

Центральноукраїнський національний технічний університет  
Факультет будівництва, транспорту та енергетики  
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри АВП

к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Олександр ДІДИК

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
за другим (магістрським) рівнем вищої освіти**

**на тему**

**«Система автоматичного керування подачею електрода  
при розмірній обробці твердого сплаву»  
«Automatic electrode feed control system for dimensional  
machining of hard alloys»**

Виконав здобувач II курсу групи АК-23МЗ  
ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-  
інтегровані технології»  
спеціальності 174 «Автоматизація,  
комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка»

\_\_\_\_\_ Олег СІСА

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

Керівник проекту

доцент, канд.техн.наук

\_\_\_\_\_ Сергій ПЛЕШКОВ

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

Рецензент

\_\_\_\_\_

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет *будівництва, транспорту та енергетики*

Кафедра *автоматизації виробничих процесів*

Рівень вищої освіти *магістр*

Галузь знань *15 Автоматизація та приладобудування*

Спеціальність *174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»*

Освітньо-професійна програма *«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 року

**ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ  
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

*Сіси Олега Федоровича*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Система автоматичного керування подачею електрода при розмірній обробці твердого сплаву*

2. Керівник роботи *Плешков Сергій Петрович, канд. техн. наук, доцент,*  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту *26.12.2024 р.*

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи *Розробити систему автоматичного керування подачею електрода при розмірній обробці твердого сплаву. 1. Обґрунтувати напрямки роботи та актуальність теми; 2. Розробити структурну схему системи автоматичної подачі електрода; 3. Зробити аналіз системи автоматичного регулювання; 4. Розробити принципову електричну схему системи автоматичної подачі і виготовити блок керування; 5. Визначити залежність витрати рідини від сили струму керування запропонованої системи гідравлічним розподільником; 6. Виконати випробування обробки твердого сплаву способом РОД.*

## 5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Жесан Р.В.</i>		

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Обґрунтування напрямку роботи та актуальність теми</i>	<b>15.10.24</b>	
2.	<i>Розробка структурної схеми та вибір елементів системи</i>	<b>30.10.24</b>	
3.	<i>Аналіз та синтез системи автоматичного керування подачею електрода при РОД</i>	<b>25.11.24</b>	
4.	<i>Практична реалізація системи автоматичного керування при розмірній обробці твердого сплаву</i>	<b>20.12.24</b>	

Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Керівник роботи \_\_\_\_\_ С.П. Плешков «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

Завдання прийнято до виконання

Здобувач \_\_\_\_\_ О.Ф. Сіса «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

## Анотація

на випускню кваліфікаційну роботу студента групи АК-23МЗ Сіси Олега Федоровича зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» на тему: «Система автоматичного керування подачею електрода при розмірній обробці твердого сплаву».

Випускню кваліфікаційну роботу присвячено проблемі підвищення якості обробки твердого сплаву способом розмірної обробки електричною дугою. Ця проблема носить гострий характер так, як для отримання гарної якості поверхні потрібно постійно підтримувати мінімальний торцевий зазор між електродом і заготовкою з мінімальною напругою горіння електричної дуги.

В роботі розглянута технологія розмірної обробки електричною дугою та технологічні характеристики експериментального верстата Дуга – 8Г. Розроблена структурна схема системи автоматичної подачі електрода. Проведен синтез адаптивного регулятора, алгоритм роботи, конструкція, методика налаштування.

На основі одержаних результатів розроблена структурна, функціональна та принципова схема мікропроцесорної системи адаптивного регулятора подачі електрода, що за допомогою зворотніх зв'язків у складі гідроприводу верстата та джерела живлення електричної дуги дозволило керувати дроселюючим гідророзподільником за миттєвими параметрами електричної дуги. Це дозволило стабільно тримати робочу напругу горіння дуги в межах  $U_{\delta}=10...15$  В.

**Ключові слова:** електрична дуга, подача електрода, система автоматичного регулювання, адаптивний регулятор.

## Summary

for the final qualification work of the student of the AK-23MZ group Sisy Oleha Fedorovycha from the specialty 174 "Automation, computer-integrated technologies and robotics" on the topic: "System of automatic control of electrode feed during dimensional processing of hard alloy".

The final qualification work is devoted to the problem of improving the quality of hard alloy processing by the method of dimensional processing by electric arc. This problem is acute in nature, as in order to obtain good surface quality, it is necessary to constantly maintain a minimum end gap between the electrode and the workpiece with a minimum voltage of burning of the electrode. The work considers the technology of dimensional processing by electric arc and the technological characteristics of the experimental machine Duga - 8G. A structural diagram of the automatic electrode feed system has been developed. The synthesis of an adaptive regulator, the algorithm of operation, design, and adjustment method have been carried out.

Based on the results obtained, a structural, functional and principle diagram of a microprocessor system of an adaptive electrode feed regulator was developed, which, using feedback loops in the hydraulic drive of the machine and the electric arc power source, allowed controlling the throttling hydraulic distributor according to the instantaneous parameters of the electric arc. This allowed stably keeping the operating voltage of the arc burning.

**Keywords:** electric arc, electrode feed, automatic control system, adaptive regulator.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
РОЗДІЛ 1. ОБГРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ РОБОТИ ТА АКТУАЛЬНОСТІ ТЕМИ .....	10
1.1. Дуга: природа, умови виникнення та існування, основні співвідношення.....	10
1.2. Математичний опис та модель дуги. Зв'язок основних параметрів дуги із зовнішніми діями	13
1.3. Спосіб розмірної обробки металів електричною дугою.....	16
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОЇ ПОДАЧІ ЕЛЕКТРОДА.....	22
2.1. Аналіз приводів переміщення електродів.....	22
2.2. Визначення параметрів електрогідравлічного приводу переміщення електрода.....	27
2.3. Мікроконтролерна система керування електрогідравлічним приводом .....	33
2.4. Складання моделі системи управління РОД.....	36
РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ РОД .....	41
3.1. Оператор як елемент системи автоматичного керування.....	41
3.2. Синтез структури адаптивного регулятора, алгоритм роботи, конструкція.....	43
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИПРОБУВАННЯ .....	49
4.1. Визначення залежності витрати рідини від сили струму керування.....	49
4.2. Випробування САК подачі електрода.....	50
ВИСНОВКИ .....	59
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	60
ДОДАТКИ ОХОРОНА ПРАЦІ.....	63
А.1 Законодавчі та нормативні акти з питань охорони праці в Україні.....	63
А.2 Шкідливі та небезпечні фактори виробництва.....	69
А.3 Способи усунення або зменшення впливу шкідливих та небезпечних факторів при експлуатації електроерозійного копіювально-прошивного верстата моделі «Дуга 8Г».....	70
А.4 Розрахунок припливно-витяжної вентиляції.....	72

## ВСТУП

### Актуальність теми

В дійсний час технологічні процеси на основі електричної дуги широко впроваджуються в різні галузі: машинобудування, будівництво, металургія й ін. При цьому постійно зростають вимоги до систем керування стабілізацією горіння електричної дуги з метою підвищення якості й енергоефективності.

Електрична дуга є складним фізичним процесом. Системи керування стабілізації горіння електричної дуги повинні враховувати ряд особливостей: істотну нелінійність, чутливість до різних факторам, роботу джерела струму, вплив оператора або привода подачі й т.д. Сучасний рівень розвитку силової електроніки, мікроелектроніки та електромеханіки дає можливість створювати систему автоматичного керування електроерозійних верстатів, що дозволяють здійснити керований стабільний процес розмірної обробки дугою (РОД) [1,2] твердого сплаву. Робота такого обладнання зазвичай заснована на регулюванні процесу горіння електричної розмірної дуги в поперечному потоці рідини за рахунок керування напругою і струмом, в тому числі і за рахунок швидкості подачі електрод-інструменту (ЕІ). Одним з основних способів керування процесом розмірної обробки електричною дугою є вплив на систему гідравлічної подачі ШІМ сигналу [3].

Сучасні системи керування частково вирішують відзначені завдання. У той же час керування процесом горіння електричної дуги постійно удосконалюється, застосовуються нові приводи подачі, сучасні джерела живлення технологічним струмом. Це дозволяє підвищити ефективність процесів із застосуванням електричної дуги: скоротити число технологічних коротких замикань й обривів дуги, підвищити стабільність горіння електричної дуги. Дуга має явно виражену нелінійну характеристику, що істотно впливає на динамічні властивості системи

регулювання процесом горіння електричної дуги. Тому створення сучасних високоефективних систем керування подачі електрода в зону горіння електричної дуги є актуальним завданням.

### **Мета та задачі роботи**

Мета дослідження – розробити систему автоматичного керування подачею електрода при розмірній обробці твердого сплаву.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- обґрунтувати напрямок роботи та актуальність теми;
- розробити структурну схему системи автоматичної подачі електрода;
- зробити аналіз системи автоматичного регулювання;
- розробити принципову електричну схему системи автоматичної подачі і виготовити блок керування;
- визначити залежність витрати рідини від сили струму керування запропонованої системи гідравлічним золотником;
- виконати випробування обробки твердого сплаву способом розмірної обробки електричної дугою.

### *Об'єкт і предмет роботи*

Об'єктом роботи є експериментальний електроерозійний верстат Дуга-8Г. Предмет роботи – система автоматичного керування подачею електрода при розмірній обробці твердого сплаву.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

Розроблено, виготовлено та випробувано блок САК з можливістю регулювання параметрів подачі за допомогою зворотних зв'язків у складі гідроприводу верстата та джерела живлення електричної дуги, який забезпечує стабільність кроку подачі електрода, має малу інерційність, малі

масо-габаритні характеристики, управління дроселюючим гідро розподільником за миттєвими параметрами дуги. Це дозволило стабільно тримати робочу напругу горіння дуги в межах  $U_{\delta} = 10 \dots 15$  В.

### **Практичне значення отриманих результатів**

Удосконалено систему автоматичного керування для експериментального електроерозійного верстата Дуга-8Г. Це дозволяє: на 15 – 20 % підвищити ефективність процесу обробки з застосуванням електричної дуги, що скоротило кількість коротких замикань і гасіння дуг, також підвищило стабільність струму обробки на 30 – 40 %.

Запропоновано, розроблено, виготовлено та випробувано систему автоматичного керування подачею електрода при розмірній обробці твердого сплаву.

### **Апробація результатів роботи**

Основні положення та результати магістерської роботи повідомлені і обговорені на Всеукраїнській науково-практичній ON-LINE конференції "Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві" в ЦНТУ 13-14 листопада 2024 року.

### **Структура й обсяг роботи**

Магістерська робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи 75 сторінки, в тому числі 19 рисунків і 2 таблиць, список використаних джерел з 25 найменувань та 1 додатку на 13 сторінок.

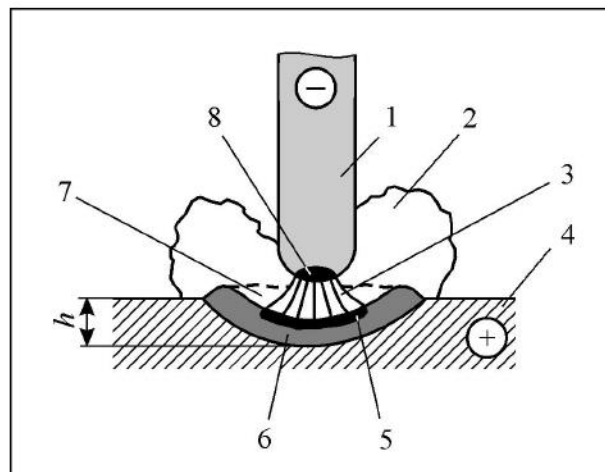
## ОБГРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ РОБОТИ ТА АКТУАЛЬНОСТІ ТЕМИ

### 1.1. Дуга: природа, умови виникнення та існування, основні співвідношення

Дуга (дуговий розряд) являє собою тривалий електричний розряд, що відбувається при атмосферному тиску у газовому проміжку між двома електродами.

Вперше дуговий розряд був описаний В. В. Петровим у 1802 році. Дугові розряди широко використовуються у різних галузях – вони можуть бути джерелом світла у спеціальних лампах надвисокого тиску (СВД), використовуються у газотронах, тиратронах тощо. Особливо широке застосування електрична дуга отримала в металургії та зварювальній техніці для нагрівання та плавлення металів.

Схема дуги прямої дії постійного струму, що горить між металевим електродом 1 та металом 4, показана на рисунку 1.1.



1 – електроди; 2 – факел дуги; 3 – стовп дуги; 4 – метал; 5 – анодна пляма; 6 – ванна розплавленого металу; 7 – кратер; 8 – катодна пляма

Рисунок 1.1 – Схема електричної дуги прямої дії

Дуга складається із стовпа 3, основа якого розташована у заглибленні (кратері 7), що утворюється на поверхні ванни 6 розплавленого металу. Стовп дуги циліндричну або трохи конічну форму. Верхня частина стовпа торкається сильно нагрітої поверхні електрода 1 в області 8, що називається катодною плямою. Основа стовпа розташована на металі та обмежується областю 5, яка називається анодною плямою.

Речовина стовпа, плазма, складається із дуже розпечених, сильно іонізованих газів. В стовпі зосереджена основна кількість енергії дуги, внаслідок цього в його осьовій частині розташована зона найбільш високих температур, досягаючись значень від 5500 до 7800 °С. Чим вище густина струму в дузі, чим вище температура її стовпа. Зовні стовп оточений ореолом полум'я 2 із нагрітих парів та газів, що мають більш низьку температуру.

Процес виникнення дуги можна описати наступним чином [2]: при дотику кінцем електроду металу відбувається коротке замикання ланцюга. Струм миттєво плавить електрод або метал, внаслідок чого між електродом та металом утворюється прошарок рідкого металу. В наступний момент електрод відводиться.

Термо- та автоелектронна емісія електронів катодом створює умови для подальшого горіння дуги.

Напруга дуги, тобто напруга між електродом металом, залежить від її довжини. Чим коротше дуга, тим нижче напруга при незмінній силі струму в дузі. Це пояснюється тим, що при довгій дозі опір газового проміжку буде більшим, тобто чим вище опір, тим вище повинна бути напруга для того, щоб забезпечити проходження той ж сили струму в ланцюзі. Загальний спад напруги на дузі  $U_d$  (рисунок 1.2) складається із спаду напруги в катодній зоні  $U_k$ , в стовпі дуги  $U_{cm}$  та в анодній зоні  $U_a$ :

$$U_d = U_k + U_c + U_a. \quad (1.1)$$

Даний вираз описує регульовальну характеристику дуги. Вона кусочно-лінійна та показує, як змінюється напруга дуги при зміні її довжини і незмінної сили струму [59].

Приблизно напругу дуги можна описати лінійним рівнянням [59]:

$$U_{\delta} = a + b \cdot l_{\delta} . \quad (1.2)$$

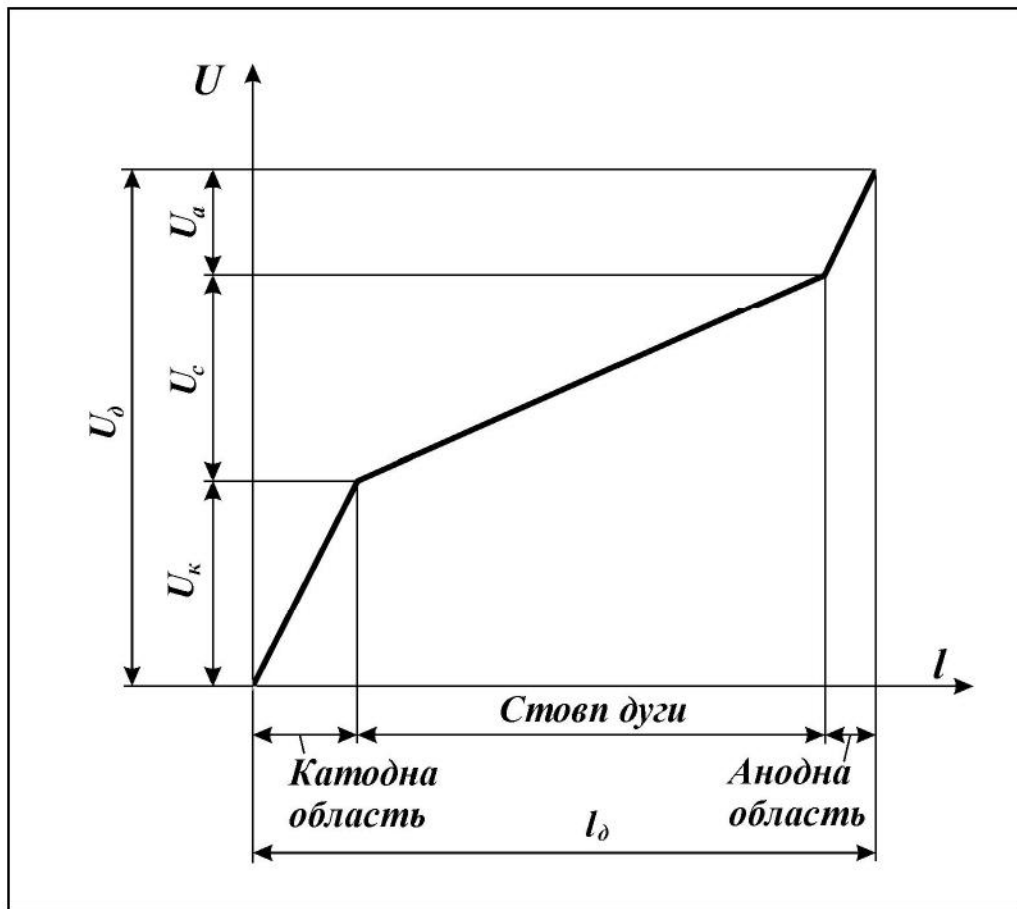


Рисунок 1.2 – Зміни напруги за довжиною дугового проміжку

Електрична дуга, як елемент ланцюга струму, володіє яскраво вираженою не лінійністю, тобто між її струмом  $I$  та напругою  $U$  відсутній пропорційний зв'язок. Залежності  $U = f(I)$  при інших незмінних умовах для таких елементів зображаються у вигляді кривих – вольт-амперних характеристик. Звичайно зі зміною сили струму змінюються швидкості парів, що витікають із активних плям електродів, розташування плям на поверхні останніх, розміри областей стовпа, що затіненні електродами від дії

струменів захисних газів, тиск газу в порожнині закритих дуг тощо. Тому у чистому вигляді залежності  $U_d = f(I_d)$  для зварювальних дуг побудувати практично не вдається.

Найбільш простою залежністю  $U_d$  від  $I_d$  характеризуються вільні дуги з електродами, що не плав'ються. Як показують чисельні заміри [1, 2], ці залежності є падаючими.

## **1.2. Математичний опис та модель дуги. Зв'язок основних параметрів дуги із зовнішніми діями**

Характерною особливістю дуги, що відрізняє її від інших видів розряду, є та обставина, що некомпенсовані просторові заряди зосереджені у приелектродних областях – у катода позитивний, у анода негативний. Надходження зарядів у стовп дуги забезпечується емісією електронів з катода та процесами іонізації у проміжку.

