

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

САВЕЛЕНКО ГРИГОРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 681.511.4:004.415.2:621.9.048.4

ДИСЕРТАЦІЯ

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ПОДАЧЕЮ
ЕЛЕКТРОДА-ІНСТРУМЕНТА ПРИ РОЗМІРНІЙ ОБРОБЦІ ДУГОЮ**

05.13.07 – Автоматизація процесів керування
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня **кандидата технічних наук**

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ /Г. В. Савеленко/

Науковий керівник – Єрмолаєв Юрій Олексійович
кандидат технічних наук, доцент

Кропивницький – 2018

АНОТАЦІЯ

Савеленко Г.В. Автоматизація процесу керування подачею електрода-інструмента при розмірній обробці дугою. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.13.07 «Автоматизація процесів керування». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2018.

Сьогодні підвищення енергоефективності при обробці деталей з важкооброблюваних металів стає все більш актуальним у зв'язку із ростом цін й зменшенням лімітів на енергоносії. В умовах постійно зростаючих цін на енергоносії пошук шляхів енергозбереження та підвищення продуктивності є першочерговими завданнями, розв'язання яких дозволить зменшити технологічну собівартість продукції і, відповідно, підвищити економічну ефективність при виготовленні продукції. В умовах інтенсивного розвитку машинобудування важливими науковими та інженерними задачами є створення систем автоматичного керування, які б забезпечували підвищення продуктивності обробки і зниження енерговитрат на виготовлення одиниці продукції.

Однією з проблемних задач в машинобудуванні є створення квадратних із фасками, прямокутних, еліптичних, багатокутних та наближених до них отворів, які використовуються для кріплення або з'єднання деталей.

Електроерозійна обробка (ЕЕО) в машинобудуванні вважається одним з найбільш прогресивних і економічно вигідних процесів. За допомогою ЕЕО можна отримувати поверхні і отвори різної конфігурації, які дуже складно виконати іншими технологічними методами. ЕЕО дозволяє обробляти будь-який за твердістю електропровідний матеріал, а також отримувати отвори і

порожнини складного перерізу при використанні простого поступального руху електрода-інструмента (ЕІ).

Одним із найбільш перспективних високопродуктивних методів ЕЕО є спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД), який відомий за роботами Носуленка В. І. РОД забезпечує значно більшу продуктивність обробки (в 5...10 разів) і менші витрати електроенергії (в 1,5...2 рази), ніж традиційні методи електроерозійної обробки, засновані на використанні нестационарного електричного розряду – електроіскрова та електроімпульсна обробка. Так, наприклад, при отриманні отворів способом РОД у порівнянні з механічною обробкою виникають ряд переваг по відношенню до штампування: точність і якість отриманого отвору не залежить від товщини деталі; не змінюється структура деталі, не відбуваються пружні деформації та внутрішні та зовнішні дефекти (тріщини, сколи тощо); матеріал електроду-інструменту не залежить від твердості деталі; отримання квадратного отвору з фаскою (або іншого) за одну операцію: прошивання з об'ємним копіюванням.

Одним з способів підвищення продуктивності обробки деталі є створення і підтримання екстремальних по продуктивності режимів процесу, які досягаються за рахунок впровадження більш гнучких (у порівнянні з діючими) сучасних автоматичних систем керування подачі електрода-інструмента.

Одним з головних чинників впливу на стабілізацію процесу РОД є величина міжелектродного проміжку, яка впливає на стабільне горіння дуги та її енергетичні можливості. Максимальна продуктивність процесу досягається при мінімальному міжелектродному проміжку при умові збереження стабільного горіння електричної дуги. Тому пошук максимуму за продуктивністю обробки можливо виконувати лише після попередньої стабілізації параметрів дуги.

Існуючі на сьогодні серійні верстати розмірної обробки дугою частково автоматизовані. Автоматизація процесу виконана для функції підтримання

заданого значення (стабілізації) напруги дуги в міжелектродному проміжку за рахунок зміни швидкості подачі електрода-інструмента.

Використовувані системи автоматичного керування подачі електрода-інструмента при РОД не забезпечують максимальну продуктивність і, відповідно, енергоефективність обробки деталі. До тепер не вирішеними залишились наступні задачі:

- спосіб визначення рівня стабільності процесу РОД з врахуванням стохастичного характеру горіння дуги;
- автоматичне керування швидкістю при роботі в режимі підведення електрода-інструмента до електрода-заготовки при відсутності горіння дуги до моменту її запалювання;
- автоматичне вимикання процесу РОД при досягненні заданої глибини обробки, особливо при використанні плавких електродів.

Вище окреслені задачі вирішуються оператором-верстатником, що не дозволяє верстат РОД позиціонувати на ринку як напівавтомат або автомат і обмежує його розповсюдження в сегменті вітчизняних електроерозійних верстатів.

Розв'язання вище окреслених задач було виконано за рахунок розв'язання часткових задач декомпозиції, синтезу та аналізу.

Розв'язок задачі декомпозиції дозволив представити процес РОД, як багаторежимний об'єкт, який можна описати трьома режимами: режим підведення електрода-інструмента до електрода заготовки, режим стабілізації параметрів електричної дуги, екстремальний режим по продуктивності обробки. При цьому кожен робочий режим виконується тільки в конкретний момент часу і вони ніколи не накладаються, а тільки переходять з одного в інший.

Застосування методів статистичної оцінки дозволило синтезувати методики експериментальних досліджень та алгоритми формування сигналу керування процесом РОД для забезпечення максимальної продуктивності обробки деталі. Застосування розробленого програмно-технічного

вимірювального комплексу дозволило отримувати, зберігати, обробляти та аналізувати результати експериментів запропонованих методик експериментальних досліджень.

За допомогою методу спектрального аналізу визначено слабкий вплив збурювальної дії струму та напруги дуги на струм і напругу привода, що дозволило використати модальний метод синтезу електромеханічної системи.

Використання синтезу системи позиційного електроприводу подачі електрода-інструмента, виконаного на основі біноміального розподілу коренів за допомогою модального керування, дозволило покращити параметри САК у порівнянні із стандартними налаштуваннями. Експериментально визначено зменшення часу перехідного процесу на 42% та перерегулювання до величини менше 5%.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що у дисертації визначено, поставлено та розв'язано задачу по підвищенню продуктивності та енергоефективності процесу розмірної обробки дугою за рахунок впровадження автоматичної електромеханічної системи подачі електрода-інструмента та розробки алгоритмів керування з врахуванням особливостей процесу. При розв'язанні цієї задачі отримано ряд нових наукових результатів:

1. Вперше запропоновано, обґрунтовано і реалізовано метод автоматичного керування швидкістю подачі з максимального значення до робочого при підведенні електрода-інструмента в зону обробки деталі, який відрізняється від відомих тим, що в якості керувального параметра використано значення статичного тиску робочої рідини в електроерозійній камері. Це дозволило скоротити машинно-допоміжний час обробки деталі за умов реалізації конкретних технологій.

2. Вперше запропоновано і обґрунтовано застосування методу визначення рівня стабільності горіння дуги, який відрізняється тим, що використовується поділ миттєвого значення напруги електричної дуги на три інтервали: холостого ходу, стабільного горіння і короткого замикання з

подальшим визначенням частоти попадання виміряного випадкового значення напруги в заданий інтервал.

3. Поширена дія методу моментів на випадок екстремального керування продуктивністю обробки деталі, яка розраховується за тиском робочої рідини, напругою і силою електричного струму дуги, що дозволило розв'язати задачу підвищення продуктивності процесу розмірної обробки дугою.

Практична цінність роботи полягає в тому, що створена автоматична мікропроцесорна система керування подачі електрода-інструмента дозволила розв'язати задачу підвищення продуктивності та енергоефективності процесу РОД. Розроблено методики визначення рівня стабільності параметрів в умовах стохастичного процесу РОД, граничного значення тиску робочої рідини на вході в міжелектродний проміжок, при якому необхідно виконати перемикання швидкості подачі ЕІ, керувального впливу для досягнення максимальної продуктивності обробки деталі, а також удосконалено систему автоматичної подачі ЕІ на задану глибину обробки з застосуванням лінійного потенціометричного датчика переміщення.

Ключові слова: РОД, розмірна обробка дугою, рівень стабільності процесу, автоматизація процесу подачі, електрод-інструмент, стабілізація процесу.

ABSTRACT

Savelenko G. V. Automation of the process controll the feeding the electrode tool for dimensional arc machining. - Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in specialty 05.13.07 "Automation of control processes". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2017.

In the context of the intensive development of mechanical engineering, important scientific and engineering tasks are the creation of automatic control

systems that would improve the increase productivity and reduce energy costs for the production unit.

One of the problem tasks in mechanical engineering is the creation holes and cavities of section a square with chamfers, rectangular, elliptical, polygonal and approximate ones close to them, which are used for fastening or joining of parts.

The process of arc dimensional machining (ADM) as a means of electrical discharge machining (EDM) provides significantly more processing performance (5-10 times) and lower electricity consumption (1.5-2 times) than electric discharge machining.

One of the ways to increase the processing performance of a part is to create and maintain extreme process modes, which are achieved through the introduction of more flexible modern automated control systems for filing electrode-tool.

The thesis is devoted to the solutions of the actual complex scientific and applied problem of automation of the process of dimensional arc processing.

As a result of the analysis of the existing systems for controlling the process of dimensional processing of the arc, a general task was set and solved to ensure an increase in the productivity and energy efficiency of the ADM process by automatically feeding the tool electrode. This became possible with the introduction of an electromechanical feeding system and the following automatic subsystems: the supply of an electrode tool to the processing area; stabilization of the parameters of the ADM process; Extreme in productivity processing parts; depth control.

The development of mathematical control laws with their subsequent software implementation for all the above subsystems made it possible to combine all the functions for automatic control of the supply of the tool electrode in a single microprocessor device.

The results of experimental studies and the technical and economic assessment confirmed the efficiency and expediency of using the microprocessor controller proposed in the work for the automatic control system for feeding the tool electrode.

The scientific novelty of the obtained results is that in the dissertation the task for increasing the productivity and energy efficiency of the process of dimensional arc processing by the introduction of the automatic electromechanical system of supplying the electrode-tool and the development of control algorithms taking into account the features of the process is determined, delivered and solved. In the process of solving this problem a number of new scientific results were obtained:

1. For the first time, the method is proposed of automatic control of the feed rate from the maximum value to the working value during the feeding of the electrode-tool into the processing area of the part, which differs from the known ones, is used the value of the static pressure of the working fluid in the electro-erosive chamber as a control parameter. This allowed reducing the machine-auxiliary processing time of the parts under the conditions of the implementation of specific technologies.

2. For the first time, proposed of a new method for determining the level of arc combustion stability, which differs from the known, is used, that the instantaneous value of the electric arc voltage distribution is used for three intervals: idling, stable combustion and short-circuit with subsequent determination of the frequency of falling of the measured random variable in the given interval, which allows to stabilize arc parameters.

3. Extended action of the method of moments on the case of extremize control of the performance of the processing of the part, which is calculated by pressure of the working fluid, voltage and electric current, which allowed to solve the problem of increasing the productivity of the process of dimensional arc processing.

The practical value of the work is that the created automatic microprocessor control system of electrode-tool feeding allowed solving the problem of increasing productivity and energy efficiency of the process of dimensional arc processing. On the basis of scientific principles, methods for determining the level of stability of parameters in the conditions of a stochastic process of dimensional arc

processing, the limit value of the pressure of the working fluid at the inlet in the interelectrode gap, in which it is necessary to perform the switching of the feeding rate of the electrode-tool, control influence to achieve maximum processing performance of the component, as well the system of automatic feeding of the electrode-tool to the given depth of processing is improved, which differs from the known automatic control systems availability of a linear potentiometric transducer with a resolution of less than 0.01 mm.

Keywords: ADM, dimensional arc processing, level of process stability, automatic control system, automation of the feeding process, electrode-tool, process stabilization.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. Єрмолаєв Ю. О. Розробка САК електромеханічного приводу верстата типу “ДУГА” на базі “ЭШИМ–1” / Ю.О. Єрмолаєв, **Г.В. Савеленко** // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград: КНТУ. - 2004. - Вип.15. - С. 270-273.

2. Єрмолаєв Ю.О. Дослідження САК процесу РОД на верстаті з електромеханічним приводом. I. Основні фактори, що впливають на процес / Ю.О. Єрмолаєв, П.М. Великий, **Г.В. Савеленко** // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград: КНТУ. - 2007.- Вип.19. – С. 270-273.

3. **Савеленко Г. В.** Дослідження САК процесу РОД на верстаті з електромеханічним приводом. II. Інформаційно-вимірювальний комплекс для проведення експериментальних досліджень / Г. В. Савеленко, Ю. О. Єрмолаєв, В. М. Каліч // Збірник наукових праць Кіровоградського

національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград: КНТУ. - 2012. - Вип. 25(2). - С. 266-271. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/znpkntu_2012_25\(2\)___48.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/znpkntu_2012_25(2)___48.pdf).

4. Єрмолаєв Ю. О. Синтез регуляторів позиційного електропривода подачі електрода-інструмента на верстатах РОД з використанням стандартних налаштувань / Ю. О. Єрмолаєв, **Г. В. Савеленко** // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград: КНТУ. - 2013. - Вип. 26. - С. 280-284. - Режим доступу: http://www.nbuv.gov.ua/j-pdf/znpkntu_2013_26_48.pdf

5. **Савеленко Г. В.** Дослідження робочого процесу розмірної обробки дугою на верстаті з електромеханічним приводом / Г. В. Савеленко, Ю. О. Єрмолаєв // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. - 2014. - № 14. - С. 164-169. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Kitonv_2014_14_27.pdf.

6. **Савеленко Г.** Обґрунтування структури екстремального регулятора по продуктивності автоматизованого процесу електроерозійної обробки / Григорій Савеленко, Юрій Єрмолаєв // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2014. – Т. 6, N 4(20). - С. 42-47. – Режим доступу : DOI: 10.15587/2312-8372.2014.32750.

7. **Савеленко Г.** Розробка програмно-апаратного пристрою автоматизованої системи стабілізації процесу розмірної обробки дугою / Григорій Савеленко, Юрій Єрмолаєв, Олександр Собінов, Василь Гуцул // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. – Т. 1, N 3(21). - С. 22-28. – Режим доступу : DOI: 10.15587/2312-8372.2015.36244.

8. **Савеленко Г.** Спосіб автоматичного визначення стабільності процесу розмірної обробки дугою / Григорій Савеленко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – Т. 1, N 5(73). - С. 9-13. – Режим доступу : DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36226.

9. **Savelenko, G.** Optimization of arc ignition process for machines of arc dimensional machining / Gregory Savelenko, Yury Yermolaev, Vitaly Yuriev // Technology audit and production reserves. – 2016. – Vol. 6, N 2(32). - P. 44-51. – Way of Access : DOI : [10.15587/2312-8372.2016.86081](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.86081).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

10. **Савеленко Г.В.** Обоснование алгоритма работы экстремального регулятора подачи электрода-инструмента на станках размерной обработки дугой / Г.В. Савеленко // Автоматизированное проектирование в машиностроении: Материалы I международной заочной научно-практической конференции / НОЦ«МС». – Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2013. - С. 115-122.

11. Ермолаев Ю.О., **Савеленко Г.В.**. Алгоритмічна оптимізація руху електропривода подачі електрода-інструмента процесу розмірної обробки дугою./Автоматизація управління та інтелектуальні системи: збірник ТЕЗ за матеріалами I міжнародної науково-технічної інтернет-конференції, 28-29 листопада/ Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. – 2013. – 120 с. С. 69-70.

12. Ермолаев Ю.А. , **Савеленко Г.В.** . Синтез системы регулирования положения электрода-инструмента процесса размерной обработки дугой с помощью модального управления. /Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип. 1/2014 (2). – 380 с. С. 53-55.

13. Ермолаев Ю.А., **Савеленко Г.В.** Стохастический анализ параметров дуги и электропривода подачи электрода-инструмента процесса размерной обработки дугой. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами», 27 листопада 2014 р. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2014 р. – 234 с. — Режим доступу: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>

14. **Савеленко Г.В.**, Єрмолаєв Ю.О. Аналіз можливостей покращення енергоефективності процесу розмірної обробки дугою. Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами», 25 листопада 2015 р. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2015 р. – 241 с. — Режим доступу: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>

*Опубліковані праці, які додатково відображають
наукові результати дисертації:*

15. Пат. 110050 Україна, МПК (2006.01) В23Н 7/26. В23Н 7/32. В23Н 1/02. В23Н 7/18. G05В 13/02. H05В 7/152. Спосіб визначення моменту процесу запалювання дуги та зміни режиму руху при холостому ході електрода-інструмента верстата розмірної обробки дугою [Текст] / **Г. В. Савеленко**, Ю. О. Єрмолаєв; заявник та патентовласник Кіровоград. нац. техн. ун-т. – № а201311270; заявл. 23.09.2013 ; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 21. – 3 с.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ.....	16
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ І СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ ОБРОБКИ СПОСОБОМ РОД	25
1.1 Особливості технологічного процесу розмірної обробки дугою	25
1.2 Аналіз процесу розмірної обробки дугою, як об'єкта керування	31
1.3. Технологічні особливості роботи системи автоматичного керування процесу розмірної обробки дугою, які впливають на його енергоефективність.....	37
1.4 Огляд і аналіз систем автоматичного керування процесом розмірної обробки дугою.....	43
1.5 Шляхи підвищення продуктивності процесу розмірної обробки дугою	48
1.6 Постановка задач досліджень та методика їх виконання	55
Висновки до першого розділу	61
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ПОДАЧЕЮ ЕЛЕКТРОДА-ІНСТРУМЕНТА	63
2.1 Характеристики деталей, обладнання та приводу подачі електрода- інструмента	64
2.2 Перевірка гіпотези про вигляд функції розподілу	73
2.3 Визначення необхідної кількості дослідів для оцінки математичного очікування	77
2.4 Розробка методики експериментальних досліджень	81
2.4.1 Методика експериментальних досліджень процесу керування швидкості подачі при підведенні електрода-інструмента до заготовки при відсутності горіння електричної дуги	83
2.4.2 Методика визначення рівня стабільності процесу розмірної обробки.....	89

2.4.3 Методика формування сигналу завдання для забезпечення максимальної продуктивності процесу обробки деталі	96
2.5 Розробка програмно-технічного комплексу для аналізу процесу розмірної обробки дугою.....	100
2.6 Лінеаризована математична модель об'єкта керування	108
2.7 Математична модель електромеханічної системи переміщення електродів.....	111
2.8 Методи лінеаризації нелінійностей електроприводу з релейними регуляторами.....	115
Висновки до другого розділу	118
РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЕЛЕКТРОДІВ	120
3.1 Статистичні методи дослідження об'єкта керування	120
3.2. Синтез системи регулювання позиційного електропривода подачі електрода-інструмента за допомогою модального керування	127
Висновки до третього розділу.....	134
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ПІДСИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОДАЧІ ЕЛЕКТРОДА-ІНСТРУМЕНТА	135
4.1. Підсистема автоматичного керування подачею електрода-інструмента в режимі підведення його в зону обробки.....	135
4.1.1 Визначення значення завдання регулятора.....	136
4.1.2 Підтвердження ефективності керування підсистеми.....	138
4.2. Підсистема автоматичного керування подачею електрода-інструмента в режимі стабілізації процесу розмірної обробки дугою	140
4.3. Підсистема автоматичного керування подачею електрода-інструмента при екстремальному по продуктивності режимі процесу розмірної обробки дугою	146
4.4. Підсистема автоматичного керування процесом РОД на задану глибину.....	149
Висновки до четвертого розділу	152

РОЗДІЛ 5 МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОДАЧІ ЕЛЕКТРОДА-ІНСТРУМЕНТА ПРИ РОД ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ЇЇ РОБОТИ	154
5.1. Розробка та реалізація алгоритмів роботи мікропроцесорної системи керування подачі електрода-інструмента	154
5.2. Експериментальні дослідження розробленої мікропроцесорної САК подачі електрода-інструмента	157
Висновки до п'ятого розділу	160
ВИСНОВКИ	161
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	164
ДОДАТКИ	180

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

АСС	–	автоматична система стабілізації
АЦП	–	аналоого-цифрове перетворення
ВАХ	–	вольтамперна характеристика
ЕЕГ	–	електроерозійна головка
ЕЕО	–	електроерозійна обробка
ЕІ	–	електрод-інструмент
ЕЗ	–	електрод-заготовка
ЕР	–	екстремальний регулятор
МЕЗ	–	міжелектродний зазор
МЕП	–	міжелектродний проміжок
МЗД	–	мікросистема збору даних
МП	–	мікропривод
МПК	–	модуль перемикання ключів
МРС	–	модуль розрахунку стабільності
МК	–	мікроконтролер
ОК	–	об'єкт керування
ПЛК	–	програмований логічний контролер
КЗ	–	коротке замикання
РОД	–	розмірна обробка дугою
САК	–	система автоматичного керування
ШІМ	–	широтно-імпульсна модуляція

ВСТУП

Актуальність теми. На даний час актуальною проблемою в машинобудуванні є впровадження нових високоефективних технологій обробки твердих, термостійких та зносостійких металів, більшість з яких важко піддаються механічній обробці. Електрофізичні і, зокрема, електроерозійний метод обробки, дозволяють найбільш ефективно розв'язувати специфічні питання технології виготовлення складних за формою деталей з твердих металів і їх сплавів.

Розмірна обробка дугою, як один з перспективних способів електроерозійної обробки, отримав розповсюдження завдяки працям Носуленко В.І., якому належить пріоритет в застосуванні розмірної обробки дугою [13]. Подальша практична реалізація та впровадження розробленого процесу обробки у виробництво виконувалась в Центральнотернопільському національному технічному університеті на базі лабораторії «Розмірна обробка електричною дугою». Вагомий вклад в дослідження технології РОД внесли В.І.Носуленко [80, 84], Г.Н.Мещеряков [73, 79], В.М.Боков [24, 26], М.І. Попова [25, 91], О.С.Чумаченко [82, 128], М.І.Москаленко [82], О.Ф.Сіса [109, 110], П.М. Великий [23, 46], В.М.Шмельов [131] та ін.

В області технологічних досліджень щодо сфери застосування розмірної обробки дугою нагромаджений вагомий експериментальний матеріал та розроблені технологічні основи способу РОД, в основному науковцями Центральнотернопільського національного технічного університету.

Напрацьовані дослідження процесу розмірної обробки дугою у більшості випадків стосуються технологічних методів отримання відповідних параметрів та форм деталей і вимагають від оператора устаткування постійного візуального контролю за ходом технологічного процесу.

Вагомий вклад в дослідження автоматичного керування процесом електроерозійної обробки внесли Б. Г. Гуткин [38], В. Ф. Іоффе [52], А. Л. Лившиц [66], М. Zhang [12], К. Kumar [3, 7], A. Behrens, J. Ginzl [1] та

ін. Проте, залишається необхідність у подальшому розв'язанні питань, що стосуються визначення рівня стабільності процесу у режимі реального часу, враховуючи, що процес розмірної обробки дугою має стохастичний характер. Також залишилися невирішеними питання, щодо керування процесом в екстремальних режимах по продуктивності обробки деталі. Це пов'язано з тим, що на даний час недостатньо повно розроблені методи, системи та алгоритми щодо визначення стану та керування процесом РОД на всіх режимах обробки деталі.

Таким чином, виконання досліджень, спрямованих на автоматизацію процесу розмірної обробки дугою в умовах дії випадкових завад, є складним та актуальним науково-прикладним завданням, успішне виконання якого дозволить підвищити продуктивність обробки деталей та енергоефективність процесу в цілому.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконувалась відповідно до державної програми розвитку промисловості на 2003-2011 роки за напрямом «Розроблення і впровадження інтегрованих автоматизованих систем управління та проектування», затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 28 липня 2003 р. № 1174 та на підставі Концепції Загальнодержавної цільової економічної програми розвитку промисловості на період до 2020 року, схваленою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 17 липня 2013 р. № 603-р. Основний зміст роботи складають результати досліджень, проведених автором протягом 2006-2017 років. Робота відповідає спрямованості тематики науково-дослідних робіт кафедр «Автоматизації виробничих процесів» та «Обробки металів тиском» в лабораторіях «Автоматизований електропривод», «Розмірна обробка дугою» Центральноукраїнського національного технічного університету в межах науково-дослідних робіт: № ДР 0111U007656 «Модернізація електромеханічної частини привода подачі електроерозійного верстата для розмірної обробки дугою», № ДР 0111U007657 «Розробка інформаційно-вимірювального комплексу для

реєстрації стохастичних параметрів роботи електроерозійного верстата для розмірної обробки дугою», № ДР 0111U007658 «Використання інформаційних технологій на базі кореляційно-спектрального аналізу вибірок осцилограм технологічних параметрів функціональних вузлів електроерозійного верстату для розмірної обробки дугою». Автор брав участь у виконанні науково-дослідницьких робіт, як виконавець.

Мета роботи полягає у підвищенні продуктивності та енергоефективності процесу розмірної обробки дугою за рахунок впровадження автоматичної електромеханічної системи подачі електрода-інструмента та розробки алгоритмів керування з врахуванням особливостей процесу РОД.

Для досягнення мети необхідно було розв'язати такі задачі:

1. Дослідити особливості сучасних систем автоматизації процесів керування при розмірній обробці дугою.

2. Проаналізувати впливи різних параметрів на об'єкт дослідження та виконати постановку задачі автоматизації керування процесу розмірної обробки дугою.

3. На основі встановлених закономірностей запропонувати та обґрунтувати метод визначення граничного значення технологічного параметру, за яким відбувається зміна швидкості подачі при підведенні електрода-інструмента до заготовки при відсутності горіння дуги.

4. Запропонувати та обґрунтувати метод визначення рівня стабільності процесу розмірної обробки дугою.

5. Запропонувати та обґрунтувати метод пошуку максимальної продуктивності процесу розмірної обробки дугою.

6. Створити програмно-технічний комплекс для збереження і обробки результатів дослідження процесу розмірної обробки дугою.

7. Розробити структурну схему автоматичної системи керування процесом розмірної обробки дугою; створити програмне забезпечення для регулятора САК; створити автоматичну систему керування процесом

розмірної обробки дугою на основі запропонованих і розроблених методів; оцінити продуктивність та енергоефективність автоматичної системи керування процесом розмірної обробки дугою.

Об'єктом дослідження є процес керування подачею електрода-інструмента при розмірній обробці дугою.

Предметом дослідження є впроваджена автоматична електромеханічна система подачі електрода-інструмента для автоматизації процесу розмірної обробки дугою на основі статистичної теорії керування.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі розв'язання поставлених задач відбувалося за допомогою методів: теорії автоматичного керування, теорії автоматизованого електроприводу, математичної статистики, теорії стохастичних процесів з використанням спектрального аналізу та на основі загальних положень теорії процесу розмірної обробки дугою.

Експериментальні дослідження виконувалися у виробничих умовах на верстаті РОД з запропонованою і впровадженою електромеханічною системою подачі електрода-інструмента за допомогою спеціально розробленого програмно-технічного комплексу. Обчислювальна частина дослідження виконувалась на сучасному персональному комп'ютері з використанням засобів математичної обробки і аналізу сигналів, зокрема пакетів прикладних програм: Microsoft Excel, «PowerGraph Professional» - серійний номер ліцензії HL11082.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше запропоновано, обґрунтовано і реалізовано метод автоматичного керування швидкістю подачі з максимального значення до робочого при підведенні електрода-інструмента в зону обробки деталі, який відрізняється від відомих тим, що в якості керувального параметра використано значення статичного тиску робочої рідини в електроерозійній камері. Це дозволило скоротити машинно-допоміжний час обробки деталі за умов реалізації конкретних технологій.

