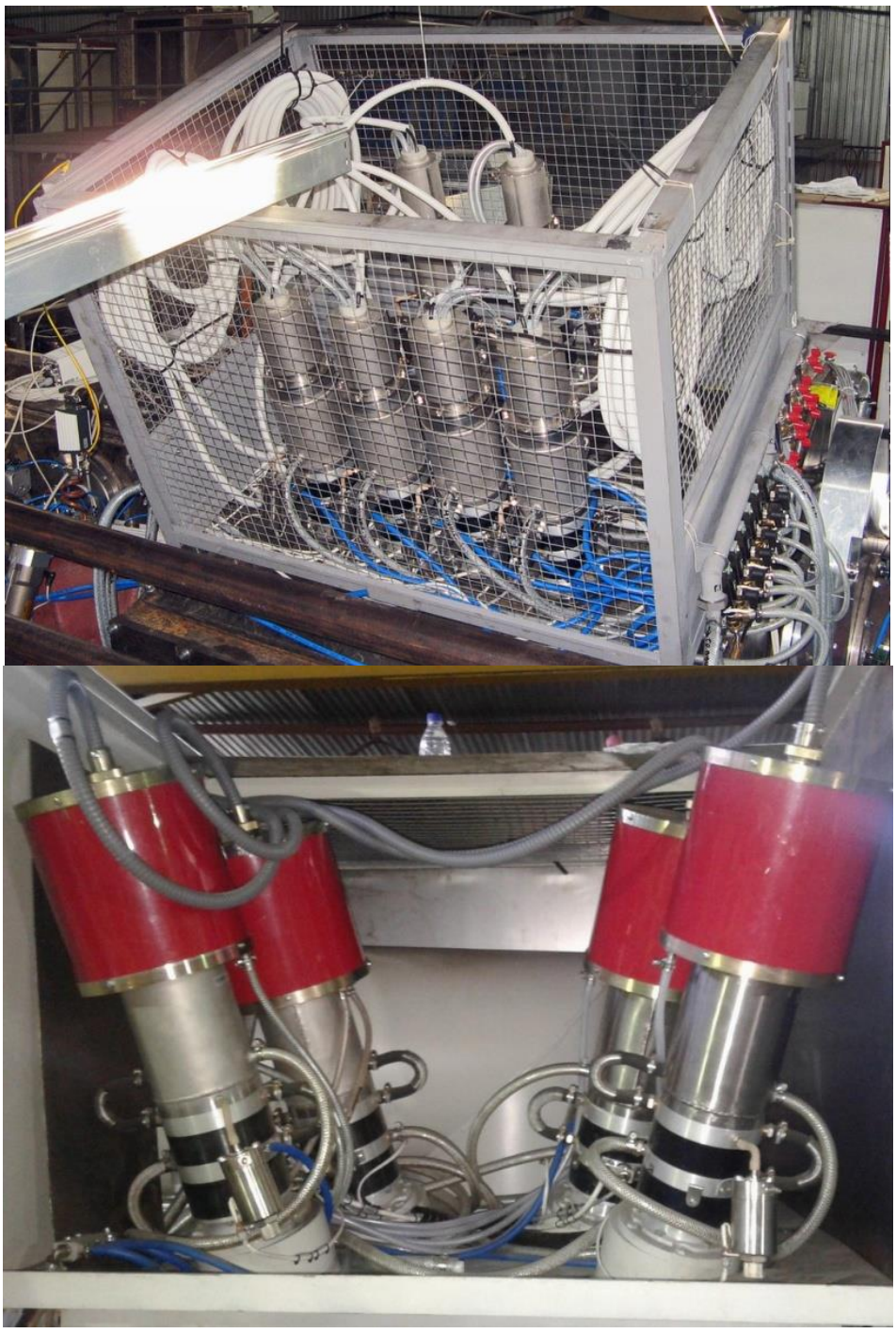

Рис. 1.5 Газорозрядні електронно-променеві гармати ВТР-100 у складі установки для нанесення теплозахисних покриттів (а) і в складі плавильної установки (б)

Фізична основа процесу плавлення полягає у перетворенні кінетичної енергії прискорених електронів у теплову при різкому зменшенні швидкості електронного променя в поверхневому шарі металу[3].

Сучасне промислове обладнання, створене на базі газорозрядних електронно-променевих гармат, відрізняється відносною конструктивною простотою, стабільністю роботи, зручністю обслуговування, високою виробничою та економічною ефективністю. Основною перевагою електронно-променевого нагріву є можливість незалежно від процесу плавлення плавно і в широких межах змінювати потужність тепла і конфігурацію зони нагріву. Деякі особливі робочі характеристики газорозрядних електронно-променевих гармат відкривають можливості реалізації нових технологічних режимів і навіть процесів.

Досвід експлуатації газорозрядних електронно-променевих гармат високовольтного тліючого розряду в реальних промислових умовах дозволив дослідити їх характеристики в різних робочих умовах і визначити шляхи подальшого вдосконалення газорозрядних електронно-променевих гармат з метою підвищення їх технологічної і комерційної привабливості.

Основними напрямками дослідних і конструкторських робіт стало покращення стабільності роботи газорозрядних електронно-променевих гармат в умовах динамічної зміни залишкового тиску в робочій камері, підвищення загальної надійності, збільшення терміну служби гармат і їх окремих частин, скорочення простоїв обладнання за рахунок зниження особливих вимог до регламентного обслуговування [7].

Існує ряд тонших металургійних процесів, що вимагають дуже м'якого або плавного нагріву мішеней, наприклад, тонких деталей або малих зон обробки. Це може бути зварювання тонкостінних елементів, пайка, поверхнева обробка, адитивне виробництво і т.п. У таких випадках прискорююча напруга (10 ... 20 кВ) забезпечує високу ефективність роботи газорозрядної

електронно-променевої гармати, при цьому комплектне устаткування стає більш простим, дешевим і безпечним.

Розроблено широкий ряд газорозрядних електронно-променевих гармат різної конструкції і потужності. Основні технічні характеристики доступних газорозрядних електронно-променевих гармат різного призначення представлені в *таблиці 1.2*

В даний час можна стверджувати, що газорозрядні електронно-променеві гармати стали надійним інструментом промислового виробництва зі зростаючими перспективами освоєння нових технологій і процесів.

Потужніст, кВт	Прискорююча напруга, кВ	Струм променя, А	Діаметр променя на мішені, мм	Діапазон робочих тисків у робочій камері, Па	Робочі гази	Технології використання
1...10	10...40	0,1...1,0	0,5...4,0	$10...10^{-2}$	Повітря Кисень Аргон Гелій	Зварювання тонкостінних деталей, пайка, поверхнева термообробка, адитивне виробництво
30…100	25…30	1…4	5…8	$10...10^{-3}$	Водень Кисень	Зварювання пресованих матеріалів, напилення покриттів, вирощування монокристалів
100…450	30	3,3…15	8…20	$5...10^{-2}$	Водень з добавками кисню	Плавка і рафінування тугоплавких і активних металів та сплавів
600	40	15	15…20	$5...10^{-2}$	Те ж саме	Те ж саме

Табл. 1.2

РОЗДІЛ 2. РОЗГЛЯД ІСНУЮЧИХ ТИПІВ НАТІКАЧІВ ТА СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ДО НИХ

2.1 Натікачі

2.1.1 Вимоги, що пред'являються до вакуумних натікачів, їх характеристики

Основні вимоги до нтікачів достатньо добре сформульовані в наявній літературі [6]. Ці вимоги відносяться як до газодинамічних властивостей натікача, так і до його конструкції, а саме:

1.Мала швидкість знегаження всіх частин натікача.

2.Мале витікання при подачі газу. Це витікання може виникнути внаслідок невдалої конструкції, особливо механізму, що керує роботою натікача, наприклад, при використанні еластомірів для герметизації сідла клапана та штоку від зовнішнього тиску. Гума еластомірних прокладок також може виділяти гази та забруднювати вакуумну систему. Вельми важливою є цілковита ізоляція керуючого механізму від безпосередньо вакуумної частини натікача. Це за звичай досягається з допомогою мембран.

3.Можливість витримувати великі перепади тиску (1 бар і більше).

4. Висока провідність натікача в положенні "натікач відкрито". Це досить важливий параметр, але інколи його досить важко досягти, оскільки інші параметри можуть мати важливіше значення.

Наприклад:

5. Число вікривань-закривань натікача, тобто час надійної роботи натікача.

6. Допустима частота операцій відкривання-закривання натікача, тобто число таких операцій в одиницю часу.

7. Час відкривання та закривання.

8. Здатність витримувати високу температуру, радіацію, вібрацію.

9. Герметичність по відношенню до атмосферного тиску в одному або в обох напрямках.

10.Максимально допустимий перепад тисків.

11.Простота обслуговування.

12.Допустимий робочий діапазон тисків (Зазвичай від атмосферного до високого вакууму).

13.Легкість дозування газу (для натікачів імпульсної дії)

14.Доступність матеріалів, з яких виготавлюється натікач. В конструкції корпуса натікача зазвичай використовується алюміній (або сплави з нього) та нержавіюча сталь. Сталь також використовується також при виготовленні внутрішніх деталей. Для прокладок використовується резина, фторопласти, а також мідь (в цільнометалічних натікачах).

1.1.2 Класифікація існуючих типів натікачів

Всі натікачі можна розділити на групи в залежності від конструктиіних особливостей, режиму роботи і т.і.

По режиму роботи натікачі розрізняють як ручні та автоматичні. Ручні натікачі керуються безспосередньо оператором, що само собою викликає значну інерційність. Такий натікач може бути прокалібрований з допомогою шкали з обертаючоюся ручкою керування натікачем для різних типів газів с тим, щоб оператор міг встановлювати з допомогою шкали певну величину потоку газу.

Автоматичні натікачі використовуються у випадку проведення тонких технологічних операцій, таких як, наприклад, реакціонний синтез, термоіонне осадження, розпилення окислів металлів і т.і., що потребують достатньо жорсткого дотримання величини заданого тиску в технологічній камері, а при необхідності використання газових сумішей парціального

тиску газа-реагента. Автоматичні натікачі передбачають також можливість дистанційного керування процесом натікання газу.

З допомогою автоматичного натікача, зокрема, можна вельми точно підтримувати заданий тиск.

По принципу дії натікачі поділяються на дискретні (імпульсні) та аналогові.

В дискретних натікачах регулювання газового потоку відбувається періодичним відкриванням клапану з частотою керуючого сигналу, що подається на катушку електромагніта або на пьєзоелемент (вони служать приводом натікача). Такі натікачі стабільні в роботі, забезпечують ефективне керування. Але вони мають також і суттєві недоліки: пульсуюче надходження газу в вакуумну камеру, короткий срок служби запорного органа, недостатню швидкодію.

Аналогові натікачі забезпечують можливість плавного регулювання потоку газу у всьому діапазону тисків. Запорним органом зазвичай слугує голка з сідлом, а в натікачі з термоприводом – нагріваємий струмом провідник, що вміщений в газовому каналі натікача. Недоліками аналогових натікачів з сервоприводом та термоприводом є їх велика інерційність, натікачців на пьезокераміці – висока керуюча напруга та короткий срок служби в аналоговому режимі.

Автоматичні натікачі можна також класифікувати по конструкції приводу: натікачі з пьєзоприводом, натікачі з сервоприводом, натікачі з термоприводом, натікачі з електромагнітним приводом.

Натікачі можна також класифікувати по діапазону швидкості натікання газу. Кожен натікач з змінюємою швидкістю натікання має визначений діапазон (наприклад, 10^{-1} – 1000 мбар/сек). Всього ці діапазони різних натікачів, перекриваючись, займають 8 порядків величини.

1.1.3 Натікачі, що працюють в дискретному (імпульсному) режимі

Роглянемо натікач з електромагнітним приводом. Приклад такого натікача приведено на *рис. 1.1.* При подачі струму на обмотку катушки електромагніта 2 якор електромагніта 3, разом зі штоком починає коливатися, внаслідок дій прижимної сили пружини 1 та сили викликаною протіканням струму в обмотці катушки.Внаслідок цього натікач починає відкриватися і закриватися з частотою струму. Об'єм подаваємої порції газу залежить від частоти та амплітуди струму, що проходить через обмотку електромагніту.

Основним недоліком такого натікача є пульсація газового потоку.

Натікач з п'єзоприводом [10] забезпечує гарну швидкодію і дозволяє здійснювати імпульсний напуск газу. Конструкція натікача приведена на рис. 1.2. Принцип роботи наступний: на п'єзоперетворювач 9 подають змінну напругу з заданою частотою, внаслідок чого під дією змінного електричного струму, що підводиться до п'єзоперетворювача, останній змінює свої геометричні розміри в такт частоті. Шток починає коливатись під дією п′єзоелемента та штовхача 8. Таким чином здійснюється імпульсний напуск газу.

1.1.4 Натікачі, що працюють в аналоговому режимі

Натікачі з термоприводом. Конструкція такого натікача [5] приведена на рис. 1.3. В початковому стані газовий натікач закритий і за рахунок розташування ущільнюючої поверхні пружнього ущільнювача 7 під гострим кутом до осі отвору штуцера 2, кромка якого перпендикулярна до осі, ущільнююче зусилля розподілено нерівномірно по периметру ущільнювача. При подачі на дріт 9 через електровводи 4 керуючої

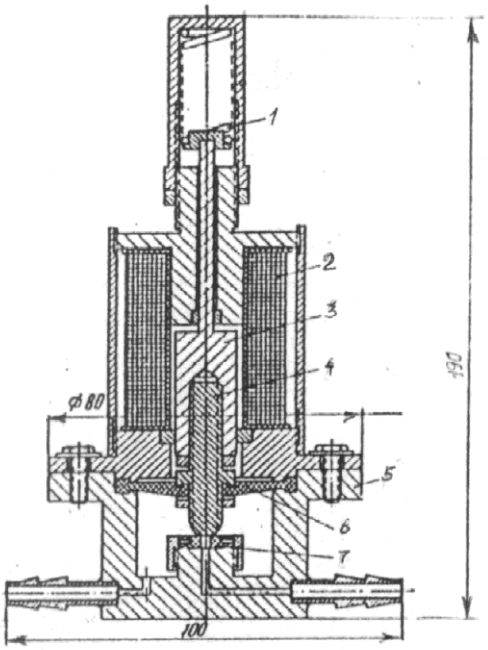

Рис. 2.1 Електромагнітний натікач

1 – пружина; 2 – катушка електромагніта; 3 – якор електромагніта; 4 – шток; 5 – корпус; 6 – резинова діафрагма; 7 – сідло клапана з фторопластовим ущільнювачем.