Плавлення металу здійснюється за рахунок енергії електричної дуги. Регулювання електричного режиму здійснюється зміною довжини дуги шляхом переміщення електрода та регулювання сили струму. Із-за наявності у приелектродних областях просторових зарядів виникає приелектродне падіння потенціалу. Приелектродні процеси викликають нерівномірний розподіл потенціалу за довжиною дуги. Із-за невеликій довжині приелектродних областей, катодний та анодний спад потенціалу можуть бути представлені у вигляді стрибків напруги. У зв'язку з відсутністю у стовпі дуги некомпенсованих об'ємних зарядів, напруга за довжиною стовпа змінюється монотонно приблизно за лінійним законом [1-2].

$$U_c = \beta \cdot l_d, \quad (1.3)$$

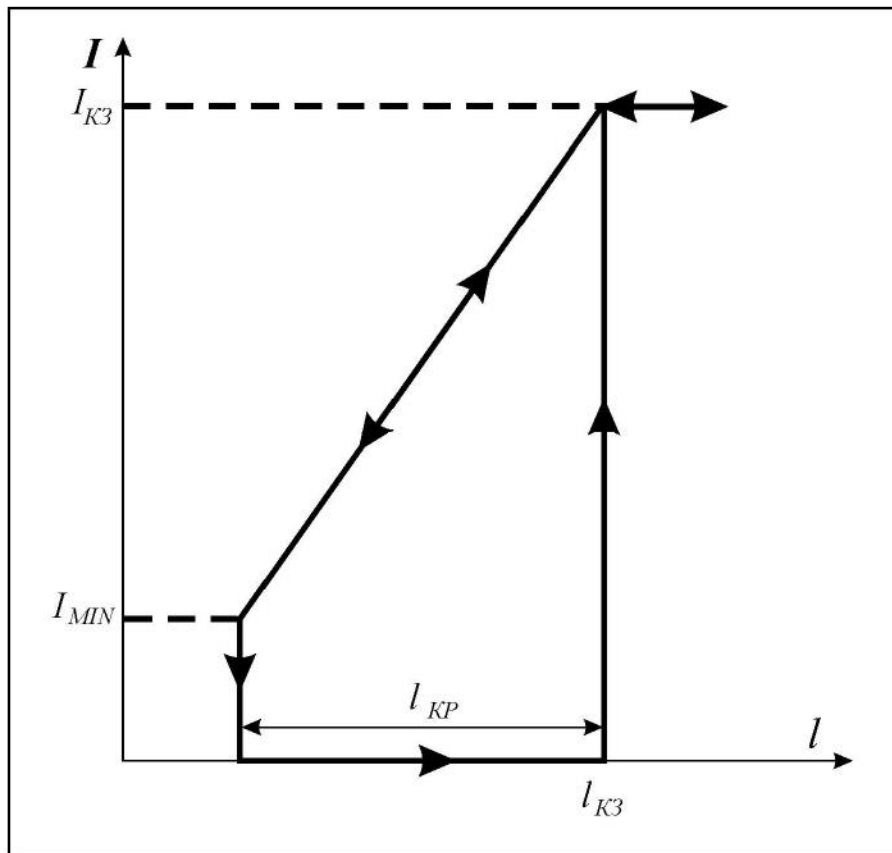
де  $\beta$  - параметр, що називають градієнтом потенціалу та дорівнює середньої напруженості електричного поля у стовпі.

Тоді, повна напруга дуги:

$$U_D = U_K + U_A + \beta \cdot l_\delta = U_{K-A} + \beta \cdot l_\delta, \quad (1.4)$$

де  $U_{K-A} = U_K + U_A$  – сума приелектродного спаду потенціалу.

Для джерела  $E_0$ , що не регулюється, характеристика  $I_\delta = f(l_\delta)$  представлена на рисунку 1.3.



$I_{MIN}$  – сила струму обриву дуги;  $I_{K3}$  – відстань від електрода до металу

Рисунок 1.3 – Залежність сили струму від довжини дуги

Для цього випадку можливість регулювання безперервної сили струму дуги обмежена діапазоном  $I_{MIN} < I_\delta < I_l$ , де  $I_l$  – номінальне значення сили струму електрообладнання, що використовується.

Модель дуги постійного струму можна подати наступною системою рівнянь:

$$\left[ \begin{array}{l} R_{\mathcal{L}} I_{\mathcal{D}} + L_{\mathcal{L}}(I_{\mathcal{D}}) \frac{dI_{\mathcal{D}}}{dt} = E - \alpha - \beta(l + \Delta l) \\ l_{KP} < l_{\mathcal{D}} < l_{K3} \\ I_{\mathcal{D}} = I_{K3} = const \text{ npu } l_{\mathcal{D}} > l_{K3} \\ I_{\mathcal{D}} = I_{MIN} \rightarrow 0 \text{ npu } l_{\mathcal{D}} \rightarrow 0 \end{array} \right], \quad (1.5)$$

де  $R_{\mathcal{L}}$  – активний опір силового ланцюга, Ом;  $I_{\mathcal{D}}$  – сила струму дуги, А;  $L_{\mathcal{L}}$  – індуктивність силового ланцюга, Гн;  $E$  – випрямлена ЕДС силового ланцюга, В;  $\alpha$  - приелектродний спад потенціалів, В;  $\beta$  - градієнт потенціалу у стовпі дуги, В/мм;  $l$  – переміщення електрода, мм;  $\Delta l$  – випадкова зміна довжини дуги, мм;  $l_{KP}$ ,  $l_{K3}$  – переміщення електрода, що відповідає обриву дуги та коротке замикання.

Система рівнянь (1.5) характеризує нелінійні властивості ланцюга силового струму. Індуктивність ланцюга  $L_{\mathcal{L}}$  складається із приведеної індуктивності трансформатора  $L_T$  та індуктивності дроселю  $L_{\mathcal{D}p}$ . Дросель розташований в ланцюзі постійного струму та звичайно виконується таким, що частково насичується. Тому  $L_{\mathcal{D}p}$  є функціонально залежною від силового струму  $I_{\mathcal{D}}$ . З підвищенням струму відбувається часткове насичення магнітопроводу. При цьому знижується величина  $L_{\mathcal{D}p}$ . Крім того, параметри  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $R_x$  суттєво залежать від режиму роботи. На підставі цього функціональна схема ланцюга, що розглядається, приймає вигляд відповідно рис. 1.4.

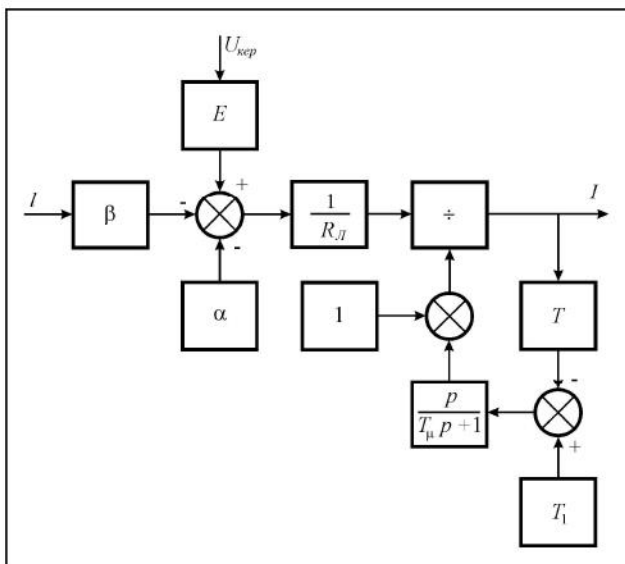
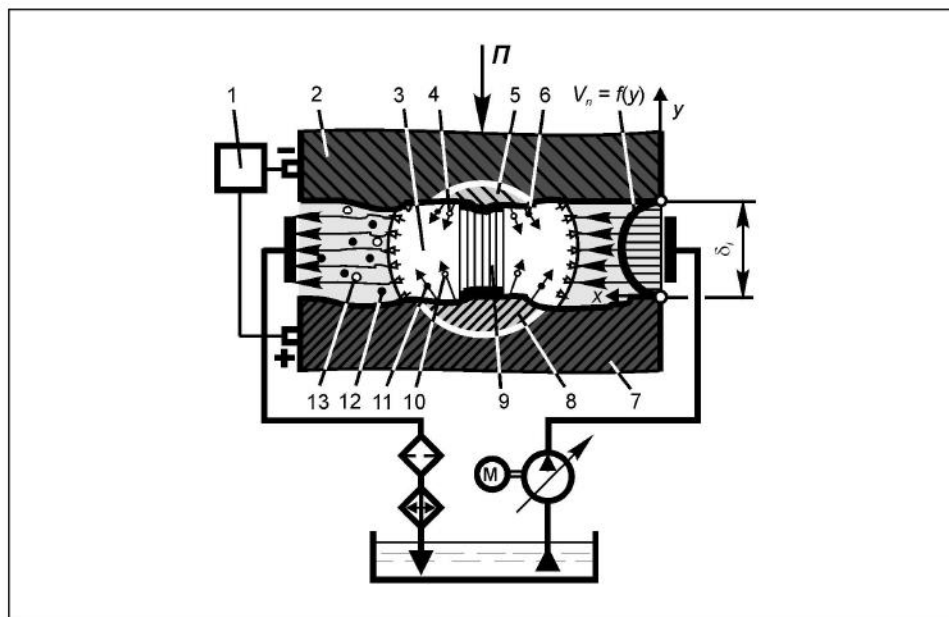


Рисунок 1.4 – Функціональна схема дуги постійного струму

### 1.3. Спосіб розмірної обробки металів електричною дугою

Спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД) відомий за роботами Носуленка В. І., Бокова В. М. та Сіси О. Ф. [1, 2]. В ньому енергія підводиться в зону обробки безперервно. Завдяки цьому, а також тому, що спосіб дозволяє вводити в зону обробки великі потужності електричного струму, даний спосіб володіє високою продуктивністю обробки.

Сутність РОД полягає в тому [1], що обробку здійснюють стаціонарною електричною дугою, яка горить поміж ЕІ та ЕЗ в потоці рідини при динамічному тиску потоку в зоні обробки не менше 1...2 кПа. Звичайно РОД здійснюють дугою, що горить в поперечному потоці робочої рідини (рисунок 1.5).



- 1 – джерело живлення; 2 – ЕІ; 3 – газова порожнина (пузир);  
4 – газоподібна частка матеріалу ЕІ; 5 – мікропорція матеріалу, що виплавлено з ЕІ; 6 – розплавлена частка матеріалу ЕІ; 7 – ЕЗ;  
8 – мікропорція матеріалу, що виплавлено з ЕЗ; 9 – електрична дуга;  
10 – газоподібна частка матеріалу ЕЗ; 11 – розплавлена частка матеріалу ЕЗ;  
12 – частка твердої фази продуктів ерозії; 13 – частка газової фази продуктів ерозії

Рисунок 1.5 – Принципова схема процесу РОД

Одержана таким чином дуга переміщується по поверхні електродів і має високі енергетичні характеристики, в зв'язку з чим відбувається інтенсивне локальне руйнування поверхні металу за рахунок випаровування та крапельного викидання розплаву, а потік рідини видаляє із зони обробки отримані продукти ерозії. Все це в сукупності забезпечує оптимальне протікання процесу розмірної обробки.

При реалізації процесу РОД гідродинамічний потік робочої рідини в МЕР виконує потрібну функцію:

- визначає енергетичний стан електричної дуги. В роботі [1] показано, що із підвищенням динамічного тиску потоку  $P_d$  (тиску у напрямку течії робочої рідини): напруженість електричного поля  $E$  в стовпі дуги різко зростає (рисунок 1.6, а) і, порівняно зі звичайними зварювальними та плазмовими дугами, за інших рівних умов (струм та напруга), в десятки разів вища, досягає 3 кВ/см і більше, та відповідає напруженості в стовпі нестационарного (імпульсного) електричного розряду в умовах відомих способів ЕЕО. Густина струму в дузі  $j$  зростає і досягає 50 кА/см<sup>2</sup> (рис. 1.6, б), а порівняно зі звичайними зварювальними та плазмовими дугами, за інших рівних умов, принаймні в декілька разів більше і відповідає густині струму в стовпі нестационарного електричного розряду в умовах відомих способів ЕЕО;

- визначає геометричний стан електричної дуги як інструмента для розмірної обробки поверхонь. В роботі [1] показано, що із підвищенням динамічного тиску потоку  $P_d$ : площа поперечного перерізу дуги  $S$  зменшується (рисунок 1.7, а) і, порівняно зі звичайними зварювальними та плазмовими дугами, за інших рівних умов, принаймні в декілька разів менша; довжина дуги  $L$  зменшується (рисунок 1.7, б) і, порівняно зі звичайними зварювальними та плазмовими дугами [2], за інших рівних умов, в десятки разів менша. Це дозволяє використати таку дугу для достатньо точного розмірного формоутворення поверхонь;

- відповідає за процес вилучення продуктів ерозії із зони горіння дуги, та інтенсифікує його, чим забезпечує передумови стабілізації процесу обробки поверхонь.

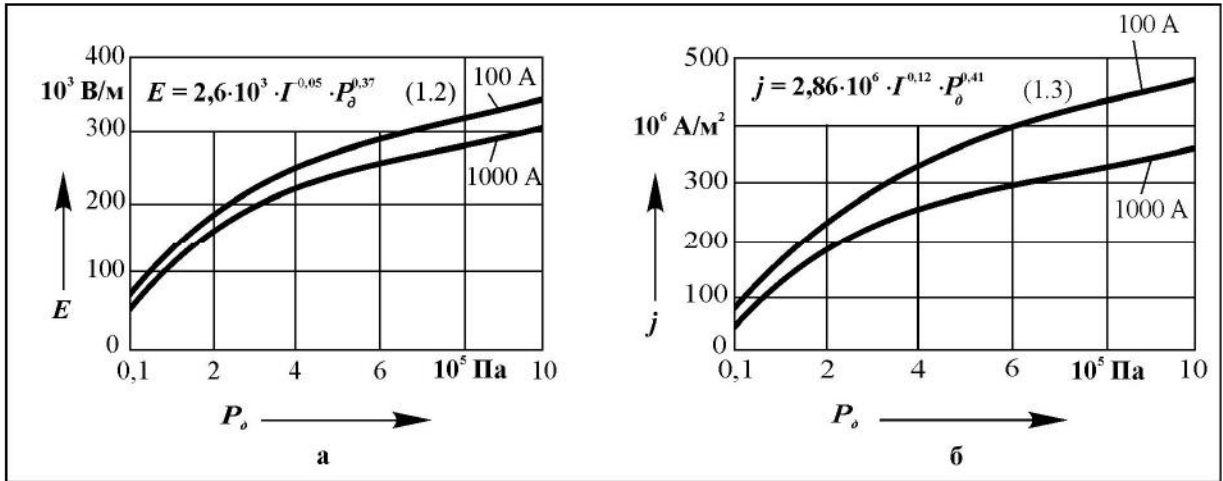


Рисунок 1.6 – Залежність напруженості електричного поля в стовпі дуги  $E$  (а) та густини струму  $j$  (б) від  $P_0$  та  $I$  {ЕЗ (-) – сталь 45; ЕІ (+) – графіт МПГ-7; робоча рідина – вода технічна} [9]

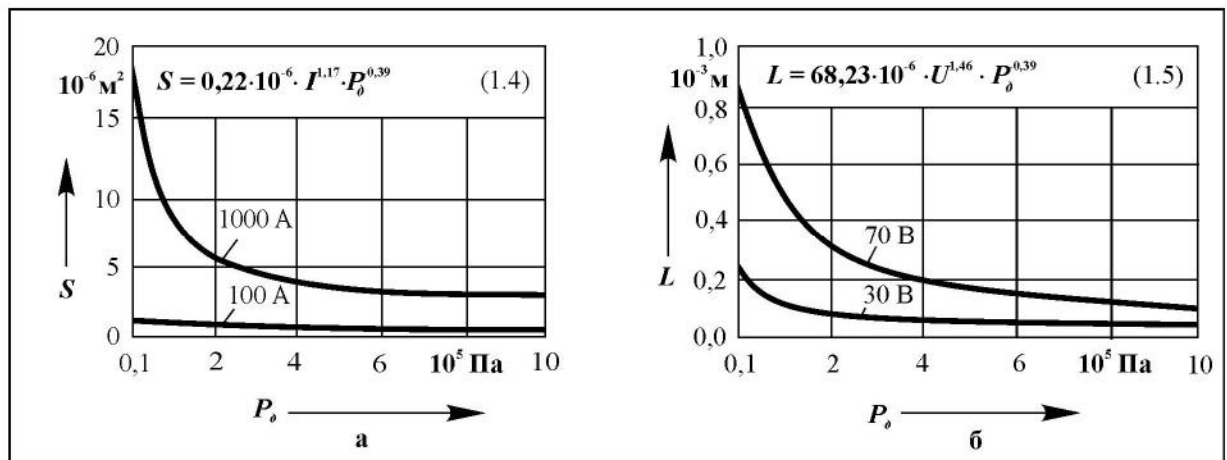


Рисунок 1.7 – Залежність площі поперечного перерізу  $S$  (а) та довжини дуги  $L$  (б) від  $P_0$ , сили струму та напруги {ЕЗ (-) – сталь 45; ЕІ (+) – графіт МПГ-7; робоча рідина – вода технічна} [9]

У перших та деяких подальших [1, 2] роботах продуктивність процесу РОД для різних експериментальних випадків оцінювалася в умовах двофакторного експерименту. В якості головного фактора, що відповідає за введення у зону обробки теплової енергії, вибирався технологічний струм  $I$ , а гідродинамічний режим в МЕР визначався динамічним тиском потоку  $P_0$ .

Крім того, відомі роботи [1, 2], де за інших рівних умов в якості гідродинамічного фактора застосовувався більш зручний для практичної реалізації фактор – статичний тиск робочої рідини на вході в МЕР  $P_{cm}$ . Математичне моделювання продуктивності РОД в умовах двофакторного експерименту з використанням фактора  $P_{cm}$  вперше було виконано автором у роботі [10].

Двофакторні математичні моделі продуктивності процесу РОД для різних матеріалів показано в таблиці 1.1. Як бачимо, максимальні досягнуті значення продуктивності РОД для усіх початкових умов експериментів значно (у 7...25 разів) перевищують відповідні значення для електроімпульсної обробки [2].

В основу порівняльного аналізу продуктивності обробки сталі 45 методом РОД та електроімпульсної обробки покладено умову: досягнення максимально можливої продуктивності обробки при однаковій шорсткості обробленої поверхні. Шорсткість обробленої поверхні  $Ra$  пов'язана з електричним ( $I$ ) та гідродинамічним ( $P_\partial$ ) режимами РОД виразом [1]:

$$Ra = 2323,98 \cdot I^{0,17} \cdot P_\partial^{-0,55} . \quad (1.6)$$

Порівнювальний аналіз виконано стосовно обробки бічної поверхні наскрізного отвору з заданою шорсткістю  $Ra = 6,3$  мкм. Технологічний струм варіювався у межах від 20 до 1000А. Для кожного значення сили струму за формулою (1.15) розраховувалося таке значення фактора  $P_\partial$ , яке відповідає заданій шорсткості обробленої поверхні, а продуктивність РОД оцінювалася аналітично за формулою (1.7). За результатами порівнювального аналізу бачимо (таблиця 1.2), що при реалізації процесу РОД суттєве підвищення продуктивності обробки (в 1,1...64 рази) досягається за рахунок можливості одночасного підвищення технологічного струму, який безпосередньо відповідає за введення теплової енергії в зону обробки, а слід і за продуктивність обробки, та динамічного тиску рідини, що визначає якість джерел тепла на електродах, а слід і якість поверхні, що обробляється.