2. Вперше запропоновано і обґрунтовано застосування методу визначення рівня стабільності горіння дуги, який відрізняється тим, що використовується поділ миттєвого значення напруги електричної дуги на три інтервали: холостого ходу, стабільного горіння і короткого замикання з подальшим визначенням частоти попадання виміряного випадкового значення напруги в заданий інтервал.

3. Поширена дія методу моментів на випадок екстремального керування продуктивністю обробки деталі, яка розраховується за тиском робочої рідини, напругою і силою електричного струму дуги, що дозволило розв'язати задачу підвищення продуктивності процесу розмірної обробки дугою.

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає в тому, що створена автоматична мікропроцесорна система керування подачею електрода-інструмента дозволила розв'язати задачу підвищення продуктивності та енергоефективності процесу РОД. Розроблено методики визначення рівня стабільності параметрів в умовах стохастичного процесу РОД, граничного значення тиску робочої рідини на вході в міжелектродний проміжок, при якому необхідно виконати, перемикання швидкості подачі ЕІ, керувального впливу для досягнення максимальної продуктивності обробки деталі, а також удосконалено систему автоматичної подачі електрода-інструмента на задану глибину обробки з застосуванням лінійного потенціометричного датчика переміщення.

Отримані наукові результати впроваджено в:

- ПАТ «ЗАВОД СЕГМЕНТ», що підтверджено відповідним актом впровадження результатів наукових досліджень від 23 квітня 2015 р;
- ТОВ АСТРА-С, що підтверджено відповідним актом впровадження результатів наукових досліджень від 19 лютого 2015 р;
- ПП «ДЦ Арт-Салон», що підтверджено відповідним актом впровадження результатів наукових досліджень від 15 червня 2015 р.

Результати дисертаційної роботи використані в навчальному процесі на факультеті автоматики та енергетики Центральноукраїнського національного технічного університету при підготовці студентів спеціальності 151 – Комп'ютеризовані системи управління та автоматика (освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр), акт використання результатів дисертаційної роботи в учбовому процесі від 17 травня 2017 р.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані здобувачем одноосібно. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих в співавторстві такий: [44] – запропоновано структурну схему системи та алгоритми роботи САК подачі ЕІ на верстаті РОД; [46] – визначено основні фактори, що впливають на процес РОД і підлягають реєстрації в процесі план-факторного експерименту; [99] – розглянуто конструктивні особливості інформаційно-вимірювального комплексу, що дозволяє проводити реєстрацію основних технологічних параметрів процесу РОД на верстаті розмірної обробки дугою з електромеханічним приводом; [45] – розглянуто систему підлеглого регулювання параметрів системи електропривод широтно-імпульсний багатокоординатний (ЕШІМ-1) – двигун постійного струму; наведено структуру системи підлеглого регулювання по положенню та запропонований її математичний опис; розглянуто синтез регуляторів даної системи на базі модульного і симетричного критеріїв оптимізації контурів регулювання координат по струму, швидкості та переміщенню; [98] – розглянуто склад і технічні можливості програмно-технічного комплексу, призначеного для реєстрації і обробки результатів наукових досліджень на

прикладі електроерозійного верстата з електромеханічним приводом подачі електрода-інструмента; [100] – обґрунтовано функціональну схему екстремального регулятора по продуктивності процесу розмірної обробки дугою, що синтезована на основі аналізу технологічного процесу і реалізації його параметрів, які мають стохастичний характер; запропоновано алгоритм роботи регулятора з використанням спектрально-кореляційного аналізу вибірок випадкового процесу; [101] – досліджено програмно-апаратну реалізацію регулятора автоматизованої системи стабілізації процесу розмірної обробки дугою; запропоновано алгоритм стабілізації процесу розмірної обробки дугою в зоні горіння дуги при заданих початкових умовах; [102] – запропоновано спосіб визначення стабільності процесу розмірної обробки дугою; наведено залежності, за якими визначається приналежність миттєвих значень напруги дуги до зон горіння дуги і по яким можна судити про стан процесу РОД. [9] - запропоновано значення величини статичного тиску в електроерозійній камері АМН-1, при якому формується сигнал для автоматичної зміни швидкості подачі з максимальної до робочої при підведенні електрода-інструмента до заготовки.

Усі дослідження, результати яких викладені в дисертації, були проведені в Центральнотехнічному національному технічному університеті.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні, методологічні положення та результати досліджень були представлені і схвалені на міжнародних та всеукраїнських наукових, науково-практичних та науково-технічних конференціях: «Автоматизоване проектування в машинобудуванні» (м. Новокузнецьк, 2013 р.); «Автоматизація керування та інтелектуальні системи» (м. Полтава, 2013 р.); «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (м. Кременчук, 2014 р.); «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів» (м. Полтава, 2014 р.); «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами» (м.

Київ, 2014 р.); «Актуальні задачі сучасних технологій» (м. Тернопіль, 2014 р.); щорічних наукових конференціях викладачів та співробітників Кіровоградського національного технічного університету (м. Кіровоград, 2007 – 2017 рр.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 15 наукових праць. Наукові результати дисертації опубліковано в 9 статтях у наукових фахових виданнях, з яких 4 статті у фахових виданнях України, занесених до міжнародних наукометричних баз даних (Ulrich's Periodicals Directory, DRIVER, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Index Copernicus, РИНЦ, ResearchBib, Directory of Open Access Journals (DOAJ), WorldCat, EBSCO)), 5 тезах у збірниках праць науково-технічних конференцій, отримано 1 патент на винахід.

Структура роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертації складає 250 сторінок, з яких 66 сторінок містять 14 додатків. Основна частина викладена на 148 сторінках друкованого тексту, містить 55 рисунків та 12 таблиць. Список використаних джерел містить 136 джерел та викладений на 16 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ І СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ ОБРОБКИ СПОСОБОМ РОД

1.1 Особливості технологічного процесу розмірної обробки дугою

Сутність розмірної обробки дугою полягає в тому, що обробка деталі здійснюється стаціонарною електричною дугою, яка горить між електродом-інструментом і електродом-заготовкою в потоці рідини при динамічному тиску потоку в зоні обробки не менше 1...2 кПа [84]. Одержаний таким чином, дуговий розряд виконує інтенсивне локальне руйнування металу електрода-заготовки за рахунок випаровування і крапельного викидання розплаву з наступним відведенням продуктів ерозії з зони обробки технічною рідиною.

На рис. 1.1 приведена технологічна схема процесу розмірної обробки дугою. Рідина нагнітається в торцевий міжелектродний проміжок за напрямком від периферії до центру електрода-інструмента, а вилучається із нього разом з продуктами ерозії крізь центральний отвір (канал) в електроді-інструменті. Для забезпечення даного способу прокачування, який отримав назву зворотного, робоча зона верстата для розмірної обробки дугою отворів обмежується герметизованою камерою, яка локалізує зону підвищеного тиску рідини на вході потоку в міжелектродний проміжок. Останнє дозволяє уникнути застосування великогабаритної ванни з робочою рідиною, яка використовується в відомих електроімпульсних верстатах.

Технологічна схема працює наступним чином. Робоча рідина 14 по трубопроводу 13 нагнітається гідронасосом 11 в електроерозійну камеру 6. Через торцевий міжелектродний проміжок за напрямком від периферії до центру електрода-інструмента 5 робоча рідина вилучається крізь центральний канал електрода-інструмента. Після перевірки герметизації

електроерозійної камери, подається напруга від джерела живлення 4 на електрод-інструмент та електрод-заготовку 7.

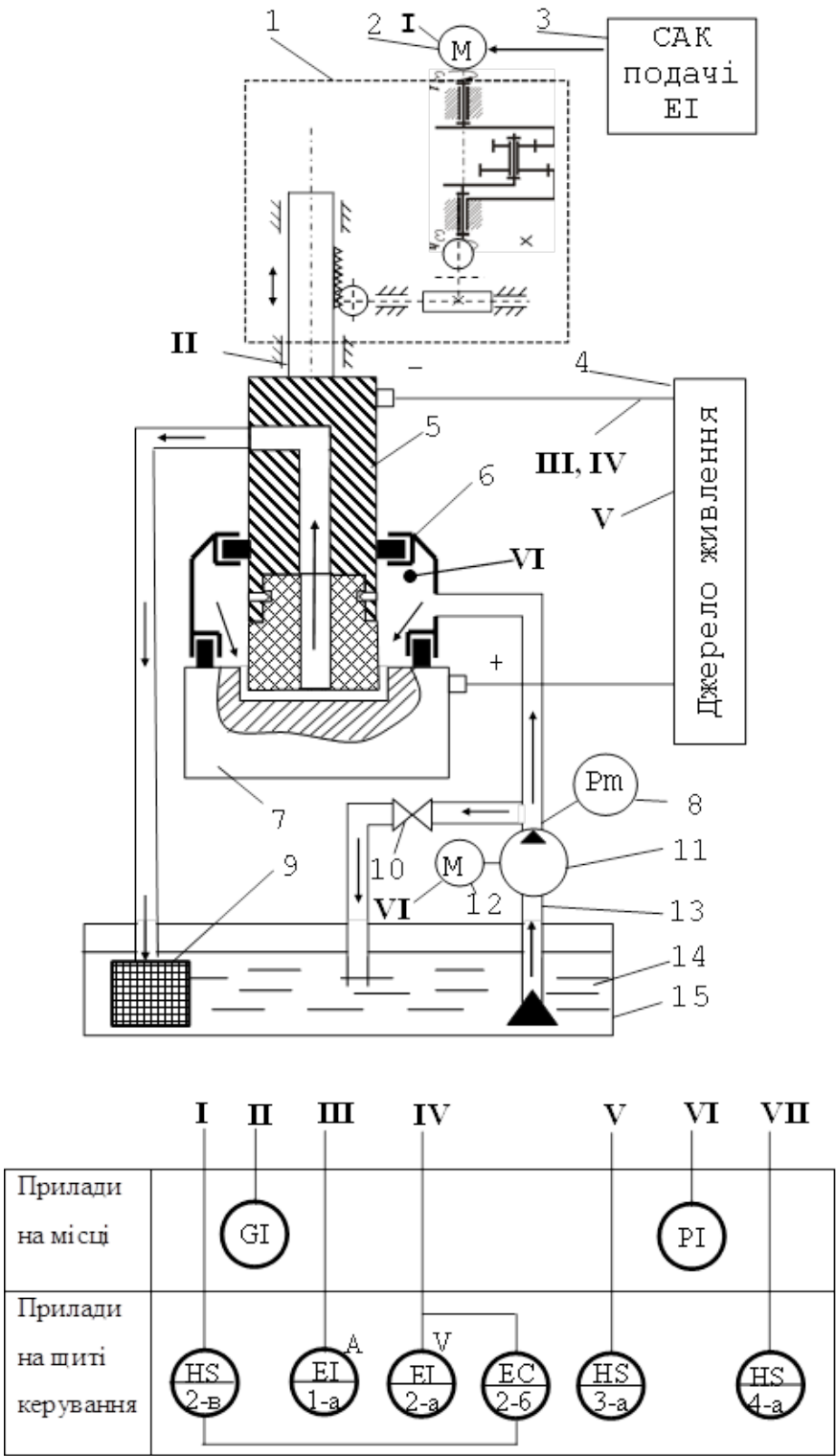


Рис. 1.1. Функціонально-технологічна схема процесу розмірної обробки дугою

Після появи напруги на міжелектродному проміжку система автоматичного керування подачею 3 відпрацьовує похибку неузгодження між напругою завдання і напругою дуги та керує роботою електродвигуна 2, який за допомогою механічної частини подачі 1 переміщує електрод-інструмент. Електрод-інструмент, переміщуючись, зменшує міжелектродний проміжок до нуля, тобто електрод-інструмент торкається електрода-заготовки. При цьому змінюється напруга в міжелектродному проміжку з напруги холостого ходу джерела живлення до напруги короткого замикання. Система автоматичного керування подачі виконує реверс і відводить електрод-інструмент від заготовки, при цьому запалюється електрична дуга, довжина якої в подальшому підтримується на заданому рівні за рахунок зміни подачі електрода-інструмента. В процесі підтримання заданого міжелектродного проміжку в ньому створюється гідродинамічний опір, що призводить до зміни тиску технологічної рідини в електроерозійній камері. Тиск в камері контролюється за манометром 8 і встановлюється за допомогою вентиля 10, який повертає надлишок технологічної рідини в резервуар 15. Робоча рідина відводить продукти ерозії з міжелектродного проміжку, які в подальшому осідають у фільтрі 9, а робоча рідина зливається в резервуар 15.

Розмірна обробка дугою, на відміну від електроіскрової обробки, забезпечує значно більшу продуктивність процесу (в 5...10 разів більше) та менші питомі витрати електроенергії (приблизно вдвічі) [83]. Електроерозійна обробка дозволяє незалежно від твердості та в'язкості отримувати форми деталі відразу по всій поверхні заготовки, що обробляється, при простому поступальному русі електрода-інструмента.

Розроблено ряд верстатів РОД: «ДУГА-2Б», «ДУГА-6», «ДУГА-8», «ДУГА-11», «ДУГА-12», «ДУГА-13», «ДУГА-15», «ДУГА-23» та електроерозійні головки (ЕЕГ) РОД моделей АМН-1 та АМН-2 до настільних свердлувальних верстатів.

Технологічні характеристики процесу розмірної обробки дугою були об'єктом дослідження в роботах [26, 80, 91, 95, 110, 128], за результатами

аналізу яких наведемо математичні моделі обробки способом РОД різних за фізичними властивостями матеріалів (Додаток А).

Характер залежностей продуктивності процесу РОД прийме наступний вигляд [84]:

$$q = k_1 I_{\text{дуги}}^{\alpha} P_d^{\beta} U_{\text{дуги}}^{\gamma}, \quad (1.1)$$

де q – продуктивність процесу, мм³/с; k_1 – коефіцієнт пропорційності; $I_{\text{дуги}}$ – сила струму електричної дуги, А, обмежується площею поперечного перерізу електрода-інструмента і приймається в межах від кількох ампер до декількох тисяч ампер (задається технологічно), визначає продуктивність обробки і таким чином, по суті, відображає кількісну сторону процесу; P_d – динамічний тиск потоку, Па, вибирається в межах від 1 ... 2 кПа до 1 МПа і більше, визначає якість обробки (шорсткість, глибину зони термічного впливу, точність) і таким чином, по суті, відображає якісну сторону процесу; $U_{\text{дуги}}$ – напруга електричної дуги, В; α , β і γ - показники степеню.

Хоча параметр P_d однозначно впливає на якісні показники процесу [80, 83, 95], проте статичний тиск P_s більш зручний для поточного контролю та керування характеристиками процесу. Тому для конкретних технологічних схем формоутворення (Додаток Б.1) замість динамічного тиску P_d доцільно користуватись статичним тиском робочої рідини на вході в міжелектродний зазор P_s , який легко контролюється і опосередковано визначає динамічний тиск [80]. Для визначення залежності між динамічним і статичним тиском, розглянемо технологічну схему формоутворення поверхні в умовах РОД: прошивання циліндричного отвору з фаскою (рис. 1.2).

Враховуючи малі значення міжелектродного проміжку (десяті або соті частки міліметра) та невелику глибину обробки (декілька міліметрів) при визначенні динамічного тиску рідини в довільній точці обробки в умовах РОД можна знехтувати величиною сили тяжіння [80]. Враховуючи дане припущення, запишемо рівняння для визначення статичного тиску на вході в міжелектродний проміжок для перерізів I-I і II-II на рис. 1.2 [128]:

$$P_{s \text{ I-I}} = \frac{\rho v_{\text{II-II}}^2}{2} + \sum_{i=1}^n \lambda \frac{l_i}{d_i} \frac{\rho v_i^2}{2} + \sum_{k=1}^m \xi_k \frac{\rho v_k^2}{2}, \quad (1.2)$$

де P_s – статичний тиск робочої рідини, Па; ρ – густина робочої рідини, кг/м³; $v_{\text{II-II}}$ – швидкість потоку на виході із зазору (в кінці траси), м/с; v_i , v_k – швидкість потоку на відповідних ділянках траси, м/с; λ – коефіцієнт опору на довжині відповідної траси; l_i – довжина відповідної траси, м; d_i – гідравлічний діаметр кільцевого зазору, м; ξ_k – коефіцієнт місцевого опору (вхід в зазор, поворот, вихід); h – товщина електрода-заготовки.

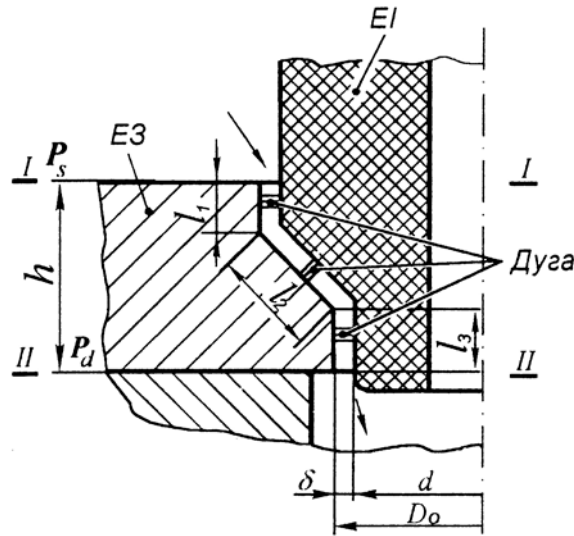


Рис. 1.2. Технологічна схема формоутворення поверхні в умовах РОД: EI – електрод-інструмент; $E3$ – електрод-заготовка; l_1 , l_2 , l_3 – довжина відповідної траси; d – діаметр електрода-інструмента; D_0 – діаметр отвору електрода-заготовки; δ – односторонній міжелектродний зазор; h – товщина електрода-заготовки

При розмірі траси евакуації в кілька міліметрів, визначною є величина місцевого опору ξ_k при переході потоку через місце звуження – міжелектродний проміжок. Із виразу (1.2) для таких випадків можна записати:

$$P_s = \frac{\rho v^2}{2} + \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2} + \xi_k \frac{\rho v^2}{2}, \quad (1.3)$$

звідки динамічний тиск робочої рідини визначають:

$$P_d = \frac{\rho v^2}{2} = \frac{P_s}{1 + \lambda \frac{l}{d} + \xi_k} = \frac{P_s}{K}, \quad (1.4)$$

де ρ – густина робочої рідини, кг/м^3 ; v – швидкість потоку на виході із зазору, м/с ; λ – коефіцієнт опору на довжині відповідної траси; l – довжина відповідної траси, м ; d – гідравлічний діаметр кільцевого зазору; ξ_k – коефіцієнт місцевого опору; K – коефіцієнт втрат тиску (коефіцієнт опору), який може бути розрахований або визначений експериментально. Зокрема, для технологічних операцій розмірної обробки таких як: калібрування і трепанація, K знаходиться в межах $1,6 \dots 2,5$, а при обробці отворів змінного по висоті поперечного перерізу K , становить $6 \dots 7$ [128].

Теоретичні і експериментальні дослідження [80, 128] дозволили зробити висновок, що продуктивність процесу (з достатньою для практики точністю) може бути представлена у вигляді функціональної ступеневої залежності: сили струму $I_{\text{дуги}}$ та статичного тиску потоку робочої рідини на виході в міжелектродний зазор P_s :

$$q = k_2 I_{\text{дуги}}^\alpha P_s^\beta U_{\text{дуги}}^\gamma, \quad (1.5)$$

де k_2 – коефіцієнт пропорційності.

Спосіб РОД дозволяє здійснити практично всі технологічні схеми формоутворення, характерні для обробки металів різанням, та схеми обробки металів тиском, де можна обробити поверхні при прямолінійному поступальному русі електрода-інструмента або електрода-заготовки за принципом прошивання з об'ємним копіюванням форми електрода-інструмента [85].

При розмірній обробці дугою використовуються три основні реалізації схем формоутворення, технологічні схеми яких наведені в додатку Б.1.

Залежно від марки сталі або сплаву, їх глибини обробки та форми отвору застосовують різні технологічні способи отримання деталей: штампування, механічна обробка, газове різання, лазерне різання, плазмова та електроерозійна обробка.

При виборі способу обробки необхідно враховувати показники якості деталі, які частіше визначаються точністю обробки та шорсткістю її поверхні. Достатньою умовою вибору технології обробки деталі є техніко-економічні показники технологічного процесу її виготовлення. Зазвичай, до таких показників відносять продуктивність та технологічну собівартість виготовлення деталей. На практиці, область раціонального застосування способу обробки визначається економічними розрахунками.

У [128] наведено узагальнену методику, яка дозволяє визначити собівартість деталей, що виготовляються із застосуванням розділових операцій. Наприклад, собівартість виготовлення квадратного отвору при програмі випуску до 7 тис деталей на рік буде найнижчою при розмірній обробці дугою [128], і при збільшенні програми випуску найменшою стане собівартість при обробці штампуванням. Якщо складність отвору збільшиться, наприклад, при виготовленні квадратного отвору з фаскою, який застосовується для кріплення лемішних ножів, лап культиваторів, ножів спецтехніки, то перевага по технологічній собівартості за обробкою деталі способом РОД залишається і при програмі випуску до 40 тис. виробів [128]. Це пояснюється тим, що деталі виготовляються з лемішної сталі Л53, Л65 і сталі 65Г, 70Г, глибина обробки яких коливається в залежності від призначення від 5 до 40 мм.

На відміну від розмірної обробки дугою, собівартість технології штампування залежить від твердості металу, який обробляється, так як важкооброблювана сталь негативно впливає на стійкість штамсів, що зменшує термін їх використання.

1.2 Аналіз процесу розмірної обробки дугою, як об'єкта керування

Як зазначалось у розділі 1.1, оператор-верстатник керує процесом розмірної обробки дугою за такими параметрами: напруга дуги, струм дуги,

тиск робочої рідини на вході в електроерозійну камеру, глибина обробки за показами глибиноміра.

Об'єктом керування є процес розмірної обробки дугою постійного струму, що горить в електроерозійній камері між електродом-інструментом і електродом-заготовкою в поперечному потоці робочої рідини, яка прокачується через міжелектродний проміжок.

Для того, щоб відбувся процес розмірної обробки дугою створюються наступні умови:

- в герметичну електроерозійну камеру нагнітається робоча рідина, яка відводиться через технологічний канал в електроді-інструменті. Канал створений таким чином, щоб електрична дуга горіла в поперечному потоці робочої рідини. При горінні електричної дуги тиск на вході у міжелектродний проміжок підтримується в межах від 0,6 до 1,8 МПа;
- електрична дуга живиться від джерела живлення з круто падаючою вольт-амперною характеристикою. При розмірній обробці для забезпечення високої продуктивності та зниження енергоспоживання необхідне горіння стаціонарної електричної дуги;
- величина міжелектродного проміжку повинна підтримуватись системою подачі електрода-інструмента в заданих межах. Залежить від технологічної схеми формоутворення деталі та технологічних параметрів процесу: струм електричної дуги та тиск робочої рідини на вході в міжелектродний проміжок. Зазвичай, зазор підтримується в межах 0,03...0,1 мм.

Величина тиску технологічної рідини задається технологом для кожної конкретної операції і залежить від форми електрода-інструмента, довжини траси евакуації продуктів ерозії та заданої чистоти обробки поверхні. Потужність підведеної електричної енергії обмежується по величині максимально допустимої сили струму, що припадає на площу поперечного перерізу електрода-інструмента. Лінійне переміщення електрода-інструмента змінює величину міжелектродного проміжку і гідродинамічний опір для

робочої рідини, що впливає на форму електричної дуги та її енергетичні можливості.

На виході електроерозійної камери отримуємо продукти електроерозії, що виводяться робочою рідиною. По кількості виведених продуктів електроерозії досить складно визначати стан об'єкту і продуктивність процесу. Тому на практиці для контролю за станом протікання технологічного процесу і, відповідно, за його продуктивністю використовують один або декілька параметрів електричної дуги: струм, напруга, їх співвідношення та інші.

Для визначення впливу збурюючих чинників на об'єкт керування розглянемо узагальнену структурну схему процесу розмірної обробки дугою, яка зображена на рис. 1.3.

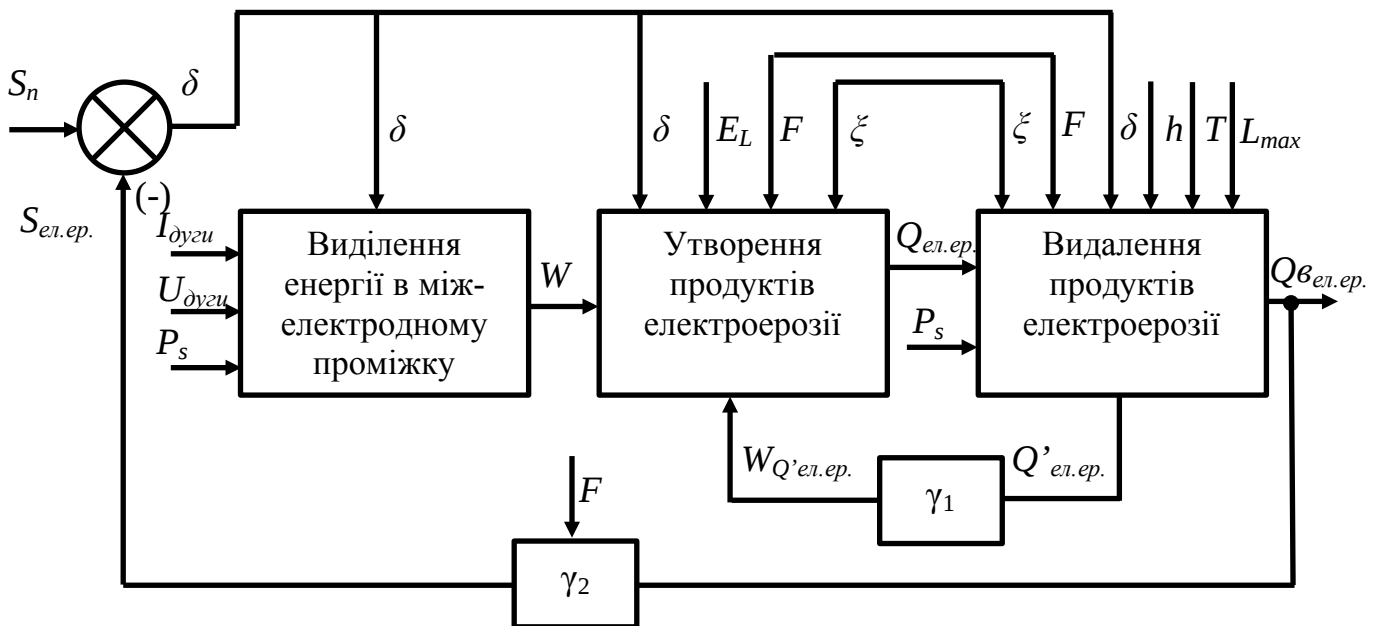


Рис. 1.3. Узагальнена структурна схема процесу розмірної обробки дугою: S_n – лінійне переміщення електрода-інструмента приводом подачі; $S_{ел.ер.}$ – величина електроерозії деталі; δ – міжелектродний проміжок; $I_{дуги}$ – струм електричної дуги; $U_{дуги}$ – напруга дуги; P_s – статичний тиск робочої рідини на вході в міжелектродний проміжок; W – теплова енергія, що виділяється електричною дугою; F – площа обробки; E_L – теплофізичні властивості електродів; ζ – діелектричні властивості робочої рідини; h – глибина обробки; T – температура робочої рідини; L_{max} – максимальна

довжина траси евакуації продуктів електроерозії; $Q_{ел.ер.}$ – утворені продукти електроерозії (продуктивність процесу $\text{мм}^3/\text{хв}$); $Q_{в.ел.ер.}$ – виведена частка продуктів електроерозії; $Q'_{ел.ер.}$ – не виведена частка продуктів електроерозії; $W_{Q'_{ел.ер.}}$ – витрати теплової потужності на підкорочування та руйнування не виведеної частки продуктів електроерозії; γ_1 – коефіцієнт зворотного зв'язку, що враховує витрати теплової потужності $W_{Q'_{ел.ер.}}$, γ_2 – коефіцієнт зворотного зв'язку по величині електроерозії деталі.