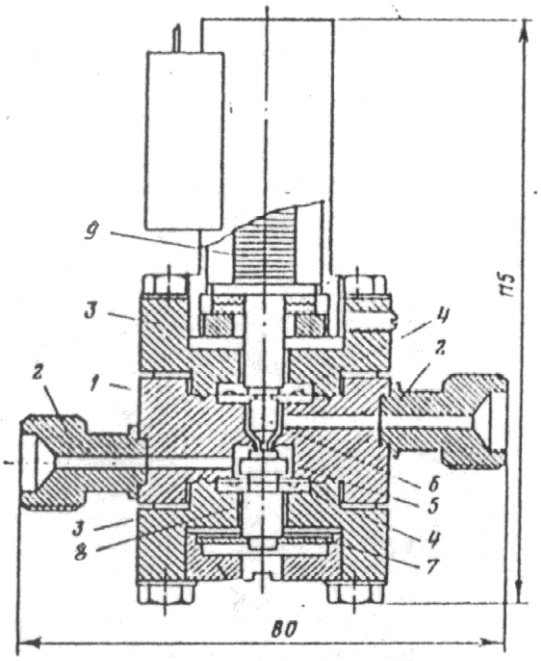

Рис.2.2 П′єзоелектричний натікач

1 – корпус; 2 – штуцер; 3 – фланець; 4 – мембрана; 5 – клапан; 6 – шток; 7 – регулюючий пристрій; 8 – штовхач; 9 – п′эзоелемент.

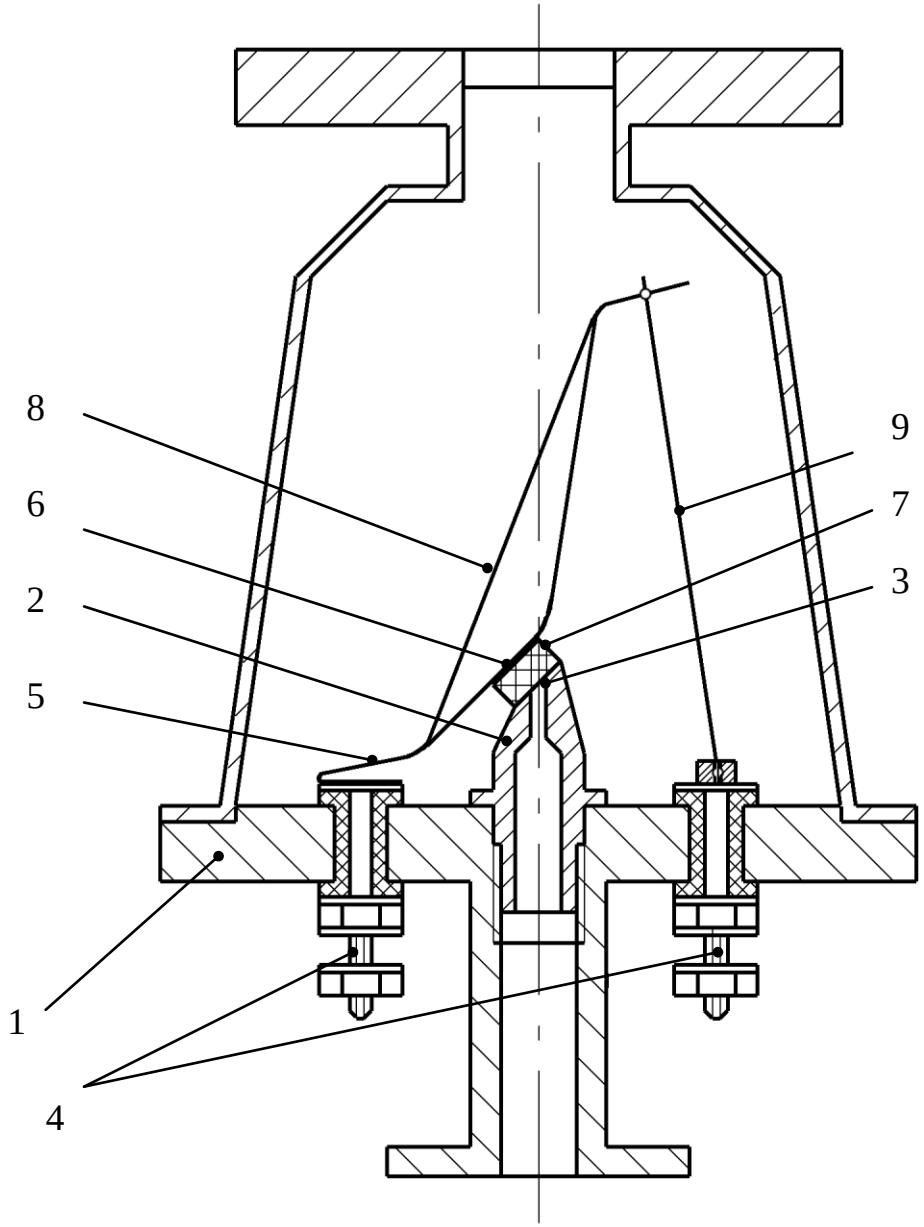

Рис.2.3 Натікач з термоприводом, що працює в аналоговому режимі

1 - корпус; 2 - штуцер; 3 - клапан; 4 - електроввід; 5 - плоска віджимаюча пружина; 6 - утримувач; 7 - пружній ущільнювач; 8 - кронштейн; 9 - ніхромовий дріт.

напруги дріт 9 подовжується і пружина 5 віджимає пружній ущільнювач 7 від отвору 3. Оскільки переміщення малі, то можна сказати, що пружній ущільнювач переміщується параллельно осі отвору 3 штуцера 2. При цьому газовий натікач починає відкриватися. Забезпечується плавність регулювання як на начальному так і на послідуючому участку. При усунені керуючого струму з дроту 9 відбувається закриття натікача в зворотньому порядку. Використання описанного технічного рішення в конструктивному виконанні газового натікача дозволяє підвищити плавність регулювання величини газового потоку, а також покращити відновлюваність величини газового потоку при прямому та зворотньому ході.

Натікач з сервоприводом. Конструкція даного натікача [6] базується на принципі дії парціального крану. Ротор і статор натікача мають деяку кількість каналів, через які при обертанні ротору з визначеною швидкістю встановлюється газовий потік, якщо тиск на виході натікача залишається постійним. Змінюючи швидкість обертання ротору, можна змінювати провідність натікача. Недоліками є пульсація газового потоку та значна інерційність натікача. Його перевага – великий діапазон швидкостей натікання газу.

1.2 Автоматичні регулятори тиску розріджених газів

Відомо, що компенсація зміни тиску в об′єкті з вакуумним середовищем може бути здійснена двома шляхами. Перший шлях – безперервне регулювання з допомогою регулюємого потоку в об′єкті при безперервній його відкачці або регулюємої відкачки при постійному потоці. Таке регулювання є аналоговим. Другий шлях – дискретне регулювання. В цьому випадку тиск в об′єкті підтримується в заданому інтервалі і при досягенні ним нижньої або верхньої границі інтервала здійснюється відповідно впуск газу або його відкачка до відновлення в об′єкті первинної величини тиску. Цьому всі системи автоматичного регулювання тиску в

вакуумному об′єкті можна розділити на дві групи: системи з аналоговим регулюванням та системи з дискретним регулюванням.

1.2.1 Система з дискретним регулюванням тиску у вакуумному об′єкті

Система такого типу приведена в [9]. Досліджуємий вакуумний об′єкт відкачується через електромагнітний клапан К1 та регулюємий вентиль К2. Тиск, який повинен підтримуватись в об′єкті в заданих границях, реєструється вакуумметром ВІТ-1А (4), що вимірює сигнали датчиків ЛМ –2 (2) або ЛТ – 2 (3). Сигнал з клем вимірювальних пристроїв вакуумметра подавався на електронний самописець (5) та підсилювач постійного струму (6). Зміна рівня сигналу при зміні тиску в об′єкті реєструється сигнальною схемою (7). Відхилення сигналу від заданного рівня викликає спрацьовування сигнальної схеми, що вмикає живлення (8) відповідного електромагнітного клапана на напуск газу (К3) або його відкачку (К1). По поверненні тиску в об′єкті до заданного рівня живлення клапана автоматично вимикалось. Принципова схема експериментальної установки представлена на рис. 1.4. Швидкість відкачування об′єму (1) регулювалась вентилем К2. Напуск газу в об′єм здійснювався через електромагнітний клапан К3. Швидкість напуску газу задавалась перепадом тиску на клапані. Останній регулювався зміною тиску в об′ємі (9), в якому за допомогою вентилів К4 та К5 встановлювався режим динамічного вакууму. Система іипробовувалась в діапазоні зміни тиску в об′ємі (1) від 10^{-1} до 10^{-5} мм. рт. ст. Верхня границя діапазону обмежувалась чутливістю датчика ЛТ-2 при роботі з вакуумметром ВІТ-1А, нижній – герметичністю ущільнення електромагнітного клапана. Взагалі така система може працювати в будь-

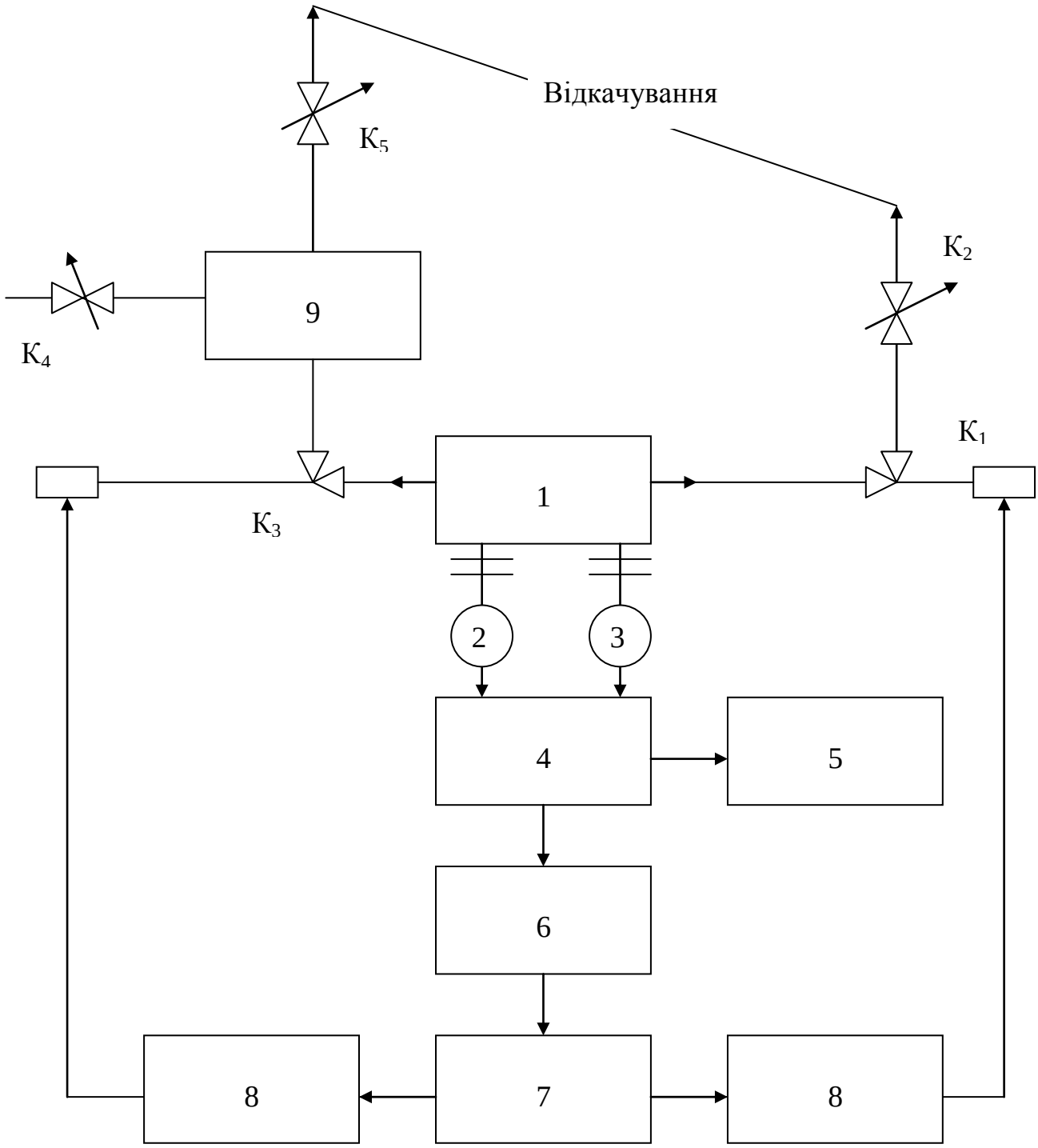

Рис.2.4 Система автоматичного дискретного регулювання

1 - вакуумний об′єм; 2 - іонізаційний манометр; 3 - термопарний манометр; 4 - вакуумметр; 5 - самописець; 6 - підсилювач постійного струму; 7 - сигнальна система; 8 - блок живлення клапана; 9 - об′єм динамічного вакуума; $К_1$, $К_3$ - клапани; $К_2$, $К_4$, $К_5$ - вентилі

якому діапазоні тисків, який визначається параметрами використовуємих датчиків тиску та вакуумної установки в цілому. Мінімальні відхилення тисків в об′ємі (1) від заданого рівня, що допускаються системою регулювання, склало 5%.

Така система дискретного регулювання тиску в вакуумному об′ємі надійна в роботі. дає повну відтворюваність результатів, але й має ряд недоліків: велику інерційність регулювання, відносно малу точність регулювання.