Таблиця 1.1 – Двофакторні математичні моделі продуктивності процесу РОД

*M* для різних початкових умов експериментальних досліджень

Початкові умови					Математична модель <i>M</i> , мм <sup>3</sup> /хв.	Джере- ло інфор- мації	Максимальне досягнуте значення <i>M</i> , мм <sup>3</sup> /хв.
Матеріал та полярність електродів		Діапазон <i>I</i> , А	Діапазон <i>P<sub>д</sub></i> , 10 <sup>5</sup> Па або <i>P<sub>см</sub></i> , МПа	*Робоча рідина			
ЕЗ	ЕІ						
Сталь 45 (+)	МПГ-7 (-)	100...1000	0,01...5	М + Г	$M = 53,27 \cdot I^{1,01} \cdot P_d^{-0,08}$ (1.6)	[10]	27300
Сталь 45 (-)	МПГ-7 (+)	100...1000	0,01...5	М + Г	$M = 22,66 \cdot I^{1,06} \cdot P_d^{-0,07}$ (1.7)	[10]	18000
Сталь 45 (+)	Сталь 45 (-)	100...1000	0,01...5	М	$M = 10,29 \cdot I^{1,03} \cdot P_d^{-0,04}$ (1.8)	[9]	8800
Сталь 45 (+)	Сталь 45 (-)	100...1000	0,01...5	В	$M = 9,03 \cdot I^{0,97} \cdot P_d^{-0,03}$ (1.9)	[9]	5600
ВК15 (+)	МПГ-7 (-)	100...1000	0,01...5	М	$M = 11,98 \cdot I^{0,99} \cdot P_d^{-0,12}$ (1.10)	[9]	3700
ВТЗ-1 (-)	МПГ-7 (+)	150...300	1,2...1,8	В	$M = 2,25 \cdot I^{1,31} \cdot P_{cm}^{-0,25}$ (1.11)	[12]	3800
ВТЗ-1 (+)	МПГ-7 (-)	150...300	1,2...1,8	В	$M = 0,92 \cdot I^{1,6} \cdot P_{cm}^{-0,25}$ (1.12)	[12]	8100
Сталь 45 (-)	МПГ-7 (+)	150...300	1,2...1,8	В	$M = 1,54 \cdot I^{1,36} \cdot P_{cm}^{-0,92}$ (1.13)	[12]	3050
Сталь 45 (+)	МПГ-7 (-)	150...300	1,2...1,8	В	$M = 8,88 \cdot I^{1,16} \cdot P_{cm}^{-0,46}$ (1.14)	[12]	6100

\*Склад робочої рідини: М + Г – масло «Індустріальне-12» (50 %) і гас (50 %); М – масло «Індустріальне-12» (100 %); В – вода технічна (100 %)

Таблиця 1.2 – Результати порівнювального аналізу продуктивності обробки сталі 45 методами електроімпульсної обробки (ЕІМО) та РОД при умові отримання однакової шорсткості обробленої поверхні

Порівнювальні параметри	ЕІМО [18]	РОД [9]				
Матеріал ЕЗ	МПГ-7	МПГ-7				
Полярність	Зворотна	Зворотна				
Робоча рідина	Органічне середовище	Органічне середовище				
Площа обробки, мм <sup>2</sup>	1500	1250				
Скважність силова	4	1				
Частота, кГц	22	-				
Сила струму <i>I</i> , А	20	20	100	200	400	1000
Динамічний тиск <i>p</i> , <i>P<sub>д</sub></i> , МПа	0	0,12	0,19	0,24	0,30	0,39
Продуктивність обробки <i>M</i> , мм <sup>3</sup> /хв.	215	238	1270	2610	5350	13860
<i>M</i> <sub>РОД</sub> / <i>M</i> <sub>ЕІМО</sub>	-	1,1	5,9	12	25	64
Шорсткість поверхні <i>Ra</i> , мкм	6,3	6,3				

Таким чином, високопродуктивний процес РОД, порівняно з електроімпульсною обробкою, має в своєму арсеналі додатковий технологічний фактор *P<sub>д</sub>*, що ефективно управляє якістю обробленої поверхні. Цей факт є однією із головних особливостей та переваг управління процесом РОД.

В той же час, незабезпечення постійного рівня гідродинамічного режиму потоку в напрямку течії робочої рідини в зоні обробки приводить до утворення градієнта шорсткості обробленої поверхні, а у місцях, де *P<sub>д</sub>* → 0, спостерігаються різні форми порушень, що приводять до дестабілізації

процесу обробки: нерозмірна (неякісна) обробка; велика глибина зони термічного впливу; “пригорання” електродів; короткі замикання, що є результатом недостатньої швидкості вилучення продуктів ерозії із МЕЗ тощо.

Тому, розробка технологічних процесів РОД деталей основного виробництва с забезпеченням постійного рівня гідродинамічного режиму потоку в напрямку течії рідини в торцевому міжелектродному зазорі є головне завдання для розробки систем автоматичного керування.

## РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОЇ ПОДАЧІ ЕЛЕКТРОДА

### 2.1. Аналіз приводів переміщення електрода

Механізм переміщення електрода має важливе значення для керування електричним режимом верстата РОД, так як його робота визначає якість системи автоматичного регулювання торцевого міжелектродного зазору, що, в свою чергу, впливає на продуктивність та якість обробки. При реалізації процесу РОД необхідно підтримати торцевий зазор в межах від 0,02 мм до 0,2 мм.

Сьогодні відомі механізми переміщення електродів дугових сталеплавильних печей, які постачаються електромеханічними або гідравлічними приводами.

Вони повинні задовольняти наступним вимогам:

- забезпечувати надійність роботи, зручність ремонту та обслуговування;
- мати мінімальні зазори та люфти у кінематичній передачі;
- не мати еластичних ланок та ковзання;
- мати можливість переміщувати електроди з великою швидкістю при автоматичному та ручному регулюванні;
- мати максимальну зрівноваженість електродів;
- забезпечувати скасування поломок електродів при їх завантаженні;
- забезпечувати неможливість вільного (спонтанного) опускання електродів під дією власної маси (самогальмувальні механізми).

Механізми з електрогідравлічним приводом виконуються з канатно-барабанною, рейковою та гвинтовою передачею. Канатно-барабанна, передача, що встановлена у старих дугових печах, не може забезпечити

задовільну якість регулювання. Троси цієї передачі є еластичними ланками, що приводять до коливання електродів при робочому навантаженні. Крім того, можливе проковзування тросу на ведучому барабані, що відповідає додатковому люфту і приводить до збільшення часу перехідних процесів. Тому усі нові печі з електромеханічним приводом виконуються з рейковою передачею.

Гвинтова передача із-за чутливості до перекосів, не знайшла широкого застосування в дугових сталеплавильних печах.

Для приведення до дії електромеханічних приводів цих печей широко застосовується шунтовий двигун постійного струму, що пояснюється наступними перевагами:

- більшим пусковим моментом (менша тривалість перехідних процесів) а більшою перевантажною здатністю;
- зручністю регулювання числа обертів двигуна шляхом зміни напруги;
- простою схемою реверсу двигуна (зміною знаку напруги);
- можливістю застосування електромеханічних режимів гальмування.

Разом з електричним приводом застосовуються механізми з гідравлічним приводом як більш компактні, прості та менш коштовні. Доцільність застосування того або іншого приводу повинна бути визначена в кожному конкретному випадку з урахуванням умов роботи механізму, характеру руху виконавчого органу, надійності в експлуатації, загальної маси приводу, його вартості та габаритних розмірів. Гідравлічні приводи володіють рядом переваг порівняно з електромеханічними. До них слід віднести можливість безступінчасте регулювання швидкості в широкому діапазоні незалежно від навантаження, можливість захисту від перевантажень обмеженням робочого тиску, плавність та безшумність роботи, здатність тривало розвивати статичні зусилля, експлуатаційну надійність [3].

Застосування гідроприводу дозволяє спростити кінематику механізму переміщення електродів, зменшити габаритні розміри шахт, так як відсутні

противаги, покращати керованість печей. Виконавчий механізм – більш швидкодіючий, гнучкий та високоточний.

Крім того, гідропривід безперервно удосконалюється, з'являються нові можливості покращання якості регулювання електричного режиму та основних техніко-економічних показників роботи печей.

Гідравлічні приводи дугових сталеплавильних печей можуть виконуватися з об'ємним та дросельним керуванням. У першому випадку переміщення електрода здійснює реверсивний насос, що підвищує або зменшує тиск у силовому циліндрі і тим самим піднімає або дозволяє опуститися (під дією ваги) поршень або плунжер силового циліндра, що жорстко зв'язаний з електродом. Реверсивний насос приводиться до дії двигуном постійного струму, що керується будь-яким перетворювачем. Таким чином, у даному випадку використовується електромеханічний привід з гідравлічною передачею. Перевага його – більший ККД передачі та, як слідство, менша потужність двигуна (приблизно у два рази), а отже, і менший момент інерції його якоря. В той же час, момент інерції ротора дуже малий із-за малих його розмірів. Недоліками такого роду привода є його складність та громіздкість.

Гідравлічний привід з дросельним керуванням складається із електромагнітних золотників, що керуються системою автоматичного регулювання та з'єднують порожнину силового циліндра, в наслідок чого і відбувається піднімання та опускання електродів. Час перехідних процесів в системах такого роду малий та визначається, в основному, запізнюванням, яка складає приблизно 0,1 секунди [3]. Тому гідравлічні приводи при якісному їх виготовленні є більш досконаліми та дозволяють забезпечити в процесі регулювання швидкості переміщення електрода до 3-5 м/хв.

З підвищенням ємності дугових печей особлива увага наділяється вибору типа привода, так як він визначає не тільки динамічні та експлуатаційні якості системи автоматичного керування (САК), але і в значній мірі конструкцію самої печі. Тому являє практичний інтерес

проведення порівнювального якісного аналізу обох видів приводів для уточнення їх динамічних моделей.

Режими роботи приводів характеризуються керуючим сигналом та зусиллям на вихідній ланці. В процесі нормальної експлуатації нормальні сигнали, що керують, можна поділити на два типу, що відповідають режимам роботи САК: у режимі стабілізації (автоматичний режим) сигнал, що керує, є випадковою функцією, а при ручному керуванні і в інших режимах – стрибкоподібним.

При визначенні енергетичних співвідношень приводів необхідно враховувати режим роботи та навантаження на вихідній ланці. Внаслідок того, що навантаження одностипні та приблизно однакові, за виключенням сил тертя для обох типів приводів, при оцінці їх енергетичної ефективності мова може йти при швидкості та прискореннях переміщення електродів.

Швидкість в режимі стабілізації обмежується умовами усталеності. При цьому необхідні прискорення визначаються перехідними процесами. У режимі ручного керування та при усуненні коротких замикань після обвалу шихти необхідно забезпечувати максимальні швидкості переміщення електрода для скорочення часу холостого ходу об'єкта та перебуванні в аварійному режимі (режимі короткого замикання). Тому максимальні енергетичні співвідношення для приводів скоріш визначаються іншими режимами роботи, ніж режимом стабілізації. Це має принципове значення, тому що підвищення потужності електроприводів пов'язано з одночасним підвищенням їх інерційності. Для гідроприводів ця сторона питання не принципова. Однак підвищення потужності для дросельного гідроприводу також ЕК бажане із-за малого ККД.

Природно, що різні принципи роботи гідравлічного та електромеханічного приводів вносять свої особливості в їх динаміку. Навантаження на вихідній ланці включає с себе сполучення різних складових: постійну, інерційну, тертя, пружні реакції кріплення основи та зв'язків вихідної ланки приводу з електродом. Наявність значної постійного

односпрямованого навантаження (маси рухомих частин) створює асиметрію швидкісної характеристики приводів та збільшує зону нечутливості, виключно недобре відбивається на роботі регулятора потужності при реверсі двигуна, так як у стані рівноваги САК дугової печі (ДП) на електродвигун діє постійний момент значної величини при відсутності струму у якорі двигуна. Очевидно, що утримання електродів у сталому положенні регулятора потужності необхідно приймати спеціальні міри, що запобігають вільному опусканню електрода: статичне зрівноваження контр вантажами або активне – багатодвигунним приводом та іншими способами. Ці міри, як правило, приводять або до збільшення і без того великої інерційності електропривода, або до погіршення експлуатаційних показників, що у кінцевому підсумку ведуть до зниження якості регулювання та надійності.

Гідроприводи в таких умовах володіють більш високою швидкодією.

В теперішній час, у зв'язку з удосконаленням гідравлічного приводу [3], він знаходить застосування не тільки для механізмів ДП середньої та великої потужності 15 МВ·А (25 т), 40 МВ·А (50 т), 90МВ·А (150 т), але й малої потужності 1,6 МВ·А (1 т) та нижче. Цьому сприяють такі переваги гідравлічного приводу, як компактність, здатність тривало розвивати статичні зусилля, можливість безступінчастого регулювання швидкості у широкому діапазоні, можливість захисту від перевантажень обмеженням тиску, плавність та безшумність роботи [3]. Створення в останній час пропорційних гідророзподільників дозволяє реалізувати різні алгоритми роботи регуляторів переміщення електродів. Недоліки гідравлічного приводу обумовлені витоками робочої рідини крізь ущільнення та зазори (особливо при високих значеннях тиску), нагрівання робочої рідини, що в ряді випадків потребує застосування спеціальних охолоджувальних пристроїв та засобів теплового захисту та приводе до більш низькому ККД ніж у механічних передачах, необхідністю забезпечення в процесі експлуатації чистої робочої рідини та захисту від проникнення в неї повітря, пожежобезпечністю (при застосуванні горючої робочої рідини). Скасовують або значно зменшують

вплив вище перерахованих недоліків раціональним вибором гідравлічних схем та конструкцій гідровузлів. Це підтримується зарубіжними розробками [3]. Тоді переваги гідроприводу перед звичайними механічними передачами стають настільки суттєвими, що в багатьох випадках перевага дається саме йому [3].

Анализ ДСППТ показує, що її робота є складним технологічним процесом, якість якого залежить від конкретних вузлів (привід подачі електрода, схема електроживлення тощо) та побудови системи регулювання сили струму дуги у цілому. В процесі плавки відбуваються параметричні зміни у контурі силового струму та діють впливи випадкового характеру, що обурюють. Це приводить до коливальності процесів контуру регулювання та порушенню технологічного процесу – обриву дуги та короткому замиканню.

Тому система регулювання струму дуги повинна бути швидкодіючою та малочутливою до параметричних змін. Одним із можливих рішень цієї задачі може бути використання попереджувальної корекції у контурі регулювання силового струму та створення вузлів схеми керування з покращеними технічними характеристиками.

Для цього необхідно дослідити модель даної системи з урахуванням особливостей її функціонування.

## **2.2. Визначення параметрів електрогідравлічного приводу переміщення електрода**

Механізм переміщення електрода має велике значення для керування електричним режимом печі, так як його робота визначає якість автоматичного регулювання електричного режиму плавки, яка, в свою чергу, впливає на продуктивність печі, питому витрату електроенергії. Відхилення електричного режиму від заданого усувається переміщенням електрода.

Привід переміщення електрода традиційно виконують електро-механічним або гідравлічним.

Гідравлічний привод переміщення електрода володіє рядом переваг у порівнянні з електромеханічним приводом: компактність, зручність керування, безшумність роботи, можливість безступінчастого регулювання швидкості у широкому діапазоні, висока питома потужність, однотипність з іншими приводами механізмів пічного агрегату.

Відомо [4], що лінеаризована структурна схема електрогідравлічного приводу (ЕГП) має вигляд (рис. 2.1).

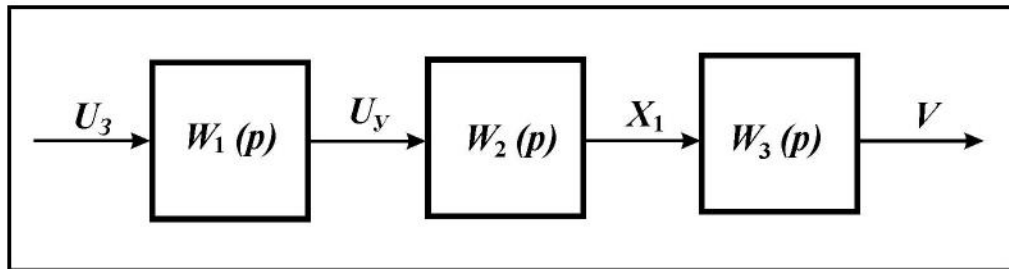


Рисунок 2.1 – Лінеаризована структурна схема електрогідравлічного приводу

Складемо модель та визначимо передатну функцію електрогідравлічного приводу з дросельним регулюванням. Його основними вузлами є підсилювач  $W_1$ , електромеханічний перетворювач  $W_2$  та гідродвигун  $W_3$ . Розглянемо кожний із цих вузлів.

Підсилювач вважаємо безінерційним з передатною функцією

$$W_y(p) = K_y = \frac{U_y}{U_1}, \quad (2.1)$$

де  $U_3$ ,  $U_y$  – напруга завдання та керування.

Робота гідродвигуна описується рівняннями [5]:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = A_n P_\delta - c_{ш} y,$$

$$K_{Qx}x - K_{Qp}P_{\partial} = A_n \frac{dy}{dt} + K_E \frac{dP_y}{dt}, \quad (2.2)$$

де  $m$  – маса рухомих частин гідроприводу, приведених до осі циліндру;

$y$  – координата переміщення поршня гідроциліндру;

$c_{ui}$  – коефіцієнт позиційного навантаження;

$A_n$  – робоча площа поршня;

$P_{\partial} = P_1 - P_2$  – перепад тисків у гідро циліндрі;

$x$  – переміщення золотника;

$K_{Qx}$  – коефіцієнт підсилення золотника за витратою;

$K_{Qp}$  – коефіцієнт ковзання;

$K_E = V_0/2E$  – коефіцієнт стиснення рідини;

$V_0 = 1,2 A_n y_{\max}$  – робочий об'єм гідроциліндра;

$E$  – модуль об'ємної пружності.

Передатна функція гідродвигуна на підставі перетворення рівняння (2.2) при умові  $c_{ui} = 0$  запишеться у вигляді

$$W_{z.d}(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{K_y}{p(T_k^2 p^2 + 2\xi_k T_k p + 1)}, \quad (2.3)$$

де  $K_y$  – коефіцієнт підсилення за швидкістю;

$T_k = \sqrt{\frac{m}{C_{\Gamma}}}$  – постійна часу гідродвигуна;

$\xi_k = \frac{\sqrt{m C_{\Gamma}}}{2B}$  – коефіцієнт демпфірування;

$$C_{\Gamma} = \frac{2EA_n^2}{V_0}; \quad B = \frac{A_n^2}{K_{Qp}}.$$

Найдемо параметри передатної функції (2.3) для системи, що досліджується. Вихідні дані наступні [4, 5, 13]:

$$m = 95 \text{ кг}; \quad d = 3,0 \text{ см}; \quad D = 4,0 \text{ см}; \quad E = 1,9 \cdot 10^8 \text{ кг/м}^2; \quad y_{\max} = 0,5 \text{ м};$$

$$K_{Qp} = 0,015 \text{ см}^5 / \text{Н} \cdot \text{с}.$$

На підставі цих даних отримуємо наступні значення:

$$A_n = 5,5 \text{ см}^2; C_T = 34,8 \cdot 10^4 \text{ кг/м}; T_K = 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ с}; B = 2017 \text{ Н·с/см}; \xi_K = 0,14.$$

Рівняння, що описують роботу електромеханічного перетворювача (ЕМП), має вигляд [13]:

$$\left[ \begin{array}{l} L_y \frac{di_y}{dt} + R_y i_y = U_y \\ T_{2y}^2 \frac{d^2 x}{dt^2} + T_{1y} \frac{dx}{dt} = K_Q i_y \end{array} \right], \quad (2.4)$$

де  $L_y, R_y, i_y, U_y$  – індуктивність, опір, струм та напруга ланцюга керування;

$T_{1y}, T_{2y}$  – постійні часу електромеханічного перетворювача;

$K_Q$  – коефіцієнт передачі.

На підставі системи рівнянь (2.4) знаходимо передатну функцію ЕМП

$$W_{ЕМП}(p) = \frac{K_Q / R_y}{(T_y p + 1)(T_{2y}^2 p + T_{1y} p + 1)} \approx \frac{K_Q / R_y}{T_y p + 1}, \quad (2.5)$$

де  $T_y = \frac{L_y}{R_y}$  – постійна часу обмотки керування.

У зв'язку малості  $T_{1y}$  та  $T_{2y}$  передатну функцію ЕМП можна спростити до ланки першого порядку  $L_y = 0,072 \text{ Гн}; R_y = 55 \text{ Ом}; T_y = 0,0013 \text{ с}$ .

Після перетворень, з урахування формул (2.1), (2.3), (2.5), передатна функція електрогідравлічного приводу набуде вигляду:

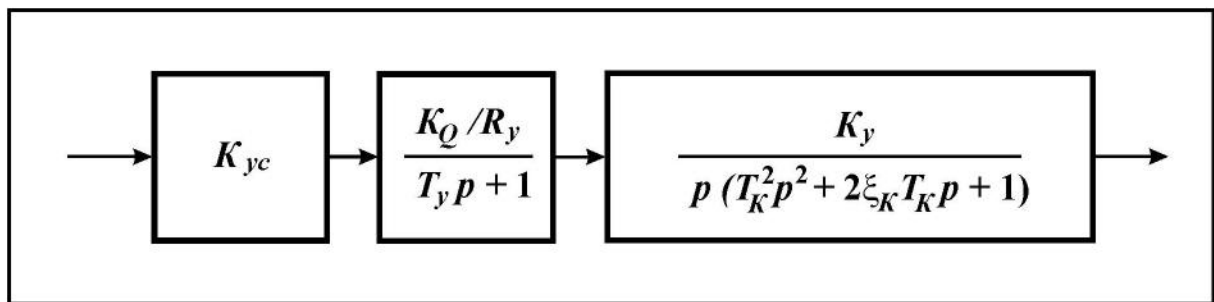
$$W_{ЕГП}(p) = \frac{K}{p(T_K^2 p^2 + 2\xi_K T_K p + 1)(T_y p + 1)} = \frac{V(p)}{U(p)},$$

де  $K = \frac{K_{yc} K_V K_Q}{R_y}$  - загальний коефіцієнт передачі електрогідравлічного приводу.