Значення струму та напруги дуги ($I_{дуги}$, $U_{дуги}$), тиску робочої рідини P_s є основними складовими, що характеризують теплову потужність W , що виділяється в міжелектродному проміжку [24, 80]. З [78, 80] відомо, що значення струму дуги $I_{дуги}$ характеризує кількісну складову процесу (продуктивність процесу), значення тиску робочої рідини P_s характеризує якісну складову вихідної продукції (шорсткість оброблювальної поверхні), а по значенню напруги дуги $U_{дуги}$ визначають величину міжелектродного проміжку. Характер зміни напруги характеризує динаміку процесу обробки.

Виходячи з того, що $I_{дуги}$, P_s задані технологічно і на протязі часу обробки деталі регулюються вручну оператором-верстатником, то дані параметри в подальшому на структурних схемах процесу відображатись не будуть.

Міжелектродний проміжок δ утворюється з різниці між значеннями лінійного переміщення електрода-інструмента та лінійної величини електроерозії. Значення лінійної величини електроерозії отримується з кількості утворених і виведених продуктів електроерозії, приведеної до площі обробки F , що і відображає коефіцієнт зворотного зв'язку γ_2 .

Технічно складно виміряти продуктивність процесу розмірної обробки дугою, особливо при змінній площі обробки та величині міжелектродного проміжку, тому використовують непрямі параметри, які можна точно виміряти і які відображають процеси в зоні обробки, зв'язані з продуктивністю і величиною міжелектродного проміжку, а саме: струм і

напруга дуги, тиск робочої рідини на вході в міжелектродний зазор. Використовуючи (1.4) та математичні моделі (додаток А) можна аналітично визначати продуктивність процесу.

Виходячи з вищенаведеної інформації та на основі методу змінних стану [33, 41] процес розмірної обробки можна представити, як багаторежимний об'єкт, структурна схема якого наведена на рис. 1.4.

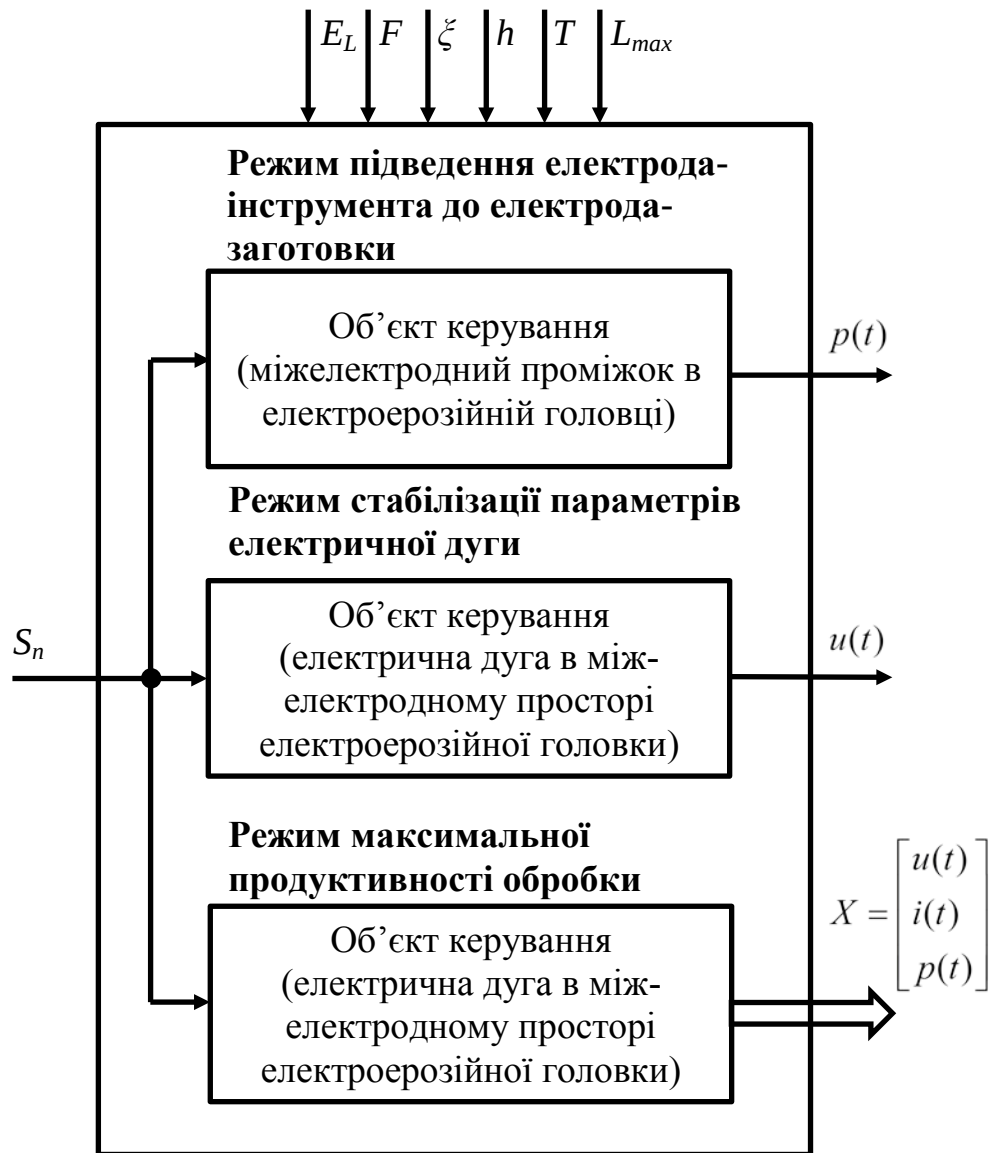


Рис. 1.4. Структурна схема процесу розмірної обробки, як об'єкта керування

В науковій літературі [5, 8, 12, 81, 111] найбільшу увагу при розгляді автоматизації процесу розмірної обробки приділяють режиму стабілізації

параметрів дуги і майже не приділяють уваги режиму підведення електрода-інструмента до електрода-заготовки та екстремальному режиму по продуктивності обробки. В процесі розмірної обробки об'єкт одночасно може знаходитись, і відповідно, керуватись тільки в одному з вищезначених режимів.

В якості вхідного параметра на всіх режимах використовується значення лінійного переміщення електрода-інструмента.

При роботі об'єкта в режимі підведення електрода-інструмента до електрода-заготовки, електрична дуга в міжелектродному проміжку не горить, і напруга на електродах відповідає напрузі холостого ходу джерела живлення. Тому в даному режимі нами запропоновано (і в подальшому реалізовано [9]) використовувати в якості вихідного параметра тиск робочої рідини, так як за апіорною інформацією він збільшується при зменшенні міжелектродного проміжку.

При роботі об'єкта в режимі стабілізації параметрів електричної дуги, на початку процесу стабілізації електрична дуга в міжелектродному проміжку горить нестійко, що характеризується частими обривами дуги та короткими замиканнями, коливання напруги дуги відбуваються від нуля до напруги холостого ходу джерела живлення. При досягненні стабільного горіння дуги процес розмірної обробки на даному режимі наближається до квазіоптимального режиму по продуктивності [38]. Як показали попередні дослідження [44, 46, 77] та існуючі системи стабілізації при роботі об'єкта в даному режимі доцільно використовувати в якості вихідного параметра напругу на дузі, і по значенню її відхилення від заданого значення збільшувати або зменшувати швидкість подачі електрода-інструмента.

При роботі об'єкта в режимі максимальної продуктивності в міжелектродному проміжку повинна горіти стаціонарна електрична дуга. Процес горіння дуги стабілізований, за апіорними даними, розмах коливання напруги дуги складає 10-15 В (напруга дуги 20..40 В). Продуктивність процесу визначається опосередковано по математичним

моделям (Додаток А). Для визначення продуктивності обробки в реальному часі необхідно знати матеріал електродів, площу обробки, її складність в плані, миттєві значення напруги і струму дуги та тиску робочої рідини в електроерозійній камері. Тому при роботі об'єкта в даному режимі можливо використовувати в якості вихідного параметра вектор миттєвих значень напруги і струму дуги та тиску робочої рідини в електроерозійній камері.

Для спрощення на структурних схемах будемо представляти процес РОД у вигляді однієї з його структур. Наприклад, при розгляді режиму роботи в якості екстремальної системи по продуктивності будемо зображати процес розмірної обробки, як на рис. 1.5.



Рис. 1.5. Спрощена структурна схема процесу розмірної обробки, як об'єкта керування

Оскільки по діючим миттєвим значенням параметрів струму і напруги дуги $i(t)$, $u(t)$ та тиску робочої рідини на вході в міжелектродний проміжок $p(t)$ можна характеризувати стан процесу при будь-якому режимі роботи, тому ми їх розглядаємо як вихідні параметри об'єкта керування, формуючи значення трьох параметрів у матриці X .

1.3. Технологічні особливості роботи системи автоматичного керування процесу розмірної обробки дугою, які впливають на його енергоефективність

Основним завданням САК переміщенням електродів є стабілізація процесу розмірної обробки (стабілізація довжини електричної дуги,

стабілізація потужності дуги, тощо.)

Досягнення максимальної продуктивності розмірної обробки дугою можливо лише при стабільному процесі. Стабільним вважається процес, у якого відхилення параметрів від середнього значення не перевищує заданого рівня на даній вибірці спостереження або розрахунку керувального впливу [63].

Найчастіше під стабільністю процесу розмірної обробки дугою розуміють стабільність горіння електричної дуги і стабільність електроерозії деталі (електрод-заготовка). На даний час не існує єдиного загальноприйнятого поняття: рівень стабільності процесу розмірної обробки дугою. Саме це ускладнює кількісну оцінку процесу і створює розбіжності в величинах, що характеризують його рівень стабільності. Це пов'язано з тим, що миттєві значення напруги або її імпульси можуть приймати значення в широкому діапазоні від нуля до напруги холостого ходу джерела живлення. На практиці їх поділяють на: напругу (імпульси) холостого ходу, напругу (імпульси) короткого замикання та робочу напругу (імпульси).

Розмірна обробка дугою характеризується показниками якості і ефективності процесу. Як зазначалось у розділі 1.1, на якість обробки (шорсткість, глибина зони термічного впливу, точність відтворення поверхні) має найбільший вплив величина підведеного тиску робочої рідини і форма електрода-інструмента. Форма електрода-інструмента впливає на рівномірність розподілу гідродинамічного опору і відповідно на ефективність відведення продуктів ерозії з зони міжелектродного проміжку. Ефективність процесу характеризується продуктивністю обробки і залежить від кількості теплової енергії, що витрачається на електроерозію деталі.

Теплову енергію дуги можна представити як суму самостійно діючих трьох джерел тепла в анодній області, катодній області та стовпі дуги [110]:

$$W = W_k + W_c + W_a, \quad (1.6)$$

де W_k – теплова потужність катодної області дуги, Вт·год; W_c – теплова потужність стовпа дуги, Вт·год; W_a – теплова потужність анодної області дуги, Вт·год.

При розмірній обробці дугою не вся енергія джерела дуги, що надходить від джерела живлення, перетворюється на тепло і вводиться в заготовку. Типовий енергетичний баланс дуги в умовах РОД розглянутий в [22, 24, 80] і представлений на рис. 1.6.

В роботах [24, 109, 110] на підставі технологічного аналізу визначено, що енергія джерела, без врахування витрат у провідниках, які підводять її до електроерозійної головки, розподіляється на три нерівномірні частини, що відповідають катодній зоні (30 – 35 %), анодній зоні (35 – 45 %) і зоні горіння стовпа дуги (30 – 25 %).

Анодна і катодна зони мають по відношенню до зони горіння стовпа дуги дуже малі (близько 10^{-7} м) фіксовані зони, розмір (ширина) яких не змінюється в процесі стабільного горіння дуги.

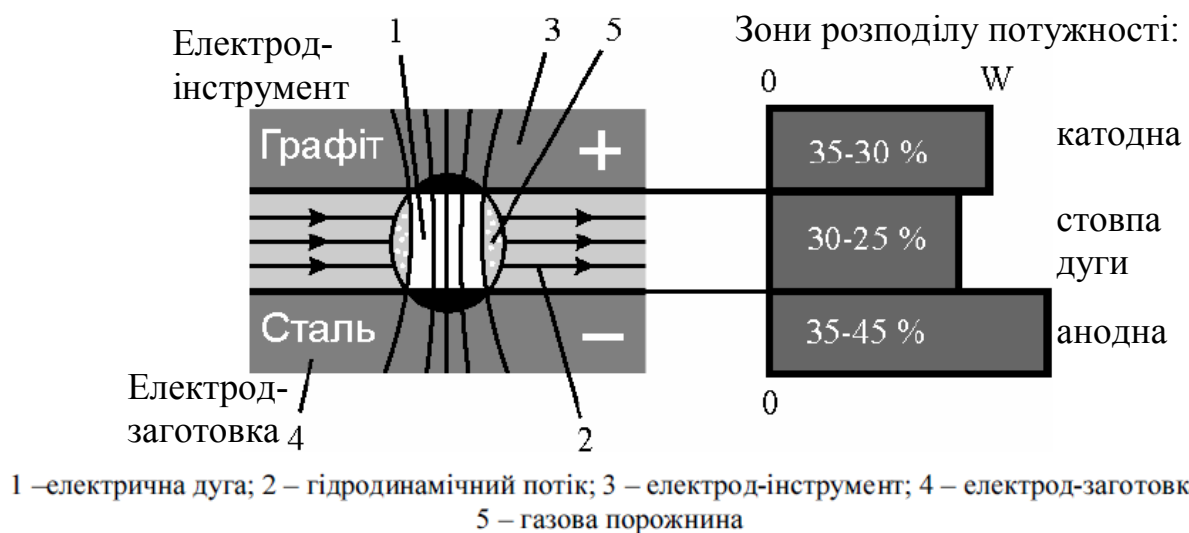


Рис. 1.6. Енергетичний баланс дуги в умовах розмірної обробки дугою

В роботах [46, 80, 110, 128] обґрунтовані параметри величин при яких відбувається горіння дуги процесу РОД. Параметр падіння напруги дуги (для матеріалу електрода-інструмента – графіт типу МПГ-7, електрода-заготовки

– сталь) знаходиться в межах 15...50 В (враховуючи, що сума напруг падіння дуги в анодній і катодній зонах, для вищезначеного матеріалу електродів складає 10...20 В, а напруга зони стовпа дуги складає 5...30 В).

При зміні довжини стовпа дуги змінюється і розподіл енергії джерела по зонах. Збільшення кількості енергії (тепла) в катодній і анодній зонах пояснюється його перерозподілом: зменшенням втрат в зоні стовпа дуги за рахунок зменшення довжини дуги і, відповідно, втрат на підтримання стовпа дуги та втрат на розсіювання енергії (тепла) в середовищі робочої рідини, що прокачується в міжелектродному проміжку.

Зменшення потужності (падіння напруги) зони стовпа дуги впливає на рівень стабільності процесу. При зменшенні потужності стовпа дуги відбувається зменшення рівня стабільності процесу, що пояснюється збільшенням дуг (імпульсів) короткого замикання через продукти ерозії, які відводяться з міжелектродного проміжку.

Теплова природа електроерозійної обробки була досліджена в працях [50, 72, 76, 133], тому можна стверджувати, що продуктивність електроерозійної обробки залежить від інтенсивності введення в зону обробки теплової енергії (через технологічний струм), а стабільність процесу за інших рівних умов визначається збалансуванням між кількістю зруйнованого та вилученого за межі міжелектродного проміжку металу (у вигляді продуктів ерозії) в одиницю часу. Зрозуміло, що найбільшу енергоефективність (продуктивність) електроерозійної обробки можна отримати, коли тепла енергія виділяється у зону обробки безперервно, тобто без пауз (шпаруватість $q = 1$).

В існуючих на даний час САК процесом розмірної обробки дугою величина довжини дуги L_d і, відповідно, падіння напруги дуги $U_{\text{дуги}}$, при якій забезпечується її стабілізація визначається оператором-верстатником, виходячи з його професійного досвіду. Стабілізація параметрів процесу розмірної обробки дугою відбувається за рахунок зміни величини подачі електрода-інструмента і контролю за тиском робочої рідини на вході в

міжелектродному проміжку. Оператор-верстатник на протязі всього часу операції обробки деталі повинен спостерігати за значенням параметрів процесу розмірної обробки дугою (напруга дуги, струм дуги, тиск робочої рідини на вході в міжелектродний проміжок), а в разі необхідності - коригувати їх та контролювати глибину обробки деталі.

Тому дуже складно підібрати значення падіння напруги дуги $U_{\text{дуги}}$, при якій довжина стовпа дуги буде мінімальною (оптимальною) при збереженні стабільності процесу, а при обробці поверхонь фасонним електродом це майже неможливо.

Визначення мінімальної довжини стовпа дуги по напрузі падіння дуги в міжелектродному проміжку, при якій зберігається максимальний рівень стабільності процесу розмірної обробки дугою, і є резервом для збільшення енергоефективності (продуктивності) обробки деталі і зменшення енергомісткості операції. Особливо це актуально при автоматичному підтриманні такого квазіоптимального процесу на протязі всього часу обробки деталі.

Довжину дуги безпосередньо виміряти складно, тому застосовують інші координати керування, які опосередковано свідчать про властивості дуги і за якими відбувається керування САК подачі ЕІ. Їх вибирають з таких умов: наявність достатньо тісної і монотонної функціональної залежності координати керування з довжиною дуги; можливість автоматичного запалювання дуги у разі її обриву; точність і надійність датчиків (для вимірювання струму дуги використовуємо датчик типу LF 305 – S з точністю вимірювання $\pm 0,4\%$; для вимірювання тиску робочої рідини датчик типу 628CR з точністю вимірювання $\pm 1\%$; для вимірювання переміщення електрода інструмента – датчик типу CLP(R)13-25 з не лінійністю $\pm 0,7\%$).

На сучасних верстатах ЕЕО в якості координати керування використовують діючі значення струму дуги $I_{\text{дуги}}$ та напруги дуги $U_{\text{дуги}}$. Вони безпосередньо залежать від довжини дуги L_d [71]. Так, довжина дуги L_d зв'язана з напругою дуги $U_{\text{дуги}}$ виразом:

$$U_{\text{дуги}} = \alpha + \beta L_{\text{д}}, \text{ В.} \quad (1.7)$$

де $\alpha = U_a + U_k$ - сума анодного і катодного падіння напруги, В; β - градієнт напруги в стовпі дуги, В/мм.

На рис. 1.7, а показано графічну залежність напруги дуги від довжини дуги [71]. Загальновідомо, що при усталеному процесі розмірної обробки дугою зв'язок напруги дуги з довжиною дуги є лінійним. Зв'язок струму дуги від довжини дуги має нелінійний характер і його вигляд, показаний на рис. 1.7, б.

За допомогою струму і напруги дуги реалізують зворотний зв'язок для САК переміщенням електродів - напругу неузгодження ΔU_p , яка дорівнює [71]:

$$\Delta U_p = aI - bU_{\text{д}}, \quad (1.8)$$

де a і b - постійні коефіцієнти, що визначають довжину дуги (уставку), котру має забезпечити САК в режимі стабілізації положення електрода.

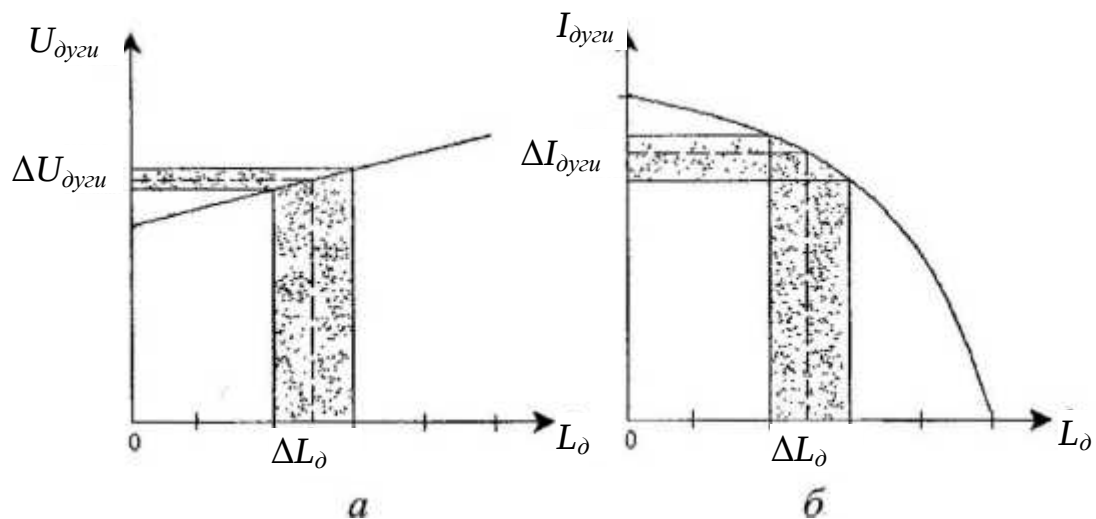


Рис. 1.7. Вплив довжини дуги на струм та напругу дуги: а-залежність

$$U_{\text{дуги}} = f(L); \text{ б – залежність } I_{\text{дуги}} = f(L).$$

Побудовані за (1.8) САК отримали розповсюдження у спорідненому до РОД процесі стабілізації параметрів електричної дуги (горіння електричної дуги в дугових печах).

1.4 Огляд і аналіз систем автоматичного керування процесом розмірної обробки дугою

Автоматизацію процесу розмірної обробки дугою будемо розглядати з двох важливих позицій: підвищення продуктивності та зменшення енерговитрат при виробництві деталі із збереженням її якісних показників. Необхідно відмітити, що на даний час на електроерозійних верстатах з електроерозійною головкою АМН-1 подача електрода-інструмента виконується безпосередньо оператором-верстатником вручну. Тому його кваліфікація значно впливає на продуктивність процесу обробки деталі та її якість.

Питання автоматичного керування технологічним процесом розмірної обробки дугою виникли одночасно з розвитком і промисловим впровадженням верстатів розмірної обробки дугою. Керування технологічним режимом можливе за рахунок зміни ряду чинників, що характеризують процес, а саме: струм і напруга дуги, швидкість і склад потоку робочої рідини, матеріал електрода і заготовки, міжелектродний проміжок, полярність електродів, тощо. Як показали дослідження [46, 77], для верстатів розмірної обробки дугою головним напрямком в автоматизації електроерозійного процесу була і залишається реалізація процесу керування подачею електрода-інструмента, що приводить до зміни і підтримання заданої величини міжелектродного проміжку. Для традиційного способу електроерозійної обробки (електроімпульсна або електроіскрова обробка) було розроблено ряд автоматичних систем керування, більшість з яких можна використовувати і на верстатах РОД.

У 70-х роках минулого століття були розроблені САК непрямої дії для верстатів електроерозійної обробки з електромагнітними підсилювачами, напівпровідниковими підсилювачами [38, 117]. В якості параметра, що підлягає контролю, найбільше розповсюдження отримала величина середнього значення падіння напруги в міжелектродному проміжку.

Величина отриманого падіння напруги в міжелектродному проміжку порівнюється з напругою задавача, а їх різниця підсилюється і подається в систему керування приводом подачі електрода-інструмента. До переваг таких систем віднесемо простоту отримання, перетворення і порівняння сигналу зворотного зв'язку з сигналом завдання. До їх недоліків можна віднести: відсутність контролю за продуктивністю, складність вибору рівня напруги задавача, яка до теперішнього часу встановлюється оператором у відповідності з його кваліфікацією.

У [66] запропонована конструкція екстремального регулятора для електроіскрових електроерозійних верстатів, яка автоматично встановлювала значення напруги на потенціометрі задавача, що відповідало максимуму продуктивності обробки. Така САК процесом електроерозійної обробки полегшувала працю оператора і створювала можливість впровадження технологічного процесу багатOVERстатного обслуговування. Але регулятор мав ряд недоліків: складність схеми з застосуванням спеціальних аналізаторів імпульсів; часта зміна уставки задавача погіршувала його контактну поверхню, знижуючи надійність; схема керування складалась з ряду релейних елементів з великою кількістю перемикаючих контактів. Вищезначені недоліки знижували надійність системи і ускладнювали її експлуатацію.

У [66] розглядаються конструктивні особливості і робота трипозиційного релейного регулятора типу ППР. Керуючим вхідним параметром регулятора є напруга дуги. Регулятор налаштовується на верхній і нижній пороги спрацювання. Якщо величина напруги в міжелектродному проміжку знаходиться між пороговими значеннями, то напруга на приводному двигуні дорівнює нулю. Якщо напруга більше (менше) порогових значень, то на приводний двигун подачі ЕІ прикладається від'ємне (додатне) значення напруги, що забезпечує подачу ЕІ «вниз» або «вгору». Недоліком розглянутого алгоритму керування подачею є робота з частими

реверсами електромеханічної системи подачі, що призводить до зниження продуктивності обробки деталі в цілому.

Крім систем, що використовують непрямі параметри визначення міжелектродного проміжку і визначення продуктивності, розроблялися системи екстремальних регуляторів з безпосереднім вимірюванням продуктивності [38]. Тут мається на увазі, що продуктивність процесу пропорційна величині лінійного переміщення електрода-інструмента при незмінній площі обробки і величині міжелектродного проміжку. Визначення оптимальної величини уставки регулятора відбувається за рахунок вимірів величин лінійного переміщення електрода-інструмента за певний проміжок часу. Недолік таких систем полягає в складності їх реалізації. Датчики лінійних переміщень при великій довжині вимірювання суттєво збільшують вартість системи. Пошук екстремуму займає значну частину часу, яка також залежить від вибору оператором початкової уставки. При обробці фасонних поверхонь пошук екстремуму даним способом майже неможливий. Ці недоліки обмежують використання даних САК.

Проблемою підтримки режиму горіння дуги при розмірній обробці дугою займалися Смірнова Н. В., Смірнов В. В. в [111], які запропонували метод визначення оптимальних параметрів робочої точки дуги. Даний метод заснований на залежності взаємної кореляції між величинами струму і напруги дуги та на значенні коефіцієнта кореляції, який розраховують за даними значень струму і напруги дуги на початку і кінці інтервалу вибірки. Так як значення струму і напруги дуги в процесі РОД мають стохастичний характер [26, 80], то вибір значень на кінцях інтервалу, які є випадковою величиною, можуть дати помилкове значення коефіцієнту нестабільності. До недоліку запропонованого методу можна віднести малий розмір вибірки часових параметрів дуги (до 2 мс), які використовуються при розрахунку взаємної кореляції струму і напруги дуги. Це буде вимагати високої швидкодії приводу подачі, оскільки необхідно виробляти керувальний вплив за малий час вибірки.