1.2.2 Система з аналоговим регулюванням тиску у вакуумному об′ємі

Така система регулювання тиску приведена в [8]. Вона складається з виконуючого пристрою (рис. 1.5) та кола зворотнього зв′язку. Газ потрапляє в об′єм 4 через сервовентиль 3 з змінною провідністю. Парціальний тиск в експериментальному відкачуваному об′ємі вимірюється високочастотним мас-спектрометричним манометром, який і є датчиком кола автоматичного регулювання. Напруга на виході датчика пропорційна регулюємому парціальному тиску. На вхід підсилювача 1 надходить напруга з діагоналі вимірювального мосту, рівна різниці напруг датчика та деякого стандартного сигналу. Підсилений сигнал керує з допомогою серводвигуна 2 відпиранням та запиранням вентиля 3. В склад кола зворотнього зв′язку входять датчик (масс-спектрометричний манометр), коректуючий ланцюг та реєструючий пристрій. Масс-спектрометричний манометр складається з вимірювальної трубки та блоку живлення. Роздільна здатність прибору $5 \cdot 10^{-9}$ мм. рт. ст. Перевагами манометра є малі розміри вимірювальної трубки та можливість простого під′єднання до вакуумної системи. Блок живлення може бути використаний для живлення декількох вимірювальних трубок. Для усунення спотворюючого впливу коливань швидкості відкачки, які

мають місце в певних областях тиску, між виходом вимірювального блока манометра та входом вимірювального моста міститься коректуючий активно-ємнісний фільтр.

Сервовентиль являє собою голкоподібний клапан, жало якого переміщується в осьовому напрямку з допомогою двохфазного двигуна. При атмосферному тиску на вході клапана його пропускна здатність змінюється від 10^{-5} до 10 мм. рт. ст. Одному оберту двигуна відповідає зміна провідності на $2 \cdot 10^{-5}$ л/сек. Швидкість обертання двигуна, а відповідно, й тиск в системі є лінійною функцією вхідної напруги.

Відносна похибка регулювання тиску склала 3%. Недоліком такої системи є відносно велика інерційність, зумовлена застосуванням натікача з сервоприводом.

1.3 Методика моделювання системи автоматичного керування струмом газорозрядної гармати

Розглянуті вище системи автоматичного керування тиском розрядженого газу розроблялись як універсальні для керування тиском в вакуумних пристроях та системах з різними газодинамічними характеристиками і не відповідають в повній мірі вимогам до стабільності та керованості параметрів електронних гармат. Покращення характеристик регулювання може бути досягнуто при розробці системи автоматичного керування струмом для конкретного пристрою за умови оптимізації її параметрів. Така задача пов′язана з великим обсягом експериментальних робіт і значно спрощується при комп′ютерному моделюванні таких систем.

В роботі [11] приведено аналіз процесу автоматичного керування струмом газорозрядної гармати за допомогою електромагнітного натікача та запропонована його математична модель та обрано ефективний спосіб її розв′язку.

Фізична модель такої системи автоматичного керування струмом гармати приведена на рис. 1.6. і складається з газорозрядної електронної гармати 1 з променепроводом 2, датчика струму гармати 3, електронного регулятора 4, натікача газу, що містить електромагнітний привод 5, дозуючий пристрій 6 та газову камеру 7, каналу для напуску газу 8, з′єднуючого натікач з гарматою, вакуумної камери 9, вакуумопроводу 10, що з′єднує вакуумну камеру з вакуумним насосом 11. Датчиком струму гармати є низькоомний опір, ввімкнений послідовно в низьковольтну ділянку кола розряду. Безперервна відкачка гармати здійснюється через променепровід разом з камерою. Електромагнітний натікач працює в аналоговому режимі.

Математичні модель системи автоматичного керування струмом ГРЕГ можна представити системою диференційних рівнянь, що описують динаміку привода пристрою напуску газу, залежність його газової провідності від амплітуди керуючого сигналу, та умови балансу газових потоків в розрядній камері гармати та в вакуумній камері електронно-променевої установки.

При складанні математичної моделі газодинамічна система гармати з системою відкачки розглядалась як система з зосередженними параметрами, в якій не враховувались об′єми вакуумопроводів та виділення газів з поверхонь. Не враховувались також потоки газів, які не виявляють суттєвого впливу на динаміку зміни тиску в ГРЕГ в процесі її роботи, такі як натікання газу в гармату та вакуумну камеру технологічної установки, сорбційні процеси на поверхні розрядної камери гармати та вакуумної камери установки та інш. Передбачалось, що відкачування вакуумної камери та газорозрядної гармати здійснюється вакуумним насосом, швидкість дії якого в значній мірі постійна в широкій області тисків, що

характерно для найбільш широко застосовуваних в електронно-променевих установках диффузійних, ротаціонних та інших насосів.

Динаміка привода електромагнітного натікача описується рівнянням балансу напруг в колі живлення електромагніта та умовою рівноваги сил його механічної частини. які в малих відхиленням мають вид відповідно

$$R_H \Delta i_H + L_H \frac{d\Delta i_H}{dt} = \Delta U_H$$

$$m_H \frac{d^2 \Delta l_H}{dt^2} = \sum_{i=1}^{n} \Delta F_i = \Delta F_Э - \Delta F_П - \Delta F_T,$$

де R_k, L_k ,$i_н$,$U_н$ - активний опір, індуктивність, струм та напруга в обмотці електромагніта натікача; m_H - маса рухомої частини натікача; l_H - координата, що визначає положення якора зі штоком відносно сідла клапана; $F_Э$ - тягова сила електромагніта; $F_П$ - пружня сила пружини та F_T – сила тертя.

$$\Delta F_Э = C_Э \Delta i_K, \;\; \Delta F_П = C_П \Delta l_H$$

$$\Delta F_T = C_K \frac{dl_H}{dt}$$

где $C_э$ - крутизна тяговоъ характеристики електромагніта; $C_П$ - коефіцієнт жорсткості пружини; C_K - коефіцієнт сили тертя.

Дозуючий пристрій натікача являє собою клапан, пропускна здатність $S_Д$ якого залежить від координати l_H, що визначає положення штока відносно сідла клапана, $S_Д=fH(lH)$ Ця функція залежить від геометрії дозуючого вузла натікача і для найбільш часто застосовуємих конструкцій може бути записана у вигляді

$$S_Д = \frac{ABl_н^k}{Al_н^k + B} P_A,$$

де A, B, k – постійні, що залежать від конструкції дозуючого клапана, p_A – атмосферний тиск.

З врахуванням часу транспортного запізнення, обумовленного переміщенням молекул газу по каналу напуску газу, сумарна провідність S_k

натікача та газового канала, з′єднуючого натікач з гарматою буде мати вигляд

$$S_г(t) = \frac{ABl_н^k}{Al_н^k + B} P_A(t - \tau_з).$$

Модель газодинамічної системи гармати з системою відкачки можна представити системою диференційних рівнянь, що описують умови баланса газових потоків в розрядній камері гармати та вакуумній камері електронно-променевої установки. Основними потоками, визначающими тиск в розрядный камеры гармати, є регулюємий потік газу $Q_Г$, що надходить в ГРЕГ через натікач та вакуумопровід, з′єднуючий натікач з розрядною камерою гармати, і потік газу, що відкачується з гармати через променепровід $Q_Л$. Рівняння баланса газових потоків в розрядній камері ГРЕГ можно записати у вигляді

$$V_П \frac{dp_П}{dt} = Q_Г - Q_Л,$$

де $V_П$ - об′єм розрядної камери гармати; $P_П$ - тиск газу в гарматі.

Регулюємий потік газа $Q_Г$ визначається провідністю $S_Г$ та різницею тисків в натікачі p_A і гарматі $p_П$

$$Q_Г = S_Г(p_A - p_П),$$

Потік газу, відкачуємого з гармати через променепровід $Q_Л$, визначається провідністю променепроводу та різницею тисків в гарматі та вакуумній камері електронно-променевої установки.

$$Q_л = S_л(p_П - p_K),$$

де $S_Л$ – провідність променепроводу; P_K - тиск в вакуумній камері електронно-променевої установки.

Основними потоками, що визначають тиск в вакуумній камері електронно-променевої установки в ГРЕГ, є потік газа, що надходить з гармати в вакуумну камеру $Q_Л$, і потік газа, що відкачується з вакуумной камери вакуумним насосом Q_0. Рівняння балансу газових потоків в

вакуумній камері електронно-променевої установки можна записати у вигляді

$$V_K \frac{dp_K}{dt} = Q_Л - Q_{OT},$$

де V_K - об′єм вакуумної камери.

Потік газа, що відкачуються з вакуумної камери, пропорційний швидкості відкачки камери S_{OT} та тиску в ній p_K,

$Q_{OT}=S_{OT}\cdot p_к$

Швидкість відкачування камери визначається швидкодією вакуумного насоса $S_н$ та провідністю вакуумопровода S_B, з′єднуючого вакуумну камеру та вакуумний насос,

$$\frac{1}{S_{OT}} = \frac{1}{S_H} + \frac{1}{S_B}.$$

Провідність S_B визначається геометрією вакуумопровода, залежить від тиску в вакуумопроводі та може бути розрахована з допомогою рівнянь динаміки розрідженного газа.

Швидкодія вакуумного насоса, згідно [2], визначається по формулі

$$S_H = S_P\left(1 - \frac{p_M}{p_K}\right)$$

де S_P та p_M – розрахункова швидкодія насоса та граничний тиск в насосі, параметри, які приводяться підприємством-виробником в технічному паспорті на насос.

Тоді вираз для визначення потоку відкачуваємого газу з вакуумної камери буде мати вигляд

$$Q_{OT} = \frac{1}{\frac{1}{S_B} + \frac{1}{S_P}}\left(1 - \frac{p_M}{p_K}\right)p_K = \frac{S_B \cdot S_P}{S_B + S_P}\left(p_K - p_M\right)$$

Вихідним параметром об′єкта керування є струм розряда гармати Іп. Залежність струму від тиску в гарматі описується емпиричною формулою [3]

$I_П = ap_П^m U_П^n$,

де a, m, n – постійні, що залежать від роду газу, матеріалу катоду, геометрії електродів, причому m вимирюється в межах 2 ÷ 4.

Математичну модель для ГРЕГ, як об′єкта, в якому стабілізується струм розряду шляхом зміни тиску в розрядному проміжку з допомогою автоматично керуємого електромагнітного натікача можна записати у вигляді

$$\begin{cases} R_H i_H + L_H \dfrac{di_H}{dt} = U_H, \\ m_H \dfrac{d^2 l_H}{dt^2} = C_Э i - C_П l_H - C_K \dfrac{dl_H}{dt}, \\ S_Г(t) = \dfrac{ABl_н^k}{Al_н^k + B} P_A(t - \tau_з), \\ V_П \dfrac{dp_П}{dt} = S_Г \cdot (p_A - p_П) - S_Л (p_П - p_K), \\ V_K \dfrac{dp_K}{dt} = S_Л (p_П - p_K) - \dfrac{S_B S_P}{S_B + S_P}(p_K - p_M), \\ I_П = a \cdot p_П^m . U^n \end{cases}$$

Вхідним параметром моделі є керуюча напруга на натікачі $U_н$, а вихідним – струм гармати $I_П$.

Система рівнянь є нелінійною. Для попереднього анализа системи керування здійснювалась лінеаризація рівнянь в околицях робочої точки, прийнятого за базовий. Структурно лінеаризована система рівнянь представлена у вигляді, показанному на рис. 1.7, де передаточні функції ланок мають вигляд

$$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}, \text{ де } k_1 = \frac{1}{R_H}; \; T_1 = \frac{L_H}{R_H}.$$

де

де $k_3 = C_н\left(p_A - p_П^*\right)$.

$$W_4(p) = \frac{k_4}{T_4 + 1}, \text{де } k_4 = \frac{1}{S_R + S_Л};\ T_4 = \frac{V_П}{S_Д + S_Л}.$$

$$W_5(p) = \frac{k_5}{T_5 + 1}, \text{де } k_5 = \frac{S_Л}{k_k + S_Л};\ T_5 = \frac{V_k}{k_k + S_Л}.$$

$$W_6(p) = k_6, k_6 = S_Л; W_П(p) = k_П;$$

$W_Д(p)=k_Д$; $k_Д = R_Д$.

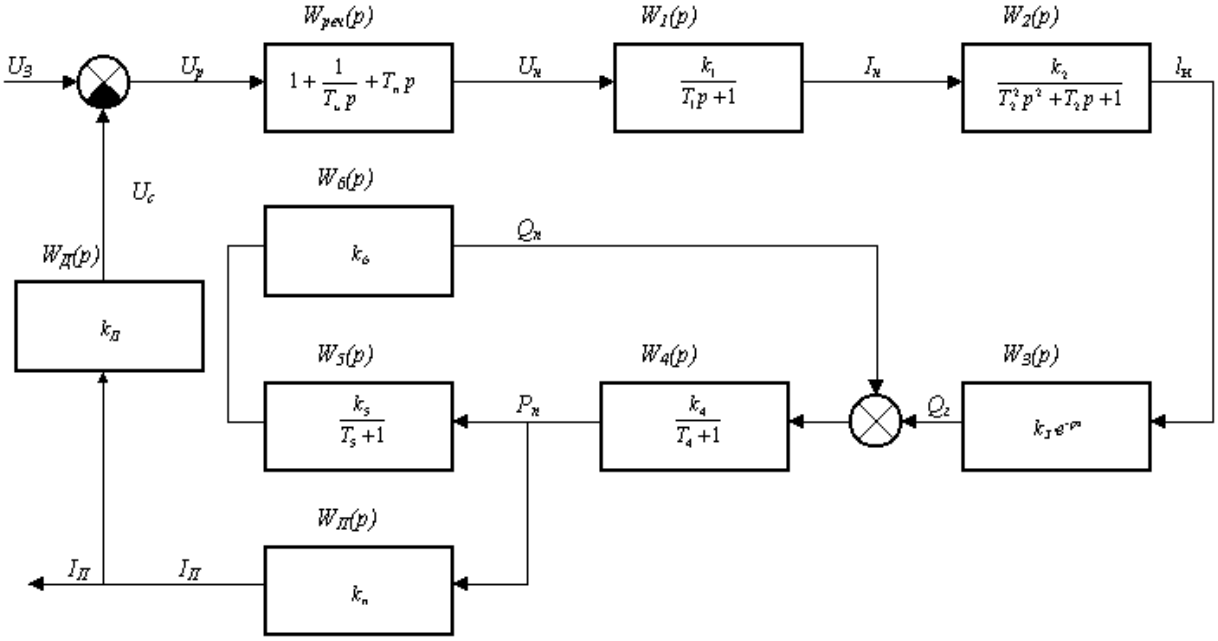

Рис. 2.5

Отримана математична модель, що враховує основні потоки газів в ГРЕГ ВТР та системі її відкачки, дозволила розробити програмне забезпечення та моделювати процес газодинамічного керування на

персональній ЭВМ при дослідженні та проектуванні систем автоматичного керування струмом ГРЕГ ВТР.