У електрогідравлічному приводі загальний коефіцієнт передачі  $K$  зв'язує вихідну швидкість з вихідною напругою завдання та може бути знайдений за припущенням сигналів:

$$K = \frac{\Delta V}{\Delta U_3} = 1,5 \text{ м/хв} \cdot \text{В.}$$

На основі цього можна скласти структурну схему лінійної моделі ЕГП (рисунок 2.2) [4].



**Рисунок 2.2 – Структурна схема лінійної моделі ЕГП**

В установці, що розглядається, використовується електрогідравлічний пропорційний гідророзподільник моделі УЕЭ8-12/16. Він призначений для дистанційного регулювання витрати та напрямку потоку робочої рідини (таблиця 2.1).

На рис. 2.3 наведена характеристична залежність «тиск/сила струму». Рекомендується керувати пропорційним гідророзподільником за допомогою ШІМ контролера, який обмежує силу струму  $I_2$ . При частоті модуляції 100 Гц гідравлічний гістерезис повинен прямувати до мінімуму. Частота модуляції підбирається в залежності від конкретного застосування та резонансової частоти гідравлічної системи.

Таблиця 2.1 – Основні технічні дані гідророзподільника УГЭ8-12/16

Параметри, розмірність	Норма
Умовний прохід, мм	10
Тиск на вході, МПа:	
- максимальний	16
- мінімальний	1,6
Тиск на виході, МПа	5,0
Витрата робочої рідини, л/хв.:	
- максимальний	40
- номінальний при $\Delta P = 1$ МПа	5
Тиск керування, МПа:	
- максимальний	8
- мінімальний	5
Маса, кг	5,3
Напруга живлення, В	12
Номінальна сила струму, мА	80...320

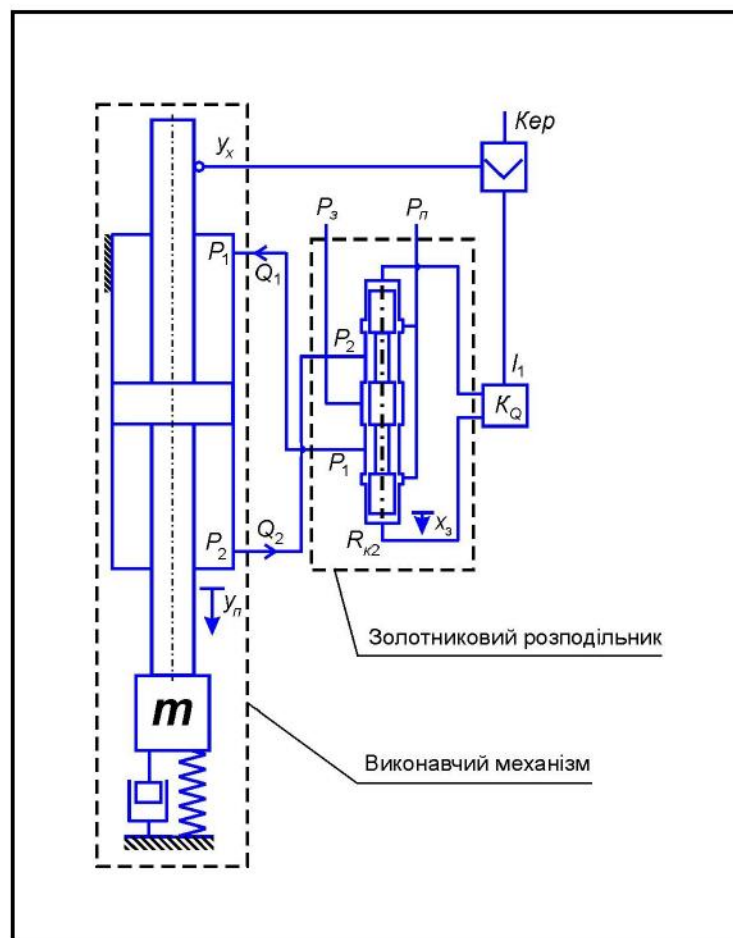


Рисунок 2.3 – Схема електрогідравлічного слідкуючого приводу експериментального верстата «Дуга -8Г»

### **2.3. Мікроконтролерна система керування електрогідравлічним приводом**

В теперішній час для керування пропорційними електрогідравлічними приводами використовуються системи керування як вітчизняного, так і зарубіжного виробництва. Найбільш поширеним є схемо технічне рішення на основі широтно-імпульсного модулятора (ШІМ), який в залежності від сигналу керування формує ШІМ-сигнали, що визначають керування електрогідравлічним приводом. Сучасні дослідження систем автоматичного керування електрогідравлічним приводом закладається у пошуку нових схемо-технічних рішень та алгоритмів формування сигналів керування з метою підвищення якості динамічних характеристик привода. Перспективними є дослідження в області розробки схем та алгоритмів роботи систем керування електрогідравлічним приводом, що забезпечують розширення діапазону регулювання та зниження нерівномірності руху електрогідравлічного привода.

Відомі вітчизняні аналоги побудовані на застарілій базі, використовують застарілі алгоритми керування та не можуть відповідати за повною мірою сучасним вимогам, що пред'являються до електрогідравлічних приводів. Зарубіжні аналоги значно перевершують у вартості пристрій, що розробляється. Тому виникає потреба у створенні нових схемо-технічних рішень та алгоритмів для реалізації системи керування електрогідравлічним приводом з більш кращими техніко-економічними параметрами у порівнянні з конкурентами.

В процесі досліджень була розроблена програма для мікроконтролера керування гідро циліндрами [6, 7].

Розроблена програма призначена для керування пропорціональним гідроприводом та має:

- модуль установки початкового зміщення двох ШІМ-сигналів;
- модуль узгоджуваного керування двох ШІМ;

- модуль керованого зміщення двох ШІМ-сигналів;
- модуль нормалізації сигналів керування.

Модуль установки початкового зміщення двох ШІМ-сигналів забезпечує початкове зміщення ШІС-сигналів. Це необхідно для компенсації зони нечутливості у характеристиці керування гідроциліндром. Зона нечутливості має місце у всіх подібних гідравлічних вузлах, але величина зони залежить від конкретних механізмів та умов роботи. Тому в процесі налаштування під конкретний об'єкт керування необхідно використати можливість підстроювання зміщення за допомогою модуля керованого зміщення двох ШІМ-сигналів відносно один одного.

При першому включенні мікро контролера в систему керування необхідно скорегувати початкові установки програми, зокрема за допомогою модуля керованого зміщення двох ШІМ-сигналів забезпечити таке налаштування системи керування, яке б компенсувало зону нечутливості у характеристиці керування гідроциліндрами.

Для узгодженого керування двома гідроциліндрами, які забезпечують два протилежних руху, використовується модуль узгодженого керування двох ШІМ. При надходженні аналогового керуючого сигналу на вхід АЦП мікро контролера відбувається формування двох ШІМ-сигналів, причому вхідний керуючий сигнал діє на них протифазно, тобто прирощення коефіцієнта заповнення ШІМ-сигналу на одному каналі супроводжується зменшенням коефіцієнта заповнення ШІМ-сигналу на другому каналі. При такому керуванні формується узгоджене керування гідроциліндром, що забезпечує переміщення по одній осі.

Модуль нормалізації сигналів керування забезпечує узгодженість рівнів вхідних аналогових керуючих сигналів з величиною шпаруватості вихідних ШІМ-сигналів. Це дозволяє узгодити роботу мікро контролера з різними вхідними вузлами керування та встановити алгоритм функціонування розробленої програми [8, 9]. Алгоритм роботи програми наведено на рисунку 2.3.

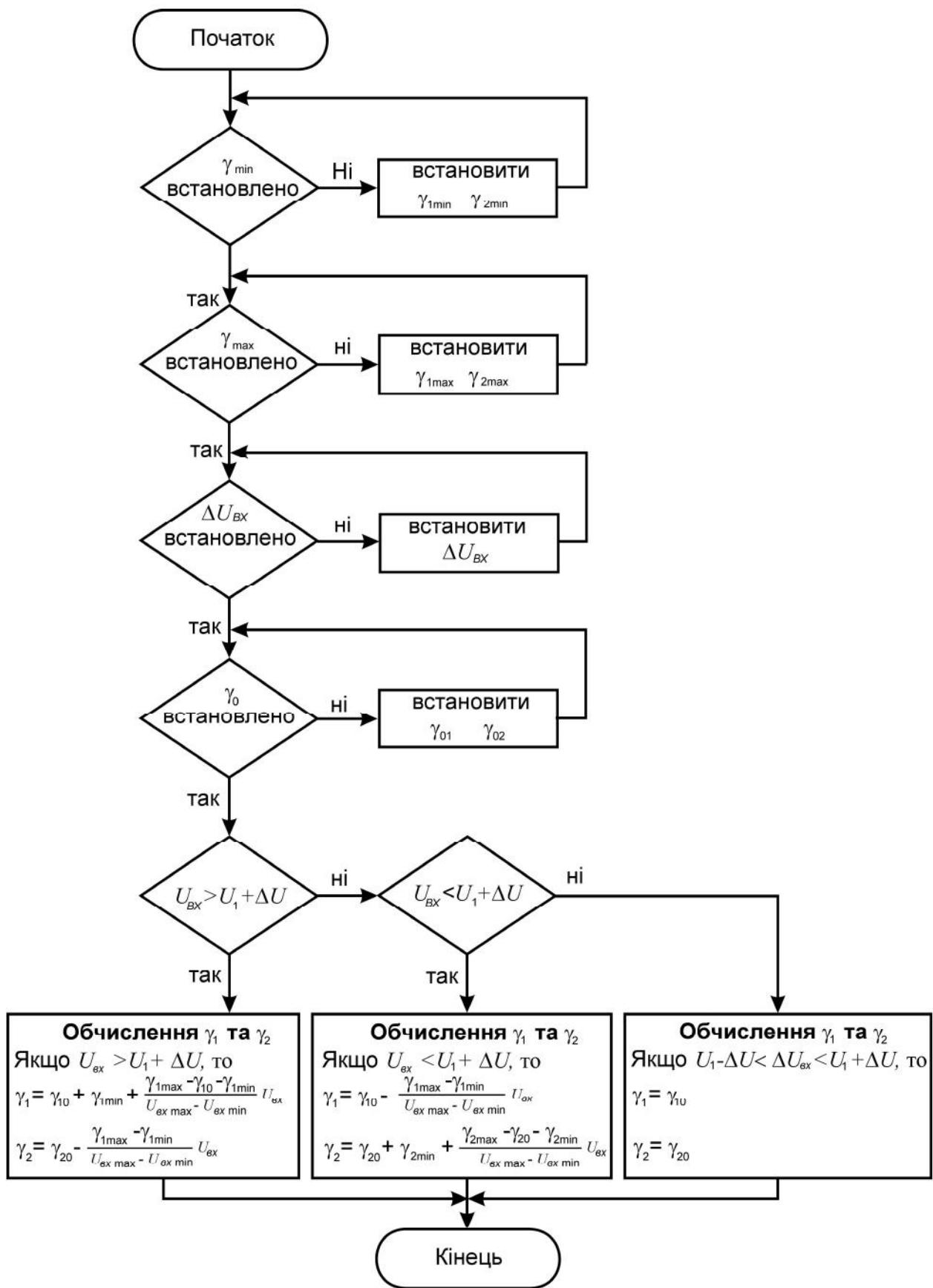


Рисунок 2.4 – Алгоритм роботи програми

Робота програми відбувається таким чином. В початковий момент встановлюються значення:

- шпаруватостей  $\gamma_{1\min}$  та  $\gamma_{2\min}$ , що забезпечують «сходінку» компенсації не лінійності тертя в момент початку руху та досягнення мінімальної швидкості  $V_{\min}$ ;

- шпаруватостей  $\gamma_{1\max}$  та  $\gamma_{2\max}$ , що забезпечують досягнення заданого значення максимальної швидкості  $V_{\max}$ ;

- зони нечутливості вхідної напруги  $\Delta U_{\text{вх}}$  для зниження впливу перешкод у вхідному сигналі;

- початкових значінь зміщення ШІМ-сигналів  $\gamma_{10}$  та  $\gamma_{20}$ .

В процесі роботи програми відбувається формування ШІМ-сигналів виходячи із умов, що наведені на рисунку 2.3.

Таке керування дозволяє знизити пульсації на низьких швидкостях та зменшити гістерезис у характеристиці гідропроводу [9, 10].

#### **2.4. Складання моделі системи управління РОД**

Процес РОД є складним об'єктом, який випробує керуючі та збурювальні дії. Для керування енергетичним режимом РОД застосовується зміна довжини дуги за допомогою переміщення електрода. Збурювальні дії пов'язані із нестабільністю горіння дуги, різкими коливаннями струму від замикання електродів та обриву дуги. Коливання струму негативно впливають на енергетичні показники, тому вони повинні оброблюватися з максимальною швидкістю.

Переміщення електрода здійснюється гідроприводом. Структурна схема одноконтурної системи керування током. Приведена на рисунку 2.4.

На вхід АЦП мікро контролера поступає різниця сигналів завдання  $U_{\text{зад.т}}$  та зворотного зв'язку  $U_z$  з датчика зворотного зв'язку по струму з коефіцієнтом  $K_z$ . Мікроконтролер розраховує неузгодженість.

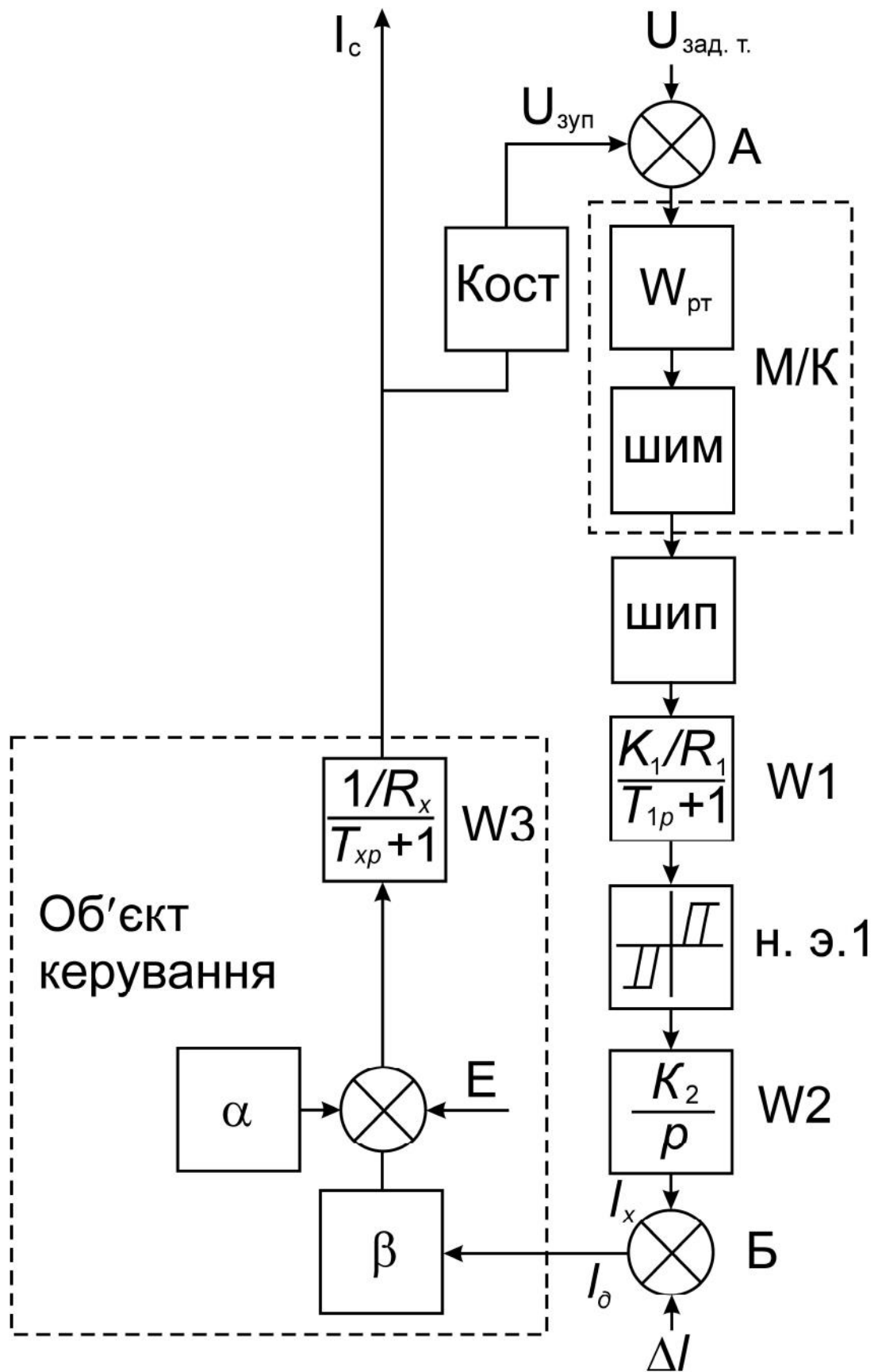


Рисунок 2.5 – Структурна схема одноконтурної САК

Програмним чином реалізуються регулятор струму та широко-імпульсний модулятор. Імпульсний ШІМ-сигнал з мікро контролера поступає на широтно-імпульсний перетворювач, навантаженням якого є обмотка електромагніту клапанного регулятора  $W_1(p)$ , що має нелінійну характеристику н.є.1. На виході клапанного регулятора під дією керуючого сигналу змінюється витрата рідини, що поступає у гідро циліндр. Він приводить до переміщення шток, на якому закріплений електрод.

Еквівалентний електричний ланцюг силового струму наведено на рисунку 2.5.

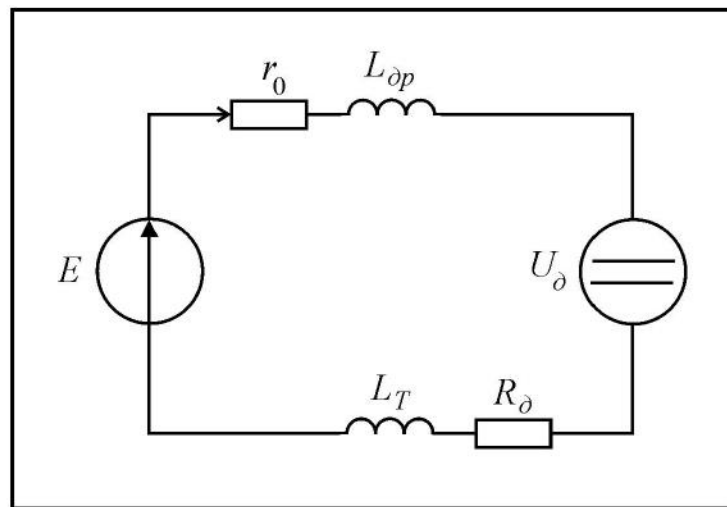


Рисунок 2.6 – Еквівалентний електричний ланцюг силового струму

Тут:  $E$  – випрямлена ЕДС вторинної обмотки трансформатора;

$L_T, L_{dp}$  – індуктивність трансформатора та дроселя;

$r_0$  – сумарний опір ланцюгів, що підводять струм;

$R_\delta$  – опір дуги;

$U_\delta = \alpha + \beta \cdot I_\delta$  – спад напруги на дузі. (2.6)

За еквівалентним електричним ланцюгом можна скласти рівняння

$$U_\delta = E - I_{кул}(r_0 + R_\delta). \quad (2.7)$$

Порівнюючи рівняння (2.6) та (2.7) отримаємо вираз, що зв'язує  $I_{cил}$  та  $l_\delta$ :

$$I_{cил}(p) = \frac{E - \alpha - \beta \cdot l_\delta}{r_0 + R_\delta + L_x p}.$$

На структурній схемі (рисунок 2.4) ця залежність відбивається ділянкою від  $l_x$  до  $l_{cил}$ . Наведена схема є нелінійною. Її параметри ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $R_\delta$ ) суттєво залежать від режиму роботи та містить випадкову складову ( $\Delta l$ ,  $R_\delta$ ). Випадкова складова визначається різними факторами, зокрема тими, що викликає зміну довжини дуги, тобто з'являється у вигляді впливу  $\Delta l$ .