Як вже зазначалось, для електроерозійних верстатів падіння напруги в міжелектродному проміжку є основним вхідним параметром системи автоматичного керування подачі електрода-інструмента, а її вихідним параметром є команда, що змінює величину його подачі.

На існуючих верстатах розмірної обробки дугою отримала розповсюдження система автоматичної стабілізації по напрузі дуги, структурна схема якої наведена на рис. 1.8 [38].

Розглянемо роботу САК, що стабілізує процес більш детально. Оператор вибирає напругу завдання, значення якої відповідає міжелектродному проміжку. Регулятор стабілізації процесу до значення напруги завдання додає $\pm 3,5$ В, задаючи таким чином зону стабілізації і, відповідно, зону горіння дуги. При надходженні напруги дуги на вхід регулятора, вона нормалізується (приводиться до значення від 0 до 5 В) і порівнюється з напругою завдання. По величині сигналу неузгодження формується значення завдання величини подачі для приводу подачі. Якщо значення напруги дуги вийшло за нижню границю зони стабілізації, то формується команда на підняття електрода-інструмента до верхньої зони горіння. Створюючи поступальні рухи «вниз» і «вгору», підтримується задане значення міжелектродного проміжку.

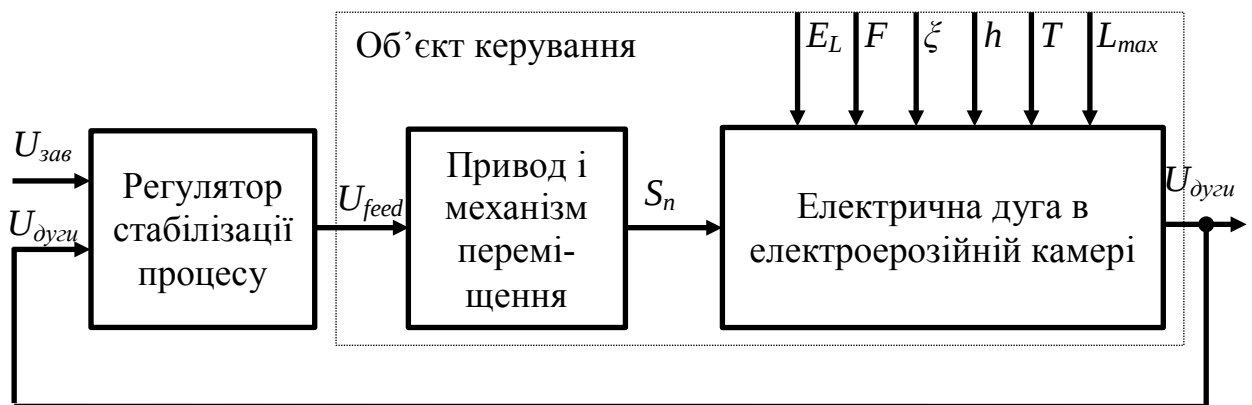


Рис. 1.8. Структурна схема системи автоматичної стабілізації процесу розмірної обробки дугою: $U_{зав}$ – напруга завдання діапазону горіння; U_{feed} – значення напруги завдання подачі; S_n – лінійне переміщення електрода-інструмента; $U_{дуги}$ – напруга дуги; E_L – теплофізичні властивості електродів;

F – площа обробки; ξ – діелектричні властивості робочої рідини; h – глибина обробки; T – температура робочої рідини; L_{max} – максимальна довжина траси евакуації продуктів ерозії.

Адаптивні САК процесу розмірної обробки дугою в основу яких покладена, наприклад, нечітка логіка та нейронні мережі на даний час не розроблені. Розробка САК подачі електрода-інструмента також ускладнюється тим, що на даний час не існує єдиного, як відмічалось вище, загальноприйнятого поняття рівня стабільності процесу РОД [102].

В дослідженнях, пов'язаних зі створенням САК міжелектродного проміжку, найважливіші задачі розв'язані переважно на основі апріорного підходу в питаннях синтезу структури системи та вибору алгоритмів керування процесом подачі електрода-інструмента. Це пояснюється недостатніми теоретичними дослідженнями електроерозійного процесу, як об'єкту автоматичного керування, що призвело до того, що робіт по даній темі значно менше, ніж питань по технічній і практичній реалізації електромеханічних систем керування процесом електроерозійної обробки.

В працях [80, 81] в основному описуються лише умови, при яких був отриманий стабільний процес при різних способах формоутворення для конкретної форми, площі і матеріалу електрода-інструменту, та наводяться двофакторні (струм дуги, статичний або динамічний тиск на вході в міжелектродному проміжку) і рідше багатofакторні (струм дуги, статичний або динамічний тиск на вході в міжелектродному проміжку, падіння напруги в міжелектродному проміжку, глибина обробки, площа обробки, тощо) математичні моделі технологічних характеристик процесу РОД. Тобто при зміні геометричних параметрів та матеріалу електрода-інструменту та електрода-заготовки від зазначених у [80, 81] математичні моделі не можуть бути використані для прогнозування та наукового обґрунтування вибору режимів обробки в залежності від зміни даних параметрів.

1.5 Шляхи підвищення продуктивності процесу розмірної обробки дугою

Проведений аналіз в розділах 1.1-1.4 показав, що існуючі системи автоматичного керування вирішують тільки основну задачу - стабілізація процесу розмірної обробки дугою, і не вирішують наступні задачі:

- автоматичне керування подачею електрода-інструмента при відсутності горіння дуги;
- автоматичне визначення рівня стабільності процесу розмірної обробки з врахуванням стохастичного характеру горіння дуги;
- автоматичне керування подачею електрода-інструмента, при якій досягається максимум продуктивності процесу обробки деталі;
- автоматичне вимикання подачі електрода-інструмента при досягненні заданої глибини обробки.

Розглянемо особливості означених вище невирішених задач.

1. Режим автоматичного керування подачею електрода-інструмента при відсутності горіння дуги виникає при підведенні електрода-інструмента в зону обробки деталі.

Процес розмірної обробки розпочинається із запалювання дуги. Відомо, що збільшення швидкості переміщення електрода-інструмента при підведенні його до заготовки збільшить силу удару між ними, що виникає на стадії запалювання дуги. Момент запалювання дуги супроводжується різким підвищенням сили струму – з'являється струм короткого замикання. Так як системи подачі електрода-інструмента мають інерційність, то в момент запалювання дуги можливе максимальне ударне навантаження між електродом і деталлю. До пошкоджень і сколів робочої поверхні електрода-інструмента зазвичай приводить стискаюче зусилля, що виникає від ударного навантаження, яке перевищує критичне значення ударної в'язкості електрода інструмента.

Тому в системах керування швидкістю подачі електрода-інструмента при запалювання дуги використовуються такі способи:

- швидкість підведення обмежується системою автоматичного керування значенням, при якому ударні навантаження на електрод-інструмент будуть створювати стискаючі зусилля менші критичного їх значення;

- швидкість підведення покладається на досвід і кваліфікацію оператора.

Для того, щоб з мінімальними витратами часу виконати подачу електрода-інструмента в зону обробки, необхідно визначити момент часу, коли необхідно перейти з підвищеної до робочої швидкості переміщення електрода-інструмента.

Тому розробка підсистеми, яка автоматично збільшить швидкість подачі до моменту часу близького до запалювання дуги і зменшить її до робочої (або мінімальної) швидкості при запалюванні дуги дозволить оптимізувати час підведення електрода-інструмента до електрода заготовки і зберігати ЕІ від руйнування.

2. Підсистема автоматичної стабілізації процесу розмірної обробки починає працювати після першого короткого замикання. Вхідним параметром процесу керування є лінійне переміщення електрода-інструмента, а вихідним параметром – напруга дуги, по якій відбувається контроль і регулювання міжелектродного проміжку.

В існуючих автоматичних системах стабілізація параметрів процесу розмірної обробки дугою відбувається наступним чином. Усереднене значення напруги дуги за період вибірки порівнюється з заданим значенням і по величині сигналу похибки неузгодження виконується збільшення або зменшення величини подачі електрода-інструмента.

Підтримання заданого міжелектродного проміжку (по напрузі дуги) за рахунок встановлення такої подачі електрода-інструмента, яка б дорівнювала швидкості електроерозії електрода-заготовки в кожен момент часу і є основним завданням автоматичної системи стабілізації параметрів розмірної обробки дугою.

Оскільки на даний час не існує єдиної загальноприйнятої методики, що характеризує рівень стабільності процесу розмірної обробки дугою, то її розробка і впровадження в процес стабілізації дозволить кількісно оцінити його рівень та автоматично вибрати зону стабілізації, при якій досягається її максимальне значення.

Як показали раніше проведені дослідження [38, 98, 101], максимальна продуктивність обробки деталі досягається лише при стабільному процесі. Більшість існуючих систем стабілізації є автоматизованими системами по підтримці заданого параметра. Для роботи автоматичної підсистеми стабілізації параметрів розмірної обробки дугою, яка б виконувала швидку стабілізацію процесу і підтримання безпаузного горіння дуги в процесі обробки всієї деталі необхідна кількісна оцінка рівня стабільності процесу в реальному часі. При цьому необхідно враховувати, що процес горіння дуги є стохастичним процесом [96].

Автоматична підсистема може підтримувати режим, близький до оптимального по продуктивності.

3. Автоматичне керування подачею електрода-інструмента, при якій досягається максимум продуктивності процесу обробки деталі.

Зазвичай максимальну продуктивність процесу отримують при використанні автоматичних підсистем пошуку екстремуму по продуктивності.

Стохастичний характер процесу горіння дуги при розмірній обробці дугою в умовах дії різних збурювальних чинників (температурних, зміна складу технічної рідини, зміна профілю електрода, зміна глибини обробки), а також нелінійність об'єкта керування, суттєво ускладнюють побудову системи автоматичного пошуку екстремуму по продуктивності.

Основна проблема при реалізації екстремальних систем керування полягає в забезпеченні суперечливих вимог щодо точності та стійкості процедури пошуку екстремуму цільової функції [66]. При розмірній обробці дугою мають місце ряд функцій екстремального характеру, а саме [38, 66]:

$$Q = f(\delta), \quad (1.9)$$

$$Q = f(\gamma), \quad (1.10)$$

$$Q = f(I_{\text{дуги}}), \quad (1.11)$$

$$Q = f(P_s), \quad (1.12)$$

$$Q = f(A), \quad (1.13)$$

де Q – продуктивність процесу; δ – проміжок (зазор) між електродами (електродом і заготовкою); γ – концентрація продуктів ерозії; $I_{\text{дуги}}$ – струм дуги; P_s – статичний тиск робочої рідини на вході в міжелектродний простір; A – амплітуда коливань електрода-інструмента.

На електроерозійних верстатах знайшли застосування системи пошуку екстремуму по функції продуктивність – зазор (1.9) [38]. Відомо з [31], що функція $Q = f(\delta)$ в двох кінцевих точках кривої (холостого ходу та короткого замикання) приймає значення, рівне нулю, коли зазор більше пробивної напруги джерела живлення та коли зазор дорівнює нулю. Тому, виходячи з теореми Ролля, функція $Q = f(\delta)$ має хоча б один екстремум. Враховуючи, що величина Q позитивна, то можна стверджувати, що точка екстремуму функції є точкою максимуму. Тому функція $Q = f(\delta)$ має одне значення екстремуму в кожен конкретний момент часу. В результаті зміни збурювальної дії точка екстремуму постійно зміщується, як це схематично зображено на рис. 1.9

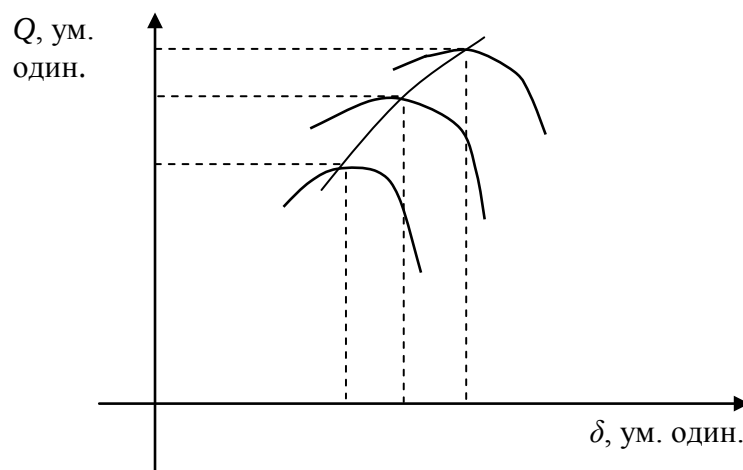


Рис. 1.9. Екстремальна характеристика по функції продуктивність – зазор

Миттєву продуктивність процесу при екстремальному регулюванні прямим методом майже неможливо визначити, тому її визначають опосередковано по відомим математичним моделям продуктивності обробки, наведеним в додатку А, або іншим.

Виходячи з отриманої інформації, створюються робочі керувальні команди, що забезпечують досягнення екстремуму цільової функції. Таким чином, при екстремальному регулюванні вирішуються дві задачі [118]:

- визначення градієнта цільової функції на об'єкті (за допомогою різних методик), що визначає напрямок руху до екстремуму при наявності завад, збурень та інерційності об'єкта оптимізації;
- організація сталого руху системи в напрямку екстремуму.

Для реалізації екстремального регулятора по продуктивності виникає необхідність у попередній стабілізації процесу РОД і вирішення наступних завдань: вибір способу визначення продуктивності процесу РОД; розрахунок цільової функції екстремального регулятора по вхідним параметрам процесу РОД.

У об'єкта при екстремальному керуванні вхідним параметром є лінійне переміщення електрода-інструмента, а вихідним є матриця $X=[i(t), u(t), p(t)]$, що характеризує параметри дуги (струм та напруга дуги, тиск робочої рідини на вході в міжелектродний проміжок).

Необхідність створювати спеціальні автоматичні підсистеми виникає тоді, коли об'єкт керування складається з динамічної частини і статичної екстремальної характеристики, яка в процесі роботи може змінюватись непередбачуваним чином, зберігаючи при цьому екстремальний вигляд [120]. Блок-схема такого об'єкта керування зображена на рис. 1.10.

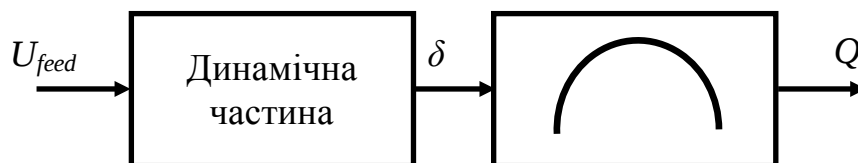


Рис. 1.10. Блок-схема об'єкта керування з екстремальною характеристикою: U_{feed} – значення напруги завдання подачі; δ – вихідна

змінна динамічної частини (міжелектродний проміжок); Q – функція якості, яка має екстремум (продуктивність процесу розмірної обробки дугою)

При створенні автоматичної підсистеми пошуку екстремуму по продуктивності обробки необхідно синтезувати такий регулятор, який забезпечив би в системі виконання умови:

$$\underset{\delta}{extr}Q(t, \delta) = Q_0, \quad (1.14)$$

де Q_0 - екстремальне значення статичної характеристики; $Q(t, \delta)$ – скалярна екстремальна характеристика з дрейфом характеристики, що відображає залежність від часу t .

4. Автоматичне вимкнення подачі електрода-інструмента при досягненні заданої глибини обробки.

На верстатах розмірної обробки дугою не вирішена задача автоматичного вимикання подачі електрода-інструмента при досягненні заданої глибини обробки, особливо це актуально при використанні плавких електродів-інструментів, так як в процесі обробки необхідно враховувати їх спрацювання. На діючих верстатах контроль за глибиною обробки деталі покладається на оператора-верстатника.

Реалізація та впровадження вище розглянутих підсистем дозволить розв'язати раніше невирішені задачі по автоматизації верстату розмірної обробки дугою, що дозволить підвищити продуктивність процесу обробки деталі та позиціонувати верстат як напівавтомат.

Як зазначалось у розділі 1.2 (рис.1.3) керування процесом розмірної обробки можна описати трьома режимами: режим підведення електрода-інструмента до електрода заготовки, режим стабілізації параметрів електричної дуги, екстремальний режим по продуктивності обробки. Кожен робочий режим виконується тільки в конкретний момент часу і при цьому вони ніколи не накладаються, а тільки переходять з одного в інший. Схематично рух режимів при РОД можна зобразити, як послідовність станів об'єкта керування (рис. 1.11).

Враховуючи багаторежимність процесу розмірної обробки та користуючись рис. 1.4 та 1.10 складемо на їх основі блок схему об'єкта керування (рис.1.12).

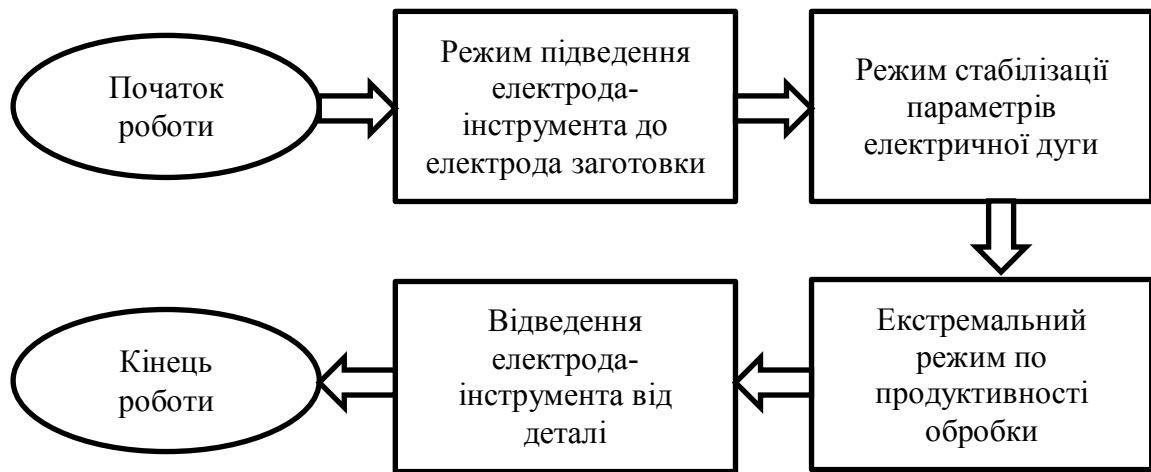


Рис. 1.11. Рух режимів роботи при розмірній обробці дугою



Рис. 1.12. Блок схема об'єкта керування: $p(t)$, $u(t)$, $i(t)$ – відповідно миттєві значення тиску робочої рідини, напруги та струму дуги; X – матриця вихідних величин

Вхідною величиною об'єкта керування буде напруга завдання швидкості подачі, а вихідна величина буде змінюватись в залежності від режиму роботи об'єкта. При роботі в режимі підведення електрода-інструмента до заготовки вихідною величиною буде значення тиску в електроерозійній камері, при роботі в режимі стабілізації - вихідною величиною буде напруга електричної дуги, а при роботі в режимі максимальної продуктивності - вихідною величиною буде матриця вихідних величин з трьома параметрами: тиску робочої рідини, напруги та струму дуги.

1.6 Постановка задач досліджень та методика їх виконання

Аналіз стану досліджень в галузі автоматизації процесів керування системи подачі електрода-інструмента при розмірній обробці дугою, результати якого наведені вище, показав, що досягнення мети досліджень доцільно виконати за рахунок розробки методів, систем та алгоритмів визначення стану процесу РОД та формування сигналів керування. На вибір такої методології впливає багато чинників [55, 56, 122]: характер зміни сигналів у каналах керування, збурень та завад; динаміка процесу розмірної обробки дугою як об'єкта керування; тип та властивості регулюючих органів; вид джерела енергії і т.п.

Оскільки електрична дуга при розмірній обробці дугою як об'єкт керування належить до багатовимірних багатозв'язаних об'єктів зі змінними параметрами, які функціонують в умовах дії випадкових корисних сигналів, збурень та завад, характеристики яких наперед не визначені, то доцільно формувати методологію проектування систем керування ними на основі програмних алгоритмів.

Якщо прийняти до уваги складність безпосереднього виміру значення міжелектродного проміжку на всіх етапах обробки деталі, то стає зрозумілим, що для підвищення енергоефективності процесу розмірної

обробки дугою за рахунок автоматизації процесу керування доцільно розробити декілька підсистем, кожна з яких буде працювати лише на своєму етапі обробки деталі, а саме:

- підведення електрода-інструмента до електрода-заготовки (подача електрода-інструмента при відсутності горіння дуги);
- стабілізація режимів (параметрів дуги);
- екстремальний режим обробки деталі по продуктивності;
- відведення електрода-інструмента при досягненні заданої глибини обробки (враховується лінійний знос електрода-інструмента).

Таким чином, дисертаційна робота спрямована на виконання наступного завдання досліджень. За відомими: конструкцією електроерозійної головки, технологічними умовами створення процесу розмірної обробки дугою обґрунтувати тип приводу подачі та систему автоматичного керування, що забезпечить максимальну продуктивність та енергоефективність процесу розмірної обробки дугою.

Виконання цього загального завдання досліджень здійснені в результаті постановки та пошуку розв'язків часткових задач, перелік яких наведено у вступі дисертації.

Порядок та алгоритм пошуку розв'язків часткових задач, вихідні дані для виконання зазначеного пошуку та очікувані результати складають зміст методики дисертаційного дослідження (рис. 1.13).

У відповідності з структурою досліджень на першому етапі необхідно обґрунтувати вибір деталі для дослідження, обладнання та приводу подачі електрода-інструмента. Визначити форму отвору в деталі, технологічну схему формоутворення, форму електрода-інструмента, тип електроерозійної головки та обґрунтувати тип приводу подачі. Оцінити функціонально-структурні особливості процесу розмірної обробки, можливості регулювання технологічних параметрів процесу, визначити режими роботи об'єкту керування.

На другому етапі необхідно обґрунтувати і вибрати методику експериментальних досліджень. Відбувається розробка методик:

- по визначенню рівня критичного зазору при підведенні електрода-інструмента до заготовки (для запобігання поломки електрода);
- по визначенню рівня стабільності процесу розмірної обробки дугою;
- по формуванню сигналу завдання керуючого впливу для забезпечення максимальної продуктивності процесу обробки деталі.

На третьому етапі відбувається обґрунтування та розробка технічних засобів. Проведення експериментальних досліджень, базується на сучасних мікропроцесорних системах збору інформації. Також необхідно проведення обґрунтування як програмних засобів, так і записів реалізації процесів. Крім того, на цьому етапі необхідно проаналізувати вибір параметрів, що підлягають запису та вибір датчиків і блоків нормалізації сигналу для перетворення їх значень до уніфікованих сигналів.

На четвертому етапі відбувається розробка математичної моделі електромеханічної системи переміщення електродів. Крім того, виконується лінеаризація моделі об'єкта керування при малих переміщеннях електрода-інструмента. Після створення математичної моделі об'єкта керування необхідно реалізувати автоматичні підсистеми керування подачею електрода-інструмента для вибраних режимів роботи об'єкта.

П'ятий етап передбачає проведення експериментальних досліджень з метою напрацювання бази знань у відповідності з методиками, розробленими на другому етапі.

На шостому етапі на основі даних експериментальних досліджень, проведених на попередньому етапі, проводимо спектральний аналіз, параметрів об'єкта керування та привода подачі електрода-інструмента та встановлюємо їх кореляційну залежність. На основі математичної моделі об'єкта керування виконуємо синтез багатоконтурної системи електропривода подачі електрода-інструмента. Налаштовуємо

електромеханічну систему на максимальну швидкість згідно з отриманими даними синтезу.

На сьомому етапі на основі отриманої математичної моделі електромеханічної системи переміщення електродів виконуємо синтез електромеханічної системи переміщення.

На восьмому етапі відбувається розробка мікропроцесорної САК подачі електрода-інструмента. Також розробляється функціональна схема САК та програмні алгоритми роботи підсистем мікропроцесорної САК.

Для перевірки працездатності розробленої мікропроцесорної САК необхідно провести експериментальне дослідження її роботи. Для цього необхідно розробити програмно-апаратну реалізацію, що реалізує розроблені закони керування. Програмно-апаратну реалізацію здійснюють за допомогою таких засобів промислової автоматизації, як програмовані логічні контролери та програмне середовище CoCoX CoIDE.



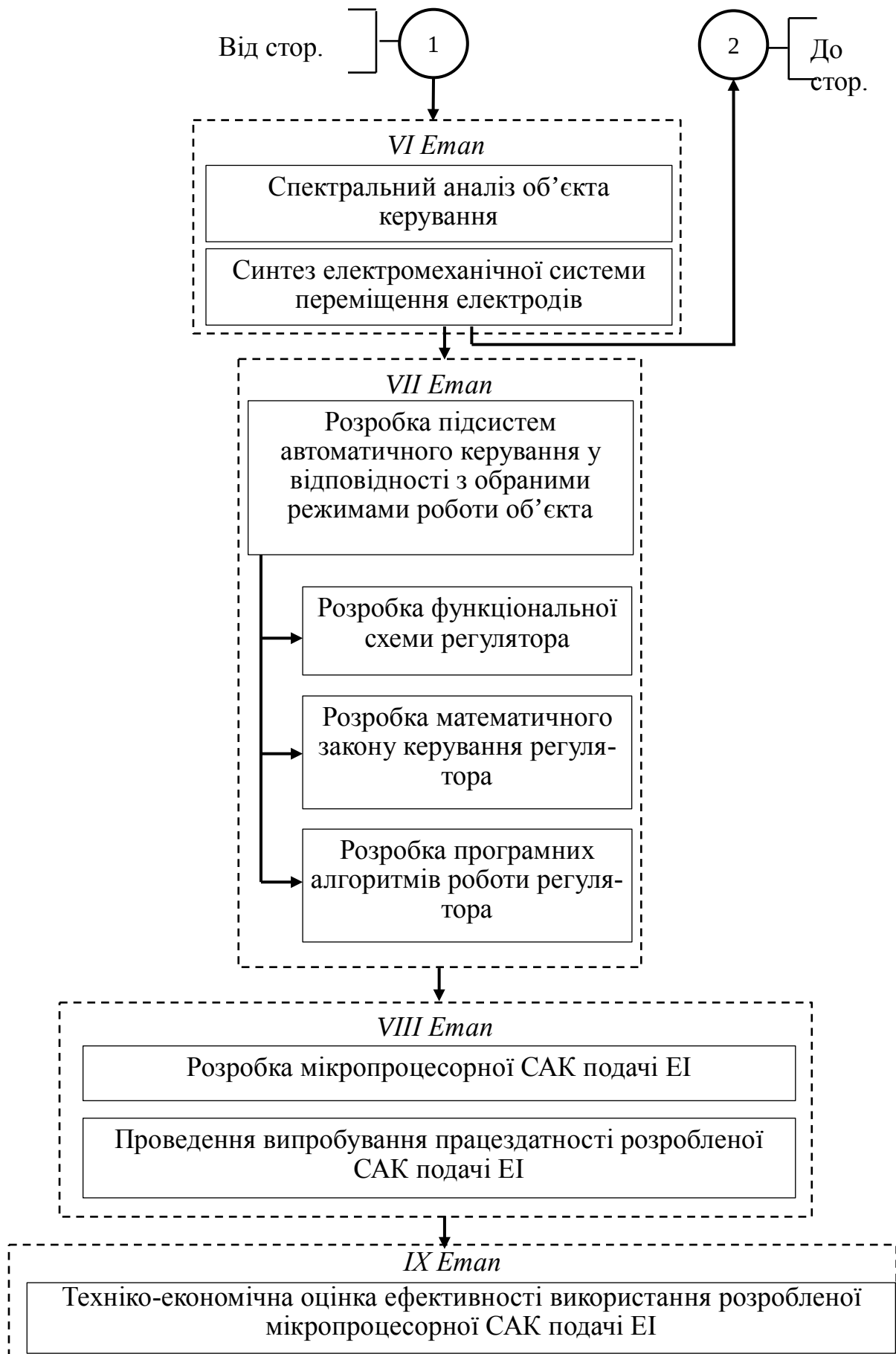


Рис. 1.13. Етапи розв'язання задачі автоматизації керування подачі EI електромеханічним приводом на верстаті розмірної обробки дугою

На дев'ятому етапі проводиться порівняльна техніко-економічна оцінка розробленої мікропроцесорної САК по відношенню до базової САК. Визначається точка беззбитковості та економічний ефект при різних програмах випуску деталі.