За результатами моделювання була розроблена система автоматичного керування струмом та проведені її експериментальні дослідження, що підтвердило коректність запропонованої моделі процесу автоматичного регулювання струму газорозрядної електронної гармати.

1.4 Вимоги, що пред′являються до автоматичного регулятора струму електронної газорозрядної гармати. Обгрунтування вибору конструкції натікача та автоматичного регулятора

Автоматичний регулятор тиску газу в вакуумній камері повинен забезпечувати:

- заданий робочий діапазон тисків;
- задану пропускну здатність с усталеному режимі;
- задане відхилення регулюємої величини від заданого значення;
- мінімальне значення постійної часу регулювання;
- герметичність вузла клапан-сідло при відсутності сигнала керування;
- можливість адаптації до об′єктів регулювання з різними газодинамічними характеристиками;
- можливість роботи від газової магістралі з заданим тиском;
- тривалість безперервної роботи;
- відсутність в конструкції виняткових елементів та високовартісних матеріалів.

На основі порівняння вимог до автоматичного регулятора струму газорозрядної електронної гармати для випаровування, з параметрами та характеристиками систем автоматичного регулювання, приведених в цьому обзорі, вибирається система аналогового регулювання тиску (а, відповідно,

і струму електронної гармати), що має достатню швидкодію та високу точність регулювання. Для такого регулятора струму електронної гармати краще за все обрати натікач, що працює в аналоговому режимі, що дає можливість плавно регулювати потік газу в діапазоні тисків $10^{-3} \div 10^{-2}$ Па, тобто дає можливість плавно регулювати струм гармати. Натікач виготовляється з недорогих доступних матеріалів (сталь, дюралюміній, латунь) та простий у виготовленні. Розробляємий натікач, що працює в аналоговому режимі, можна використовувати в складі будь-якого газорозрядного пристрою (в газорозрядних елктронних гарматах, іонних джерел і т. і.).

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ СТРУМОМ ГАЗОРОЗРЯДНОЇ ГАРМАТИ

3.1 Розробка математичної моделі

В результаті аналізу літературних джерел, проведеного в розділі 1, можна зробити висновок, що на сьогодняшній день існують натікачі та розроблені на їх основі системи автоматичного керування тиском в вакуумних камерах або струмом розряду газорозрядних джерел тисків та потоків газу. Але їх динамічні характеристики та точність регулювання не відповідають вимогам електронно-променевих технологій до стабільності параметрів електронних гармат. Необхідні характеристики регулювання можуть бути досягнуті при розробці малоінерційних виконууючих пристроїв (натікачів) та проектування систем автоматичного керування струмом та оптимізації їх параметрів безпосередньо до конкретної гармати та вакуумної установки з заданими газодинамічними характеристиками. При цьому визначення оптимальних значень параметрів системи керування значно спрощується при компьютерному моделюванні таких систем та наступною їх експериментальною перевіркою.

В пункті 1.3 розглянуто методику проектування системи атоматичного керування, що включає розробку математичної моделі процесу автоматичного керування та її розв′язок на ЕОМ, що може бути взято за основу при розробці системи автоматичного керування струмом газорозрядної гармати потужністю 10 кВт, що встановлена на вакуумній установці УРМ.033.

Для складання математичної моделі розробляємої системи автоматичного керування струмом розглянемо її структурну схему, що приведена на *рис. 3.1.* Об′єктом керування є газорозрядна гармата, до якої піключена система відкачування газу та джерело високої прискорюючої

напруги. В колі високовольтного живлення гармати на низьковольтному його участку встановлено датчик струму гармати, яким є низькоомний опір. Виконуючим пристроєм системи керування є малоінерційцний електромагнітний натікач. Керування натікачем здійснюється від електронного блоку, який містить в собі електронний регулятор. При роботі сигнал з датчика струму поступає в елктронний блок де доповнюється з сигналом, що поступає з джерела опорної напруги. Різничний сигнал підсилюється пропорційно-інтегральним підсилювачем і поступає на електромагнітний натікач. Під дією сигнала керуючої дії натікач змінює потік газу в гармату, регулюючи тиск в розрядному проміжку гармати так, щоб струм гармати відповідав заданому значенню.

При складанні математичної моделі по аналогії з [6] газодинамічна система гармати з системою відкачки розглядалась як система з зосередженними параметрами, в якій не враховувались об′єми вакуумопроводів та газовиділення з їх поверхонь. Не враховувались також потоки газів, які не мають суттевого впливу на динаміку зміни тиск в ГРЕГ в процесі її роботи, такі як натікання газу в гармату та вакуумну камеру технологічної установки, сорбціонні процеси на поверхні розрядної камери гармати та вакуумної камери установки і др. Передбачалось, що відкачка вакуумної камери та газоразрядної гармати здійснювалась вакуумним насосом, в якому швидкодія в значній мірі постійна в широкій області тисків, що характерно для найбільш широко застосовуємих в електронно-променевих установках дифузійних, ротаціоних та інших насосів.

2.1.1 Складання рівнянь динаміки електромагнітного приводу натікача

Для систем автоматичного керуванням струмом газорозрядної гармати для нанесення покриттів доцільним є розробка та застосування

малоінерційних натікачів з електромагнітним приводом, що мають малий час спрацьовування, надійністю в роботі, відносною простотою та дешевизною у виготовленні. Схематичне зображення електромагнітного натікача приведено на рис. 2.2. Основними елементами конструкції є прямоходовий електромагніт, що складається з обмотки 1, магнітопровода 2 та якора 3, та дозуючий пристрій, являючий собою клапан, рухомим штоком якого слугує якор електромагніта, підпружинений до сідла клапана 4 пружиною 5. Пропускна здатність такого натікача залежить від положення штока відносно сідла клапана та змінюється при зміні струму обмотки електромагніта.

Для складання рівнянь динаміки пристрою напуска газу зобразимо його у вигляді структурної схеми, що складається з трьох ланок (рис. 2.3): електричної частини 1, механічної частини 2 та дозуючого пристрою 3. При цьому вхідною керуючою величиною є сигнал керуючого впливу, що подається на катушку електромагніта $U_н$, а вихідний - пропускна здатність натікача S_k. Струм катушки електромагніта $i_н$ та величина переміщення якора $l_н$ є проміжними змінними.

Електрична частина натікача включє в собі обмотку електромагніта з активним опором R_k та індуктивністю L_k. Згідно другому закону Кирхгофа рівняння баланса напруг такого кола в малих відхиленнях від усталеного значення має вигляд:

$$R_H \Delta i_H + L_H \frac{d\Delta i_H}{dt} = \Delta U_H \qquad (2.1)$$

Механічна частина натікача складається з жорстко з′єднаного штока та якора електромагніта, підпружинених з боку електромагніта. Натікач працює в аналоговому режимі, а положення рівноваги при заданому режимі роботи системи керування визначається значенням координати l_H, визначаючої положення якора з штоком відносно сідла клапана, $F_Э$ - тягової сили електромагніта, $F_П$ - пружньої сили пружини та F_T - сили опору руху

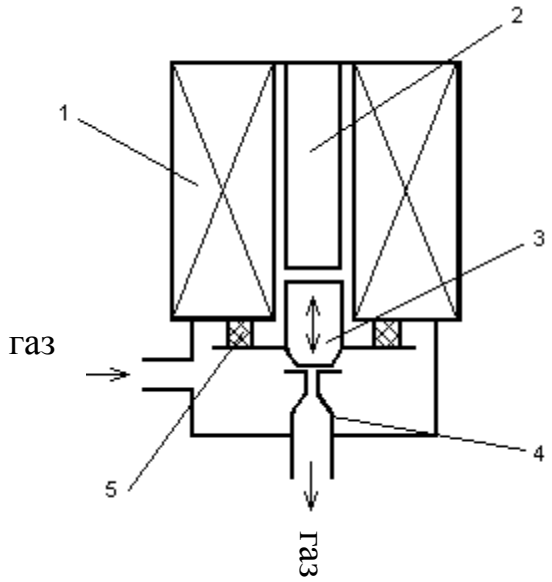

Рис.3.1 Схематичне зображення конструкції електромагнітного натікача

1 – обмотка електромагніта; 2 – магнітопровід; 3 – дозуючий пристрій; 4 – сідло клапана; 5 - пружина

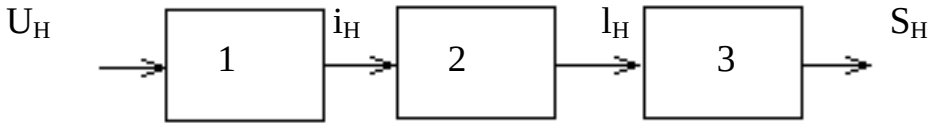

Рис.3.2 Структурна схема електромагнітного натікача

1 – електрична частина; 2 – механічна частина; 3 – дозуючий пристрій

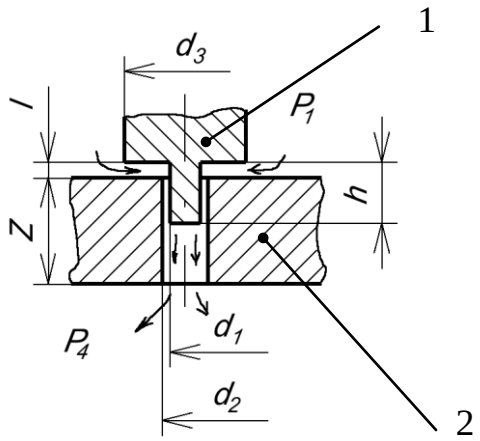

Рис.3.3 Схематичне зображення конструкції дозуючого вузла натікача

1 – рухомий шток; 2 – сідло клапана

(тертя). Згідно другому закону Ньютона умова рівноваги для механічної частини натікача можна записати у вигляді

$$m_H \frac{d^2 \Delta l_H}{dt^2} = \sum_{i=1}^{n} \Delta F_i = \Delta F_Э - \Delta F_П - \Delta F_T, \qquad (2.2)$$

де m_H - маса рухомої частини натікча(сумарна маса якора та штока).

В електромагнітних прямоходових соленоїдних системах тягова сила електромагніта, що здійснює механічне переміщення якора, складається з двох сил, утворюваних на якорі: сили притягнення якора[95]

$$F_{ПР} = 5{,}1 i_H^2 \omega_K^2 \mu_0 \frac{\pi r^0}{b \cos^2 \alpha}$$

та соленоїдної сили, визначаємої взаємодією магнітного потока виливу з струмом, протікаючим в катушці електромагніта,

$$F_C = 27{,}2 \frac{i_H \omega_K}{l_H} B r^2,$$

де ω_k - кількість витків катушки електромагніта; r - радіус якора електромагніта; b - величина робочого зазора; μ_0 - відносна магнітна проникність; α - кут між утворюючою поверхнею конічного штока та його основою; i_H - струм катушки електромагніта натікача.

Згідно [135] в короткоходових електромагнітних системах враховується лише сила притягнення якора та штока. Соленоїдна сила в таких системах відносно мала і нею нехтують. Тоді тягова сила електромагніта

$$F_Э = C_Э i_K^2,$$

де $C_Э = 5{,}1 \omega^2 \mu_0 \pi r^2 / b \cos\ \alpha$.

Лінеаризуючи $F_э$ в межах малих відхилень від заданого значення, отримаємо

$$\Delta F_Э = C_Э \Delta i_K, \qquad (2.3)$$

де $C_э$ - крутизна тягової характеристики електромагніта, яку також можна визначити експериментально.

Пружня сила пружини пропорційна її зжиманню [95]. В аналогових електромагнітних натікачах робоча точка на характеристиці пружини визначається стисненням пружины l_Y, забезпечуючим ущільнення клапана, та зжиманням l_H, визначаючим положення штока відносно сідла клапана. Тоді

$$F_П = C_П(l_У + l_H) \qquad (2.4)$$

або

$$\Delta F_П = C_П \Delta l_H ,$$

де $C_П$ - коефіцієнт жорсткості пружини.

Сила тертя F_T складається з сил, пропорційних відносній швидкості руху поверхонь, що труться, і називаємих вязким тертям, та сил, що дають нелінійний ефект і не залежащих від швидкості руху, - це тертя спокою та кулоновське тертя, що має постійну силу опору. Нелінійний еффект, що визивається наявністю тертя, описуэться рівнянням, приведенним в роботі [118]

$$F_T = C_K sign \frac{dl_H}{dt} \text{ при } \frac{dx}{dt} \neq 0;$$

$$-C_K \leq F_T \leq C_K \text{ при } \frac{dx}{dt} = 0.$$

У випадку, коли $\frac{dx}{dt} = 0$, сила тертя F_T може приймати будь-які значення з інтервала [$+C_K$, $-C_K$] в залежності від інших сил діючих в кінематичній парі з кулоновським тертям.

Для усунення неоднозначностей при перетворенні сигналів керування, використовуємо метод вібраційної лінеаризації [5], суть якого складається в подачі на вхід нелінійного елемента додаткового періодичного сигнала $g(t)$ відповідної амплітуди з частотою коливань на порядок вище частоти зміни основного сигнала $g_0(t)$, та наступною фільтрацією змінної складової на виході елемента. Застосування даного метода в системі керування струмом ГРЕГ з малоінерційним електромагнітним натікачем дозволяє усунути

вплив сухого тертя та магнітного гістерезису на якість процесу керування. В цьому випадку вираз для сили тертя можна записати

$$\Delta F_T = C_K \frac{dl_H}{dt}, \qquad (2.5)$$

де C_K - коефіцієнт сили тертя.

При підстановці (2.3), (2.4), (2.5) в (2.2) рівняння динаміки механічної частини натікача буде мати вигляд

$$m_H \frac{d^2 l}{dt^2} = C_Э i_K - C_П l_H - C_K \frac{dl}{dt}. \qquad (2.6)$$

2.1.2 Вибір геометрії дозуючого пристрою натікача та складання його математичної моделі

Дозуючий пристрій натікача являє собою клапан, пропускна здатність $S_Д$ якого залежить від координати l_H, визначаючої положення штока відносно сідла клапана,

$$S_Д = f_H(l_H).$$

Вид цієї функції залежить від геометрії дозуючого вузла натікача. В роботі [Д] дозуюча пара являє собою шток у вигляді плоскої поверхні. та сідла у вигляді плоского ущільнювача з циліндричним отвором в центрі. При такій конструкції робочий хід штока складає сотні мкм і при нагріванні натікача в процесі роботи розмір регулюючого зазору суттєво змінюється під впливом теплового лінійного розширення елементів конструкції натікача, що погіршує стабільність його роботи.