Керування електрогідравлічним приводом здійснюється від широтно-імпульсного перетворювача (ШІП). Це дає можливість отримати високу швидкодію та якість регулювання. Для оцінки впливу дискретності роботи керуючого мікроконтролера та ШІП на роботу електрогідравлічного приводу порівняємо сталу часу приводу  $T_M$  зі сталою часу ШІМ ( $T_{II}$ ) та  $T_{II}$  з дискретністю роботи мікроконтролера ( $T$ ).

Дискретність роботи мікроконтролера (час циклу обчислювань) залежить від числа тактів виконання команди ( $N$ ) та від частоти мікроконтролера ( $f$ ). Стосовно використаному в схемі керування мікроконтролеру АТ9054433-8РІ та програмі керування (додаток П1), маємо  $N = 134$ ,  $f = 8$  МГц, тоді дискретність роботи мікроконтролера складе  $T = N/f = 16,8 \cdot 10^{-6}$  с.

Частота комутації ШІМ складає 125 Гц, тому  $T_{II} = 1/2\pi f \approx 0,0013$ .

Рівняння балансу сил для гідроприводу має вигляд  $F - F_c = m \, dv/dt$ , де  $F$  та  $F_c$  – сила гідроприводу та сила опору;  $m$  – маса рухомих частин приводу переміщення електрода.

В цьому випадку механічна стала часу  $T_M$  визначається виразом  $T_M = m/c$ , де  $c$  – жорсткість механічної характеристики гідроприводу.

Для системи, що розглядається,  $T_M = 0,02$  с. Як бачимо, що

$$T_M \gg T_{II} \gg T$$

Тому мікроконтролер можна вважати безперервною ланкою з внесеним запізненням  $e^{-Tp}$ . В першому наближенні запізнення за часом може бути еквівалентно замінено на аперіодичну ланку першого порядку:

$$W_{МК}(p) = \frac{1}{\frac{T}{2}p+1} = \frac{1}{\tau_1 p+1}.$$

Аналогічно можна представити широтно-імпульсний перетворювач:

$$W_{ШИМ}(p) = \frac{K_{ШИМ}}{\frac{T_{II}}{2}p+1} = \frac{K_{ШИМ}}{0,001p+1} = \frac{K_{ШИМ}}{\tau_2 p+1}.$$

Проведений аналіз показує, що мікроконтролер та ШІП в системі, що розглядається, можна вважати безперервними ланками з малими сталими часу. Використання розробленої програми керування гідروприводом дозволяє скасувати неоднозначність на робочій ділянці характеристики, що підтверджується проведеними випробуваннями.

## СИНТЕЗ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ РОД

### 3.1. Оператор як елемент системи автоматичного керування

Складні системи автоматики являють собою сукупність технічних пристроїв і людей. Цю сукупність прийнято називати системою «людина-машина». Досить розповсюдженим є випадок, коли взаємодія з машиною здійснюється однією людиною, якого звичайно називають оператором.

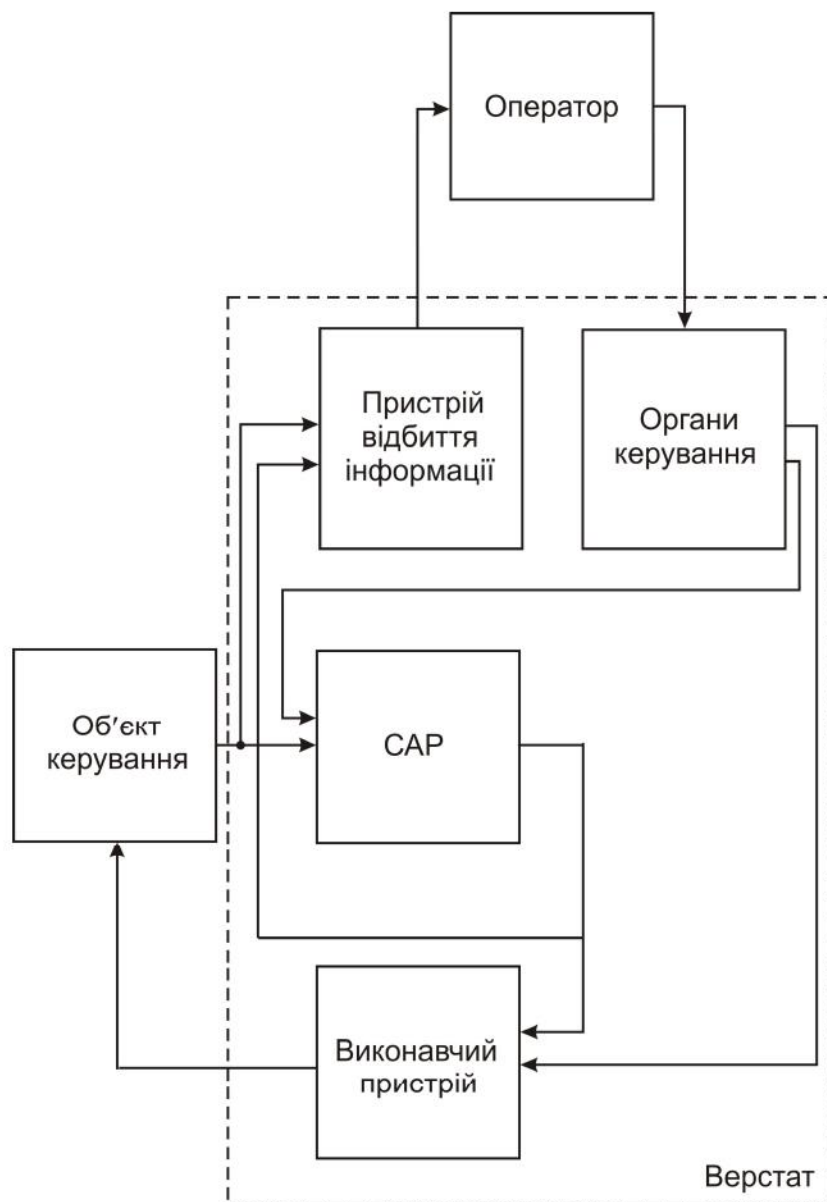
В нашому випадку структура системи керування має підсистеми автоматичного регулювання САР (рисунок 3.1). Де, основними функціями оператора є контроль за роботою САР, попередження й профілактика аварій, виявлення виникаючих несправностей і т.п. При нормальній роботі САР оператор обмежується спостереженням за станом керованих об'єктів. Коли ж САР не справляється із завданням, оператор змушений активно втручатися в процес керування. Основним завданням оператора стає контроль за роботою системи автоматичного керування. При виході із ладу оператор бере на себе й функції керування. Функції інтегральної ланки системи керування процесом обробки лягає на оператора, а це означає, що відносна роль людини в системах керування зростає.

Оскільки оператор працює в замкнутому контурі системи керування, будучи інтегральною ланкою системи, вона може розглядатися як керуючий «верстат». Зі збільшенням інтенсивності порушення зростають також швидкість і прискорення відповідного руху, тобто скорочується час моторного компонента.

На відміну від верстатних ланок, оператор здатний коректувати дії по швидкості зміни сигналу, дозувати дії пропорційно значенням сигналів або здійснювати деякі нелінійні перетворення.

Оператор здатний сприймати й урахувати інформацію з випадковим подіям, поєднувати в єдине ціле інформацію. Однак він повільно

розраховує, погано працює в режимі очікування, не пристосований до монотонної роботи, втрачає професійну пильність.



**Рисунок 3.1 – Структура системи «оператор-верстат»**

Сприймаючи інформацію про стан технічної частини системи, оператор здійснює обробку цієї інформації й вплив на органи керування верстата. Оператор може впливати на верстат двома способами: або він є основним джерелом енергії, необхідної для процесу керування «оператор-інструмент», або він не є джерелом енергії для виконання процесу, а тільки визначає час введення в дію того або іншого пристрою (регулятора) системи «оператор-верстат».

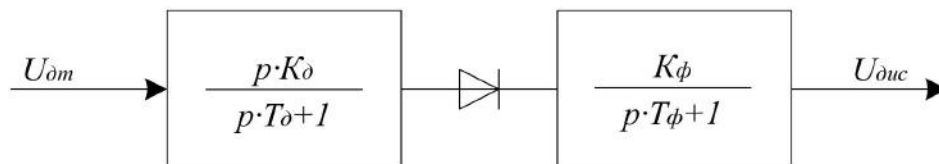
### 3.2. Синтез структури адаптивного регулятора, алгоритм роботи, конструкція

Дисперсія випадкового сигналу визначається за формулою:

$$D[X] = M[X^2] - (M[X])^2, \quad (3.1)$$

де  $M[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x dF_x(x); x \in \mathfrak{R}$  – математичне очікування.

Вхідним сигналом, необхідним для керування адаптивним регулятором подачі електрода при обробці твердого сплаву, є рівень дисперсії, який можливо оцінити, застосовуючи наступну структуру.



$U_{oc}$  – напруга датчика;  $K_d$  – коефіцієнт передачі реальної ланки, що диференціює;  $T_d$  – постійна часу реальної ланки, що диференціює;  $K_\phi$  – коефіцієнт передачі фільтра;  $T_\phi$  – постійна часу фільтра.

Рисунок 3.2 – Схема знаходження дисперсії

Відповідно до формули дисперсії необхідно виключити постійну складову у вхідному сигналі, що виконується з допомогою реальної ланки диференціювання з параметрами  $K_d$ ,  $T_d$ . На наступному етапі отриманий змінний сигнал випрямляється й згладжується фільтром з параметрами  $K_\phi$ ,  $T_\phi$ .

Для реалізації способу розмірної обробки твердого сплаву електричною дугою застосовується автоматична система регулювання (АСР) між

електродного проміжку. Функціональна схема АСР представлена на (рис 3.3)

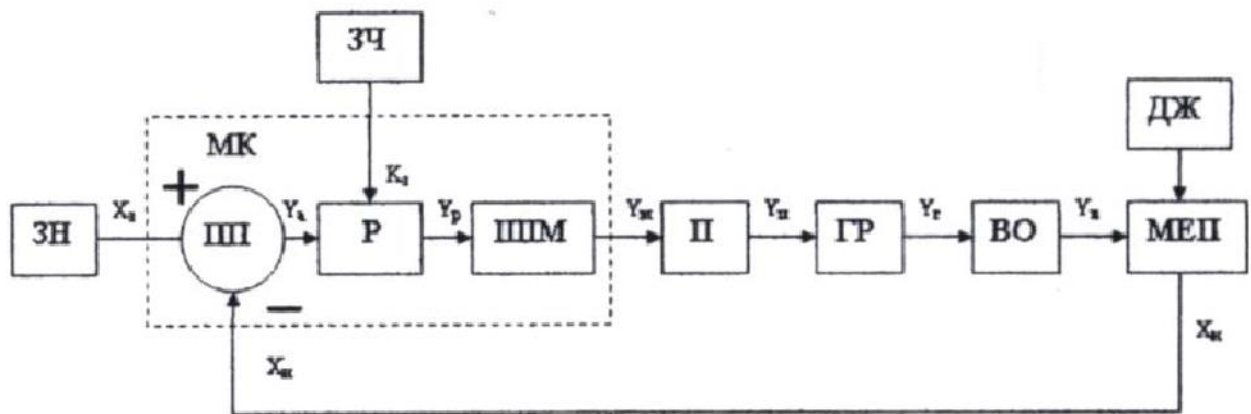


Рисунок 3.3 – Функціональна схема автоматичної системи регулювання

Дана схема являє собою одно контурну АСР компенсаційного типу, в якій джерело живлення з крутопадаючою вольтамперною характеристикою підключено до між електродного проміжку. Напруга на міжелектродному проміжку при горінні дуги залежить від його величини, що дозволяє за рахунок зміни величини між електродного проміжку регулювати величину напруги, яка є для даної САР параметром  $X_n$ , що регулюється. Текуче значення параметра  $X_n$  подається на пристрій порівняння ПП, куди також надходить сигнал  $X_z$  із задавальника напруги ЗН. Вихідний сигнал  $Y_a$ , що являє собою різницю  $(X_z - X_n)$ , надходить на регулятор Р, де підлягає обробці за спеціальним алгоритмом з метою забезпечення підтримки напруги на між електродному проміжку на заданому рівні. Чутливість  $K_z$  регулятора можна змінювати в певних межах за допомогою за датчика чутливості ЗЧ. Пристрій порівняння ПП та регулятор Р реалізовані програмою на основі мікроконтролера МК AT9054433-8PI, побудованим на розширеній AVR RISC архітектурі. Вихідний сигнал  $Y_p$  регулятор Р надходить на широтно-імпульсний модулятор ШІМ. Сформований таким чином сигнал  $Y_m$  підсилюється за потужністю підсилювачем П. Гідророзподільник ГР перетворює отримані електричні імпульси  $Y_n$  у відповідну витрату рідини гідросистеми, яка в свою чергу, впливає через виконавчий орган ВО на між електродний проміжок, де забезпечує певний рівень регулювання.



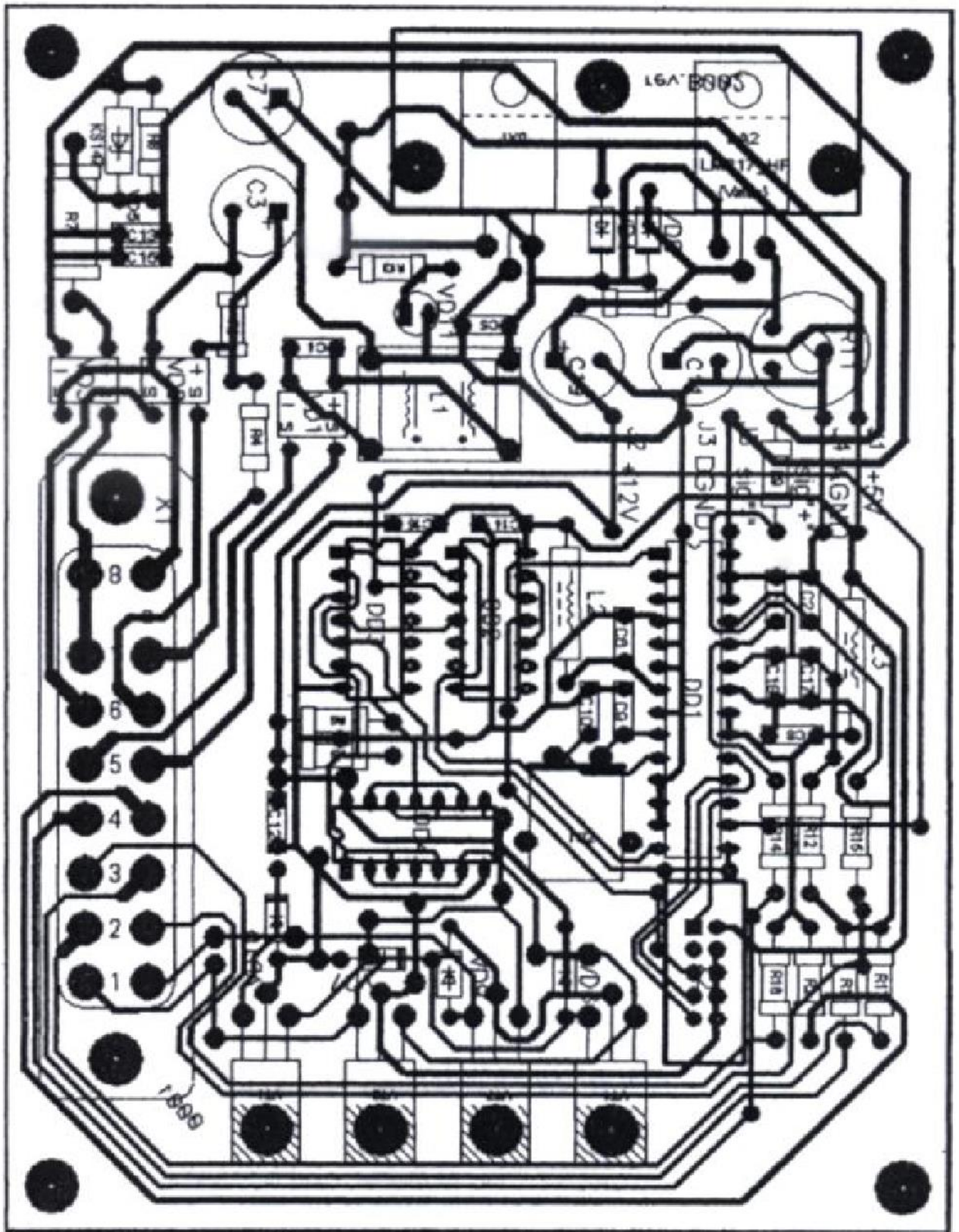


Рисунок 3.5 – Монтажна схема плати адаптивного регулятора системи автоматичної подачі електрода

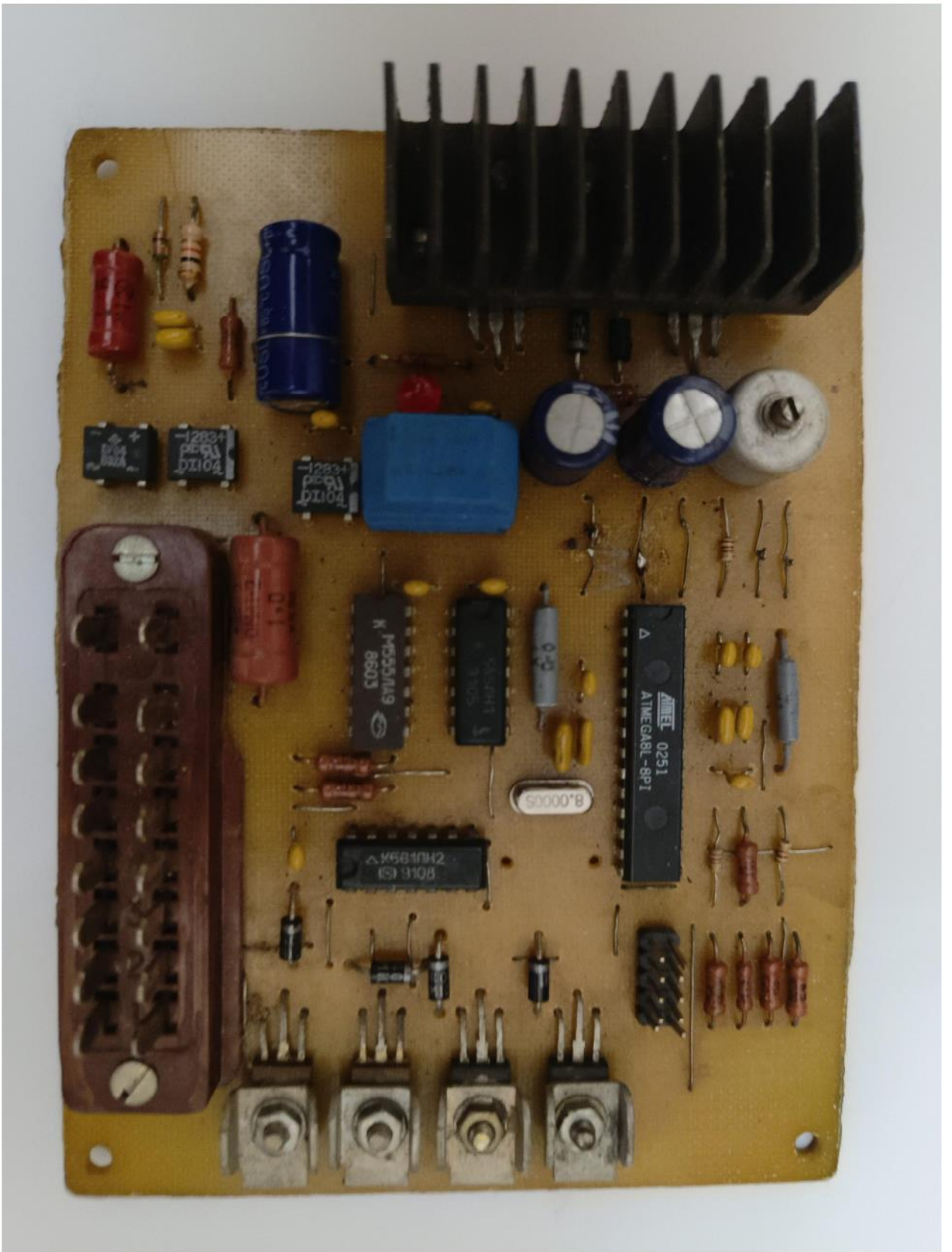


Рисунок 3.6 – Мікроконтролерний блок системи автоматичного керування подачею електрода при розмірній обробці твердого сплаву

Контролер забезпечує адаптацію, тому використовуються порти. З портів сигнали надходять на ЦАП1 і ЦАП2. На вхід (29) мікроконтролера надходить сигнал між електродного проміжку горіння електричної дуги, на вхід (23) надходить сигнал завдання напруги горіння електричної дуги.