Висновки до першого розділу

1. В результаті аналізу умов протікання технологічного процесу розмірної обробки дугою визначений перелік впливу основних чинників на процес формоутворення деталі, до яких входять контрольовані, неконтрольовані, експлуатаційні та конструкторські фактори.

2. В результаті аналізу існуючих систем керування було виявлено, що одного контрольованого параметру: напруга електричної дуги (величина міжелектродного проміжку), за яким відбувається керування процесом обробки деталі на діючих верстатах РОД, недостатньо для повної автоматизації процесу розмірної обробки дугою. Неохопленими залишаються: процес підведення робочого інструменту в зону обробки при відсутності горіння дуги на перехідних режимах та процес контролю за глибиною обробки деталі. Розв'язання даних задач дозволить позиціонувати верстат, як напівавтомат, що створить умови для багатOVERSTATного обслуговування.

3. Виявлено, ручне керування оператором при обмеженому контролі режимів роботи процесу РОД не дає оперативно (швидко) стабілізувати горіння дуги. Обґрунтовано, що автоматичне керування параметрів процесу дозволить досягти максимальної стабільності і продуктивності процесу РОД.

4. У результаті аналізу літературних джерел виявлено існування декількох причин зменшення енергоефективності процесу розмірної обробки дугою:

- наявність невизначеності у параметрах об'єкта керування, що виникає внаслідок випадкової зміни коригуючих сигналів, збурень та завад;

- наявність невизначеності у параметрах об'єкта керування: величина міжелектродного проміжку при відсутності горіння електричної дуги; величина лінійного зносу при використанні плавких електродів.

5. Для досягнення мети дослідження визначено основні етапи реалізації задачі автоматизації керування процесом розмірної обробки дугою, показано взаємозв'язок між ними та послідовність виконання.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ПОДАЧЕЮ ЕЛЕКТРОДА-ІНСТРУМЕНТА

При дослідженнях процесу розмірної обробки дугою в науковій періодиці [23, 78, 79, 81, 109, 112] та наукових працях [24, 80, 91, 110, 128, 131] в переважній більшості робіт увага приділяється питанням технологічних особливостей процесу при різних способах формоутворення поверхні, типу прокачки (пряма та зворотна), оптимізації технологічних параметрів процесу і їх відносному впливу на шорсткість оброблюваної поверхні, зносу електродів, продуктивності процесу, глибині термічного впливу, тощо, і приділяється мало уваги автоматичному керуванню процесом електроерозійної обробки.

Як показали дослідження, процес розмірної обробки дугою при однакових технологічних параметрах: формі та матеріалу електродів, способу прокачки, складу робочої рідини, полярності електродів, струму і напрузі дуги та тиску в міжелектродному проміжку на серійному верстаті ДУГА-8Г (середній клас верстату) або за допомогою електроерозійної головки АМН-1 (малий клас верстатів), має однакові властивості і протікає подібно, про що свідчать осцилограми процесів наведених в [77, 80, 96].

Зробимо наступні припущення:

- значення тиску P_s (швидкості потоку v_n робочої рідини) на вході в міжелектродний проміжок задається технологічно (залежить від форми електродів, заданого значення чистоти поверхні та глибини термічного впливу), керування дуговим розрядом відбувається за рахунок зміни величини міжелектродного проміжку. Регулюються вручну оператором;

- струм дуги, обмежується поперечним перерізом електрода-інструмента. Даний параметр задається технологічно. Регулюється вручну оператором.

2.1 Характеристики деталей, обладнання та приводу подачі електрода-інструмента

Однією з важливих задач в машинобудуванні є створення квадратних із фасками, прямокутних, еліптичних, багатокутних та наближених до них отворів, які використовуються для кріплення або з'єднання деталей. Так, наприклад, за допомогою квадратних отворів з фаскою (або без) виконується кріплення наступних деталей: лемешів на плуги (рис. 2.1, а), дисків на лушпильники (рис. 2.1, б), стрілочатих лап на культиваторах (рис. 2.1, в), ножів на відвалах бульдозерів, грейдерів (рис. 2.2) та на грейферних навантажувачах та інші.

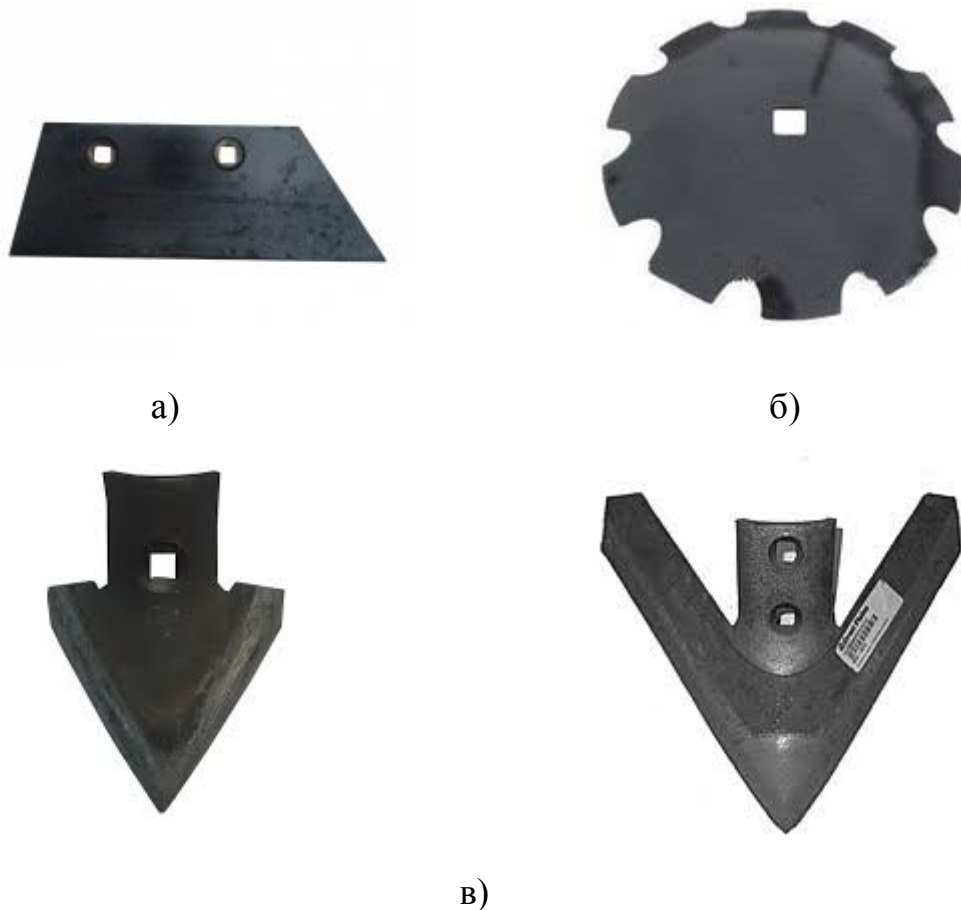


Рис. 2.1. Деталі з квадратним отвором: а – леміш передплужника культиватора; б – диск лушпильника; в – стрічасті лапи культиватора

Найчастіше круглі, квадратні, багатокутні отвори виготовляють за технологією штампування. Проте, як показали дослідження в [128], при

заміні технології штампування на РОД отримання отворів по новій технології є економічно вигідним при програмі випуску деталей до 40 тис. шт./рік. Це пояснюється тим, що отримання квадратного отвору з фаскою (або іншого) виконується за одну операцію: прошивання з об'ємним копіюванням, а не за дві: штампування та зенкерування отворів. При цьому задіюється менша виробнича площа, вартість графітового електрода-інструмента на порядок менша ніж вартість штампів та переточка зенкера. У [128] розрахунок технологічної собівартості і економічної ефективності був виконаний для деталі стрілчаста лапа з двома квадратними отворами (рис. 2.1, в) за двома варіантами: базовий (штампування), новий (РОД). Глибина отвору в стрілчастій лапі дорівнює 6 мм, матеріал сталь 65Г, що дозволяє використовувати холодне штампування без суттєвих дефектів при базовій технології.

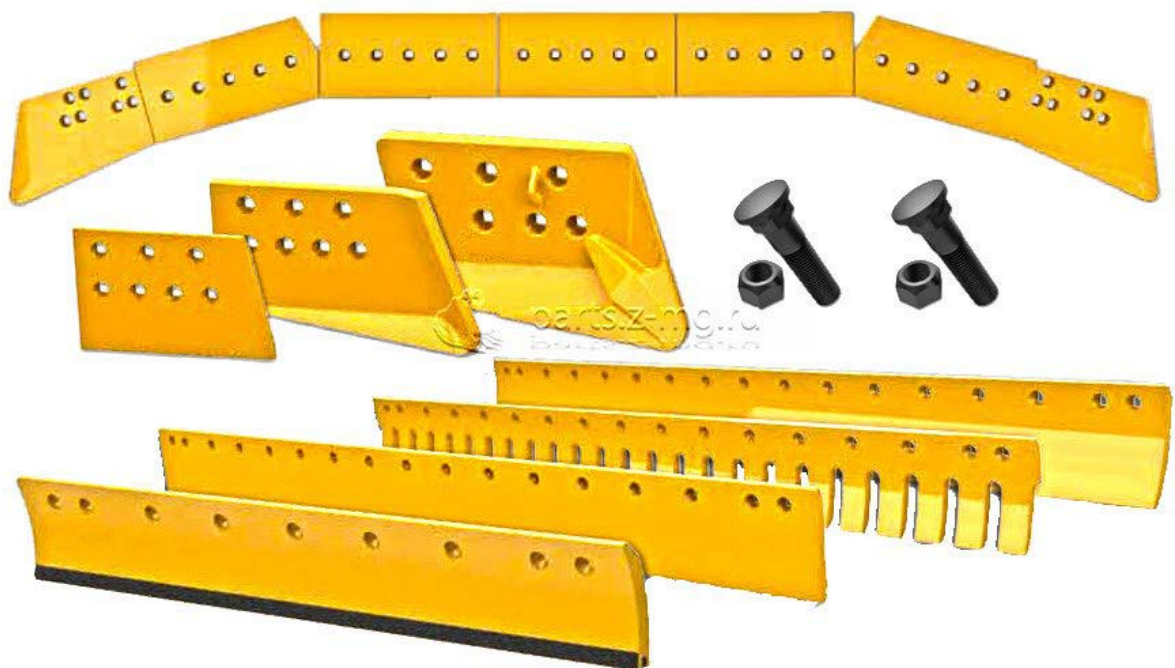


Рис. 2.2. Набір ножів з квадратним отвором для спецтехніки

На відміну від лап культиватора товщина ножів на відвалах бульдозерів, грейдерів коливається від 12 до 50 мм, матеріал сталь 65Г, тому для отримання отворів використовують гаряче штампування. При гарячому штампуванні відбувається зміння структури деталі, що зазвичай,

відновлюється за допомогою додаткових операцій: відпуску, загартування або нормалізації, і що збільшує технологічну собівартість. Собівартість технології штампування залежить від твердості та товщини металу, який обробляється, бо важкооброблювана сталь негативно впливає на стійкість штампів і зменшує їх строк використання.

При отриманні отвору способом РОД виникають ряд переваг по відношенню до штампування:

- точність і якість отриманого отвору не залежить від товщини деталі;
- не змінюється структура деталі, не відбуваються пружні деформації та не виникають внутрішні та зовнішні дефекти (тріщини, сколи тощо);
- матеріал електроду-інструменту не залежить від твердості деталі;
- отримання квадратного отвору з фаскою (або іншого) проходить за одну операцію: прошивання з об'ємним копіюванням.

Для проведення досліджень в дисертаційній роботі нами використовувались дві форми електрода-інструмента (рис. 2.3).

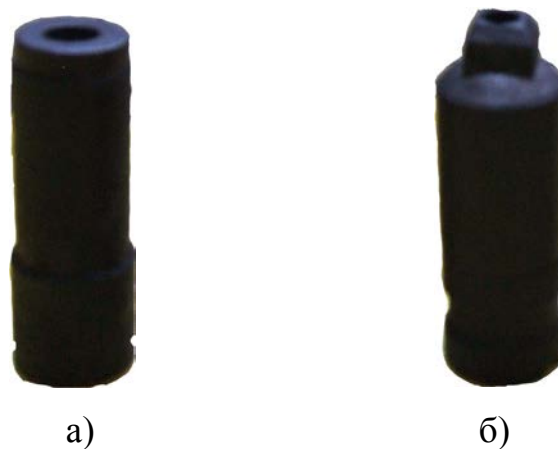


Рис. 2.3. Електроди-інструменти: а – для отримання циліндричних отворів; б – для отримання квадратних отворів з фаскою

На існуючих верстатах розмірної обробки переважно використовується гідропривід в якості привода подачі електрода-інструмента. Це пояснюється специфікою способу обробки по відношенню до інших способів електроерозійної обробки, а саме:

- в герметичну електроерозійну камеру нагнітається робоча рідина, яка відводиться через технологічний канал в електроді-інструменті. Канал створений таким чином, щоб електрична дуга горіла в поперечному потоці робочої рідини;

- зменшення міжелектродного зазору приводить до збільшення в ньому гідродинамічного опору і, відповідно, збільшується тиск робочої рідини на вході в електроерозійну камеру. В процесі стаціонарного горіння дуги тиск робочої рідини знаходиться в межах 0,5...1,8 МПа;

- тиск в камері створює момент опору для двигунів подачі, що вплинуло на конструктивні особливості механізму переміщення та призвело до збільшення вимог до моменту, що розвиває двигун подачі;

- з іншого боку, тиск в камері сприяє усуненню люфтів у механізмі подачі, що позитивно впливає на точність переміщення електрода-інструмента.

Гідравлічний привод переміщення електрода-інструмента потребує окремого спеціального агрегату для свого живлення, станції гідроприводу, яка складається з бака, насоса, приладів кондиціювання, фільтрів, носія енергії, рідини та приладів керування її потоками. Для перетворення керувального електричного сигналу, що надходить від САК, використовується досить складний перетворювач – дроселювальний гідророзподільник. Разом з цим, кінцевим силовим органом є простий гідроциліндр, який безпосередньо створює поступальний рух електрода-інструмента.

Подача електрода-інструмента може виконуватись вручну, а при установці автоматичної системи керування за допомогою електромеханічного або гідравлічного приводу. Порівняння характеристик приводів наведена в табл. 2.1.

У випадку застосування електромеханічного приводу (наприклад, з двигуном постійного струму) відпадає необхідність в станції гідроприводу, значно спрощується система живлення, зменшуються її розміри, відпадає

необхідність в перетворенні електричного сигналу керування в іншорідний (гідравлічний), що підвищує ККД привода в цій ланці.

Таблиця 2.1. Характеристики приводів (порівняльні)

Показник	Тип привода	
	гідравлічний	електромеханічний
Конструктивний	Дві гідростанції	Одна гідростанція
Вид руху	Без перетворення	Перетворення за допомогою складного редуктора
Величина зусилля, що передається на ЕІ	Обмежене тиском в гідроциліндрі	Обмежене моментом двигуна
Потужність, що споживається системою подачі	Більша	Менша
Час налаштування	Більше	Менше
Залежність роботи автоматики від температури	Більше	Менше
Швидкодія	Менша	Більша
Наявність дроселювання ШІМ	Є	Немає
Забруднення оточуючого середовища	Більше	Менше
Час відновлення автоматики після відмови	Більший	Менший
Вартість	Більша	Менша

Також при впровадженні електромеханічного привода подачі електрода-інструмента зменшуються: шум, ймовірність аварійних ситуацій в разі пошкодження маслопроводів, забрудненість навколишнього середовища та габарити верстату.

Механізми переміщення електрода-інструмента з електричним приводом найчастіше використовуються з передачею від: кульково-гвинтової пари, черв'ячно-гвинтової пари, черв'ячно-рейкової пари, що характерно для верстатів з традиційним способом ЕЕО.

Окремою групою виділяються верстати, де використовуються в якості механізму переміщення електрода-інструмента лінійні сервоприводи. Даним

приводом комплектуються верстати електроерозійної обробки японських фірм «Sodick» [59], Mitsubishi Electric [48].

Враховуючи ряд суттєвих переваг електромеханічного над гідравлічним приводом для класу малих верстатів, автор вважає необхідним використати в якості привода подачі електрода-інструмента швидкодіючий комплектний електропривод постійного струму типу ЕШІМ-1М, який знайшов широке застосування для приводів подач високоточних металорізальних верстатів. Технічні параметри приводу наведені в додатку В.

Розмір отворів визначається основними характеристиками кріпильного болта (рис. 2.4), наведеними в табл. 2.2.

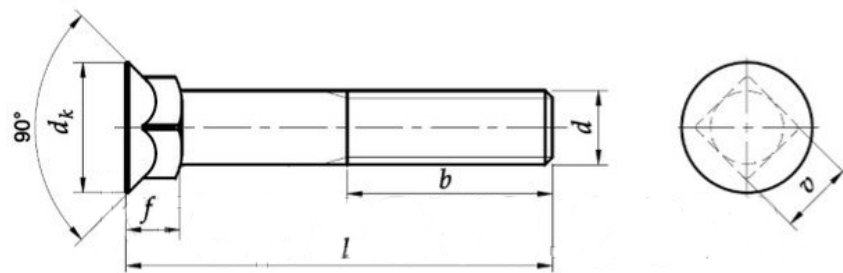


Рис. 2.4. Болт лемішний

Враховуючи розмір отворів, які необхідно отримати (болт лемішний М10), та глибину обробки деталей (6-12 мм), вибираємо електроерозійну головку АМН-1, технічні параметри якої повністю відповідають вимогам для отримання прийнятих розмірів отворів і порожнин наведені в табл. 2.3. Зовнішній вигляд головки наведений на рис. 2.5.

Виходячи з конструктивних особливостей електроерозійної головки формоутворення виконується по принципу копіювання форми електрода-інструмента при прямому поступальному русі останнього.

Для відведення робочої рідини при прошиванні наскрізних отворів необхідно використовувати спецпристосування, зовнішній вигляд якого зображений у додатку Б.2.

Електроерозійна головка розширює технологічні можливості свердлувального верстата, перетворюючи його в електроерозійний верстат. Для цього у вузлі патрон фіксують електроерозійну головку.

Таблиця 2.2. Основні характеристики болта лемішного

Опис	Характеристика		Значення, мм
Діаметр різьби	d		M10
Крок різьби	-		1,5
Довжина різьбової частини	b_{min}		26
Діаметр головки	d_k	min	18,35
		max	19,65
Висота підголівника	f	min	7,55
		max	8,45
Ширина сторони підголівника	v	min	9,42
		max	10,58

Таблиця 2.3. Технічні параметри електроерозійної головки АМН-1

Параметр	Значення
Максимальний поперечний розмір електрода, мм	50
Найбільша глибина прошивання, мм:	
- без перестановки головки	40
- із перестановкою головки	80
Струм обробки, А	до 300
Тиск робочої рідини, МПа	від 0,3 до 1,8
Швидкість прошивання, мм/хв	до 20

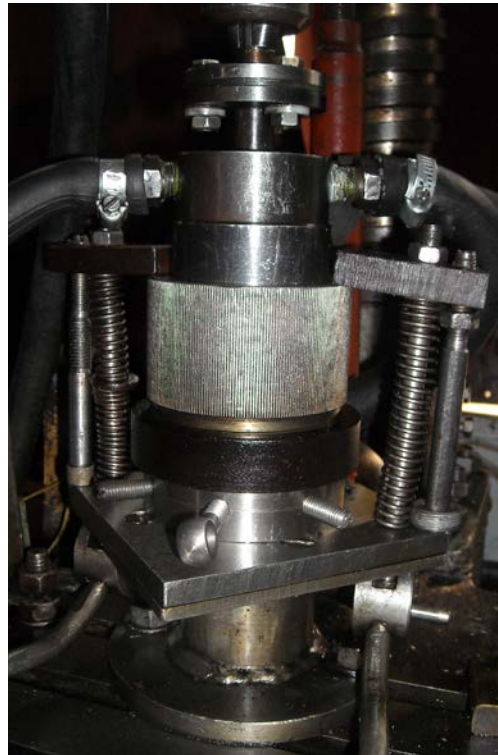
Головка призначена для прошивки наскрізних і глухих отворів різних перерізів, для виготовлення фасонних стержнів і порожнин в деталях як із конструкційних, так і важкооброблюваних сталей і сплавів, зокрема загартованих сталей і твердих сплавів, а також для випалювання залишків зламаних інструментів.

В якості джерела живлення електричним струмом використовується зварювальний апарат ВДУ-504. В якості робочої рідини використовується суміш гасу і масла «Індустріальне – 12» у співвідношенні 1:1, або вода із

водопровідної мережі. Але при використанні водопровідної води в якості робочої рідини зменшується якість обробки та збільшується знос електрода-інструмента. Інструментом можуть бути електроди із графіту, чавуну, сталі, міді і т.п.



а)



б)

Рис. 2.5. Зовнішній вигляд електроерозійної головки типу АМН-1: а – загальний вид; б – робоче положення при дослідженні.

На даний час на електроіскрових і електроімпульсних верстатах в якості виконавчого органу подачі електрода-інструмента використовуються двигуни постійного струму, лінійні двигуни та крокові двигуни.

Зовнішній вигляд механічної частини верстату з електроерозійною головкою типу АМН-1 наведений на рис. 2.6.

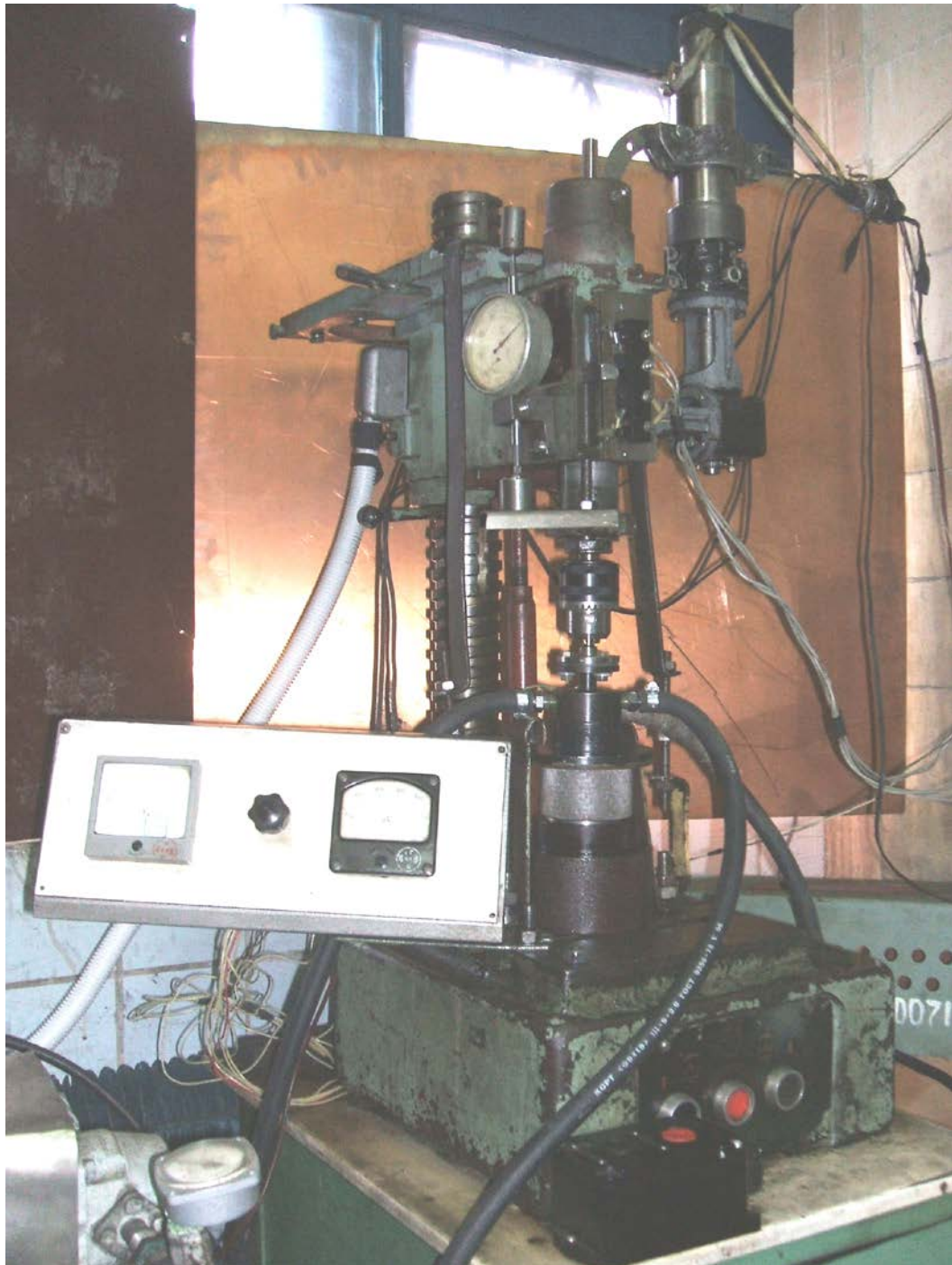


Рис. 2.6. Зовнішній вигляд механічної частини верстату з електроерозійною головкою типу АМН-1.

Фізичні умови реалізації процесу розмірної обробки дугою визначають такі основні елементи установки:

- свердлувальний верстат, який має станину, стіл, на якому кріпиться заготовка (при прошиванні наскрізних отворів заготовка кріпиться до пристрою);

- електроерозійна головка, в якій кріпиться електрод-інструмент і яка забезпечує підведення технологічного струму і підведення та відведення із зони обробки робочої рідини та реалізацію відповідної технологічної схеми формоутворення;

- система живлення робочою рідиною (гідростанція), яка складається із бака з робочою рідиною, фільтрів очистки робочої рідини, гідронасосу, трубопровідної арматури, двигуна приводу гідронасоса і шафи з пускорегулюючим обладнанням та приладами, що відображають стан роботи гідростанції;

- джерело живлення технологічним струмом (з круто падаючою ВАХ);

- комплектний привод, редуктор, регулятор стабілізації процесу розмірної обробки дугою (детальна конструкція верстата виконувалась автором і розглянута в науково-дослідній роботі [77]).

2.2 Перевірка гіпотези про вигляд функції розподілу

При оцінюванні параметрів розподілення випадкової величини та критеріїв для перевірки статистичних гіпотез необхідно впевнитись, що отримані дані досліджень підпорядковуються нормальному закону розподілення.

Найбільш простим, але досить наближеним методом перевірки узгодженості результатів експерименту з тим чи іншим законом розподілення є графічний метод. Сутність його полягає в оцінці емпіричної функції розподілення і порівнянні її з функцією передбачуваного теоретичного закону. Графічний метод в значній мірі є суб'єктивним і використовується на практиці в якості першого наближення при вирішенні подібних задач. Більш об'єктивні методи визначення вигляду функції розподілення випадкової величини базуються на апараті перевірки статичних гіпотез – критеріях узгодженості.