В розробляємому натікачі конструкція штока з боку сідла має осесиметрично розташований циліндричний виступ, що заходить в полий циліндр сідла, а ущільнення здійснюється між плоскими поверхнями штоку та сідла клапану (рис. 2.4). Така конструкція може забезпечувати хід штока до декількох мм, при цьому зміна температури натікача практично не впливає на його характеристики. Для розрахунку загальної газової провідності

дозуючого пристрою натікча дозуючий канал необхідно розділити на три ділянки з провідностями $S_{д1}$, $S_{д2}$, $S_{д3}$, які включені послідовно. Провідність $S_{д1}$ першої ділянки, яка утворена плоскими ущільнюючими поверхнями штоку та ущільнюючого матеріалу сідла можна розглядати як призму (рис. 3.4). ребра якої визначаються з наступних виразів:

$$a_1 = \pi(d_3 - d_2),$$

$$b_1 = h/2,$$

$$c_1 = (d_3 - d_2)/2$$

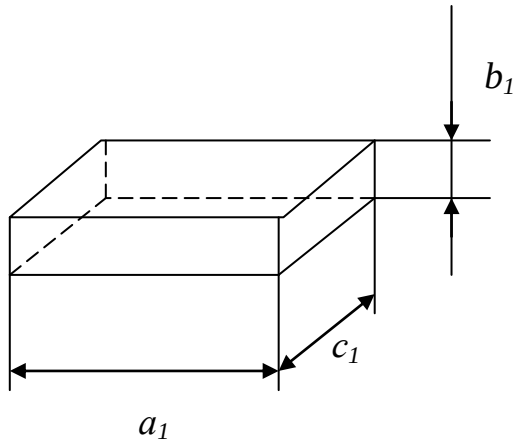

Рис.3.4

Тоді згідно [Фролов спр] газова провідність трубопровода з прямокутним перетином для повітря при ламінарному потоці буде визначатись за формулою

$$S_{д1} = A_1 \, \overline{p}_1 l^2,$$

де $A_1 = 2925 \cdot k$; k – емпіричний коефіцієнт, значення якого залежить від вдношення $a/в$; $\overline{p}_1$ – середне значення тиску газу на даній ділянці вакуумопроводу.

Провідність $S_{д2}$ другої дільниці, що утворена двома циліндричними поверхнями виступу штока та отвору в сідлі дозуючої пари, можна також розглядати як призму, ребра якої визначаються з співвідношень

$$a_2 = \pi(d_2 - d_1),$$

$b_2 = (d_2 - d_1)/2,$

$c_2 = (h-l)/2.$

Тоді газова провідність $S_{д2}$ для повітря при ламінарному потоці визначатиметься як

$$S_{д2} = {A_2\bar{p}_2}/{(h-l)},$$

де $A_2 = 488 \cdot k \cdot \pi^2 (d_2 - d_1)^2$; $\bar{p}_2$ - середне значення тиску на ділянці вакуумопроводу з газовою провідністю $S_{д2}$.

Провідність $S_{д3}$, утворена циліндричним отвором в сідлі діючої пари з діаметром $d_c = d_2$ та висотою $H_c = (z - h - l)$ визначається за формулою

$$S_{д3} = {A_3\bar{p}_3}/{(z-h-l)},$$

де $A_3 = 1360 d_2^4$ (для повітря). $\bar{p}_3$ - середне значення тиску на ділянці вакуумопроводу з провідністю $S_{д3}$.

Загальна провідність дозуючого пристрою визначається з співвідношення

$$\frac{1}{S_д} = \frac{1}{S_{д1}} + \frac{1}{S_{д2}} + \frac{1}{S_{д3}}.$$

Тоді

$$\frac{1}{S_д} = \frac{1}{A_1\bar{p}_1 l^2} + \frac{h-l}{A_2\bar{p}_2} + \frac{z-h-l}{A_3\bar{p}_3}$$

Провідність газового каналу, що з′єднує натікач з гарматою значно більша провідності дозуючого пристрою натікача, тому в розрахунках нею можна знехтувати. Проте на динамічні характеристики системи керування значно впливає часове значення запізнення $\tau_з$, яке спричинене переміщенням молекул газу в напрямку газового потоку. З урахуванням транспортного запізнення вираз для провідності газового каналу матиме вигляд

$$S_д = \left(\frac{1}{A_1\bar{p}_1 l^2} + \frac{h-l}{A_2\bar{p}_2} + \frac{z-h-l}{A_3\bar{p}_3} \right)^{-1} (t - \tau_з)$$

Математичну модель газодинамічної системи гармати з системою відкачування можна описати системою диференційних рівнянь, що описують умови баланса газових потоків в розрядній камері гармати та вакуумній камері електронно-променевої установки. Основними потоками, визначаючі тиск в розрядній камері гармати, є регулюємий потік газа $Q_Г$, що надходить в ГРЕГ через натікач та вакуумопровід, з′єднуючий натікач з разрядною камерою гармати, та потік газу, що відкачується з гармати через променепровід $Q_Л$. Рівняння балансу газових потоків в розрядній камері ГРЕГ можна записати у вигляді

$$V_П \frac{dp_П}{dt} = Q_Г - Q_Л, \qquad (2.11)$$

де $V_П$ - об′єм розрядної камери гармати; $P_П$ – тиск газу в гарматі.

Регулюємий потік газу $Qг$ визначається провідністю $S_Г$ і різницею тисків в натыкачы $p_А$ та гарматі $p_П$

$$Q_Г = S_Г(p_А - p_П), \qquad (2.12)$$

Потік газу, відкачуваємого з гармати через променепровід $Q_Л$, визначається провідністю променепроводу та різницею тисків в гарматі та вакуумній камері електронно-променевої установки.

$$Q_л = S_л(p_П - p_К), \qquad (2.13)$$

де $S_Л$ – провідність променепроводу; $P_К$ – тиск в вакуумній камері електронно-променевої установки.

Після підстановки (2.12) і (2.13) в (2.11) рівняння баланса газових потоків в ГРЕГ буде мати вигляд

$$V \frac{dp_П}{dt} = S_Г(p_А - p_П) - S_Л(p_П - p_К). \qquad (2.14)$$

Основними потоками, визначаючими тиск в вакуумній камері електронно-променевої установки в ГРЕГ, є потік газа, що надходить з гармати в вакуумну камеру $Q_Л$, та потік газа, що відкачується з вакуумної камери вакуумним насосом Q_0. Рівняння баланса газових потоків в

вакуумній камері електронно-променевої установки можна записати у вигляді

$$V_K \frac{dp_K}{dt} = Q_Л - Q_{ОТ}, \qquad (2.15)$$

де V_K - об′єм вакуумної камери.

Потік газа, що відкачується з вакуумної камери, пропорційний швидкості відкачки камери $S_{ОТ}$ та тиску в ній p_K,

$$Q_{ОТ}=S_{ОТ}\ p_K$$

Швидкість відкачки камери визначається швидкодією вакуумного насоса $S_н$ і провідністю вакуумопровода $S_В$, з′єднуючого вакуумну камеру і вакуумний насос. Оскільки в вакуумній установці вакуумний насос під′єднаний безспосередньо до вакуумної камері, то

$$S_{от} = S_н.$$

Швидкодія вакуумного насоса, згідно [155], визначається по формулі

$$S_H = S_P\left(1 - \frac{p_M}{p_K}\right),$$

де S_P і p_M – розрахункова швидкодія насоса і граничний тиск в насосі, параметри, які приводяться підприємством-виготовником в техничному паспорті на насос.

Тоді вираз для визначення потоку відкачуємого газу з вакуумної камери буде мати вигляд

$$Q_{OT} = S_H\left(1 - \frac{p_M}{p_K}\right)p_K = S_H(p_K - p_M). \qquad (2.16)$$

З врахуванням (2.13), (2.18) та (2.19) рівняння (2.15) запишемо у вигляді

$$V_K \frac{dp_K}{dt} = S_Л(p_П - p_K) - S_H(p_K - p_M). \qquad (2.17)$$

Вихідним параметром об′єкта керування є струм розряду гармати Іп. Залежність струму від тиску в гарматі описується емпіричною формулою [65]

$$I_П = a p_П^m U_П^n, \qquad (2.18)$$

де коефіцієнти *a, m, n* – визначаються емпірично для кожної модифікації гармати.

Математична модель для ГРЕГ, як об′єкта, в якому стабілізується струм розряду шляхом зміни тиску в розрядному проміжку з допомогою автоматично керованого електромагнітного натікача.

$$\begin{cases} R_H i_H + L_H \dfrac{di_H}{dt} = U_H, \\ m_H \dfrac{d^2 l_H}{dt^2} = C_Э i - C_П l_H - C_K \dfrac{dl_H}{dt}, \\ S_д = \left(\dfrac{1}{A_1 \bar{p}_1 l^2} + \dfrac{h-l}{A_2 \bar{p}_2} + \dfrac{z-h-l}{A_3 \bar{p}_3} \right)^{-1} (t - \tau_з), \\ V_П \dfrac{dp_П}{dt} = S_Г \cdot (p_A - p_П) - S_Л (p_П - p_K), \\ V_K \dfrac{dp_K}{dt} = S_Л (p_П - p_K) - S_H (p_K - p_M), \\ I_П = a \cdot p_П^m . U^n \end{cases} \qquad (2.19)$$

Вхідним параметром моделі є керуюча напруга на натікачі $U_н$, а вихідним – струм гармати $I_П$.

Отримана система рівнянь є нелінійною. В роботі [Д1] нелінійна модель газорозрядної електронної гармати була лінеаризована в межах малих відхилень і вирішувалась в лінійному вигляді, однак лінеаризована модель не дозволяла досліджувати поведінку системи керування при великих розузгодженнях, що характерно для роботи газорозрядного електронно-променевого випаровувача при дугових пробоях та вимкненні гармати.

2.2 Розробка програми для комп′ютерного моделювання системи автоматичного керування струмом

2.2.1 Розробка комп′ютерної моделі дозуючого пристрою натікача

Розробка комп′ютерної моделі є однією з основних задач інженера-розробника. Вона дозволяє спростити вибір необхідних параметрів пристрою, зменшити час та кількість досліджень і витрат, що пов′язані з ними.

На основі розробленої математичної моделі, що приведеної в пункті 2.1.2. даної дипломної роботи створюється програма, що моделює дозуючий пристрій натікача. Алгоритм програми приведено на рис. 2.6.

В момент часу t = 0 клапан натікача знаходиться в закритому стані і його провідність мінімальна, тобто дорівнює 0. Всі можливі витікання газу, що пов′язані з недостатньо щільним приляганням штоку до сідла клапана в зв′язку з можливою наявністю забруднень, деформацією ущільнювача і т. і. нехтуються. За зовнішній тиск беремо атмосферний, тобто $P1 = 10^5$ Па. Газ - повітря.

Оскільки точний розподіл тисків в газопровідних каналах клапана в якийсь певний час його роботи залежить від його пропускної здатності в цей момент, а пропускну здатність можна вирахувати лише знаючи цей розподіл, то необхідно скористатись наближеними методами розрахунку. Для цього припустимо що тиск в камері гармати є P4 = 1 Па, що є цілком нормальним. Різниця зовнішнього тиску, тобто тиску на вході клапана та внутрішнього клапана, тобто тиск на виході клапана припадає саме на ділянки газопроводу, що утворюються клапаном. Для визначення тиску на цих ділянках різницю між зовнішнім та внутрішнім тиском розбиваємо на велику кількість прирощень, тобто dp. Значення dp залежить від величини різниці (P1 - P4) та кількості самих dp. Чим вищою буде їх кількість kd, тим точнішим буде результат, але при цьому значно зростає й кількість обчислень та час необхідний для підрахунку. Отже слід обмежитись якимось оптималь-

ним значенням, наприклад kd = 50. Далі в циклі проводиться підрахунок тисків P2 = P1 - s*dp, де s - рахівник циклу і для першої ітерації s = 1, P3 = P1 - z*dp, де z - також рахівник циклу і z=s+1.

За дійсне значення приймаються такі значення тисків, при яких виконується умова безперервності потоку з найбільшою достовірністю, а саме вираз ek:=sqr((P1-P2)*SD1-(P2-P3)*SD2)+sqr((P2-P3)*SD2-(P3-P4)*SD3) є сумою квадратів різниці вхідного та вихідного потоків в конкретній точці.

Таким чином можна отримати залежність пропускної здатності дозуючого вузла від величини *l*, тобто відстані між сідлом клапана та штоком, а також від напруги на катушці натікача.