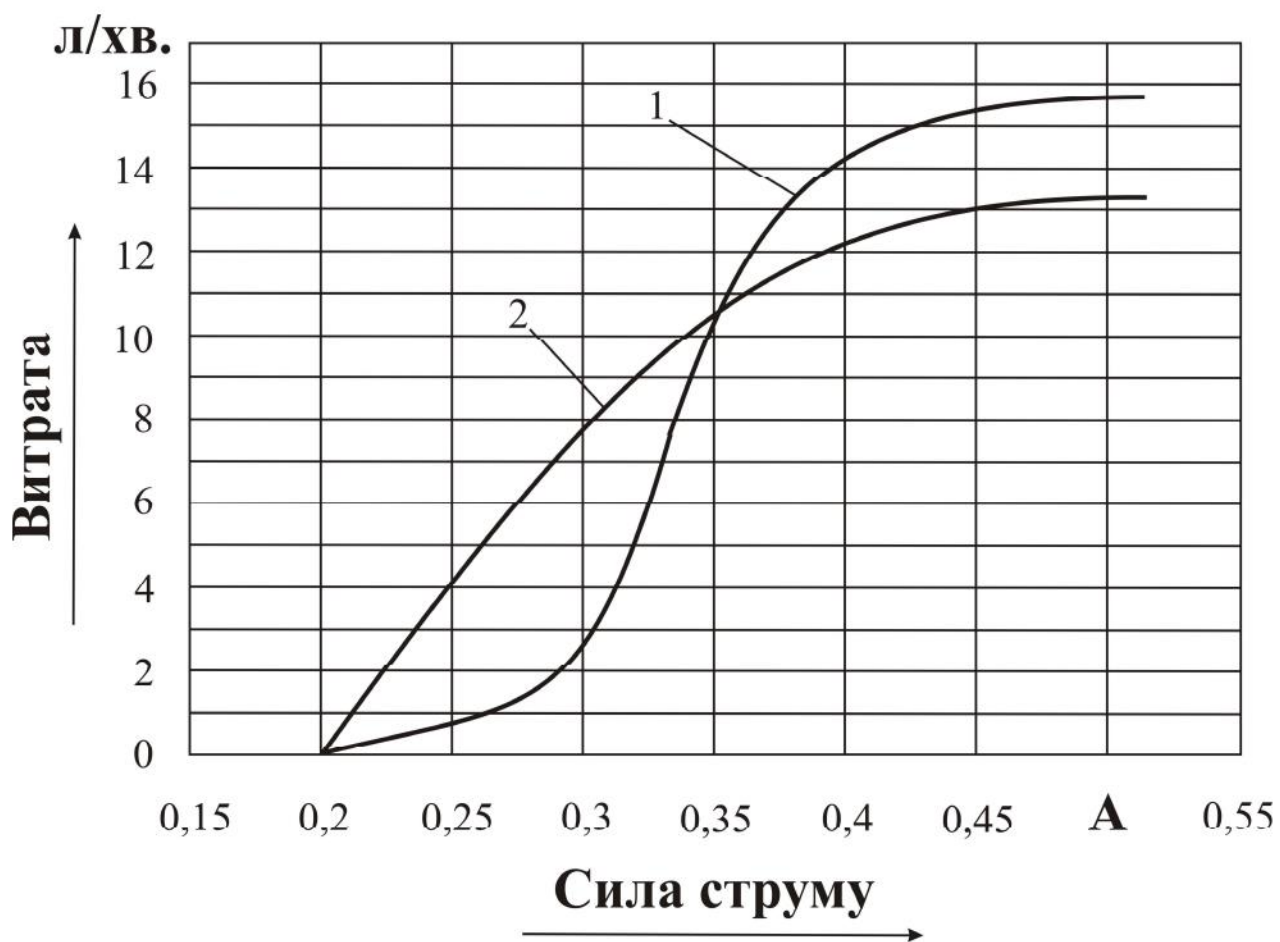
Розроблена програма оптимізації призначена для обчислення сигналу оптимізації в контурі пошуку екстремума (мінімуму) дисперсії. Вона містить наступні модулі:

- обчислювача поточного значення дисперсії (МОТД);
- керування пошуком екстремума (МКП);
- настроювання керованого параметра (МНП);
- зміна керованого параметра (МЗП).

МОТД визначає поточне значення дисперсії. Сигнал надходить на АЦП. У процесі обчислення визначається його похідна з наступним усередненням за інтервал часу обчислення. Отримане значення запам'ятовується, і цикл обчислення повторюється. У МКП рівняються значення сигналів двох тактів роботи МВТД. Якщо нове значення дисперсії вище попереднього, то формується сигнал «1», якщо нижче, то «0». МНП змінює керований параметр у бік збільшення або зменшення залежно від сигналів вступників з МКП. Настроювання одного параметра проходить в межах десяти тактів. Після цього МЗП змінює що набудовує параметр на інший, і наступні десять тактів відбувається його настроювання. За тим МЗП повертає схему до настроювання попереднього параметра й так далі.

#### 4.1 Визначення залежності витрати рідини від сили струму керування

Виконуємо вимірювання витрати рідини у гідроциліндрі і будемо залежність.



- 1 - за даними заводу-виробника;
- 2 - за даними експериментальних випробувань

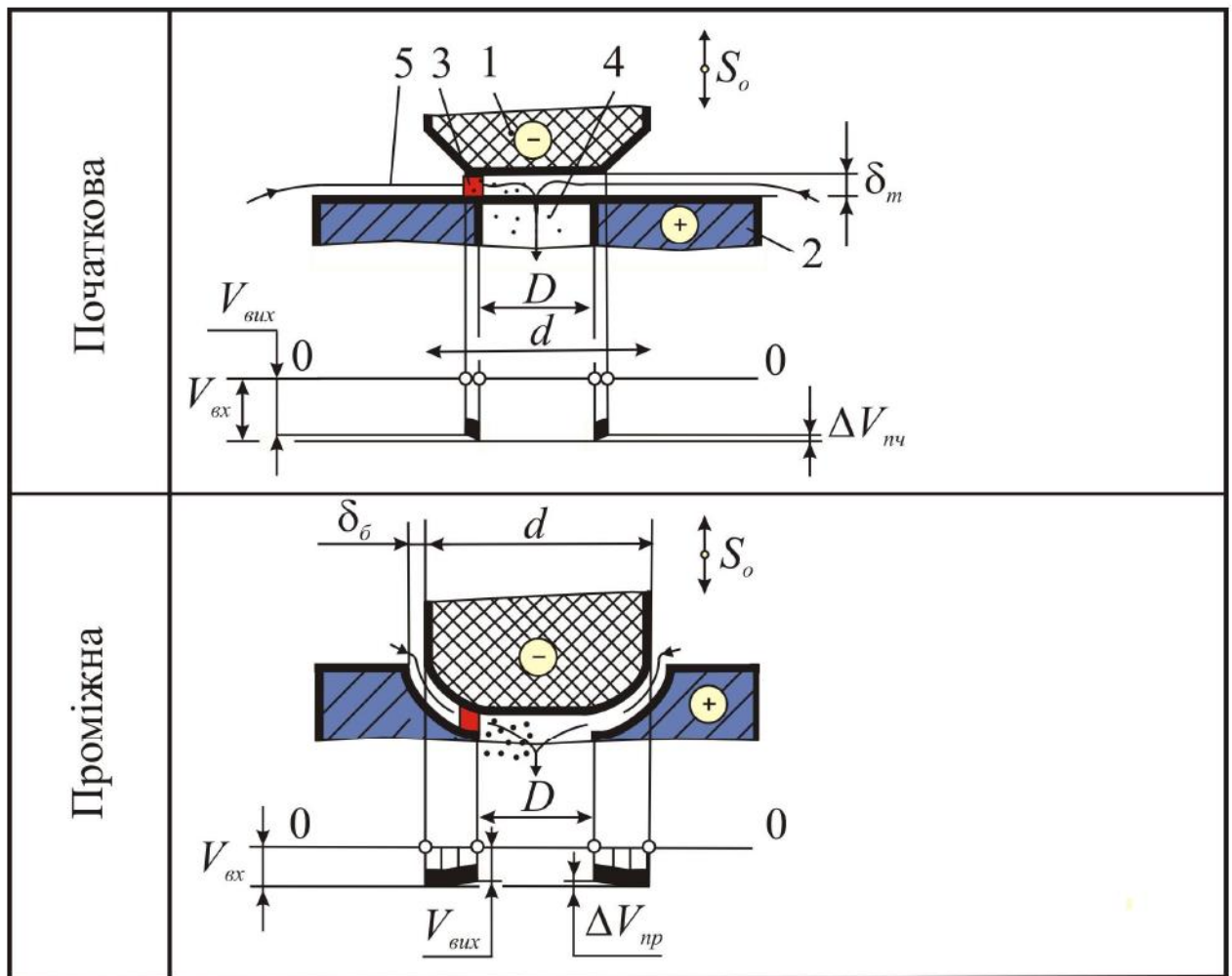
Рисунок 4.1 – Залежність витрати рідини від сили струму керування гідророзподільника

## 4.2 Випробування САК подачі електрода

### 4.2.1 Технологічна схема формоутворення

Для дослідження технологічних характеристик процесу РОД напрямачів потоку використовували технологічну схему формоутворення за принципом прошивання з об'ємним копіюванням форми електрода – інструмента, що має поступальних рух, з прокачуванням робочої рідини в торцевому зазорі за напрямком від периферії до центру отвору заготовки.

Таблиця 4.1 – Технологічна схема формоутворення та епюри швидкостей потоку в торцевому МЕЗ



Примітка: 1 – графітовий ЕІ; 2 – заготовка; 3 – електрична дуга; 4 – продукти ерозії; 5 – гідродинамічний потік

### Основні дані верстата «Дуга – 8Г»

Розміри стола (довжина x ширина), мм	400 x 300
Найбільша маса ЕІ, кг	35
Найбільша маса заготовки, кг	100
Найбільший розмір оброблювальної порожнини в плані, мм	150
Найбільша відстань від торцевої поверхні електродотримача до робочої поверхні стола, мм	325
Робочій хід шпинделя, мм	200
Установче переміщення інструментальної головки, мм	300
Робоча рідина, %	
- Масло «Індустріальне І-20А» ГОСТ 20790-75	70
- Гас освітлювальний ГОСТ 4953-68	30
Об'єм робочої рідини , що заливається в бак, л	800
Привод слідкуючої подачі шпинделя	електрогідравлічний
Межі регулювання струму, А	50 – 1000
Межі регулювання напруги, В	24 – 45
Найбільша продуктивність при використанні вуглеграфітового електрода - інструмента, $\text{мм}^3/\text{хв}$ :	
- по сталі 45	22000
- по титановому сплаву ВТЗ-1	30000
Найменша шорсткість поверхні після РОД по ГОСТ 2789-73, Ra, мкм	3,2
Габарит верстата (довжина x ширина x висота), мм	1000 x 1000 x 2740
Маса верстата, кг	2100

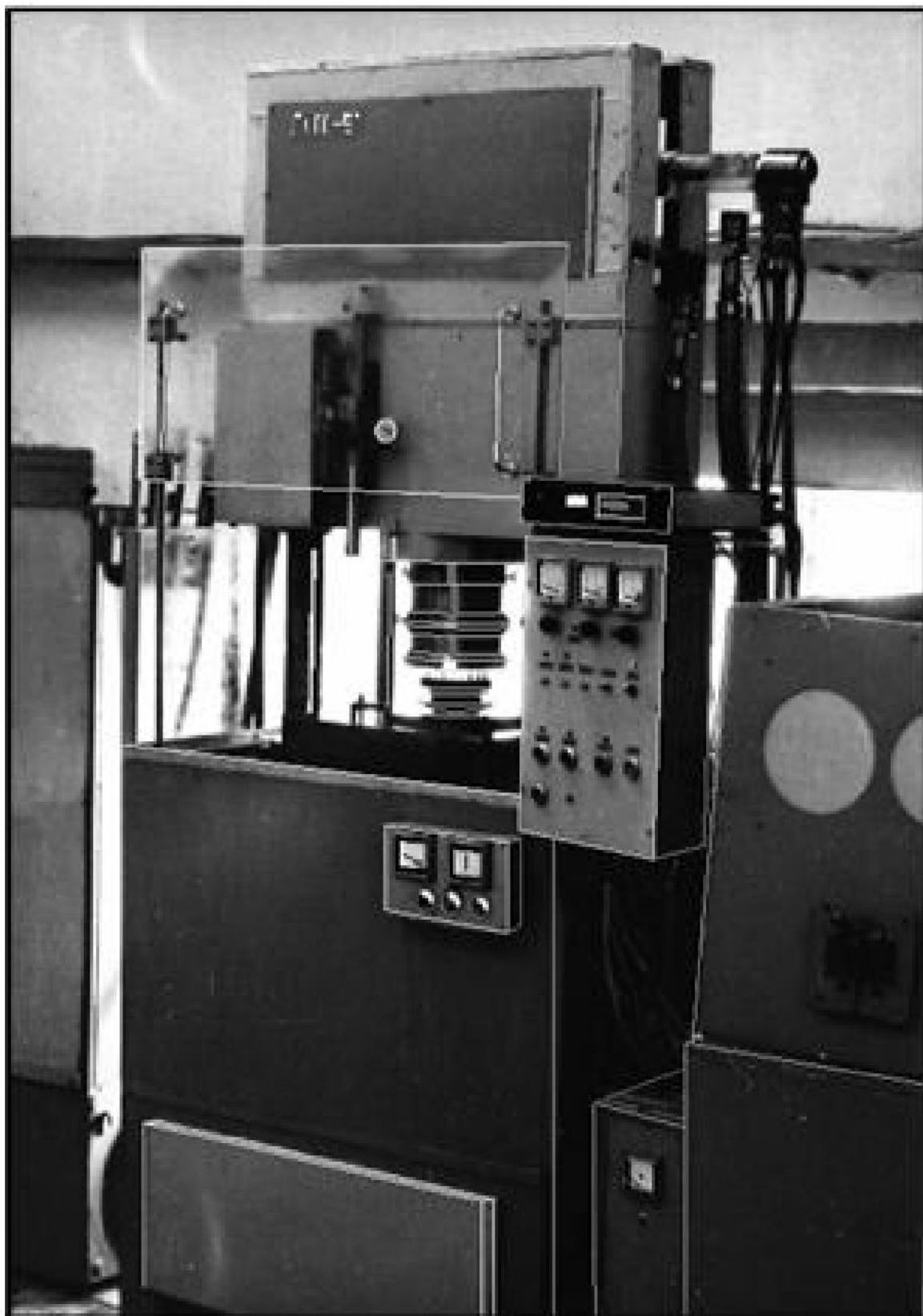


Рисунок 4.2 – Экспериментальный электро - ерозийный копирувально-прошивний верстат моделі «Дуга -8Г»

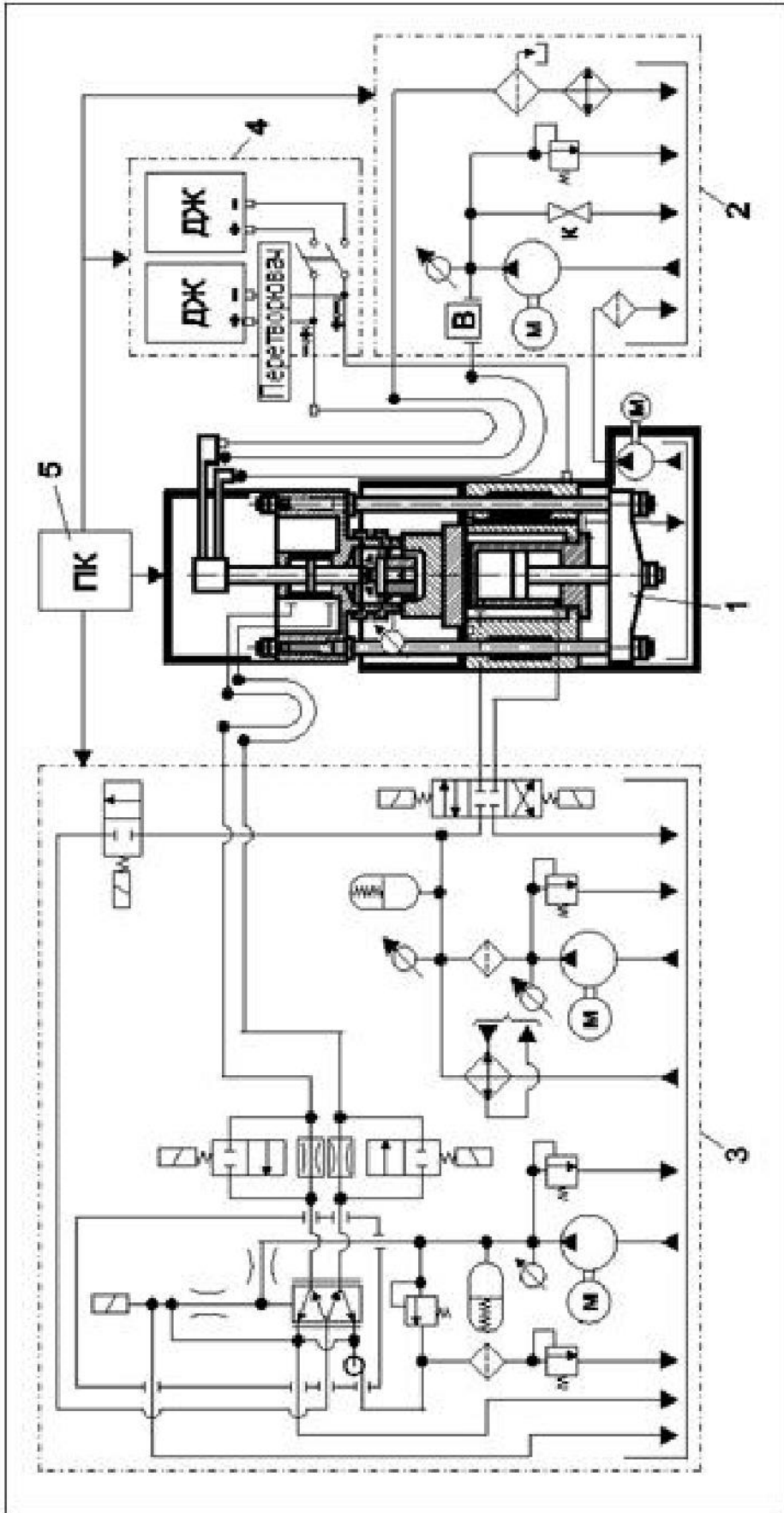


Рисунок 4.3 – Електрогідродинамічна схема експериментального копіювального прошивного верстата моделі «Дуга – 8Г»