Нульова гіпотеза в даному випадку полягає в тому, що H_0 : досліджувана генеральна сукупність не суперечить запропонованому теоретичному закону розподілення. При цьому альтернативна гіпотеза, як правило, формується так H_1 : випадкова величина має будь-яке розподілення, відмінне від запропонованого.

Попередня обробка даних експерименту починається з групування, яке проводиться в наступній послідовності [115]:

1. Знаходимо найбільше ($x_{\max}$) і найменше ($x_{\min}$) вибірконе значення випадкової величини і визначаємо її розмах:

$$R = x_{\max} - x_{\min}. \quad (2.1)$$

2. Розмах випадкової величини розбиваємо на k рівних інтервалів. Кількість інтервалів вибираємо в залежності від об'єму вибірки. Число інтервалів визначаємо за формулою Штюргеса з округленням до найближчої цілої величини:

$$k = 1 + 3,32 \lg(n), \quad (2.2)$$

де n – об'єм вибірки.

3. Визначаємо ширину інтервалу h , для спрощення розрахунків значення округлюють в будь-яку сторону, дещо збільшуючи або зменшуючи при цьому розмах варіювання R :

$$h = R/k. \quad (2.3)$$

4. Встановлюємо межі інтервалів і виконуємо підрахунок числа попадань випадкової величини у кожний з вибраних інтервалів $\bar{m}_i$, $1 \leq i \leq k$.

5. Визначаємо частоту попадань для кожного інтервалу:

$$P_i = \bar{m}_i/n. \quad (2.4)$$

6. Результати розрахунків зводимо до табл. 2.4.

Перевірка гіпотези нормального розподілення по критерію χ^2 Пірсона. Рівняння закону щільності стандартного нормального розподілу має вигляд [115]:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} \approx 0,4e^{-\frac{z^2}{2}}; z = \frac{x - M_x}{\sigma_x}. \quad (2.5)$$

Таблиця 2.4. Поділ експериментальних даних на інтервали

Інтервал	Число значень дослідів в кожному інтервалі $\bar{m}_i$	Частота попадань в інтервал P_i
$x_1 \dots x_2$	$\bar{m}_1$	$\bar{m}_1/n$
$x_2 \dots x_3$	$\bar{m}_2$	$\bar{m}_2/n$
...	...	...
$x_i \dots x_{i+1}$	$\bar{m}_i$	$\bar{m}_i/n$
...	...	...
$x_k \dots x_{k+1}$	$\bar{m}_k$	$\bar{m}_k/n$
Перевірка	$\sum_{i=1}^k \bar{m}_i = n$	$\sum_{i=1}^k P_i = 1$

Тоді теоретична ймовірність попадання випадкової величини в інтервал $\Delta z = z_{i+1} - z_i$ у випадку нормального розподілення можна визначити за формулою [31, 115]:

$$P_i^* = F(z_{i+1}) - F(z_i) = \frac{1}{2\pi} \int_{z_i}^{z_{i+1}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \quad (2.6)$$

Відмінність оцінки закону розподілення P від теоретичного закону розподілення P^* можна охарактеризувати величиною:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k C_i (P_i - P_i^*)^2, \quad (2.7)$$

де P_i та P_i^* - оцінка і теоретична ймовірність випадкової величини для i -го інтервалу; C_i - вагові коефіцієнти, які з більшою вагою враховують відхилення для менших P_i .

Пірсон визначив вагові коефіцієнти наступним чином [31]:

$$C_i = \frac{n}{P_i^*}. \quad (2.8)$$

Пірсон довів [31, 115], що при такому виборі C_i закон розподілення χ^2 має слабку залежність від n і $P(x)$, визначається в основному числом розрядів k . Відповідно, закон розподілення χ^2 :

$$\chi^2 = n \sum_{i=1}^k \frac{(P_i - P_i^*)^2}{P_i^*} = n \sum_{i=1}^k \frac{(\bar{m}_i/n - P_i^*)^2}{P_i^*} = \sum_{i=1}^k \frac{(\bar{m}_i - nP_i^*)^2}{nP_i^*}. \quad (2.9)$$

При ідеальній відповідності експериментальних даних нормальному закону розподілення, експериментальне значення критерію Пірсона буде дорівнювати нулю, так як $P_i = P_i^*$.

У виразі (2.7) стоїть сума квадратів k випадкових величин, проте вони не є незалежними, так як на них накладається деяке число зв'язків. Одним з таких зв'язків є вимога, щоб площа під кривою оцінки закону розподілення дорівнювала одиниці. Інколи вимагають [115], щоб середнє значення $\bar{x}$ співпадало з математичним очікуванням M_x , а вибіркова дисперсія S_x^2 - з дисперсією σ_x^2 . Тому число ступенів свободи частіше всього визначається як:

$$m = k - 2. \quad (2.10)$$

Теоретичне значення критерію Пірсона $\chi_{\alpha;m}^2$ визначається за довідниковими даними або за допомогою пакетів прикладних програм (ППП), наприклад, за функцією ХИ2ОБР(α ; m) – PPP Microsoft Excel.

Алгоритм використання критерію Пірсона полягає в наступному.

1. Висувається нуль-гіпотеза H_0 : «Генеральна сукупність, що досліджується має не суттєву відмінність від нормального закону розподілення» та альтернативна їй гіпотеза H_1 : «Генеральна сукупність, що досліджується має суттєву відмінність від нормального закону розподілення».

2. За результатами експериментальних вимірювань і припущенню нормального закону їх розподілення визначається розрахункове значення критерію χ^2 Пірсона.

3. Визначається число ступенів свободи m , задаються рівнем значимості α і визначають теоретичне значення критерію Пірсона $\chi^2_{\infty;m}$.

4. Якщо $\chi^2 < \chi^2_{\infty;m}$, то нуль-гіпотеза H_0 про нормальне розподілення експериментальних даних приймається з довірчою ймовірністю $P = 1 - \alpha$. В іншому випадку нуль-гіпотеза відкидається і приймається альтернативна гіпотеза H_1 .

2.3 Визначення необхідної кількості дослідів для оцінки математичного очікування

Збільшення кількості дослідів (вимірювань) при незмінній їх точності може збільшити довірчу ймовірність або звужити довірчий інтервал для визначення дійсного значення вимірювальної величини (математичного очікування) [115].

Необхідну кількість дослідів n для досягнення необхідної точності δ при заданій довірчій ймовірності P можна визначити в тому випадку, коли відоме дійсне значення середньоквадратичного відхилення σ_x , а також коли експериментальні дані підпорядковуються нормальному закону розподілення.

Враховуючи вище означені припущення, кількість дослідів можна визначити за наступним виразом [115]:

$$n \geq \left(\frac{z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma_x}{\delta} \right)^2 = z_{1-\alpha/2}^2 \left(\frac{\sigma_x}{\delta} \right)^2 = z_{1-\alpha/2}^2 (\varepsilon)^2, \quad (2.11)$$

де $\varepsilon = \sigma_x / \delta$.

Таким чином, число дослідів n визначається необхідною довірчою ймовірністю $P = 1 - \alpha$ і відносним (по відношенню до середньоквадратичного відхилення) значенням половини ширини довірчого інтервалу δ , тобто необхідною точністю визначення вимірювальної величини. Так при $P = 0,95$, $z_{0,975} = 1,96$ і при $\delta = \sigma_x$ кількість дослідів дорівнює 4. При збільшенні

необхідної точності вимірювання у два рази, тобто звуженні довірчого інтервалу до величини $\delta = (1/2)\sigma_x$, необхідне число дослідів складе 16. Тобто, необхідна кількість дослідів зі збільшенням точності збільшується у квадратичній залежності.

Довірчий інтервал для математичного очікування M_x випадкової величини з нормальним законом розподілення, побудований з довірчою ймовірністю $P = 1 - \alpha$, при невідомому значенні генеральної дисперсії σ_x^2 визначається за нерівністю [115]:

$$\bar{x} - t_{\alpha,m} \frac{S_x}{\sqrt{n}} < M_x < \bar{x} + t_{\alpha,m} \frac{S_x}{\sqrt{n}}, \quad (2.12)$$

де $\bar{x}$ - середнє арифметичне значення вибірки; $t_{\alpha,m}$ - коефіцієнт Стюдента; S_x - вибіркове середнє квадратичне відхилення; n - кількість дослідів.

Середнє арифметичне значення вибірки визначаємо:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.13)$$

де n - об'єм вибірки; x_i - результат вимірювання i -того значення.

Як правило, дійсне значення середньоквадратичної похибки (σ_x) невідоме, а є можливість визначити тільки її оцінку (S_x). Тоді, враховуючи (2.12), необхідну кількість дослідів можна визначити із співвідношення [115]:

$$n \geq \frac{t_{\alpha,m}^2 \cdot S_x^2}{\delta^2} = t_{\alpha,m}^2 \left(\frac{S_x}{\delta} \right)^2 = t_{\alpha,m}^2 (\varepsilon)^2, \quad (2.14)$$

де $\varepsilon = S_x / \delta$.

При розрахунках по даному рівнянню слід мати на увазі, що значення критерію Стюдента залежить не тільки від α , але і від числа ступенів свободи m , яке визначається кількістю дослідів. В зв'язку з цим рівняння (2.14) необхідно розв'язувати методом послідовних наближень. В якості початкового наближення можна задати кількість дослідів, розрахованих за формулою (2.11).

Для побудови довірчого інтервалу для математичного очікування значення тиску в електроерозійній камері в момент торкання електрода-інструмента з електродом-заготовкою (коротке замикання електричної дуги) визначимо, яку кількість дослідів необхідно провести за (2.11) та (2.14).

Розглянемо конкретні умови, при яких були отримані значення тиску робочої рідини в електроерозійній камері при короткому замиканні електрода-інструмента з електродом-заготовкою. Дослідження проводились на електроерозійному верстаті з електроерозійною головкою типу АМН-1 з електромеханічним приводом подачі електрода-інструмента на базі комплектного високоточного приводу типу ЕШІМ-1. В якості робочої рідини використовувалась суміш гасу і масла «Індустріальне – 12» у співвідношенні 1:1; матеріалом ЕІ був вибраний графіт марки МПГ 7 (форма зображена на рис. 2.3, б); в якості матеріалу електрода-заготовки вибраний метал марки Ст3сп згідно з ДСТУ 3760-98. Були введені технологічні обмеження по силі струму в межах від 50 до 100 А і статичного тиску робочої рідини на вході в МЕП $P_{cm} = 0,6...1,8$ МПа. У всіх проведених дослідях, використовувалась зворотна полярності електродів («+» на ЕІ, «-» на ЕЗ).

Запис осцилограм технологічного параметру (тиску робочої рідини в електроерозійній камері) виконувався за допомогою програмно-технічного комплексу, розглянутому у розділі 2.5. Отримані значення тиску наведені в табл. 2.5.

Вибіркову дисперсію для отриманих даних визначимо за формулою [115]:

$$S_x^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right], \quad (2.15)$$

де x_i .- результат вимірювання i -того значення.

Таблиця 2.5. Значення тиску, отримане в момент короткого замикання електрода-інструмента з електродом-заготовкою

Значення x_i , атм														
1,7	1,97	2,03	1,75	1,98	1,8	2,05	2	2,3	1,85	2	2,21	2,3	2,15	2,24
2,1	2,14	2,01	2,11	2,12	2,2	2,24	2,5	2,2	2,07	1,9	2,22	2,4	2,19	2,14

Вибіркове середнє квадратичне відхилення визначаємо як додатний квадратний корінь із вибіркової дисперсії:

$$S_x = +\sqrt{S_x^2}. \quad (2.16)$$

В результаті розрахунку за (2.15-2.16) даних табл. 2.5 отримаємо:

$$S_x^2 = 0,033522; \quad S_x = 0,18303 \approx 0,183.$$

Визначимо довірчий інтервал для математичного очікування тиску робочої рідини в електроерозійній камері у момент короткого замикання електрода-інструмента з електродом-заготовкою за (2.13) та (2.14) з довірчою ймовірністю $P = 0,95$; $\alpha = 0,05$. За даними табл. 2.5 ($n = 30$; $m = n-1 = 30-1=29$; $\bar{x} = 2,095667 \approx 2,1$). Якщо припустити, що значення тиску в момент короткого замикання не суперечить нормальному закону розподілення, і оскільки $t_{0,05, 29} \approx 2,045$ (значення визначене за допомогою статистичної функції СТЬЮДРАСПОБР(0,05;29) пакету прикладних програм Microsoft Excel), то довірчий інтервал дорівнює:

$$2,1 - 2,045 \frac{0,183}{\sqrt{30}} < M_x < 2,1 + 2,045 \frac{0,183}{\sqrt{30}}, \text{ або } M_x = 2,1 \pm 0,07 \text{ атм.}$$

При $\varepsilon = 0,183/0,07 = 2,6$ і $P = 0,95$; $\alpha = 0,05$, як вже було відмічено, за (2.11) отримуємо $n \geq z_{1-0,05/2}^2 \cdot \varepsilon^2 = 1,96^2 \cdot 2,6^2 \approx 26$, тоді $m = 26 - 1 = 25$, $t_{0,05, 25} \approx 2,059$ (СТЬЮДРАСПОБР(0,05;25) = 2,059538553). За (2.14) отримуємо $n \geq t_{0,05, 25}^2 \cdot \varepsilon^2 = 2,059^2 \cdot 2,6^2 = 28,67 \approx 29$; на наступній ітерації $m = 29 - 1 = 28$ $t_{0,05, 28} \approx 2,048$ (СТЬЮДРАСПОБР(0,05;28) = 2,048407142), $n \geq 2,048^2 \cdot 2,6^2 = 28,35 \approx 29$.

В результаті розрахунку було доведено, що 30 дослідів при $P = 0,95$; $\alpha = 0,05$ для визначення довірчого інтервалу для математичного очікування тиску робочої рідини в електроерозійній камері у момент короткого замикання електродів із точністю $\delta = 0,38S_x$ є цілком достатньо.

2.4 Розробка методики експериментальних досліджень

Широке розповсюдження електромеханічних приводів на верстатах розмірної обробки дугою стримує недостатня інформованість загалом про наступні параметри технологічного процесу:

- швидкість подачі електрода-інструмента при обробці заготовок з металів та сплавів при різних значеннях технологічного струму;
- вплив завад: нестабільність живильної електричної мережі, поява хибних наведень сигналу на вході системи керування приводом подачі електрода-інструмента і т.п.;
- характер і значення збурювальних чинників на виконавчий механізм подачі електрода-інструмента.

Крім цього необхідно знати зону стійкого горіння дуги, її параметри при квазіоптимальному режимі обробки, причини зриву дуги. З досвіду роботи на верстатах та з [25, 96], можна зробити висновок, що процес горіння дуги носить стохастичний характер, тому для розрахунку імовірнісних характеристик і визначення імовірнісних законів необхідно зняти реалізації часових рядів, а саме: струму і напруги дуги, швидкості подачі електрода-інструмента, тиску (швидкості) робочої рідини в міжелектродному проміжку, параметрів привода подачі. Причому ці часові ряди (реалізації) повинні показувати миттєве значення зміни вимірюваних величин за часом, що в більшості випадків зручно досягається за допомогою мікропроцесорних систем збору даних.

Мета і завдання експериментального дослідження: отримання осцилограм для визначення статистичних характеристик, необхідних для математичного опису

стохастичних процесів: струму і напруги дуги, лінійного переміщення електрода-інструмента, тиску робочої рідини в експериментальному верстаті, а також зняття статичних і динамічних параметрів розробленого приводу подачі електроду.

Під час проведення експерименту враховувався вплив зміни умов на хід експерименту при різних марках металу; площі обробки, форми і матеріалу електрода; глибини обробки, тощо.

Необхідна точність дослідження визначалася похибкою, що задавалася, при визначенні оцінок імовірнісних характеристик в межах 1 – 5%. Планувалася необхідна і достатня кількість реалізацій для забезпечення заданої точності дослідження або залежно від характеру процесу час однієї реалізації. Величина кроку квантування по рівню і часу вибиралася виходячи із забезпечення вибраної точності дослідження. Розв’язання цього питання необхідне для вибору масштабу рівня, часу і швидкості запису інформації. Обґрунтування швидкості запису процесів наведене в додатку Е.

Закон розподілу миттєвих значень осцилограм за попередніми даними [16] приймався нормальним, потім справедливність цієї гіпотези уточнювалася за наслідками експерименту.

Таким чином, на підставі попередніх дослідів при плануванні експерименту ухвалювалися попередні рішення про закон розподілу, стаціонарність, ергодичність і інші властивості процесу, що досліджувався. Враховувалося, що в процесі експерименту ці гіпотези можуть не підтвердитися, точність дослідження виявиться недостатньою, доведеться коректувати той або інший пункт програми або здійснювати додаткову серію дослідів.

Для реєстрації процесів застосовувався програмно-технічний комплекс, який розглянутий в розділі 2.5.

2.4.1 Методика експериментальних досліджень процесу керування швидкості подачі при підведенні електрода-інструмента до заготовки при відсутності горіння електричної дуги

Метою дослідження є оптимізація процесу керування швидкості подачі електрода-інструмента при запалюванні дуги та зменшення при цьому ударного навантаження на електрод-інструмент. Це дозволяє зменшити час технологічної операції та знижує ймовірність пошкодження робочої поверхні електрода-інструмента в процесі запалювання дуги.

Для досягнення поставленої мети необхідно: встановити технологічний параметр, за яким доцільно керувати швидкістю подачі електрода-інструмента до моменту запалювання дуги; визначити граничне значення вибраного технологічного параметра, за яким відбувається зміна швидкості подачі.

За апіорною інформацією відомо, що при зменшенні міжелектродного проміжку в ньому підвищується гідродинамічний опір, і, відповідно, підвищується тиск в електроерозійній камері. Саме на цій фізичній властивості і базується спосіб визначення моменту процесу запалювання дуги, запропонований автором, що підтверджується патентом України номер 110050 від 10.11.2015.

Виходячи з конструктивних особливостей верстату та шорсткості електрода-інструмента і електрода-заготовки, неможливо досягти їх повної паралельності площин в процесі обробки. При першому підведенні електрода-інструмента до заготовки значення паралельності поверхонь цих площин є найменшою і збільшується в процесі обробки до певного значення. Тому технологічно, в процесі обробки деталі при підведенні електрода-інструмента до заготовки, може виникнути два порогових значення тиску при запалюванні дуги. Перше граничне значення тиску робочої рідини відповідає моменту перемикання швидкості подачі з максимальної на робочу при першому підведенні електрода-інструмента до заготовки. Друге граничне

значення тиску робочої рідини відповідає моменту перемикання швидкості подачі з максимальної на робочу після попереднього вирівнювання поверхні електрода-заготовки на попередньому етапі обробки, або у разі повторного підведення електрода-інструмента до електрода-заготовки після обриву дуги. Це пояснюється тим, що паралельність площин електрода-інструмента і електрода-заготовки збільшується до певного значення при попередній обробці, і відповідно, одне й те ж значення міжелектродного проміжку буде досягатись при різних значеннях тиску. За апіорною інформацією відомо, друге граничне значення тиску робочої рідини завжди більше першого граничного значення. Тому в першому наближенні достатньо визначити і використовувати в САК подачі ЕІ тільки перше граничне значення тиску для перемикання швидкості подачі з максимальної на робочу.

На гідродинамічний опір впливає ряд чинників, а саме: профіль і площа електрода-інструмента, довжина траси евакуації, температура і склад робочої рідини, тощо. Тому встановити конкретні значення тиску, що відповідають моменту перемикання швидкості подачі можливо лише для певних умов. При виконанні однакових операцій значення таких налаштувань можуть зберігатись в мікропроцесорних системах керування подачею, що значно підвищить продуктивність обробки деталі в цілому.

Як зазначалось в розділі 1.2, процес розмірної обробки відбувається в закритій камері і визначити відстань між електродом-інструментом і деталлю по основному параметру – напруга дуги (при відсутності її горіння) неможливо. На практиці оператор-верстатник, керуючись значенням тиску робочої рідини в електроерозійній камері і своїм досвідом змінює швидкість подачі електрода-інструмента (змінюючи напругу завдання стабілізації процесу). На діючих верстатах розмірної обробки перемикання швидкості з підвищеної (при підведенні електрода-інструмента в зону обробки) на робочу швидкість подачі електрода-інструмента не виконується.

Враховуючи конструктивні особливості: форму електрода-інструмента; розмір і форму найменшого поперечного перерізу отвору відведення

продуктів ерозії та робочої рідини; довжини траси евакуації; спосіб прокачки (прямий і зворотний) та глибину обробки; значення тиску в камері, при якому відбувається запалювання дуги, змінюється в широких межах 0,18...0,8 МПа [9].

Автоматичне змінювання швидкості при підведенні електрода-інструмента в зону обробки можливе, якщо буде відомо граничне значення тиску робочої рідини в електроерозійній камері, при якому необхідно виконувати цю зміну.

Це пропонується здійснити шляхом навчання САК подачі електрода-інструмента. При дослідженні необхідно врахувати наступні припущення:

- визначається значення тиску робочої рідини в момент короткого замикання, коли електроди торкаються один-одного.
- значення тиску, при якому САК подачі електрода-інструмента повинно перемикає швидкість, повинне бути меншим ніж значення тиску при короткому замиканні.

Визначати значення тиску, при якому повинна спрацювати САК подачі пропонуємо наступним чином:

1. За результатами експериментальних вимірювань (при навчанні) робимо вибірку даних з $n = 30$ дослідів (значення визначене у розділі 2.3) при яких відбувається коротке замикання.

2. За критерієм χ^2 Пірсона перевіряємо гіпотезу про вигляд функції розподілення за алгоритмом наведеним у розділі 2.2.

3. Якщо прийнята нуль-гіпотеза H_0 , то визначаємо значення довірчого інтервалу δ для $\alpha = 0,05$ і $n = 30$. Визначаємо середнє значення експериментальних даних у вибірці.

Враховуючи те, що нуль-гіпотеза H_0 прийнята і закон розподілення нормальний, можна використати правило трьох δ та зробити наступні припущення:

- ймовірність того, що випадкова величина відхилиться від свого математичного очікування на більшу величину, ніж 3 значення середнього квадратичного відхилення, практично дорівнює нулю;

- в довірчому інтервалі $(\bar{x} \pm 3\delta)$, що розглядається, знаходяться значення випадкових величин (що відповідають тиску робочої рідини в міжелектродному проміжку), при яких з прийнятою ймовірністю 95% може відбутися коротке замикання;

- вибравши величину, що відхиляється від свого математичного очікування на величину $\bar{x} - 5\delta$ можна гарантовано стверджувати, що величина знаходиться за межами довірчого інтервалу, як це показано на рис. 2.7. Дане значення і буде прийматись за граничне значення, при якому повинна спрацювати САК подачі електрода-інструмента, що дозволить виконувати перемикання швидкості з максимальної на робочу до моменту короткого замикання, тобто в момент торкання на електрод-інструмент буде діяти мінімальне ударне навантаження.

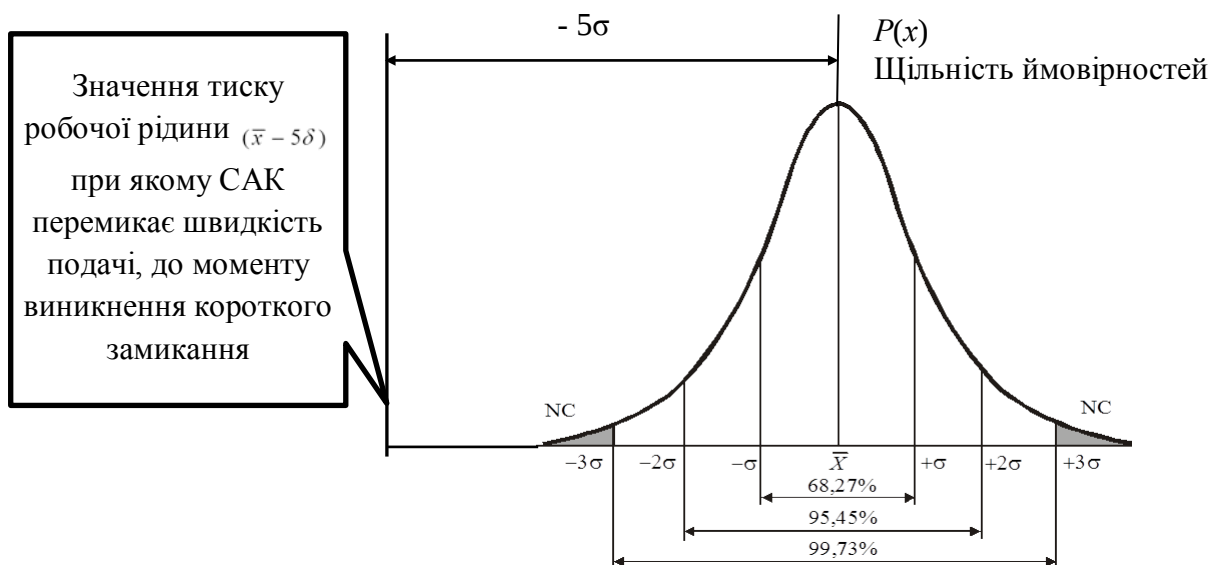


Рис. 2.7. Довірчий інтервал значення тиску робочої рідини, при якому відбувається коротке замикання

4. Визначаємо значення тиску, при якому повинна спрацювати САК подачі електрода-інструмента за формулою:

$$P_{заг} = \bar{x} - 5\delta, \quad (2.17)$$

де $\bar{x}$ - середнє арифметичне значення вибірки; δ - значення довірчого інтервалу.

Датчики, що використані в дослідженні, наведені в табл. 2.6.

Таблиця 2.6. Застосування датчиків в каналах вимірювання

Назва каналу	Датчик або блок спряження
Лінійне переміщення електрода-інструмента	Датчик лінійного переміщення CLP (R) 13-25 (Megatron)
Тиск робочої рідини	Датчик тиску серії 628CR
Напруга тахогенератора типу ТГ (кутова швидкість переміщення EI)	Блок нормалізації сигналу
Струм дуги	Лінійний датчик струму LF 305-S/SP11
Напруга дуги	Блок нормалізації сигналу

Алгоритм проведення експериментальних досліджень наступний:

1. До клемної плати DB-25C (рис. 2.14) приєднати з'єднувальні проводи від датчиків: лінійного переміщення, тиску та струму дуги. Значення напруги на тахогенераторі та напруги дуги знімаються безпосередньо і передається через блоки нормалізації на клемну плату DB-25C.

2. Встановити значення коефіцієнтів калібрування для під'єднання каналів. При їх відсутності провести калібрування каналів за допомогою еталонного вимірювального приладу.

3. Встановити заготовку, закрити електроерозійну камеру, ввімкнути прокачку робочої рідини. При відсутності протікань робочої рідини зовні подати напругу живлення дуги на електрод-інструмент та заготовку.

4. Ввімкнути запис осцилограм на програмно-технічному комплексі.

5. Перейти на ручний-налагоджувальний режим роботи. В даному режимі потужність джерела живлення, що підведена до електродів, складає декілька ват, тому обробка електрода-заготовки не відбувається, а виконується лише імітація короткого замикання. Підвести на підвищеній

швидкості електрод-інструмент до електрода-заготовки до моменту, коли почне збільшуватись тиск в електроерозійній камері. Встановити робочу швидкість подачі.

6. Після запису 30 коротких замикань зупинити подачу і запис.