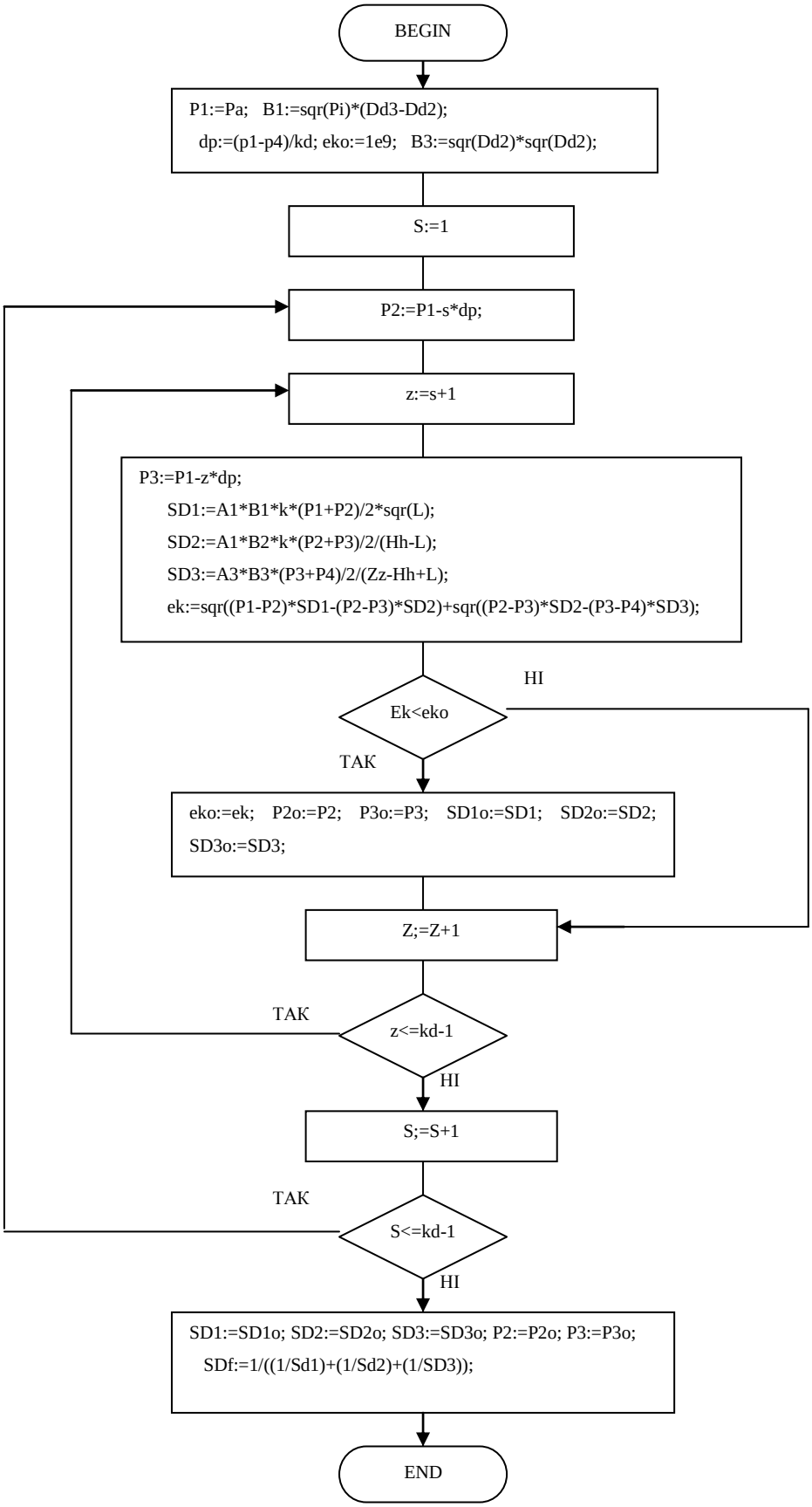

Рис. 2.6 Алгоритм програми моделюючої дозуючий вузол натікача

2.2.2 Розробка компютерної моделі системи автоматичного керування струмом

На основі приведеної в пункті 2.1.2 математичної моделі та створеної раніше компьютерної моделі створюється компьютерна модель системи керування струмом газорозрядної електронної гармати з електромагнітним натікачем. Для цього в математичну модель вводиться рівняння, що описує зворотній зв′язок між гарматою та керуючою системою. А саме

$$\frac{dU_H}{dt} = K_{рег}\left(R_д \frac{dI_д}{dt} + \frac{1}{T_i} R_д I_д\right),$$

де $K_{рег}$ - коефіцієнт пропорційності, що визначає величину реакції регулятора на одиничний сигнал похибки; T_i - час ізодрому.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ СТРУМОМ ГАЗОРОЗРЯДНОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ ГАРМАТИ

3.1 Розрахунок геометричних параметрів електромагнітного приводу натікача газу

Розрахунок параметрів намотки катушки електромагнітого приводу натікача, його геометричних розмірів та розмірів дозуючого пристрою проводився за вихідними даними, які були отримані при моделюванні системи автоматичного керування струмом гармати, що приведено в розділі 2. Розрахунок електромагнітного приводу здійснювався за методикою, що приводиться в роботах [9]. Електромагнітний привод являє собою прямоходову систему постійного струму у вигляді соленоїда з замкнутим магнітопроводом. Прямоходові електромагнітні системи поділяються на довгоходові та короткоходові. Обираємо короткоходову систему, яка застосовується для отримання великих значень сили притягування при відносно малому ході якора.

Розрахунок електромагніту проводимо за даними, отриманими при моделюванні системи автоматичного керування струмом, отриманому в розділі 2:

$U_н = 10$ *В*; $L = 0{,}7$ *Гн*; $F_е = 9$ *кг*; $F_{пр} = 1$ *кг*; $l = 2 \cdot 10^{-3}$ *м*, режим роботи - тривалий;

Для вибору форми стопа визначимо значення конструктивного фактора.

$$\frac{Q_p \sqrt{F_e}}{l} = \frac{0{,}1 \cdot 3}{2 \cdot 10^{-3}} = 1{,}5 \cdot 10^2 \text{ кг/м}$$

При даному конструктивному факторі виберемо короткоходову магнітну систему з конічним стопом. Для отримання більш лінійної тягової характеристики електромагніту виберемо кут конуса $\alpha_k = 60^0$. Схематичне зо-

браження вибраного короткоходового магнітного приводу приведено на рис. 3.1.

При розрахунках короткоходових систем враховується тільки сила притягування двох поверхонь - якора та стопа. Соленоїдна сила в таких системах відносно мала і нею можна знехтувати. Тоді рівняння для розрахунку сили електромагніту матиме вигляд

$$F_e = 5{,}1 N_M^2 \frac{dG_p}{ds}; \qquad (4.1)$$

де N_M - намагнічуюча сила катушки з врахуванням падіння магнітного потенціалу в стопі та неробочому зазорі; G_p - магнітна провідність робочого зазору.

Провідність робочого зазору для конусного стопу:

$$G_p = \mu_0 \frac{\pi r^2}{s\cos^2\alpha} - \mu_0 \frac{\pi s \sin^2\alpha}{2}, \qquad (4.2.)$$

де r - радіус основи конуса стопа; α - кут при основі конуса; S - величина робочого зазору.

Величина робочого зазору складатиметься з величини ходу якора електромагніта l та висоти немагнітної вставки в конструкції електромагніту h_H, що обмежує хід якора з боку стопа, та виключає ефект залипання якора і стопа при роботі натікача.

$S = l + h_H$,

де $h_H = 0{,}1$ *мм*.

Другий член рівняння відносно малий, тому приймаємо:

$$G_p = \mu_0 \frac{\pi r^2}{s\cos^2\alpha} \qquad (4.3)$$

Тоді

$$\frac{dG_p}{ds} = -\mu_0 \frac{\pi r^2}{s^2\cos^2\alpha}. \qquad (4.4)$$

Далі

$$N_{мр} \cdot G_p = \Phi_p = B_p q_p. \qquad (4.5)$$

Запишемо вираз для сили електромагніту з врахуванням (4.3), (4.4) та (3.5)

$$F_e = \frac{5{,}9 \cdot 10^{-4} B_p^2 \cdot q_p^2 \cdot \cos^2 \alpha}{\mu_0 \pi r^2}. \qquad (4.6)$$

Приймаємо, що магнітний потік в якорі рінвий потоку в робочому зазорі

$$\Phi = \Phi_p = B_p q_p = B \pi_{rя2}, \qquad (4.7)$$

тоді вирази для сили електомагніту буде мати вигляд

$$F_e = 5{,}82 \cdot 10^{-4} B^2 \pi r_я^2 \cos 2\alpha. \qquad (4.8)$$

В залежності від конструктивного фактору та форми стопа електромагнітного приводу виберемо величину магнітної індукції з таблиці 5.5 [л]. Для конусної форми стопа з кутом $\alpha = 60^0$ та конструктивного фактору $1{,}5 \cdot 10^2$ кг/м величина магнітної індукції буде B = 1 Вб/см^2.

Визначимо величину падіння магнітного потенціалу в сталі та неробочому зазорі.

При розрахунках в раціонально побудованих конструкціях величину падіння магнітного потенціалу в сталі магнітоприводу вибирають в межах $U_{мст} = (10 \div 20)\%$ від велични намагнічуючої сили катушки.

Падіння потенціалу в неробочих зазорах вибирають в межах $N_{мн} = (5 \div 10)\%$.

Враховуючи, що в розробляємій конструкції величина робочого зазору складає < 0,1 мм, а товщина магнітопроводу в зоні робочого зазору складає 7÷9 мм, виберемо $N_{мн} = 0{,}05U_м$, а $N_{мст} = 0{,}15U_м$.

З формули (4.8) визначимо діаметр якора електромагніта.

$$r_я = \sqrt{\frac{F_e}{2{,}91 \cdot 10^{-2} \cdot B^2 \cdot \pi \cdot \cos^2 \alpha}} = \sqrt{\frac{13{,}2}{2{,}91 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}01 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}25}} = 8{,}5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Діаметр провода катушки, число витків та геометричні розміри катушки визначаються з рівняння проміжка електричного кола натікача

$$U_H = I_H R_H = I_H \rho \frac{l_{cp}}{q} \omega = \frac{4\rho(r_1 + r_2)}{d^2} I\omega 10^{-3}, \qquad (4.9)$$

де l_{cp} - довжина одного витка катушки; ω - кількість витків; d - діаметр проводу; r_1, r_2 - внутрішній та зовнішній радіуси катушки (рис. 4.1). Внутрішній діаметр катушки 2, виберемо з врахуванням товщини матеріалу каркасу катушки електомагніту $h_е$ = 2 мм та повітряного зазору між якорем та каркасом $h_з$ = 1 мм.

$r_1 = r_я + h_е + h_з$ = 20 мм.

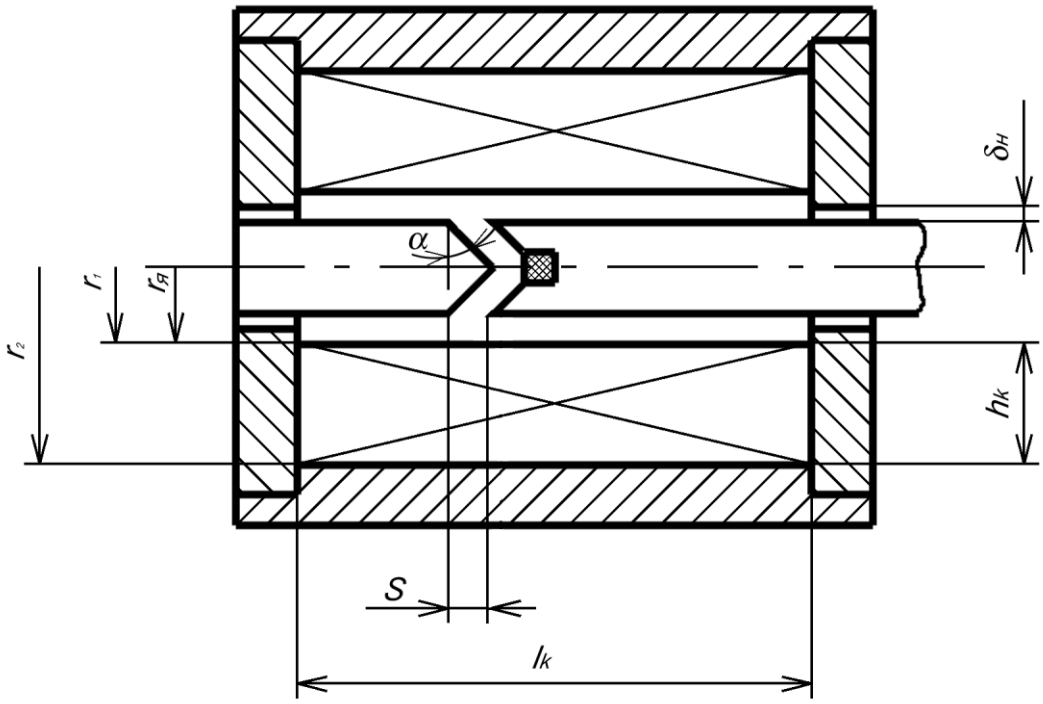

Рис. 4.1 Схематичне зображення магнітного приводу натікача

Довжину циліндричної катушки для тривалого режиму роботи визначимо по формулі [ ]

$$l_к = \sqrt[3]{\frac{N_м^2 \rho n}{2k_{зм} k_t (t_{доп}^0 - t_0^0)}}, \qquad (4.10)$$

де n = 5, ρ - питомий опір мідного провода; $k_{зм}$ - коефіцієнт заповнення міді; k_t - коефіцієнт теплопередачі; $t_{доп}{}^2$ - температура навколишнього середовища.

Згідно таблиці П.24 та графіка П.14 [л…] виберемо $k_{зм}$ = *0,67;* k_t = *10* Вт/(м^2·^{0}С), а також *n = 5*; $t_{доп}^{\ 0}$ = *70* ^{0}С; $t_0^{\ 0}$ = *20* ^{0}С.

Тоді

$$l_k = \sqrt[3]{\frac{7{,}9\cdot 10^3\cdot 1{,}7\cdot 10^{-8}\cdot 5}{2\cdot 0{,}67\cdot 10\cdot (70-50)}} = 47\cdot 10^{-3}\ \text{м.}$$

Для максимального значення струму натікача $I_{н\ мах}$ = *0,7* А виберемо товщину дроту катушки діаметром *0,67* мм.

При заданних ампервитках катушки товщину намотки катушки $h_к$ знайдемо з (4.9)

$h_к = r_2 - r_1 = 11\cdot 10^{-3}$ м.

Для перевірки число витків катушки розраховуємо також за формулою

$$\omega = S_0 k_{зм} \big/ \pi d^2,$$

де S_0 - площа вікна обмотки.

При розмірах катушки $h_к = 1{,}1\cdot 10^{-2}$ *м*, та $l_к = 4{,}7\cdot 10^{-2}$ площа вікна катушки $S_0 = 51{,}7\cdot 10^{-4}$ *м*^{2}.

Число витків в одному слою при довжині вікна $l_к = 4{,}7\cdot 10^{-2}$ та діаметру провода з ізоляцією $d_{пр}$ = *0,67* мм дорівнює

$$\omega_1 = 0{,}95(l_к / d_{пр}) - 1 = \left(\frac{0{,}95\cdot 4{,}7\cdot 10^{-2}}{0{,}67\cdot 10^{-3}}\right) - 1 \approx 66 \text{ витків,}$$

число шарів

$$\omega_2 = h_к / d_{пр} = \frac{1{,}1\cdot 10^{-2}}{0{,}67\cdot 10^{-3}} \approx 16$$

Тоді $\omega = \omega_1\cdot\omega_2 = 66\cdot 16 = 1056$ витків.