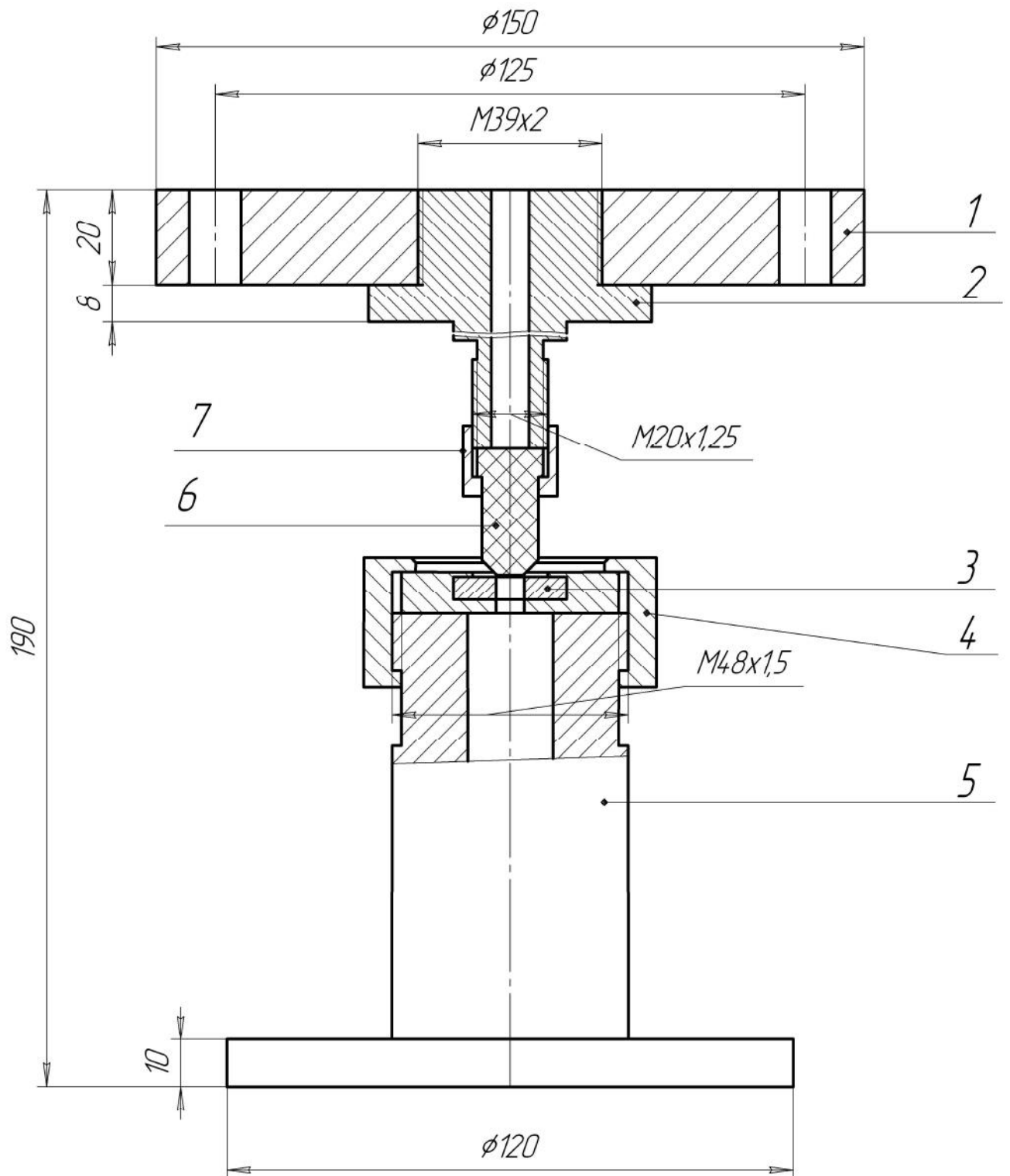
#### 4.2.2 Експериментальний пристрій

Для дослідження технологічних характеристик процесу РОД для обробки електричною дугою твердосплавних заготовок напрямачів потоку застосовано пристрій (рисунку 2.4) до електроерозійного верстата «Дуга – 8Г»

Пристрій включає в себе наступні основні деталі:

- комплект електродів – інструментів 7 для формування отвору
- комплект електродів – заготовок 4;
- тримач 2 для кріплення електрода – заготовки;
- електродотримач 3 для кріплення рухомої частини пристрою до шпиндельної плити верстату ;
- плиту верхню 1 для приєднання рухомої частини пристрою до шпиндельної плити верстату;
- стійку нижню 6 для закріплення нерухомої частини пристрою відносно стола верстата.

Пристрій працює таким чином. Перед початком роботи один із електродів – інструментів 7 встановлюють у електродотримач 3 та закріплюють останній чотирма болтами М10 відносно плити 1, а електрод – заготовку 4 нерухомо закріплюють накидною гайкою 5 відносно стійки 6. Позиціонування електрода – заготовки відносно електрода – інструмента здійснюється за рахунок переміщення нижньої плити. Далі закривають герметизовану камеру, вмикають електродвигун насосу робочої рідини, зварювальної випрямляч і ведуть процес РОД для обробки електричною дугою твердосплавних зразків в електроді – заготовці, яка моделює твердосплавну заготовку напрямача потоку, з використанням показаної на рис. 2.1 технологічної схеми формоутворення. При цьому електрична дуга горить у між електродному зазорі в потужному гідродинамічному потоці робочої рідини, який відповідальний за стиснення дуги та за вилучення продуктів ерозії з робочої зони пристрою та верстата.



1 – плита; 2 – електро-тримач; 3 – твердосплавний зразок;  
 4 – накидна гайка; 5 – стійка; 6 – графітовий електрод; 7 – гайка

Рисунок 4.4 – Експериментальний пристрій

#### 4.2.2 Матеріали, зразки та вимірювальний інструмент

В якості матеріалу електрода – інструмента 1 (рисунок 2.5) використовувався електроерозійний графіт МПГ – 7 (внутрішній шар) та свинець (зовнішній шар).

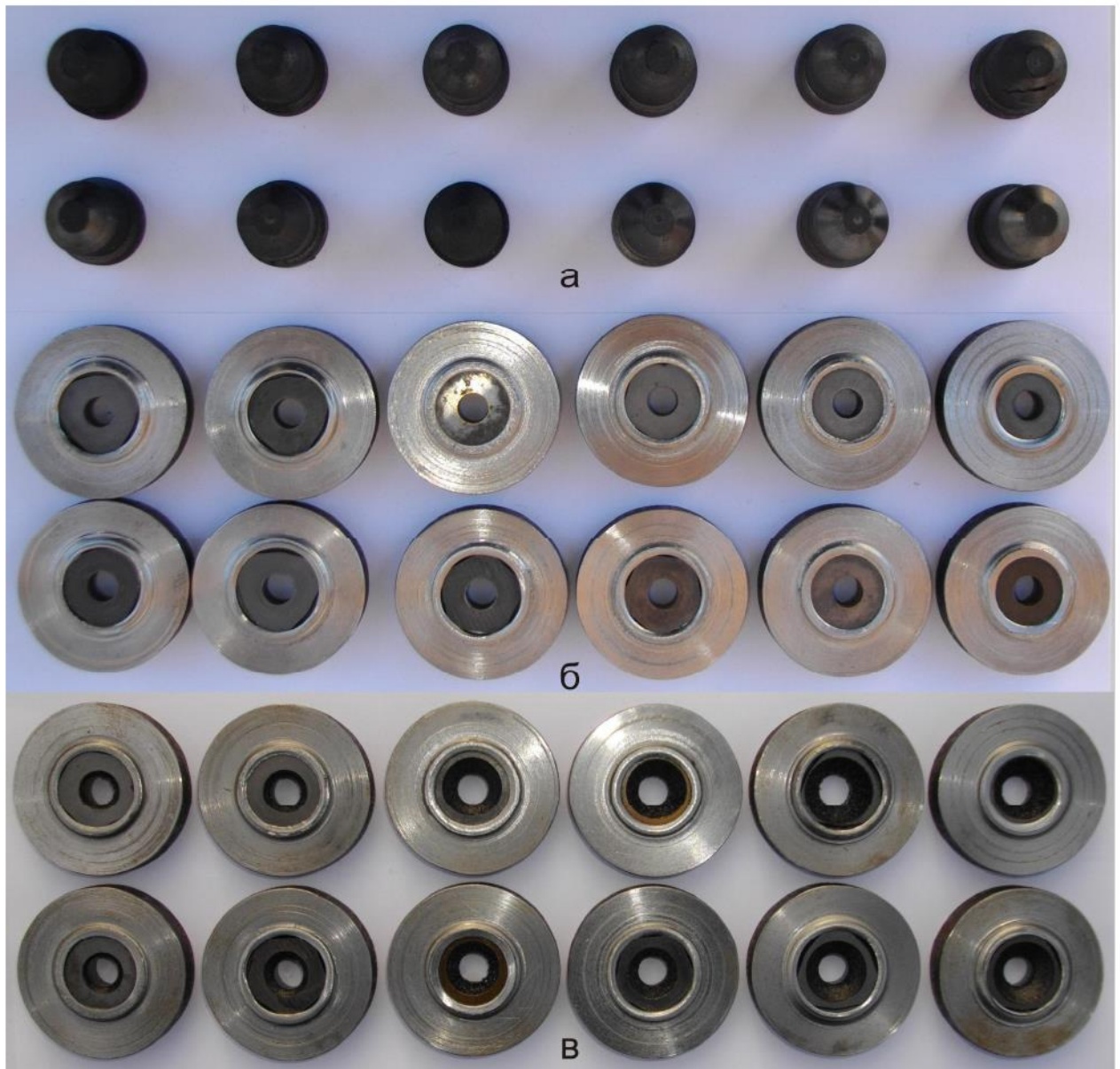
Зразки твердосплавні, електрод – інструмент (рисунок 2.5)

В якості контрольно – вимірювальних приборів та інструмента застосовувалися.

- для керування силою струму: амперметр типу М367;
- для контролю напруги: вольтметр типу М4200;
- для керування статичним тиском робочої рідини на вході в між електродний зазор: манометру типу М1 – 2 – 2;
- для вимірювання часу обробки: секундомір із ціною поділки 0,05с;
- для вимірювання геометричних параметрів електрода – інструмента та електрода заготовки: мікрометру типу МК ГОСТ 6407 – 78 із ціною поділки 0,01 мм; штангенциркуль типу ШЦ – 11 ГОСТ 166-80 із ціною поділки 0,05мм;
- для вимірювання лінійного переміщення шпинделя подачі електрода – інструмента: індикатор годинникового типу ИЧ – 25;
- для вимірювання шорсткості поверхні після РОД: еталони електроерозійної шорсткості.

Крім того, в роботі здійснювалося:

- осцилографування електротехнологічних характеристик процесу (сили струму, напруги на дузі, статичного тиску робочої рідини на вході потоку в торцевий МЕЗ) з використанням плати АЦП m-DAQ14 із частотою перетворення 100 кГц, яка під'єднується до ПК через USB-інтерфейс (USB 2,0 High Speed).



а – електрод - інструмент; б – заготовка до обробки РОД ; в – заготовка після обробки РОД

Рисунок 4.5 – Дослідні матеріали

Під час виконання обробки на різних режимах технологічного струму і різних тисках робочої рідини, яка прокачується через електрод, виконуємо осцилографування процесу обробки.

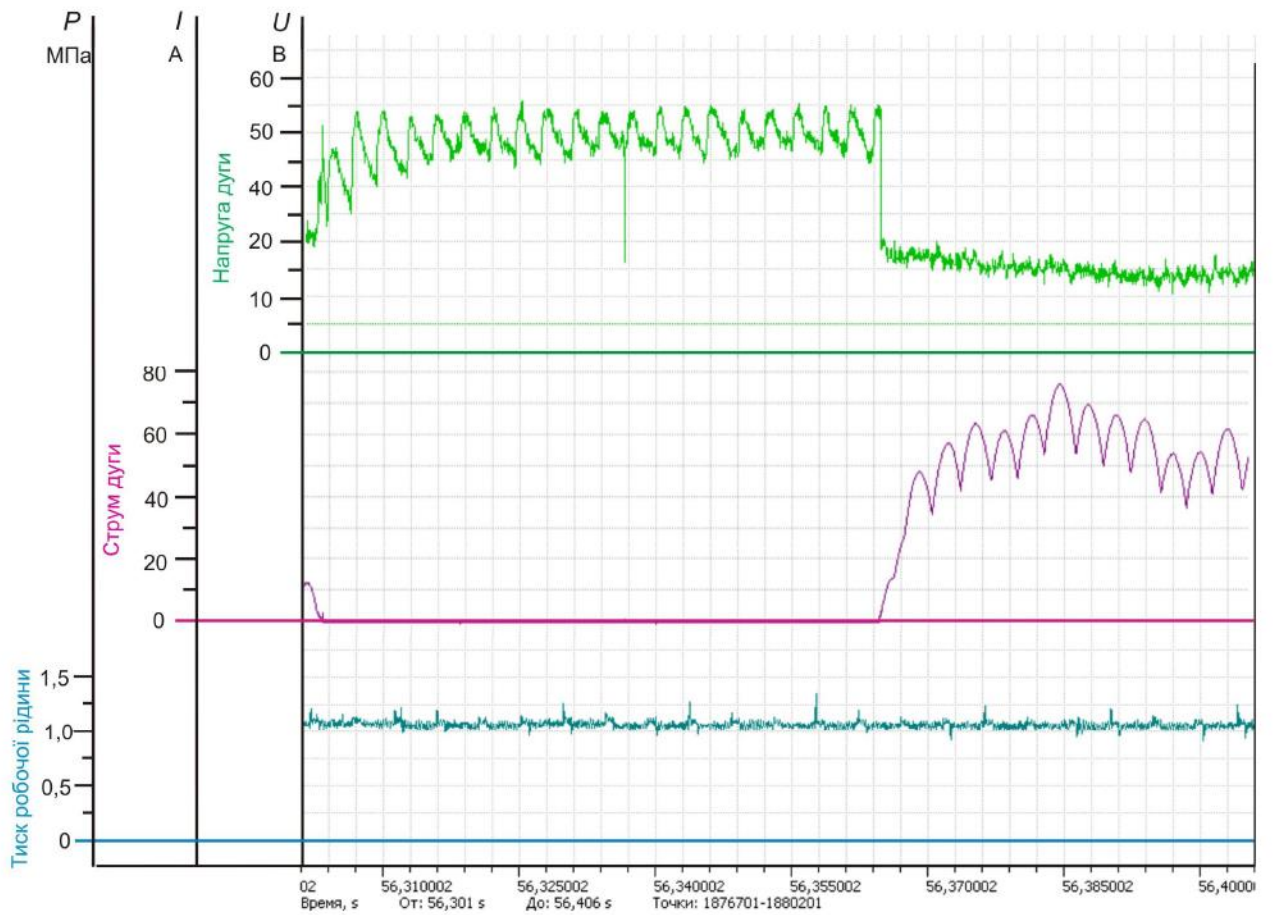


Рисунок 4.5 – Осцилограма початку процесу РОД обробки електричною дугою тврдосплавних заготовок

## ВИСНОВКИ

1. Виконано порівняльний аналіз різних адаптивних систем, визначені їх переваги і недоліки.
2. Розроблено, виготовлено та випробувано блок САК з можливістю регулювання параметрів подачі за допомогою зворотних зв'язків у складі гідроприводу верстата та джерела живлення електричної дуги, який забезпечує стабільність кроку подачі електрода, має малу інерційність, малі масо-габаритні характеристики, управління дроселюючим гідророзподільником за миттєвими параметрами дуги. Це дозволило стабільно тримати робочу напругу горіння дуги в межах  $U_d = 10 \dots 15$  В.
3. Удосконалено систему автоматичного керування для експериментального електроерозійного верстата Дуга-8Г. Це дозволяє: на 15 – 20 % підвищити ефективність процесу обробки з застосуванням електричної дуги, що скоротило кількість коротких замикань і гасіння дуг, також підвищило стабільність струму обробки на 30 – 40 %.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою: Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.03.07 / НТУУ «КПІ». – Київ, 1999. – 36 с.
2. Боков В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою / В. М. Боков. – Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2002. – 300 с.
3. Meritt, H. E. Hydraulic control systems / H. E. Meritt. – New York, London, Sydney : John Willey & Sons Inc., 1991.
4. Теорія систем керування: підручник / В.І. Корнієнко, О.Ю. Гусєв, О.В. Герасіна, В.П. Щокін; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро: НГУ, 2017. – 497 с.
5. Стеклов В.К. Проектування систем автоматичного керування.- К.:Вища школа,1995.-231 с.
6. Баранов В.Н. “Застосування мікроконтролерів AVR: схеми алгоритми програми” - видавничий дім «Додека-XXI», 2004.
7. Гребньов В.В. Мікроконтролери сімейства AVR фірми Atmel. - М. В«ІП РадіоСофтВ» 2002 р.
8. Elliot Williams Make: AVR Programming / Williams E. - Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 2014, - 41p.
9. Muhammad Ali Mazidi AVR Microcontroller and Embedded Systems: Using Assembly and C (Pearson Custom Electronics Technology) / Muhammad Ali Mazidi, Sarmad Naimi, Sepehr Naimi., - Prentice Hall 2010, - 792p.
10. Шелестов І.П. “Радіолюбителям: корисні схеми”. Книга 6. - М.: видавництво «Слон-Р», 2005р.
11. Стеклов В.К. Проектування систем автоматичного керування.- К.:Вища школа,1995.-231 с.
12. Автоматизація виробничих процесів: навч. посіб. / Б. М. Гончаренко, С. І. Осадчий, Л. Г. Віхрова [та ін.]. - Кіровоград: Лисенко В.Ф., 2016. - 352 с.

13. А.П. Ладанюк Теорія автоматичного керування технологічних об'єктів: Навч. посіб. / А.П. Ладанюк, К.С. Архангельська, Л.О. Власенко – К.: НУХТ, 2014. – 274 с.

14. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. 3-є вид., перероб і доп. Львів : УАД, 2006. 336 с.

15. Босов Є. П., Жесан Р. В., Каліч В. М., Голик О. П., Зубенко В. О. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва : навч. посіб. 2-е вид., перероб. і доп. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 208 с.

16. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с.

17. Конституція України. Київ : Вид-во Паливода А. В., 2019. 76 с.

18. Про охорону праці : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2694-12#Text> (дата звернення: 01.11.2024) Основи законодавства України про охорону здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2801-12#Text> (дата звернення 03.11.2024).

20. Про систему громадського здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20#n840> (дата звернення 03.11.2024) Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80> (дата звернення 28.10.2024).

22. Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1105-14> (дата звернення 10.11.2024).

23. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/5403-17#Text> (дата звернення: 29.10.2024). Кодекс законів про працю України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/322-08#Text> (дата звернення: 09.11.2024)

Джеджула В. В. Вентиляція та кондиціювання громадських об'єктів : навчальний посібник / В. В. Джеджула – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 71 с.

# ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А

### ОХОРОНА ПРАЦІ

#### **А.1 Законодавчі та нормативні акти з питань охорони праці в Україні**

В умовах науково-технічного прогресу в усіх галузях промислового комплексу, широкого впровадження нових технічних засобів автоматизації виробничих процесів, а також нових форм організації й оплати праці, особливого значення набуває питання охорони праці.

Охорона праці (ОП) – система законодавчих актів, соціально-економічних, організаційних, технічних, гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці [14, 15].

Поліпшення умов праці є одним з резервів зростання її продуктивності й економічної ефективності виробництва, а також подальшого розвитку самої людини.

Охорона життя та здоров'я громадян в процесі їх трудової діяльності, створення безпечних та нешкідливих умов праці – одне з найважливіших державних завдань.

Правовою основою законодавства України щодо ОП є Конституція України; Закони України: «Про охорону праці», «Основи законодавства України про охорону здоров'я», «Про систему громадського здоров'я», «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування»; Кодекс цивільного захисту України (КЦЗ); Кодекс законів про працю України (КЗпП) [14, 15, 16].

Спеціальними юридичними актами в сфері ОП є [14, 16]: нормативно-правові акти з питань ОП (НПАОП); Державні стандарти України (ДСТУ); різноманітні Санітарні норми; Нормативні акти з ОП, що діють в межах об'єкта господарювання (підприємства) та інші нормативні документи, якими встановлюються загальнообов'язкові правила (норми) [14, 15].