7. Відвести електрод-інструмент з зони горіння дуги.

8. З'єднати електроди з джерелом постійного струму, наприклад до ВДУ-504. Встановити струм обробки 80 А. Перейти на автоматичний режим роботи. Виконати прошивку порожнини глибиною 1 мм. Відвести електрод-інструмент з зони горіння дуги.

9. Повторити пункти 4 – 7 даного алгоритму.

10. Повторити пункти 3-9 для іншої заготовки.

11. За результатами дослідів виконати розрахунок значення тиску спрацювання по наведеному вище алгоритму.

За працями [77, 96] відомо, що в системі подачі, яка розглядається в даній роботі, максимальна лінійна швидкість подачі електромеханічної системи складає 0,807 мм/с, а робоча – 0,0616 мм/с. Сума часу запізнювання системи керування приводом та часу перехідного процесу приводу складає $T_z = 0,04$ с. При зміні максимальної швидкості подачі та часу запізнювання САК необхідно, перевірити виконання наступної умови:

$$V_{\max} < V_{\text{critical}}; V_{\text{critical}} = \frac{\delta_{\min}}{T_z}; \delta \geq \delta_{\min}, \quad (2.18)$$

де V_{critical} – критична швидкість, при якій відбудеться зіткнення електродів; $\delta_{\min}$ – граничний міжелектродний проміжок, при якому виконується перемикання швидкості подачі з максимальної на робочу системою автоматичного керування (для даного варіанту $\delta_{\min}$ знаходиться в межах 0,8...1 мм).

Необхідно перевірити виконання умови $V_{\max} < V_{\text{critical}}$. При виконанні умови система при підведенні електрода-інструмента на максимальній швидкості буде налаштована оптимально.

12. Зробити висновок про економію часу при відстані між електродом-інструментом і електродом-заготовкою рівній 5 мм (середня відстань при встановленні деталі) за рахунок більш швидкого підведення ЕІ.

2.4.2 Методика визначення рівня стабільності процесу розмірної обробки

Метою проведення дослідження є розробка методики визначення рівня стабільності як стабілізованого так і не стабілізованого процесу розмірної обробки. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні основні задачі:

- визначити характерні зони горіння дуги при РОД;
- розробити спосіб визначення параметрів стабільності процесу РОД.

Характерною особливістю процесу розмірної обробки на відміну від інших способів електроерозійної обробки є використання стаціонарної електричної дуги [78]. Тому існуючі способи, що використовуються для визначення рівня стабільності процесу для нестационарних дуг на електроімпульсних та електроіскрових верстатах не підходять без суттєвої зміни алгоритму роботи на верстати розмірної обробки.

Впровадження сучасних засобів, які розв'язують задачу керування подачею електрода-інструмента, неможливе без наявності достовірного способу визначення рівня стабільності процесу РОД. Спосіб визначення рівня стабільності процесу РОД дозволить в реальному часі отримувати дані, за допомогою яких можна як в ручному так і автоматичному режимі керувати процесом РОД. Основною задачею САК подачі електрода-інструмента є підтримання міжелектродного проміжку в межах, при яких відбувається стабільний процес горіння дуги. Квaziоптимальний процес РОД по продуктивності обробки можливий лише при стабільному процесі горіння дуги і він відбувається, коли швидкість подачі електрода-інструмента приблизно дорівнює швидкості електроерозії електрода-заготовки, а

величина міжелектродного проміжку становить таке значення, при якому в дуговому розряді виділяється максимум підведеної електричної потужності.

Для електроерозійних верстатів падіння напруги в міжелектродному проміжку є основним вхідним параметром системи автоматичного керування подачі електрода-інструмента, а її вихідною величиною є команда, що змінює швидкість його подачі.

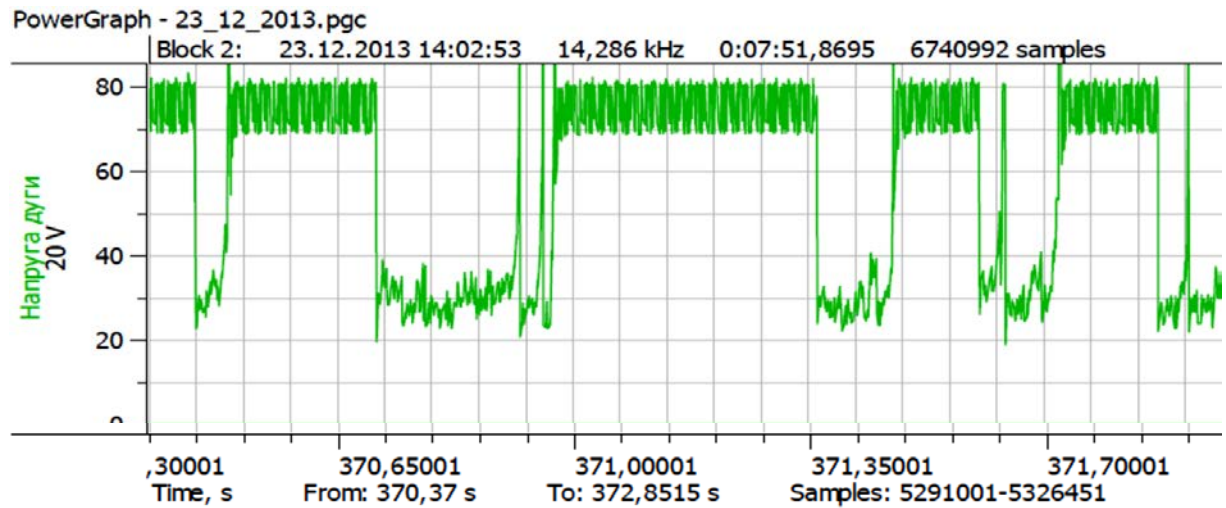
На практиці, на діючих верстатах з гідроприводом подачі визначення зони, в якій горить дуга, покладається на оператора-верстатника, який керуючись своїм досвідом за показами приладів, виконує керування швидкістю подачі електрода-інструмента. Технологічні параметри процесу: струм дуги та тиск робочої рідини він визначає, відповідно, за амперметром та манометром. При відповідності технологічних параметрів за вольтметром оператор-верстатник визначає величину зазору між електродом-інструментом та електродом-заготовкою. За характером зміни напруги дуги він визначає і рівень стабільності процесу.

При стабілізації процес розмірної обробки дугою можна умовно поділити на два режими роботи, виходячи з аналізу осцилограм:

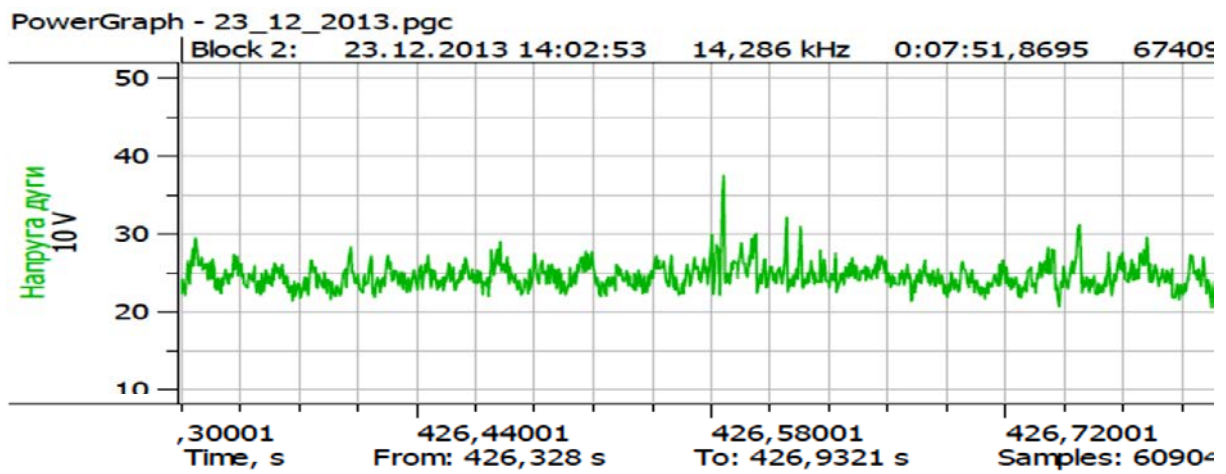
- нестабільне горіння електричної дуги (рис. 2.8, а);
- стабільне горіння електричної дуги (рис. 2.8, б).

З практичного досвіду відомо, що стабільне горіння дуги можливе, коли напруга залишається в межах 15...50 В [46]. Зони нижче 15 В та вище 50 В вважаються зонами нестабільного горіння дуги.

Для визначення рівня стабільності процесу розмірної обробки дугою пропонуємо використати наступний алгоритм розрахунку:



а)



б)



в)

Рис. 2.8. Типові часові ряди значень напруги дуги: а - при нестабільному горінні; б, в – при стабільному горінні

При нестабільному горінні електричної дуги:

1. Встановлюємо межі зон горіння дуги: зона холостого ходу (миттєве значення напруги дуги більше 50 В), зона стабільного горіння дуги (миттєве значення напруги дуги залишається в межах від 15 до 50 В), зона короткого замикання (миттєве значення напруги дуги менше 15 В).

Характерні зони напруги дуги з використанням осцилограми $U_{дуги} = f(t)$, наведені на рис. 2.9.

2. Виконуємо за даними вимірювань підрахунок миттєвих значень напруги дуги, що припадають на кожну з вибраних зон за встановлений час вимірювання.

3. Розраховуємо відсоток приналежності миттєвих значень напруги дуги в кожній з трьох визначених зон за розрахунковий період (час вимірювання).

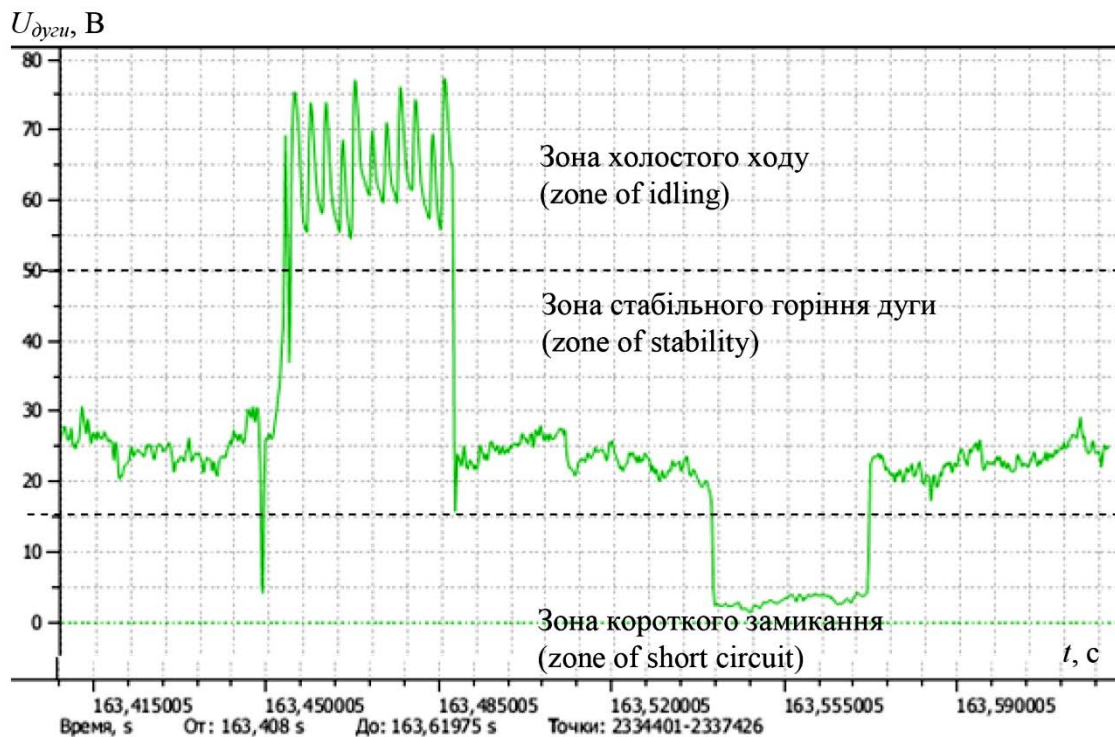


Рис. 2.9. Характерні зони напруги дуги

Для визначення приналежності напруги дуги у відсотках до конкретної зони використаємо формули:

$$P_{zone\ idling} = \frac{\sum n_{>50\ B}}{\sum n_i} 100, \quad (2.19)$$

$$P_{zone\ stability} = \frac{\sum n_{15-50\ B}}{\sum n_i} 100, \quad (2.20)$$

$$P_{zone\ short\ circuit} = \frac{\sum n_{<15\ B}}{\sum n_i} 100, \quad (2.21)$$

де $\sum n_{>50\ B}$ – кількість точок миттєвого значення напруги, що знаходились в зоні від 50 В і більше за час проходження n_i точок (зона холостого ходу); $\sum n_{15-50\ B}$ – кількість точок миттєвого значення напруги, що знаходились в зоні 15-50 В за час проходження n_i точок (зона стабільного горіння дуги); $\sum n_{<15\ B}$ – кількість точок миттєвого значення напруги, що знаходились в зоні менше 15 В за час проходження n_i точок (зона короткого замикання); $\sum n_i$ – кількість точок вибірки миттєвого значення напруги (за час вимірювання).

При розрахунку по (2.19)-(2.21) повинна виконуватись наступна умова:

$$\sum n_i = \sum n_{>50\ B} + \sum n_{15-50\ B} + \sum n_{<15\ B}. \quad (2.22)$$

Тобто при обробці вибірки значень миттєвої напруги по вище розглянутому алгоритму отримаємо такі кількісні показники процесу: відсоток миттєвих значень напруги, що припадають на зону холостого ходу $P_{zone\ idling}$; відсоток миттєвих значень напруги, що припадають на зону короткого замикання $P_{zone\ short\ circuit}$; відсоток миттєвих значень напруги, що припадають на зону стабільного горіння дуги $P_{zone\ stability}$, за якими оператор або регулятор подачі електрода-інструмента змінюють швидкість подачі.

При стабільному горінні електричної дуги.

На підставі проведених експериментів було встановлено, що при рівні стабільності процесу ($P_{zone\ stability}$) більше 95 % характер миттєвих значень напруги дуги матиме вигляд, наведений на рис. 2.10.

1. При досягненні значення $P_{zone\ stability} = 95\%$ необхідно звужити межі зони стабільного горіння дуги з 35 В до 10 В. Причому середину зони стабільного горіння вибирати для кожної ітерації вибірки даних окремо по середньому значенню напруги в цій ітерації $\bar{u}$. Тоді верхня межа зони стабільного горіння буде дорівнювати $\bar{u} + 5\text{ В}$, а нижня - $\bar{u} - 5\text{ В}$, як це показано на рис. 2.10.

2. Виконуємо підрахунок миттєвих значень напруги дуги, що припадають на кожну з вибраних зон за встановлений час вимірювання.

3. Розраховуємо відсоток приналежності миттєвих значень напруги дуги в кожній з трьох визначених зон за розрахунковий період (час вимірювання). Розрахунок виконуємо за формулами (2.19-2.21).

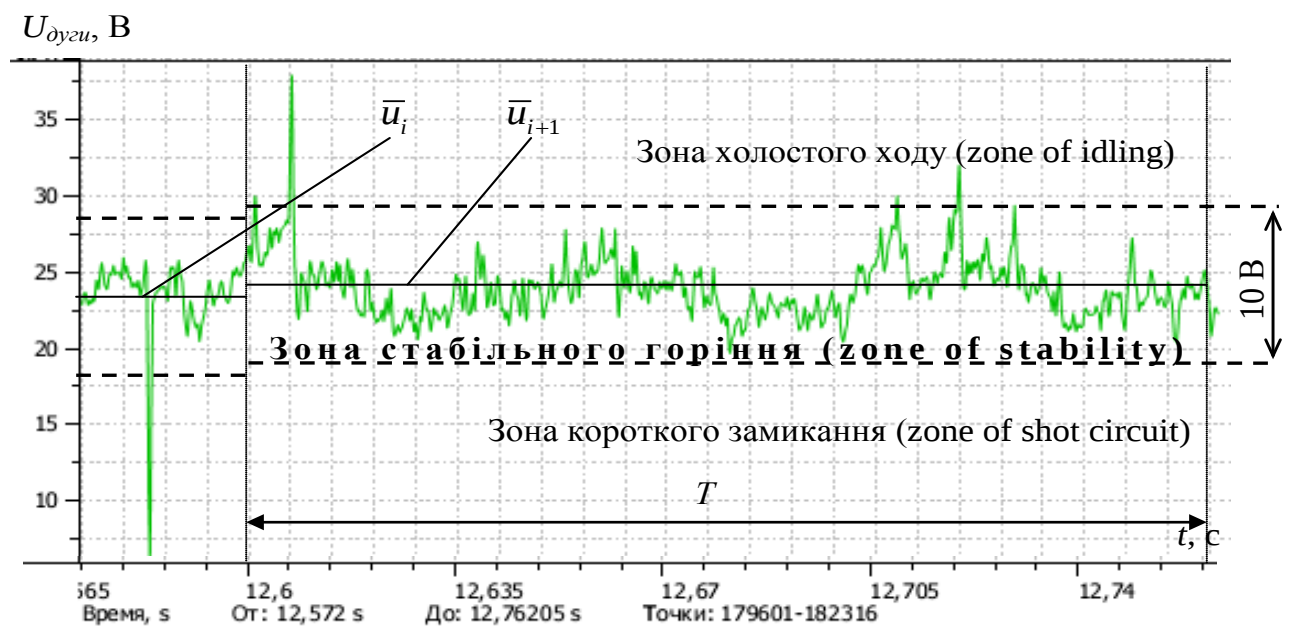


Рис. 2.10. Осцилограма стабільного процесу РОД

Стабілізація процесу горіння дуги в заданих межах відбувається за рахунок підтримки постійної довжини дуги, яка залежить від різниці швидкостей подачі електрода-інструмента та електроерозії електрода-заготовки. В залежності від значення відсотків зон, розрахованих по (2.19)-(2.21), визначається знак для збільшення або зменшення швидкості подачі

електрода-інструмента на один крок (див. табл. 2.7). Значення кроку залежить від матеріалів електрода-інструмента та електрода-заготовки.

Використовуючи значення коефіцієнтів, що характеризують приналежність миттєвих значень напруги дуги (у відсотках або частках) до кожної з означених зон, можна побудувати закон керування для командного пристрою (мікропроцесорного регулятора), за допомогою якого в автоматичному режимі буде забезпечуватися стабілізація процесу розмірної обробки.

Таблиця 2.7 Визначення знака для збільшення або зменшення швидкості подачі

№ можливої ситуації	Виконання умови	Знак приросту швидкості	Як необхідно змінити швидкість подачі ЕІ?
1	$P_{zone\ stability} \geq 95\%$	без змін	залишити без змін
2	$\begin{cases} P_{zone\ stability} < 95\% \\ P_{zone\ idling} > P_{zone\ short\ circuit} \end{cases}$	«+»	швидкість подачі збільшити
3	$\begin{cases} P_{zone\ stability} < 95\% \\ P_{zone\ idling} < P_{zone\ short\ circuit} \end{cases}$	«-»	швидкість подачі зменшити

Підтримка міжелектродного проміжку в межах, при яких відбувається стабільне горіння дуги, тобто при значенні коефіцієнта $P_{zone\ stability} \geq 95\%$, дозволить підтримувати такий режим, при якому потужність, що підводиться в міжелектродний проміжок, буде витрачатись на електроерозію металу без пауз, що виникають при нестабільному режимі роботи РОД ($P_{zone\ stability} < 95\%$).

2.4.3 Методика формування сигналу завдання для забезпечення максимальної продуктивності процесу обробки деталі

Метою проведення дослідження є розробка методики пошуку максимальної продуктивності обробки деталі. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступну основну задачу: вибрати метод оцінювання продуктивності та обґрунтувати для цього функціональну схему роботи екстремального регулятора.

Як вже зазначалось у розділі 1.5, робота підсистеми автоматичного керування подачею, при якій досягається максимум продуктивності процесу обробки деталі, можлива лише після стабілізації параметрів процесу РОД попередньою підсистемою керування подачею ЕІ. Тобто екстремальна підсистема працює, коли горить стаціонарна електрична дуга, а теплова потужність вводиться в міжелектродний проміжок без пауз. Збільшення продуктивності обробки відбувається за рахунок зміни довжини стовпа дуги, а отже і перерозподілу теплової потужності в приелектродних зонах і стовпі дуги. З [24] відомо, що максимум теплової потужності на електродах буде виділятися при мінімально можливій довжині стовпа дуги при збереженні стаціонарності (заданого рівня стабільності) процесу РОД. Одним з способів пошуку і підтримки такої довжини електричної дуги є автоматична зміна швидкості подачі за допомогою крокових алгоритмів після кожного опитування стану об'єкта керування, як це показано на рис. 2.11. Як зазначалось у розділі 1.5, вихідними величинами, що характеризують стан об'єкта керування є: миттєві значення струму і напруги електричної дуги та тиску робочої рідини. Згідно з роботами [80, 84] за вищезначеними даними, якщо відомі умови процесу РОД (тип і форма електроду, полярність електродів, тип прокачки, склад робочої рідини, тощо), можна визначити технологічний показник процесу: продуктивність процесу, якість обробленої поверхні, знос електрода-інструмента, тощо.

У роботах [26, 80, 91, 110, 131 128] наводяться математичні моделі продуктивності процесу РОД за параметрами: струм і напруга електричної дуги, тиск робочої рідини. Нами вибрана модель по продуктивності, наведена в [128], що відповідає умовам процесу прошивання квадратного отвору з фаскою графітовим електродом (розмір електрода та робоча рідина були подібні до нашого випадку):

$$Q = 3,138 I_{\text{дуги}}^{0,96} U_{\text{дуги}}^{0,32} P_s^{-0,32} L_{\text{max}}^{0,09} S^{0,01} C_v^{-0,23}, \quad (2.23)$$

де Q – продуктивність процесу, мм3/хв.; P_s – статичний тиск на вході в міжелектродний проміжок, МПа; L_{max} – максимальний отвір (порожнина) в плані, мм; S – товщини заготовки, мм; C_v – умовна складність форми отвору (порожнини); L_d – довжина стовпа електричної дуги, мм.

Враховуючи ($S = 10$ мм; $L_{\text{max}} = 18,5$ мм; $C_v = 1$) (2.23) прийме вигляд:

$$Q = 4,2 I_{\text{дуги}}^{0,96} U_{\text{дуги}}^{0,32} P_s^{-0,32}. \quad (2.24)$$

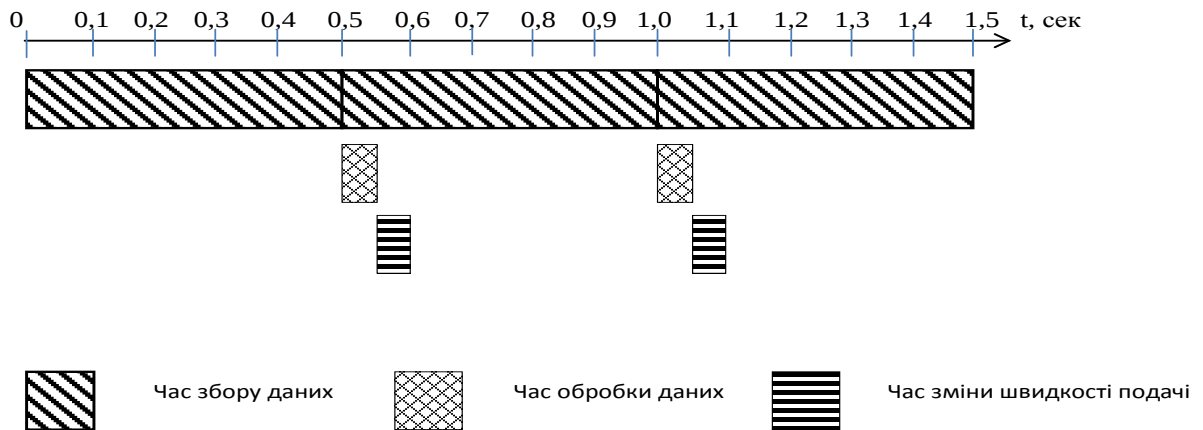


Рис. 2.11. Спрощена циклограма роботи САК подачею EI

За (2.24) або за іншою математичною моделлю (додаток А) на кожній ітерації опитування матриця стану об'єкта керування $X = [u[mT], i[mT], p[mT]]$ обробляється і формується вектор миттєвих продуктивностей $Z = [q[mT]]$. При порівнянні даних вектора на поточній ітерації $Z = [q[mT]]$ з даними на попередній ітерації $Z = [q[(m-1)T]]$ і визначенні кращої продуктивності формується команда на зміну швидкості

подачі на один крок, і тим самим збільшуючи або зменшуючи на ньому (кроці) подачу електрода-інструмента.

Для оцінки продуктивності в вибірці нами вибрано метод моментів, запропонований К. Пірсоном [115], в якості точкової оцінки параметрів вибірки $Z = [q[mT]]$. Основною перевагою даного методу є простота алгоритму розрахунку, що дозволяє обчислити великі об'єми вибірки при обмежених розрахункових потужностях контролера.

Припустимо, що випадкова величина $\bar{x}$, вибірка якої представлена в $Z = [q[mT]]$ має Γ -розподілення. Необхідно знайти оцінки параметрів цього розподілення, враховуючи що нормальне розподілення є окремим випадком гамма розподілення. Функція щільності Γ -розподілення з двома параметрами має вигляд [115]:

$$f_{\mu,\nu}(x) = \begin{cases} \frac{\mu^\nu}{\Gamma(\nu)} x^{\nu-1} e^{-\mu x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}, \quad (2.25)$$

де μ, ν – додатні параметри, μ – параметр масштабу, ν – параметр форми, ($\mu > 0, \nu > 0$); $\Gamma(\nu)$ – гамма-функція Ейлера.

Γ -функція Ейлера визначається:

$$\Gamma(\nu) = \int_0^{\infty} x^{\nu-1} e^{-x} dx. \quad (2.26)$$

Характеристична функція розподілення має вигляд:

$$\int_0^{\infty} e^{itx} f_{\mu,\nu}(x) dx = \left(1 - \frac{it}{\mu}\right)^{-\nu}. \quad (2.27)$$

Якщо випадкова ξ величина має Γ -розподілення, то символічно вона позначається як $\xi \in \Gamma_{\mu,\nu}$ і її моменти визначаються як:

$$M\xi = \frac{\mu^\nu}{\Gamma(\nu)} \int_0^{\infty} x^{\nu+t-1} e^{-\mu x} dx = \frac{\mu^{-t}}{\Gamma(\nu)} \int_0^{\infty} y^{\nu+t-1} e^{-y} dy = \frac{\mu^{-t} \Gamma(\nu+t)}{\Gamma(\nu)}. \quad (2.28)$$

При цілих $t > 0$ це може бути отримане прямим диференціюванням характеристичної функції. Зокрема припускаючи, що $t = 1, 2$, знаходимо:

$$M\xi = \bar{x} = \frac{\nu}{\mu}; D\xi = S_x^2 = \frac{\nu}{\mu^2}, \quad (2.29)$$

де $M\xi, D\xi$ – відповідно, математичне очікування і дисперсія цього розподілення, виражене через μ, ν .