Опір обмотки складає

$$R_H = 4\rho l_{ср}\omega \big/ \pi d_{пр}^2 = \frac{4\cdot 1{,}7\cdot 10^8\cdot 15{,}5\cdot 1{,}056}{3{,}14\cdot (0{,}67\cdot 10^{-3})^2} = 14{,}7 \text{ Ом}$$

Потужність, що потребує електромагніт

$P = U_H^2 / R_H = 10^2/14{,}7 = 6{,}8$ Вт.

За результатами проведених розрахунків розроблена конструкція електромагнітного натікача. креслення якого проведено на листу 1 Додатка.

На немагнітному корпусі 21 натікача осесимметрично розташовані дозуючий пристрій та прямоходовий електромагніт. Основними елементами дозуючого пристрою є шток 35 та тарілка 36, виготовлена з ущільнюючого матеріалу. Шток закріплений жорстко та осесимметрично з якорем 8 прямоходового електромагніту 1 натікача. Шток з якорем можуть рухатись вздовж осі у фторопластових підшипниках 6, 9. З боку електромагніту шток піджимає пружина 16, що забезпечує ущільнення дозуючої пари при відсутності сигналу керуючої дії на натікачі. Необхідна величина зусилля, що спричиняє пружина на шток, регулюється гайкою 12. Катушка електромагніту 3 намотана на немагнітному каркасі. Електромагнітний привід натікача є закритого типу. в якому магнітний потік замикається по магнітному колу, що складається з полюсних наконечників 2, 3, 4, магнітному екрану 35, магнітному сердечнику 1, якоря 8, а також робочому зазору, який розташований між магнітним сердечником та якорем та неробочий зазор, що знаходиться між рухомим якорем та полюсним наконечником. В корпусі натікача встановлено герметично впускний 18 та випускний 23 штуцери. Корпус натікача з′єднаний з електромагнітним приводом болтами 29. На полюсному наконечнику 2 закріплено електричний роз′єм, чарез який в катушку електромагніту поступає сигнал керуючої дії.

Порядок роботи натікача слідуючий. При відсутності синалу керуючої дії натікач знаходиться в закритому стані. При цьому його газова провідність мінімальна. По мірі зростання сигналу керуючої дії, шток, що жорстко з′єднаний з якорем електромагніту, плавно переміщується в сторону електромагніта. При цьому пропускна здатність натікача зростає. Максимальна пропускна здатність натікача встановлюється при максимальній амплітуді сигналу керуючої дії, що подається на натікач в процесі його роботи.

№	Назва	Позначення	Один. вимір.	Чисельне знач.
1.	Активн. оіпр катушки натікача	$R_к$	Ом	14,7
2.	Індуктивність катушки натікача	$L_к$	Гн	0,74
3.	Маса рухомої частини натікача та привода	$m_Н$	кг	$3{,}6\cdot10^{-2}$
4.	Крутизна тягової характеристики електромагніта	$C_э$	кг/А	4,1
5.	Коеф. жорсткості пружини	$C_п$	кг/м	$1{,}2\cdot10^{3}$
6.	Коеф. сили тертя	$C_к$	кг/м·с	5,5
7.	Об′єм розрядної камери гармати	$V_п$	$м^3$	$5\cdot10^{-4}$
8.	Максимальна пропускна здатність натікача	$S_Д$	$м^3/с$	$2\cdot10^{-2}$
9.	Тиск газу в натікачі	$P_а$	Па	10^{5}
10.	Транспортне запізнення газу в газопроводі між натікачем та гарматою	$t_з$	мс	$2\cdot10^{-2}$
11.	Газова провідність променепровода гармати	$S_л$	$м^3/с$	$2{,}2\cdot10^{-3}$
12.	Об′єм камери технологічної установки	$V_к$	$м^3$	$4\cdot10^{-2}$
14.	Розрахункова швидкодія вакуумного насоса	$S_р$	$м^3/с$	1000 ± 90
15.	Граничний остаточний тиск в насосі	$P_м$	Па	$6{,}6\cdot10^{-5}$

Таблиця 4.1

3.2 Розробка схеми електронного блоку керування

Електронний блок керування в значній мірі визначає характеристики системи автоматичного керування струмом гармати і тому при його розробці для підвищення стабільності роботи та точності регулювання враховувались особливості роботи натікача газу з електромагнітним приводом, а також газорозрядної електронної гармати. Функціональна схема електронного блоку системи керування приведена на рис. 3.2. Основним функціональним вузлом електронного блоку є регулятор, що складається з джерела опорної напруги, суматора, що забезпечує порівняння сигналів з датчика та джерела опорної напруги, пропорційно-інтегрального підсилювача з регулюємими коефіцієнтами пропорційного підсилення та часом ізодрому та підсилювача потужності сигналу керуючої дії, що поступає на електромагнітний натікач. На характеристики роботи електромеханічних виконуючих пристроїв суттєво впливають люфти, сухе тертя, електромагнітний гістерезис, що зменшує їх чутливість та порушує роботу систем автоматичного керування, де вони застосовуються. Тому в розробляємій системі автоматичного керування струмом для підвищення точності регулювання реалізований ефект лінеаризації нелінійностей статичної характеристики електромагнітного натікача, визваних магнітним гістерезисом та сухим тертям. Для цього в електронному блоці сигнал керуючої дії модулюється імпульсною напругою, яка поступає на суматор з генератора імпульсів і може регулюватись по амплітуді, частоті та тривалості імпульсів.

Характерним для роботи електронних гармат високовольтного тліючого розряду є наявність дугових пробоїв міжелектродного проміжку. В момент дугового пробою струм розряду гармати може перевищувати його задану величину на 1 - 2 порядки. При мікропробоях тривалість імпульсів дугового пробою становить десітки-сотні мкс, а при утворенні стійкої дуги її обривають за допомогою систем автоматичного вимкнення джерела висо-

ковольтного живлення з послідуючим його автоматичним ввімкненням. Тривалість такої комутації сягає сотень мс. Як в першому так і в другому випадках, коли струм значно перевищує номінальний або зовсім відсутній при вимкненному джерелу високовольтного живлення, на електронний регулятор з датчика струму надходить сигнал збурюючої дії великої амплітуди, що порушує стабільність роботи системи керування. В розробленому електронному блоці зменшення впливу дугових пробоїв на характеристики керування досягається тим, що сигнал з датчика струму на електронний регулятор надходить через блок виборки та зберігання інформації, який керується сигналами з датчика струму гармати та блоку її високовольтного живлення. При відсутності дугових пробоїв сигнал з датчика струму гармати безперервно надходить на вхід електронного регулятора, а в моменти дугового пробою чи віключення джерела високовольтного живлення в схемі виборки та зберігання інформації сигнал запам′ятовується на рівні, що був безпосередньо перед пробоєм та безпосередньо подається на вхід електронного регулятора. Таким чином на регулятор надходить квазібезперервний сигнал, що забезпечує стабільну роботу системи автоматичного керування.

При розробці принципової електричної схеми електронного блоку та розрахунку параметрів її елементів вихідними даними були величини параметрів електромагнітного натікача та параметри налаштування електронного регулятора (табл. 2.1), що були отримані розрахунковим шляхом в пункті 2.2.2 та 3.1.

Принципова електрична схема електронного блоку приведена на рис. 3.2. Розрахунок схеми приводився поступово, починаючи з вибору датчика струму гармати та закінчуючи розрахунком підсилювача потужності сигналу керуючої дії.

Датчиком сигналу зворотнього зв′язку вибраний активний опір величиною $R_д = 2$ Ом та потужністю 10 Вт. Опір встановлено в низьковольтній

ділянці високовольтного кола живлення гармати між "корпусом" та позитивним полюсом високовольтного джерела. Величина опору обиралась з умови, що вн повинен бути значно меншим від динамічного опору гармати $R_д << R_п$, де $R_п > 10$ кОм, в той же час повинен забезпечувати сигнал зворотнього зв′язку U_c не менше десятків, сотень мВ. При цьому потужність, що виділяється на ньому, повинна бути незначною, що не призводило б до його нагрівання.

Сигнал з датчика струму надходить на обмежувач амплітуди сигналу *VD1*, *R1* і далі на схему виборки та зберігання інформації, що виконана на польових транзисторах *VT1*, *VT2* та фторопластовому конденсаторі *C4* з малим струмом витікання. Транзисторний ключ *VT1* керується від компараторів на операційних підсилювачах *DA3*, *DA4*, та діодів *VD2*, *VD3*, що являють собою логічну схему 2 або-ні.

Розрахуємо обмежувач напруги вхідного сигналу. Виходячи з того, що струм гармати при дуговому пробої обежений даластним опором $R_б$ і визначається з умови

$$I_{дп} = \frac{U_п}{R_п + R_б},$$

де $U_п = 15$ кВ; $R_б = 1{,}5$ кОм та $R_п << R_б$.

Тоді $I_{дпмах} = 10$ А.

Сигнал зворотнього зв′язку не повинен бути більше $U_{со} = 10$ В. Тоді обмежувачем сигналу візьмемо стабілізатор *Д814В*, а баластний опір *R1* вибираємо з умови

$$R1 \geq \frac{U_{смах} - U_{ст}}{I_{стмах} + I_{R2} + I_{R3}}, \text{ де}$$

$U_{смах} = I_{дпмах} \cdot R_д = 10 \cdot 2 = 20$ В.

$I_{стмах} = 4 \cdot 10^2$ А (паспортні дані)

$$I_{R2} = I_{R3} = \frac{U_{со}}{R_2} = \frac{U_{со}}{R_3} = \frac{10В}{4{,}3к} = 2{,}3 \text{ мА, тоді}$$

$$R1 \geq \frac{20-10}{(40+2{,}3+2{,}3)\cdot 10^{-3}} \geq 220\,\text{Ом}$$

Виберемо *R1 = 510* Ом.

Джерело опорної напруги являє собою парометричний стабілізатор, зібраний на елементах *VD4, R15, R16, R17*. Розрахунок стабілізатора виконувався наступним чином. Враховуючи, що в елктронному блоці використовується стабілізована напруга $U_{вх} = \pm 15$ В (для живлення мікросхем) виберемо значення стабілізуємої опорної напруги $U_{ст} = \pm 12$ В, для чого застосовуємо стабілітрон Д814Г з напругою стабілізації 12 В та діапазон струму стабілізації $I_{ст} = 3 \div 35$ мА. Тоді величину баластного опору *R15* визначимо з співвідношення

$$R_б = \frac{U_{вх} - U_{ст}}{I_н + \frac{I_{ст.мах} - I_{ст.\min}}{2}} = \frac{15-12}{\left(5+\frac{35-3}{2}\right)\cdot 10^{-3}} = 114 \text{ Ом},$$

де $I_н$ - струм навантаження стабілізатора

$$I_н = \frac{U_{ст}}{R16 + R17}.$$

Якщо $\frac{U_{ст}}{I_н} = \frac{12}{5\cdot 10^{-3}} = 2{,}4$ к

Тоді виберемо $R15 = R_б = 120$ Ом; *R16 = 1,5* к; *R17 = 1* к.

При розрахунках схеми коефіцієнт підсилення операційних підсилювачів k_0 прийнято вважати нескінченно великим $k_0 \to \infty$. Тоді коефіцієнт підсилення пропорційного підсилювача задається дільником *R22, R23, R24*

$k_п = (R23+R24)/R22 = 53$ (див. табл. 2.1)

Звідси виберемо *R22 = 5,1* к; *R23 = 51* к; *R24 = 680* к. Змінний опір *R24* призначено для коректування коефіцієнту пропорційного підсилення безпосередньо на вакуумній установці.

Час ізодрому T_i визначається величинами опору *R18* та ємності *C5*

$T_i = K18 \cdot C5 = 0{,}47$ с (див. табл. 2.1).

Тоді візьмемо: $C5 = 5$ мкФ, а $R18$ - змінний опір 510 кОм, що дозволяє нам коректувати при необхідності час ізодрому в межах $T_i = 0 \div 2,5$ с.

Виберемо параметри диференційного суматора DA6. Передаточна функція такого суматора при умові ідеального операційного підсилювача має вигляд

$$U_\Sigma = \frac{R27}{R19}U_n + \frac{R26}{R19}U_i - \frac{R20}{R21+R25}U_г,$$

де U_Σ - сигнал на виході суматора; U_n, U_i, $U_г$ - сигнали з пропорційного, інтегрального каскадів регулятора та з генератора імпульсів відповідно.

Виберемо: $R26 = R26 = 10$ к; $R19 = 51$ к; $R25 = 2,7$ к; $R21 = 51$ к; $R20 = 51$ к.

Транзистори регулюючого каскаду VT3, VT4 виберемо за потужністю, величиною максимально допустимого струму та коефіцієнта підсилення струму. Враховуючи, що джерело струму живлення натікача має напругу $U_д = 10$ В, а його опір складає $R_H = 14$ Ом, то при струмі $I_н = 300$ мА потужність регулюючого транзистора VT4 повинна бути

$$P_{T4} \geq (U_д - I_H R_H) \cdot I_H \geq 2 \text{ Вт.}$$

Коефіцієнти передачі струму транзисторів VT3 та VT4 визначимо з умови

$$I_н = I_{смах} \cdot k_{VT3} \cdot k_{VT4},$$

де $I_н = \frac{U_д - U_{э4}}{R_H} = 0,69$ А - максимально можливий струм натікача; $I_{смах} < 8 \cdot 10^{-3}$ А - максимальний вихідний струм операційного підсилювача К140УД7; k_{VT3}, k_{VT4} - коефіцієнти передачі струму транзисторів VT3 та VT4. Тоді

$$k_{VT3} \cdot k_{VT4} = \frac{I_H}{I_{c\max}} \approx 86.$$

Виберемо транзистор VT4 з максимально допустимим струмом колектора $I_к = 3$ А та коефіцієнтом передачі струму $k_{VT3} > 30$.

Схема електронного блоку систем автоматичного керування струмом гармати виконана без джерела живлення мікросхем та регулюючого каскаду і призначена для використання в електронно-променевих енергокомплексах, що мають стандартну напругу ±15 В та +10 В.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ СТРУМОМ ГАЗОРОЗРЯДНОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ ГАРМАТИ

4.1. Експериментальна установка для дослідження системи автоматичного керування струмом газорозрядної електронної гармати

Дослідження передбачали визначення характеристик електромагнітного натікача та системи автоматичного керування струмом при роботі в складі вакуумної установки.