В ст. 43 Конституції України записано: «Кожен має право на працю, що включає можливість заробляти собі на життя працею, яку він вільно обирає», «Кожен має право на належні, безпечні і здорові умови праці, на заробітну плату, не нижчу від визначеної законом» [14, 17].

Кожен, хто працює, має право на відпочинок (ст. 45 Конституції України) [17]. Це право забезпечується наданням днів щотижневого відпочинку, оплачуваної щорічної відпустки, встановленням і скороченого робочого дня щодо окремих професій і виробництв.

У тексті ст. 46 Конституції України вказано на те, що громадяни мають право на соціальний захист, що включає право на забезпечення їх у разі повної, часткової або тимчасової втрати працездатності, втрати годувальника, безробіття з незалежних від них обставин, а також у старості [17].

Верховна Рада України 14.10.1992 р. прийняла Закон України «Про охорону праці». Цей Закон визначає основні положення щодо реалізації конституційного права громадян про охорону їх життя і здоров'я в процесі трудової діяльності, регулює, за участю відповідних державних органів, відносини між власником підприємства, установи, організації, або уповноваженим ним органом, і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації ОП в Україні. Його дія поширюється на всі підприємства, установи і організації, незалежно від форм власності та видів їх діяльності, на усіх громадян, які працюють, а також залучені до праці на цих підприємствах [18].

Особливістю українського Закону, що регламентує правову основу ОП, є високий рівень прав та гарантій робітників. Вперше в історії держави робітникам було надано право відмовлення від роботи, у випадку існування на виробництві загрози для їхнього здоров'я та життя. Розширено права робітників у соціальних гарантіях відшкодування збитків у випадку пошкодження їх здоров'я на виробництві. Передбачається нова система фінансування ОП, формування системи страхування від нещасних випадків

та профзахворювань, посилюється централізація планування. Договірне регулювання з питань ОП поставлено на високий рівень, передбачається участь громадських інституцій у цьому процесі. Законом України «Про охорону праці» за державою закріплено функції нагляду та управління ОП [14, 15, 18].

В системі законодавства щодо охорони здоров'я та гігієни праці ключове місце займають закони України «Основи законодавства України про охорону здоров'я» [19] та «Про систему громадського здоров'я» [20]. Вони передбачають розробку та здійснення адміністрацією підприємств санітарних та протиепідемічних заходів; здійснення в необхідних випадках лабораторного контролю за дотриманням вимог санітарних норм стосовно рівнів шкідливих факторів виробничого середовища; формування органів та установ державної санепідеміологічної служби при надзвичайній події та ситуації, що становлять небезпеку для здоров'я населення; відшкодування, в установленому порядку, працівникам громадянам збитків, яких завдано їх здоров'ю в результаті порушення санітарного законодавства. Можна виділити наступні положення цих двох законів:

- кожна людина має невід'ємне і непорушне право на охорону здоров'я;
- суспільство і держава відповідальні перед сучасними і майбутніми поколіннями за рівень здоров'я і збереження генофонду народу України, поліпшення умов праці, розв'язання екологічних проблем, запровадження здорового способу життя;
- здоров'я – стан фізичного, душевного і соціального благополуччя, а не тільки відсутність хвороб і фізичних дефектів;
- заклади охорони здоров'я – підприємства, установи та організації, завдання яких є забезпечення різноманітних потреб населення в галузі охорони здоров'я шляхом подання медико-санітарної допомоги;
- медико-санітарна допомога – комплекс спеціальних заходів, спрямованих на сприяння поліпшення здоров'я, підвищення санітарної

культури, запобігання захворюванням та інвалідності.

Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» [21] був прийнятий для регламентації заходів з ліквідації наслідків Чорнобильської катастрофи і запобігання подібним ситуаціям в майбутньому. Він охоплює всі сфери використання радіоактивних матеріалів та технологій, чи, навіть, просто контактування з ними. Закон встановлює пріоритет безпеки людини та навколишнього природного середовища, права і обов'язки громадян у сфері використання ядерної енергії, регулює діяльність, пов'язану з використанням ядерних установок та джерел іонізуючого випромінювання, встановлює також правові основи міжнародних зобов'язань України щодо використання ядерної енергії.

Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування» [22] забезпечує право громадян на соціальний захист, яке проголошується Конституцією України, зокрема в разі повної, часткової або тимчасової втрати працездатності. Окрім того, він створює правове поле, фінансові й організаційні механізми для успішного розв'язання триєдиного завдання: запобігання нещасним випадкам і професійним захворюванням, відновлення здоров'я та працездатності потерпілих на виробництві, компенсації потерпілим матеріальних збитків, внаслідок ушкодження здоров'я.

Страхування від нещасного випадку є самостійним видом загальнообов'язкового державного соціального страхування, за допомогою якого здійснюється соціальний захист, охорона життя та здоров'я громадян у процесі їх трудової діяльності. Основними принципами соціального страхування від нещасного випадку є наступні [14, 15, 22]:

- обов'язковий порядок страхування працівників, а також учнів та студентів навчальних закладів;
- сплату страхових внесків тільки роботодавцями;
- своєчасне та повне відшкодування шкоди потерпілим;
- надання державних гарантій застрахованим у реалізації їх прав тощо.

Основним юридичним документом, що регламентує вимоги щодо пожежної безпеки є, на сьогодні, КЦЗ [23]. Він з'явився як результат злиття кількох розрізнених Законів України, що діяли раніше, і визначає загальні правові, економічні та соціальні основи забезпечення цивільного захисту на території України, регулює відносини державних органів, юридичних і фізичних осіб у цій галузі, незалежно від виду їх діяльності та форм власності. КЦЗ також регулює відносини, пов'язані із захистом населення, територій, навколишнього природного середовища та майна від надзвичайних ситуацій, реагуванням на них, функціонуванням єдиної державної системи цивільного захисту, та визначає повноваження органів державної влади, Ради міністрів Автономної Республіки Крим, органів місцевого самоврядування, права та обов'язки громадян України, іноземців та осіб без громадянства, підприємств, установ та організацій, незалежно від форми власності.

КЗпП України [24] регулює трудові відносини всіх працівників, сприяючи зростанню продуктивності праці, поліпшенню якості роботи, підвищенню ефективності суспільного виробництва і піднесенню на цій основі матеріального і культурного рівня життя трудящих, зміцненню трудової дисципліни і поступовому перетворенню праці на благо суспільства в першу життєву потребу кожної працездатної людини.

У КЗпП, зокрема, зазначені наступні положення [14, 15, 24]: забороняється залучати до надурочних робіт вагітних жінок і жінок, які мають дітей віком до трьох років (ст. 176), а також осіб молодших 18 років (ст. 192); забороняється застосовувати працю жінок на важких роботах і роботах із шкідливими або небезпечними умовами праці, а також на підземних роботах (ст. 174). В ст. 153 КЗпП зазначено про обов'язок роботодавця створювати безпечні та нешкідливі умови праці [14, 15, 24].

НПАОП до початку 2003 року носили назву Державні нормативні акти про охорону праці (ДНАОП), – це правила, норми, положення, стандарти, інструкції та інші документи, обов'язкові до виконання [14, 15].

Законодавством передбачено, що, залежно від сфери дії, НПАОП можуть бути міжгалузевими і галузевими.

Серед НПАОП досить важливе місце посідають ДСТУ [14, 15]. Вони почали розроблятися з 1992 р. і поступово вводяться в якості Національних стандартів у всіх сферах економіки, на заміну стандартам колишнього СРСР (Міждержавних стандартів ГОСТ).

Складовою частиною права в галузі гігієни праці є постанови та положення (норми) затверджені Міністерством охорони здоров'я України (наприклад, «Положення про медичний огляд працівників певних категорій», «Перелік важких робіт і робіт з шкідливими і небезпечними умовами праці, на яких забороняється застосування праці неповнолітніх»), Державні санітарні правила і норми (ДСанПіН) стосовно окремих факторів виробничого середовища, певних технологічних процесів і конкретних виробництв, Державні санітарні норми та правила (ДСНП), Державні санітарні норми (ДСН), Державні санітарні правила (ДСП) [14, 15].

Серед норм, затверджених МОЗ України можна виділити: Граничні норми підймання і переміщення важких речей жінками; Граничні норми підймання і переміщення важких речей неповнолітніми; Перелік важких робіт і робіт з шкідливими і небезпечними умовами праці, на яких забороняється застосування праці неповнолітніх; Положення про медичний огляд працівників певних категорій.

Виходячи із специфіки і особливих умов на своїх підприємствах, власники можуть розробляти, на основі діючих НПАОП, і впроваджувати нормативні акти з ОП, що діють в межах об'єкта господарювання (підприємства). Такі нормативні акти можуть відхилятися від НПАОП лише у бік покращення умов для працюючого [14]. Серед типових нормативних актів підприємства з ОП можна виділити [14, 15]: Положення про систему управління ОП на підприємстві; Положення про службу ОП підприємства; Положення про комісію з питань ОП підприємства; Загальнооб'єктові та цехові інструкції щодо заходів пожежної безпеки; Порядок атестації робочих

місць щодо їхньої відповідності нормативним актам з питань ОП; Інструкції з ОП для працюючих за професіями і видами робіт; Перелік робіт з підвищеною небезпекою; Наказ про організацію безкоштовної видачі працівникам певних категорій лікувально-профілактичного харчування; Наказ про порядок забезпечення працівників підприємства спецодягом, спецвзуттям та іншими засобами індивідуального захисту та ін.

Відповідно до ст. 49. Закону України «Про охорону праці» [18], за порушення законодавчих та інших нормативних актів з ОП, створення перешкод для діяльності посадових осіб органів державного нагляду за ОП і представників професійних спілок винні притягаються до дисциплінарної, адміністративної та кримінальної відповідальності, згідно із законодавством.

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

## **A.2 Шкідливі та небезпечні фактори виробництва**

В ДСТУ 2293-93 „Охорона праці. Терміни та визначення» та інших стандартах даються визначення основних понять та термінів в галузі охорони праці.

Шкідливий виробничий фактор — виробничий фактор, вплив якого може призвести до погіршення стану здоров'я, зниження працездатності працівника.

Небезпечний виробничий фактор — виробничий фактор, дія якого за певних умов може призвести до травм або іншого раптового погіршення здоров'я працівника.

Відповідно до ГОСТ 12.0.003-74, небезпечні та шкідливі фактори за природою дії поділяються на такі групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні.

В процесах експлуатації, технічного обслуговування (ТО) та поточного

ремонту (ПР) електроерозійного копіювально-прошивного верстата моделі «Дуга 8Г» можуть мати місце наступні небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

- елементи механізмів обладнання та засобів механізації, що рухаються й обертаються;
- інерційно падаючих елементів обладнання та виробів, що виготовляються;
- дія рідкого і газоподібного робочого середовища, що знаходиться під тиском;
- нерівності і гострі поверхні верстата;
- елементи обладнання в результаті непослідовного функціонального спрацьовування механізмів або їхнього вмикання;
- аварійні несправності устаткування;
- підвищена температура поверхонь обладнання, матеріалів;
- підвищенні або зниженні температури, вологість та рухомість повітря робочої зони;
- підвищенні рівні шуму, вібрації на робочому місці при виконанні технологічних операцій;
- недостатня освітленість робочої зони;
- незахищені струмоведучі частини електрообладнання (електроустановок).
- шкідливі компоненти в складі робочої рідини, що застосовується, які діють на працівників через шкіряний покрив, дихальні шляхи, травну систему та слизові оболонки органів зору та дихання.

### **А.3 Способи усунення або зменшення впливу шкідливих та небезпечних факторів при експлуатації електроерозійного копіювально-прошивного верстата моделі «Дуга 8Г»**

Для усунення і зменшення впливу небезпечних та шкідливих факторів

прийняті наступні заходи:

– рухомі частини електроерозійного копіювально-прошивного верстата мають бути закриті захисними сітками і корпусами, для унеможливлення прямого контакту людини з рухомими частинами, під час роботи;

– зняття деталі з затискного устаткування електроерозійного копіювально-прошивного верстата і очищення від продуктів ерозії, повинна здійснюватись коли верстат зупинено і вимкнено зварювальні джерела живлення технологічного струму;

– закриття робочої камери електроерозійного копіювально-прошивного верстата повинно бути герметичне, а на корпусі камери і обладнання мають бути попереджувачі знаки безпеки;

– необхідно провітрювати приміщення після, роботи;

– верстат повинен бути підключений до системи витяжної вентиляції з витратою не менш  $100 \text{ м}^3/\text{год}$ ;

– необхідно забезпечити загальне або місцеве освітлення робочої зони, при недостатній кількості природного освітлення;

– при роботі на електроерозійному копіювально-прошивному верстаті необхідно забезпечити захисні засоби для безпечної роботи та пересування робочого персоналу в приміщенні;

– використані матеріали для обтирання повинні зберігатися в металевих ящиках із кришками і після закінчення роботи виносяться з приміщення;

– поблизу електроерозійного копіювально-прошивного верстата повинні знаходитися засоби пожежогасіння;

– біля верстата необхідно мати ізоляційне покриття на якому знаходиться оператор;

– верстат по закінченню роботи знеструмлюється вхідним вимикачем;

– шафи захисно-пускових апаратів і розподільних щитків мають бути зачинені;

– для захисту людини від ураження електричним струмом необхідно

розрахувати та виконати заземлення електрообладнання;

– відключення, ремонт і підключення верстата до мережі живлення повинно виконуватися спеціалістами, які пройшли відповідну атестацію.

Для захисту від впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів адміністрація забезпечує працюючих спецодягом, спецвзуттям і іншими індивідуальними захисними засобами відповідно до діючого «Типовими галузевими нормами безкоштовної видачі спецодягу, спецвзуття і запобіжних пристосувань».

Одним з основних заходів по *оптимізації параметрів мікроклімату та складу повітря* в виробничих приміщеннях є забезпечення належного обміну повітря.

Загально обмінна вентиляція повинна розроблятися таким чином, щоб виключалася можливість надходження повітря із приміщення з більшим газоутворенням в приміщення з меншим виділенням газу і пилу.

#### **А.4 Розрахунок припливно-витяжної вентиляції**

Припливно-витяжна вентиляція призначена для повітрообміну, що забезпечує видалення з приміщення повітря не придатного для подиху.

Припливно-витяжна вентиляція застосовується у приміщеннях, коли необхідно забезпечити підвищений і надійний обмін повітря.

При розрахунку [25] керуємося наступними вихідними даними:

Параметри приміщення: 11x8x2,5 м;

Припустима швидкість руху повітря на ділянці мережі повітроводу не більш 3 м/с;

Довжина ділянки повітроводу 4м;

Припустима концентрація вуглекислого газу: не більш 5% ;

Час устанавлення припустимої концентрації вуглекислого газу в приміщенні: не більш 5 хв з моменту включення вентиляції.

Розрахунок вентиляційної системи починається з визначення обсягу

повітря, яке проходить через систему. Розрахунок вентиляційної мережі проводиться без домішок, які знаходяться у повітрі, так як їх вагові концентрації не перевищують 0,002.

Відповідно обсяг дорівнює:

$$V_{pr} = A \cdot B \cdot H \quad (5.1)$$

$$V_{pr} = 8 \cdot 11 \cdot 2,5 = 220 \text{ м}^3$$

Виходячи з технічних вимог час необхідного повітрообміну для досягнення припустимих концентрацій вуглекислого газу повинний складати не більш 5 хвилин, відповідно система вентиляції повинна забезпечити 100% заміну повітря в на протязі зазначеного часу .

Розрахуємо потрібну кількість замінного повітря  $G$  для зазначеного приміщення,  $\text{м}^3/\text{год}$  по формулі:

$$G = \frac{V_{pr}}{t} \quad (5.2)$$

$$G = \frac{220 \cdot 60}{5} = 2640 \text{ м}^3 / \text{год}$$

*Визначення поперечних розмірів повітроводу*

Вихідними даними для визначення поперечних розмірів повітроводу є витрати повітря ( $O$ ) і припустимі швидкості його руху на ділянці мережі ( $V$ ). Необхідна площа повітроводу  $f$  ( $\text{м}^2$ ), визначається по формулі:

$$f = G / (3600 \cdot V) \quad (5.3)$$

$$V = 3 \text{ м/с}$$

$$f = 2640 / (3600 \cdot 3) = 0,244 \text{ м}^2$$

Для подальших розрахунків (при визначенні опору мережі, підборі вентилятора й електродвигуна) площа повітроводу приймається рівній найближчій більшій стандартній величині, тобто  $f = 0,246 \text{ м}^2$ . По довіднику знаходимо, що для площі  $f = 0,246 \text{ м}^2$  умовний діаметр повітроводу  $d = 560$  мм.

*Визначення опору мережі*

Визначимо втрати тиску у вентиляційній мережі. При розрахунку мережі необхідно врахувати втрати тиску у вентиляційному устаткуванні. Для забезпечення запасу вентилятор повинний створювати у повітроводу тиск, що перевищує не менш чим на 10% розрахунковий тиск.

Для розрахунку опору ділянки мережі використовується формула:

$$P = R \cdot L + E_i \cdot V^2 \cdot Y / 2$$

де  $R$  – питомі втрати тиску на тертя на ділянках мережі;  $L$  – довжина ділянки повітроводу;  $E_i$  – сума коефіцієнтів місцевих втрат на ділянці повітроводу;  $V$  – швидкість повітря на ділянці повітроводу;  $Y$  – щільність повітря (приймаємо 1,2 кг/м )

Значення  $R$ , визначаються по довіднику ( $R$  – за значенням\* діаметра повітроводу на ділянці  $d = 560$  мм і  $V = 3$  м/с),  $E_i$  – у залежності від типу місцевого опору.

Результати розрахунку повітроводу й опору мережі приведені в таблиці А.1.

Таблиця А.1 – Розрахунок повітроводу мережі

№ діл.	G, м <sup>3</sup> /год	L, м	V, м/с	d, мм	M, Па	R, Па/м	R·L, Па	E <sub>i</sub>	W, Па	P, Па
1-1	660	4	3,0	560	5,4	0,018	0,072	2,1	11,34	11,412
1-2	660	4	3,0	560	5,4	0,018	0,072	2,1	11,34	11,412

$$P_{max} = P1 + P2$$

$$P_{max} = 11,412 + 11,412 = 22,824 \text{ Па}$$

*Вибір вентилятора та електродвигуна*

Необхідний тиск, створюваний вентилятором з урахуванням запасу на непередбачений опір у мережі в розмірі 10% складе:

$$P_{тер} = 1,1 \cdot P_{max}$$

$$P_{тер} = 1,1 \cdot 22,824 = 25,106 \text{ Па}$$

У вентиляційній установці для даного приміщення необхідно застосувати вентилятор низького тиску, тому що  $P_{мер}$  менше 1 кПа.

Вибираємо осьовий вентилятор (для опорів мережі до 200 Па) по аеродинамічних характеристиках тобто залежностям між повним тиском  $P_{мер}$ , (Па), створюваним вентилятором і продуктивністю  $V_{мер}$  ( $\text{м}^3/\text{г}$ ).

З обліком можливих додаткових втрат у повітроводі необхідна продуктивність вентилятора збільшується на 10%.

$$V_{мер} = 1.1 \cdot G$$

$$V_{мер} = 1.1 \cdot 2640 = 2904 \text{ м}^3 / \text{г}$$

По довіднику вибираємо осьовий вентилятор типу 06-300 N4 із ККД  $n_e=0,65$  першого виконання. ККД пасової передачі вентилятора  $n_{pn}=1,0$ .

Потужність електродвигуна розраховується за формулою:

$$N = \frac{V_{мер} \cdot P_{мер}}{3.6 \cdot n_e \cdot n_{pn}} \cdot 10^{-6}, \text{ кВт}$$

$$N = \frac{2904 \cdot 25,106}{3.6 \cdot 0.65 \cdot 1} \cdot 10^{-6} = 0,312 \text{ кВт}$$

По потужності вибираємо електродвигун АОЛ-22-2 з потужністю  $N=0,6$  кВт та частотою обертання 2830 об/хв.