При дослідженні натікача визначені залежності величини потоку газа через натікач від струму на катушці електромагніта та тиску на вході натікача, зміна величини робочого ходу клапана наптукача вд його температури, інерційність натікача. Крім того, була знайдена залежність величини потоку газа через натікач від величини переміщення якора натікача.

При досліджені автоматичної системи керування визначені залежності статичної похибки регулювання від величини збуджуючого впливу, відхилення регулюючої величини від залежності даного значення при довгій безперервній роботі системи та перехідна характеристика процесу регулювання при збуджуючому впливі у вигляді ступінчатого імпульсу.

Схема експериментальної вакуумної установки передбачена на рис. 4.1.

В склад установки входять газорозрядна елеткронна гармата для випаровування, автоматичний регулятор струму, форвакуумний та дифузійний насоси, високовольтне джерело живлення, вакуумметри, вентилі.

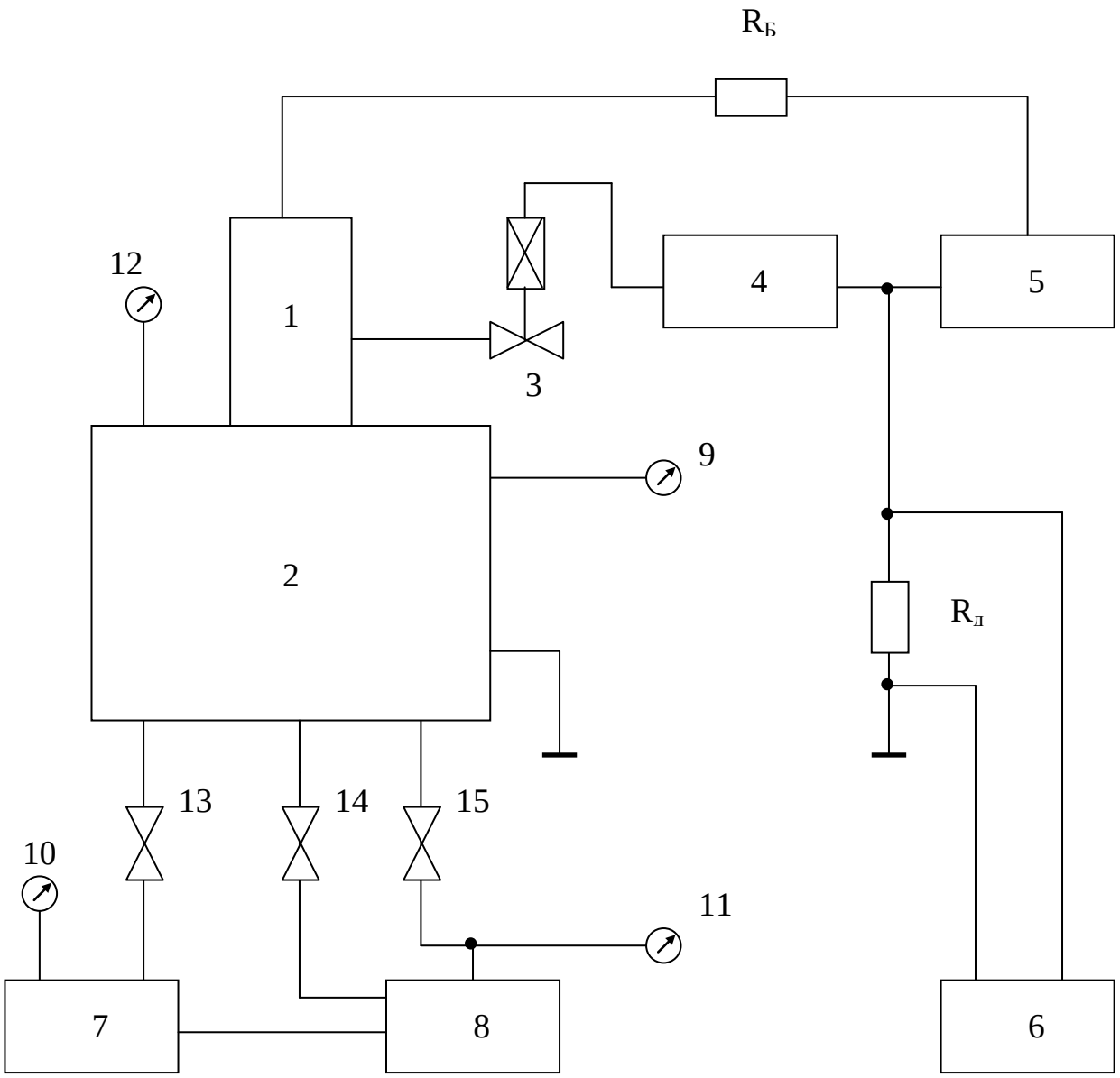

Рис. 4.1 Схема вакуумної установки

1 - ГРЕПГ; 2 - технологічна камера; 3 - натікач; 4 - електронний блок; 5 - високовольтне джерело живлення; 6 – осцилограф; 7 - дифузійний насос; 8 - форвакуумний насос; 9-12 - вакуумметри; 13-15 - вентилі.

Камера електронної гармати та технологічна камера відкачувались до тисків 4 Па та 10^{-2} Па відповідно.

Осциллограми інерційності натікача та перехідної характеристики автоматичного регулятора знімались з допомогою запам′ятовуючого осциллографа С8-13.

Датчиком в колі зворотнього зв′язку автоматичної системи керування струмом слугував опір $R_д$. Тиск газу в камері гармати та технологічній камері вимірювались термопарними вакуумметрами.

4.2 Експериментальні характеристики автоматичної системи керування струмом газорозрядної електронної гармати

Визначення залежності величини потоку газу через натікач від струму на катушці електромагніта проводилося з допомогою каліброваного циліндра. Натікач вихідним штуцером під′єднується до відкачуваного об′єму, а вхідним до каліброваного циліндра з тиском газу, що дорівнює атмосферному. Струм на катушку електромагніта подавався від джерела постійного струму ТЭС-88 та одночасно з включенням джерела запускався електронний секундомір П14-2М. По зміні об′єма газу в каліброваному циліндрі за одиницю часу визначалась величина потоку газа через натікач при заданному струмі на катушці електромагніта.

З проведеного графіка виходить, що при відсутності сигналу керування (тобто струму через катушку електромагніту) натікач забезпечує герметичність дозуючого вузла. Максимальний потік газа через натікач складає 0,5 $м^3$·Па/с при струмі 0,1 А. Величина номінального струму на катушці натікача не більше 0,5 А, при цьому забезпечується потік газу 10^{-2} $м^3$·Па/с.

Інерційність натікача вимірювалась з допомогою ємнісного датчика механічних переміщень. Схема вимірювань приведенана. Одна з обкладок конденсатора, що утворює з індуктивністю L параллельний коливальний

контур, з′єднана жорстко з корпусом натікача, а друга з якорем електромагніта. На контур з генератора синусоїдальних коливань Г4-102 через роз′єнуючий опір R подавалась змінна напруга з частотою, що дорівнювала власній частоті коливань контура. Амплітуда змінної напруги на контурі вимірювалась з допомогою запам′ятовуючого осциллографа С8-13. При вимірюванні одночасно з імпульсом напруги, що подавався на натыкач выд джерела живлення Б5-30, запускався осциллограф, фіксуючи зміну амплітуди напруги на контурі, викликане зміщенням частоти його власних коливань з зміною ємності при переміщенні якора електромагніта. Осцилограма, що характеризує інерційність натікача, приведена на рис. 4.5. Для розробленого натікача час відкриття клапана, що визвано ступінчатою зміною величини струму через катушку електромагніта складає $t_н \leq 0,1$ с. Приведено залежність потоку газа через натікач від переміщення якора натікача.

Дослідження характеристик системи керування проводилось при роботі системи в режимі стабілізації струму розряду газорозрядної електронної гармати. Дослідженні залежності статичної похибки регулювання від величини збуджуючого впливу, відхилення регулюємої величини від заданого значення при довгій безперервній роботі системі керування та перехідна характеристика процесу регулювання при збуджуючому впливі у вигляді ступінчатого імпульсу.

При дослідженні статичної похибки регулювання збуджуючий вплив здійснювався через зміну швидкості відкачування вакуумної камери з газорозрядною гарматою від 10^{-3} до 10^{-2} $м^3 \cdot Па/с$. При цьому величина статичної похибки не перевищувала 2%.

Відхилення регулюємої величини від усталеного значення на протязі довгої безперервної роботи проводилось при безперервній роботі систем

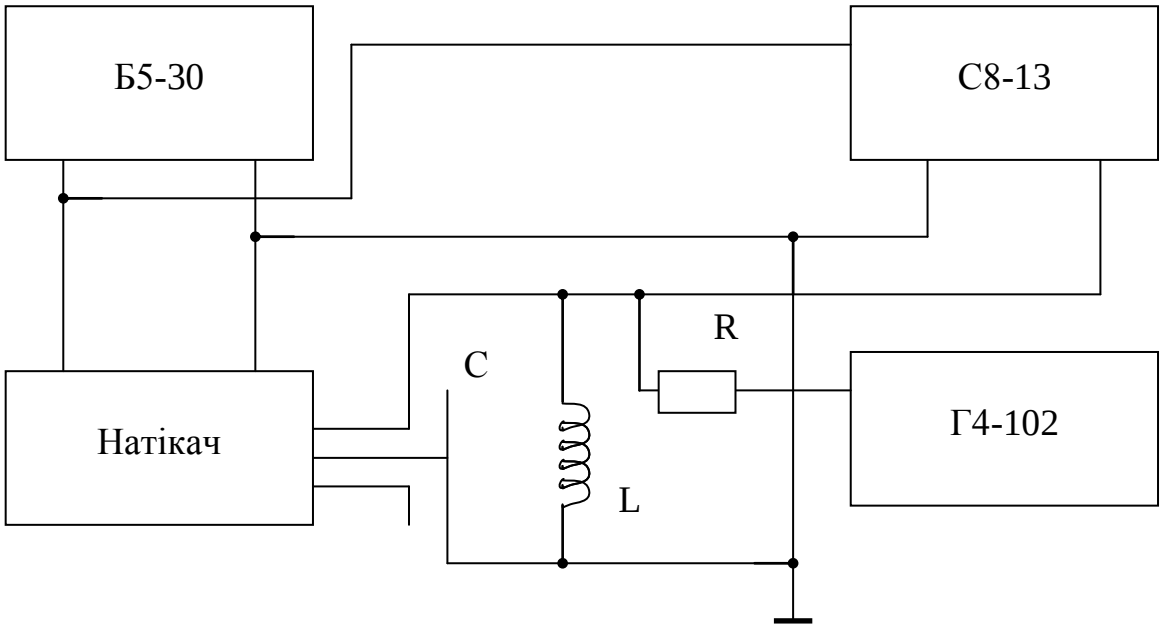

Рис. 4.2 Блок-схема вимірювань інерційності натікача

керуванння протягом двох годин. Помітне відхилення регулюємої величини має місце в початковий період роботи системи. Потім відхилення регулюємої величини від номінального значення не перевищує 1%. Отже для більшої точності регулювання струму систему керування необхідно вмикати за 15 - 20 хв. перед початком технологічного процесу.

Перехідна характеристика проесу регулювання залежить від часу параметрів регулюємого об′єкту (газодинамічних властивостей вакуумної системи технологічної установки) та постійної часу автоматичного регулятора. В електронному блоці розробленої системи автоматичного керування струмом передбачено регулювання постійної часу регулятора, змінюючи яку, млжна досягнути оптимальної форми перехідного процесу при регулюванні струму в установках з різними характеристиками вакуумних систем. Постійна часу може регулюватись в діапазоні 0,1 ÷ 10 с.

Приведена осцилограма перехідної характеристики при регулюванні струму розряду газорозрядної електронної гармати. Відкачування вакуумної камери проводилась дифузійним насосом. Збуджуюча дія вводилась вимиканням системи керування з наступним її вмиканням. При цьому перерегулювання не перевищувало 5 % від заданого значення струму розряду, а час тривалості перехідного процесу склав 0,7 с.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Новиков А.А.* Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой / А.А. Новиков. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 96 с.

2. *Плазменные* процессы в технологических электронных пушках / М.А. Завьялов, Ю.Е. Крейндель, А.А. Новиков, Л.П. Шантурин. — М.: Атомиздат, 1989. — 256 с.

3. *Ладохин С.В*. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве / С.В. Ладохин, Н.И. Левитский, В.Б. Черннявский и др. — К.: Сталь, 2007. — 605 с.

4. *Мельник И.В.* Аппроксимация вольт-амперных характеристик технологических источников электронов высоковольтного тлеющего разряда с использованием средств системы MatLab / И.В. Мельник // Вестн. Херс. нац. техн. ун-та. — Херсон, 2009. — Вып. 2 (35). — С. 299–305.

5. *Денбновецький С.В.* Моделювання процесу автоматичного керування струмом газорозрядного електропроменевого нагрівача / С.В. Денбновецький, К.О. Костюченко, В.І. Мельник и др. // Электроника и связь. — 2014. — **9**, № 22. — С. 15 – 17.

6. *Мельник И.В.* Исследование пропускной способности дозирующего устройства натекателя газа для газоразрядной электронной пушки / И.В. Мельник, С.Б. Тугай // Электроника и связь, № 5 (64), 2011. — С. 25–30.

7. *Пипко А.И.* Конструирование и расчет вакуумных систем / А.И. Пипко, В.Я. Плисковский, Е.А.Пенчко. — М.: Энергия, 1979. — 504 с.

8. *Гейнце В.* Введение в вакуумную технику: в 2 т. / В.М. Гейнце. — М.–Л.: Госэнергоиздат, 1960. — Т. 1. Физические основы вакуумной техники. — 511 с.

9. *Тягунов Г.А.* Основы расчета вакуумных систем / Г.А. Тягунов. — М.–Л.: Госэнергоиздат, 1948. — 148 с.

10. *Васильев В.П.* Численные методы решения экстремальных задач / В.П. Васильев. — М.: Наука, 1988. — 552 с.

11. *Бронштейн И.Н.* Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов /И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. — М.: Наука, Гл. ред. Физико-математ. лит-ры, 1986. — 723 с.