Складемо систему рівнянь для оцінювання параметрів:

$$\begin{cases} \frac{\nu}{\mu} = \bar{x} \\ \frac{\nu}{\mu^2} = S_x^2 \end{cases}. \quad (2.30)$$

Поділивши оцінку математичного очікування на оцінку дисперсії, отримуємо:

$$\mu = \frac{\bar{x}}{S_x^2}, \text{ і відповідно, } \nu = \mu \cdot \bar{x}. \quad (2.31)$$

Використовуючи (1.5), (2.24), (2.13), (2.15) та (2.31) складемо функціональну схему роботи логічного пристрою перемикання ключів для підсистеми з екстремальним режим керування подачею електрода-інструмента (рис. 2.12), яка входить до загальної схеми САК мікропроцесорного регулятора.

Позначимо на рис 2.12 через m – кількість точок у вибірці за вибраний проміжок часу T , що використовується для розрахунку статистичних оцінок. Позначимо вектор q_i , значення i -тої миттєвої розрахункової продуктивності процесу РОД відповідно, де $i = 1, 2 \dots m$.

Розроблена функціональна схема логічного пристрою перемикання ключів для підсистеми з екстремальним режим керування подачі електрода-інструмента дозволяє описати математичний закон керування роботою даної підсистеми, яка розглянута в розділі 4.3.

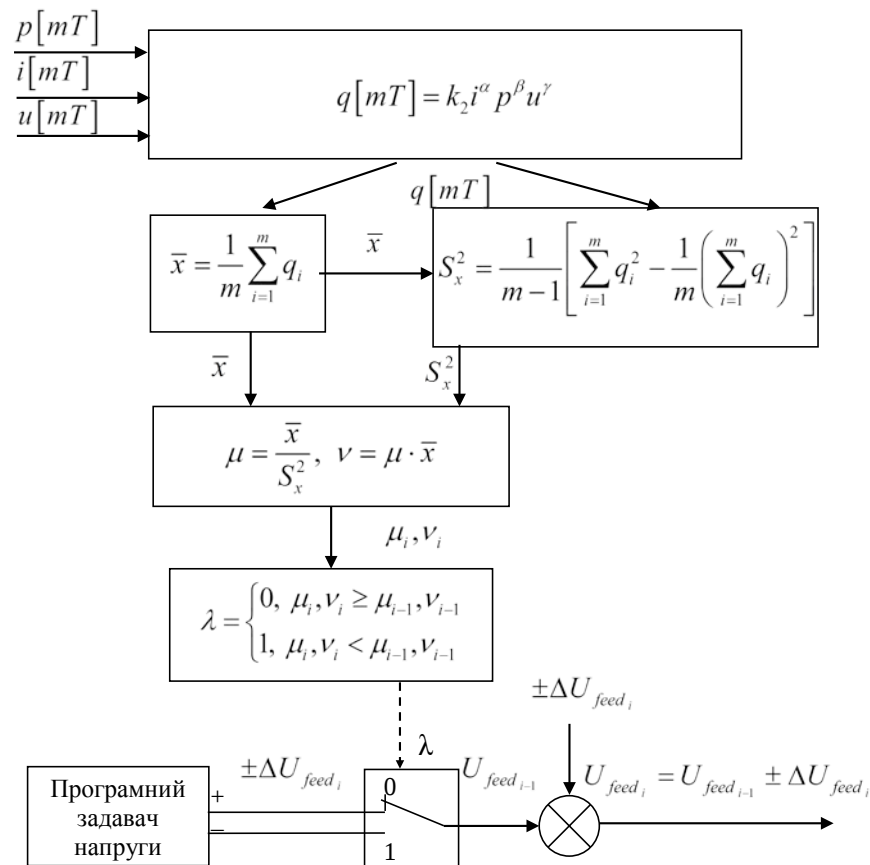


Рис. 2.12. Функціональна схема роботи логічного пристрою перемикання ключів для підсистеми з екстремальним режимом керування подачі електрода-інструмента.

Для перевірки працездатності означених методик дослідження в розділі 2.4.1-2.4.3 та для накопичення даних експериментів, їх візуалізації і обробки розроблений програмно-технічний комплекс, реалізація якого розглянута нижче.

2.5 Розробка програмно-технічного комплексу для аналізу процесу розмірної обробки дугою

Для проведення експериментальних досліджень процесу розмірної обробки дугою при стабільному режимі і особливо на перехідних режимах, необхідні набори статистичних даних: струму і напруги електричної дуги, тиску робочої рідини, лінійного переміщення ЕІ, струму, напруги і частоти обертання двигуна подачі ЕІ, напруги завдання привода подачі. Розв'язати

дану задачу можливо при наявності спеціального обладнання для реєстрації миттєвих значень цих величин. Це потребує використання точних швидкодіючих АЦП та мікроконтролерів і програмного забезпечення до них, що в значній мірі впливає на час розробки та вартість системи.

Останнім часом на ринку вимірювальної техніки з'явилась значна кількість автоматизованих систем збору даних та реєструвальних комплексів, які можуть виконувати багатоканальний запис вимірюваних величин. В багатьох наукових джерелах [30, 34, 39, 40, 49] наводяться приклади побудови таких вимірювальних систем, що використовують універсальні та спеціалізовані АЦП таких виробників, як National Instruments, Texas Instruments, Analog Devices, Microstar Laboratories, L-Card, ХОЛИТ Дэйта Системс. Проте кожна з представлених систем, що відноситься до нижнього цінового діапазону, потребує значних доопрацювань під конкретні умови використання і не може виконувати поставлену перед нами задачу без суттєвої зміни структури вимірювальних каналів та блока спряження. Універсальні реєструючі комплекси середнього і високого цінового діапазону можуть розв'язати поставлену задачу, але надто висока вартість обмежує їх використання у багатьох потенційних замовників. Також на ринку окремо пропонуються блоки АЦП, блоки нормування сигналу та програмне забезпечення для обробки числових даних.

Мікропроцесорні системи збору даних різних виробників однакового цінового діапазону мають приблизно однакові технічні можливості. Вибір продукції того чи іншого виробника обумовлений ціною політикою, наявністю представництва в країні та якістю служби підтримки. Саме тому було прийняте рішення розробити власну багатоканальну вимірювальну систему на базі сучасної мікросистеми збору даних вітчизняного виробництва.

Попередня реєстрація сигналів робочого процесу розмірної обробки дугою з метою визначення їх характеру, а також з метою оцінки необхідних параметрів аналогово-цифрового перетворювача показала, що він повинен

забезпечувати частоту квантування реалізацій змінних одного каналу, враховуючи апріорні дані, не менше ніж 20 кГц, що цілком достатньо для обробки стохастичних процесів за частотним діапазоном. Діапазон вхідної напруги перетворювача повинен складати ± 10 В, орієнтуючись на датчики струму і напруги. Кількість аналогових входів повинно бути не менше восьми. Усім вище означеним критеріям відповідає вітчизняна мікросистема збору даних виробництва ХОЛИТ Дэйта Системс типу m-DAQ12 [97], яка й була вибрана нами для побудови програмно-технічного комплексу. Мікросистема дозволяє працювати з 4-ма диференційними або 8-ма каналами із загальною точкою для введення аналогових сигналів.

Кожен з аналогових каналів підмикається до АЦП через програмно-керований підсилювач, що дозволяє задавати один з чотирьох діапазонів вимірювання напруги (± 10 В ± 5 В, ± 2.5 В, ± 1.25 В). Модулі забезпечують безперервний (синхронізований по внутрішньому таймеру) збір даних на частотах дискретизації АЦП від 65 Гц до 100 кГц.

Програмно-технічний комплекс для реєстрації технологічних параметрів складається з технічних і програмних компонентів. До основних технічних компонентів можна віднести: засоби вимірювання електричних величин, засоби вводу-виводу аналогових, цифрових і релейних сигналів та засоби обчислювальної техніки. До програмних компонентів відносимо системне програмне і загальне прикладне програмне забезпечення.

Параметри процесу розмірної обробки дугою, що підлягають реєстрації, розділимо на технологічні параметри об'єкта дослідження і технологічні параметри привода подачі електрода-інструмента. До технологічних параметрів об'єкта дослідження віднесемо: струм дуги; напруга дуги; статичний тиск робочої рідини, що прокачується; переміщення електрода інструмента.

До технологічних параметрів привода подачі віднесені: напруга та струм двигуна подачі електрода-інструмента; напруга на тахогенераторі, якій

співвісно з'єднаний з двигуном подачі електрода-інструмента; напруга задавання.

Межі вимірювання досліджуваних параметрів експерименту наведені в таблиці додатку Г.

При сталій потужності джерела дуги, струм та напруга дуги змінюються в залежності від міжелектродного проміжку, на який впливає різниця між швидкістю подачі електрода-інструмента та швидкістю обробки матеріалу.

Так як швидкість подачі електрода-інструмента змінює параметри дуги, то даний параметр вважатимемо основним по мірі впливу на процес обробки. Іншими параметрами, що підлягають контролю є струм, що споживається двигуном подачі електрода-інструмента, та частота обертання двигуна. Дані параметри дозволяють визначити зусилля, яке необхідно створити на електроді-інструменті для його подачі, а також визначити оптимальну потужність приводу для різних операцій обробки методом розмірної обробки дугою.

В програмно-технічному комплексі передбачається можливість реєстрації параметрів, наведених в додатку Г. Кількість одночасних каналів, що реєструються, обмежуються можливостями мікросистеми збору даних m-DAQ12 і їх кількість дорівнює восьми при схемі з'єднання загальна точка і чотири канали у випадку диференційного з'єднання джерела вимірювального сигналу з m-DAQ12 [97].

В програмно-технічному комплексі передбачена гальванічна роз'єднання чотирьох каналів:

- струм електричної дуги (датчик Холла типу LEM LF 305-S/SP11);
- струм двигуна подачі електрода-інструмента (датчик Холла типу ACS712ELC-20A);
- напруга двигуна подачі електрода-інструмента (за допомогою каналу модуля гальванороз'єднання типу МГР2);

- напруга тахогенератора, що співвісно з'єднані з двигуном подачі електрода-інструмента (за допомогою каналу модуля гальванороз'єднання типу МГР2);

Модуль гальванороз'єднання МГР2 має два канали напруги, які гальванороз'єднання між собою і побудовані на операційному підсилювачі HCPL-7840 фірми Hewlett Packard.

Миттєві значення вимірюваних величин, що підлягають реєстрації, можуть бути за рівнем амплітуди сигналу більшими допустимого значення, яке дозволено згідно з технічною документацією на мікросистему збору даних з інтерфейсом USB типу m-DAQ12. Тому між датчиками і мікросистемою збору даних встановлюється блок нормалізації сигналу, який перетворює і нормує сигнал за рівнем допустимих значень по входу пристрою мікросистеми збору даних. Принципова електрична схема блоку нормалізації каналу напруги наведена на рис. 2.13. Схемні рішення блоку нормалізації для каналів, що вимірюють інші фізичні величини, наведені в [96]. До складу вимірювальних каналів входить обмежувальний захист від високої напруги у вигляді подільника напруги та двоанодного стабілітрона, які обмежують напругу вище встановленого рівня 10 В.

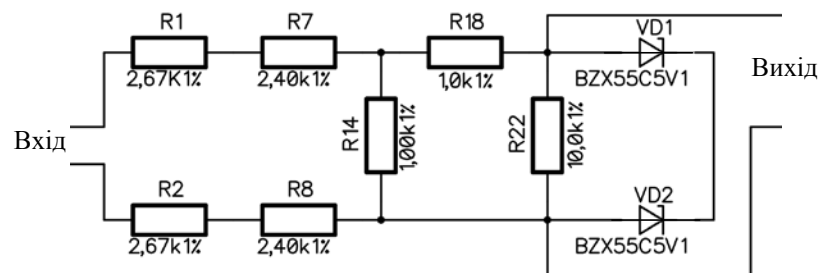


Рис. 2.13. Принципова електрична схема блоку нормалізації каналу напруги.

Всі вимірювальні канали, яким необхідне додаткове живлення, отримують його від гальванічно розв'язаних джерел живлення. Це дозволяє зменшити наводки та паразитні сигнали між вимірювальними каналами при схемі з'єднання з загальною точкою.

Дані вимірювальних каналів після блоку нормалізації та захисту поступають на клемну плату DB-25C, а далі - на мікросистему збору даних з інтерфейсом USB типу m-DAQ12 (Рис. 2.14).

Робота мікросистеми збору даних неможлива без з'єднання її з персональним комп'ютером, який виконує функцію прийому і збереження масивів числових даних. Програмне забезпечення програмно-технічного комплексу повинно розв'язувати задачі по налаштуванню каналів введення-виведення мікросистеми збору даних, приймати і відображати поточні дані, вносити коригування і заносити коментарі до записаних блоків інформації, виконувати математичну обробку отриманих даних; зберігати, імпортувати і друкувати результати досліджень.



Рис. 2.14. Зовнішній вигляд мікросистеми збору даних m-DAQ12 в зборі з клемною платою DB-25C.

До складу поставки мікросистеми збору даних входять драйвери для роботи з операційною системою, DLL-бібліотеки і приклади роботи з нею для середовища графічного програмування Labview і програма «Осцилограф-реєстратор». Даної комплектації достатньо для написання програм під конкретну задачу реєстрації параметрів робочого процесу розмірної обробки дугою. Проте створення спеціалізованого програмного забезпечення потребує тривалого часу написання і налаштування програмного коду, що неможливо виконати без залучення спеціалістів високої кваліфікації і додаткового фінансового ресурсу.

Для наукових досліджень вибираємо програмний продукт «PowerGraph Professional», який позиціонується на ринку програмного забезпечення, як програмна система, що дозволяє організувати запис, візуалізацію, обробку та збереження результатів дослідження з плат АЦП і мікросистем збору даних, в тому числі і m-DAQ12. До складу програми «PowerGraph Professional» входить бібліотека функцій математичної і цифрової обробки сигналів, призначених для проведення обчислень і отримання розрахункових даних. Функції обробки сигналів можуть бути використані як після закінчення реєстрації (режим пост-обробки), так і безпосередньо в процесі отримання даних з мікросистеми збору даних m-DAQ12 (режим реального часу) [116]. Структурна схема описаної системи наведена на рис.2.15.

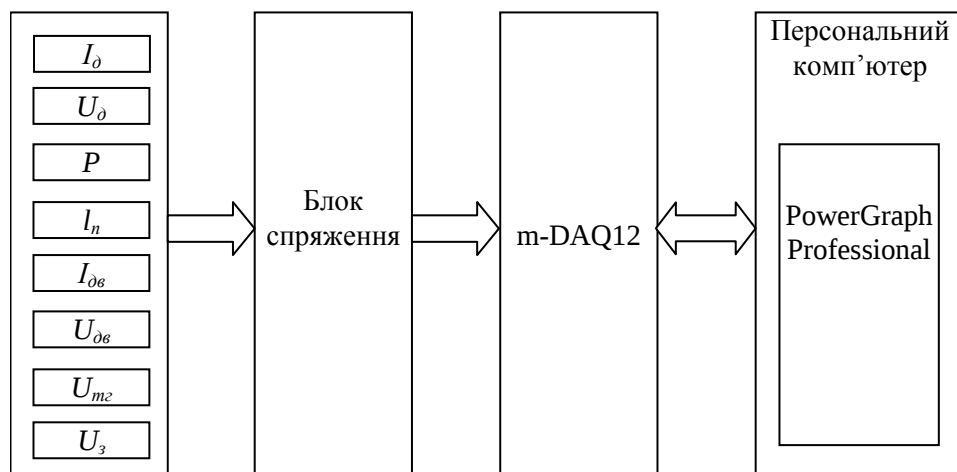


Рис. 2.15. Структурна схема програмно-технічного комплексу для дослідження РОД: I_d – струм електричної дуги; U_d – напруга дуги; P – тиск робочої рідини; I_n – величина переміщення ЕІ; $I_{дв}$ – струм двигуна подачі ЕІ; $U_{дв}$ – напруга двигуна подачі ЕІ; $U_{mг}$ – напруга тахогенератора (датчик частоти обертання двигуна); $U_з$ – напруга завдання.

Характерні часові ряди значень вимірювальних каналів, отримані в ході проведення експериментальних досліджень (марка графітового електрода МПГ7, марка деталі сталь Ст3), наведені на рис. 2.16.

Програма «PowerGraph Professional» виконує блочний запис результатів аналого-цифрового перетворення та дозволяє виконувати велику

кількість операцій над блоками або їх виділеною частиною по переміщенню, копіюванню, видаленню, математичній обробці сигналів, як в масштабі реального часу, так і після запису експерименту.

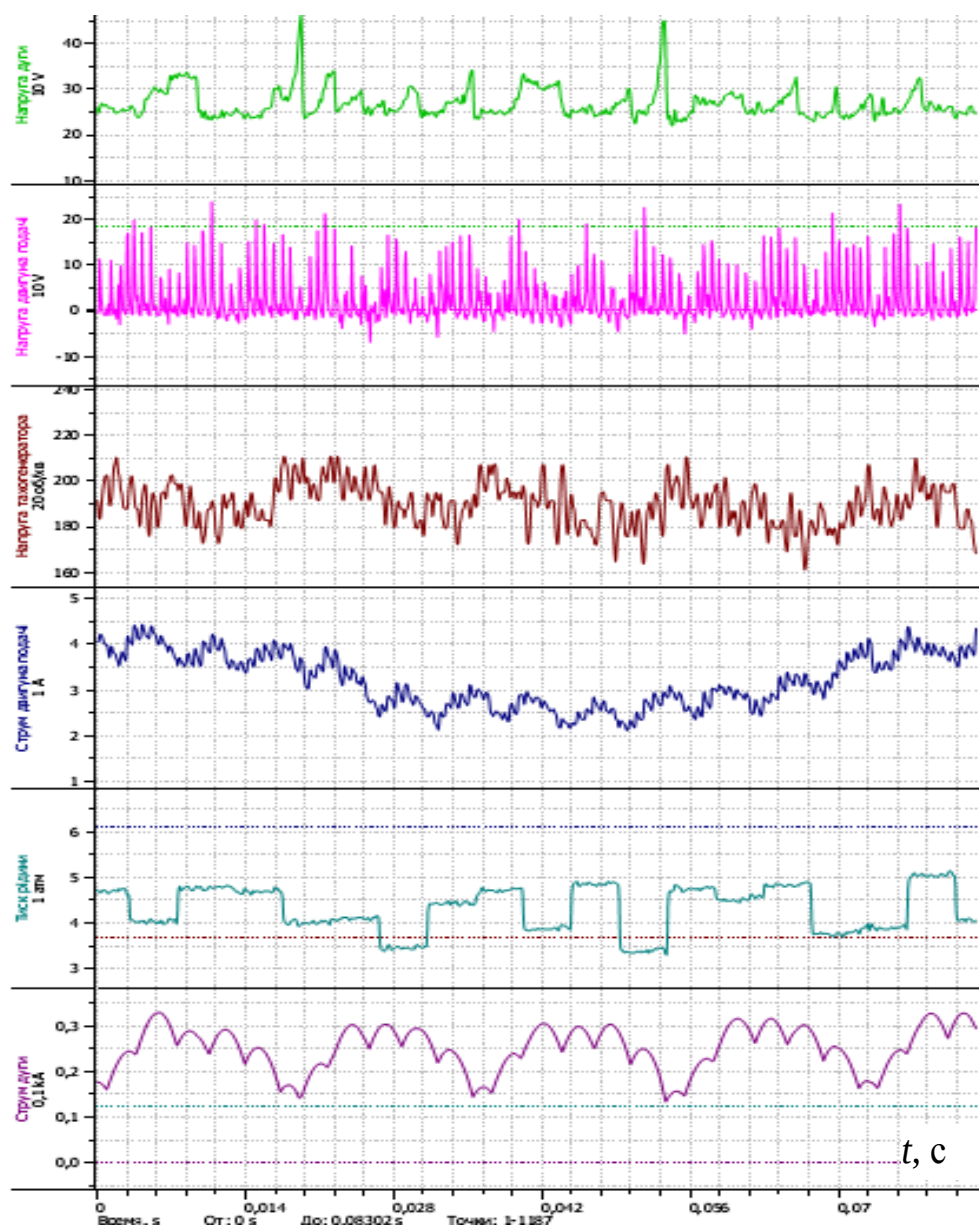


Рис. 2.16. Типові часові ряди значень вимірювальних каналів при стаціонарному режимі обробки деталі

Також в програмному продукті передбачена можливість аналізу даних шляхом збільшення масштабу і редагування окремих ділянок і значень оцифрованого сигналу, шляхом додаткової графічної побудови на осі часу і амплітуди, розрахунку кута нахилу та побудови дотичної в точці, пошук

максимального, мінімального та середнього значення з побудовою відповідної проекції і багато інших інструментів (функцій).

Засоби вимірювання технічних параметрів процесу РОД на верстаті з електромеханічним приводом розглянуті в додатку Д.

2.6 Лінеаризована математична модель об'єкта керування

В переважній більшості САК електроерозійних верстатів міжелектродний проміжок визначається по величині падіння напруги на електричній дузі. Це пояснюється тим, що процес горіння дуги відбувається, коли робоча точка дуги знаходиться на лінійній ділянці АК, (анод-катод) характеристики дуги $U_{\text{дузи}} = f(L_d)$. Фізична картина процесу РОД з урахуванням електричних зон міжелектродного проміжку зображена на рис. 2.17. Напругу дуги $U_{\text{дузи}}$ можна представити як суму падінь напруг в анодній U_a , катодній U_k зонах і зоні стовпа дуги U_c [24, 80]:

$$U_{\text{дузи}} = U_k + U_c + U_a, \text{ В.} \quad (2.12)$$

В роботах [26, 50, 62, 83] доведено, що електрична дуга виконує локальне руйнування деталі поступово, створюючи лунки на її поверхні. При цьому отримуємо поверхню деталі, що відповідає профілю електрода-інструмента. Характер зміни міжелектродного проміжку при РОД має дискретний характер, як це схематично показано на рис. 2.18, тому при подачі електрода-інструмента, відповідно рівній швидкості електроерозії електрода-заготовки, можна стабілізувати довжину електричної дуги в певних межах і, відповідно, стабілізувати процес РОД.

Дуга є нелінійним елементом, що залежить від дуже великої кількості чинників. Лінеаризуємо математичну модель дуги для стаціонарної дуги процесу розмірної обробки дугою у її робочій точці в режимі малих переміщень ЕІ.

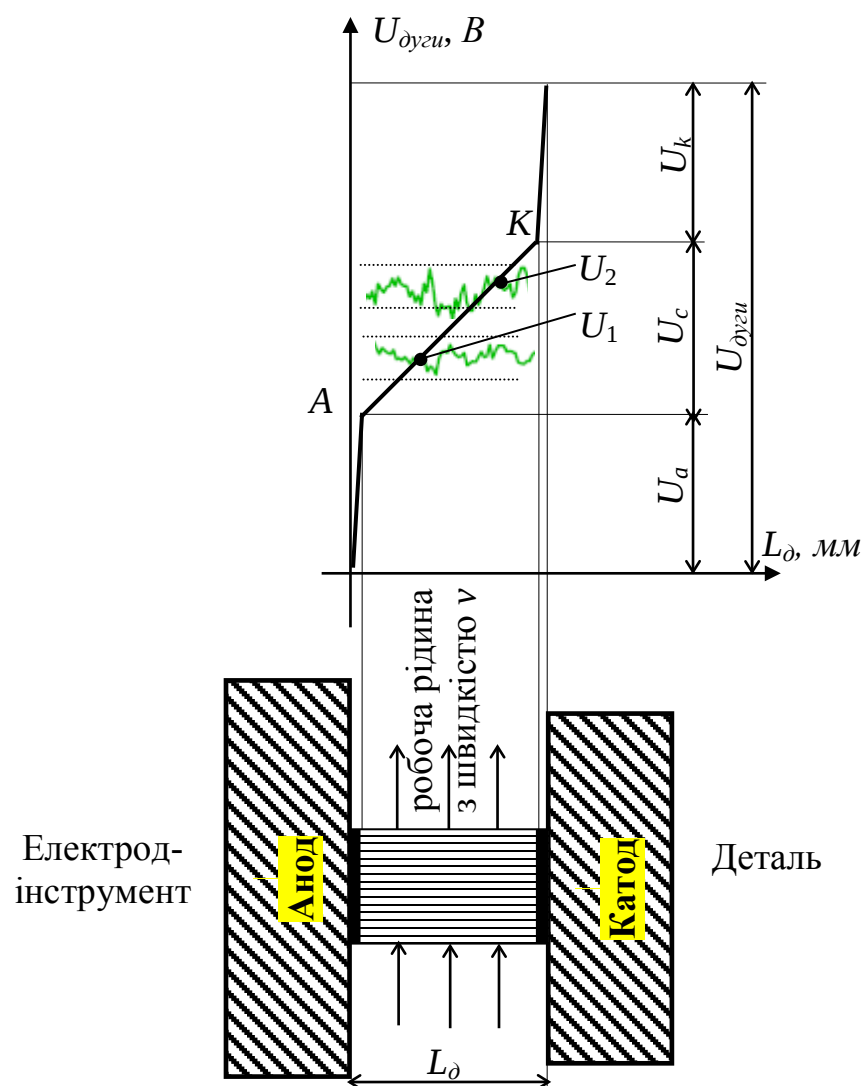


Рис. 2.17. Процес РОД при стаціонарному електричному розряді.

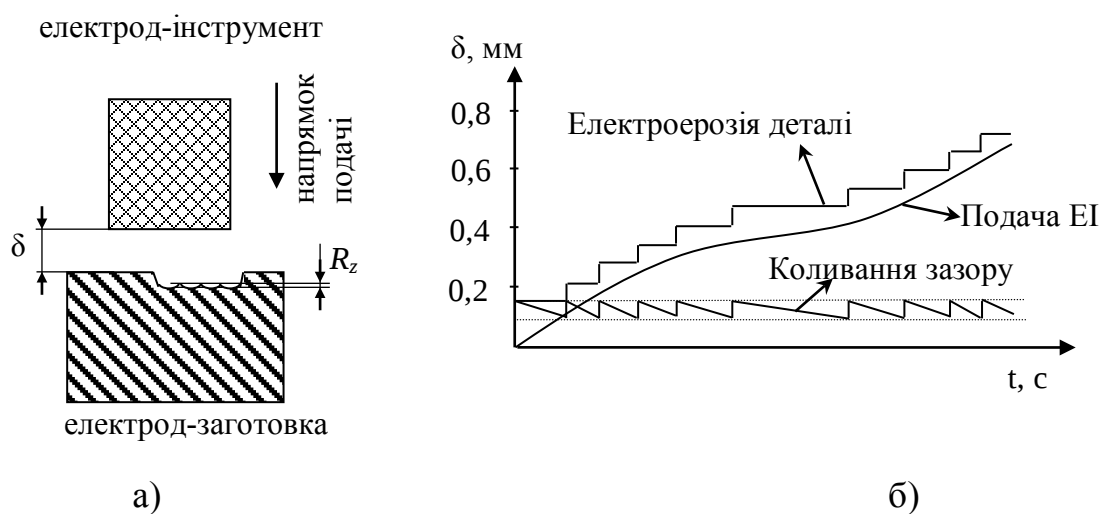


Рис. 2.18. Характер зміни МЕР при ЕЕО: а – зміна проміжку між електродами; б – зміна зазору за часом при стабільному горінні дуги

переміщенням електродів. Цій робочій точці відповідають значення $U_{\text{дуги}}$. Під час обробки способом РОД з'являються прирости $\Delta L_{\text{д}}$ і відповідно одержимо приріст $\Delta U_{\text{дуги}}$. Тоді САК переміщенням електрода змінює положення електрода так, щоб забезпечити роботу, що відповідає робочій точці, де $\Delta L_{\text{д}} = 0$.

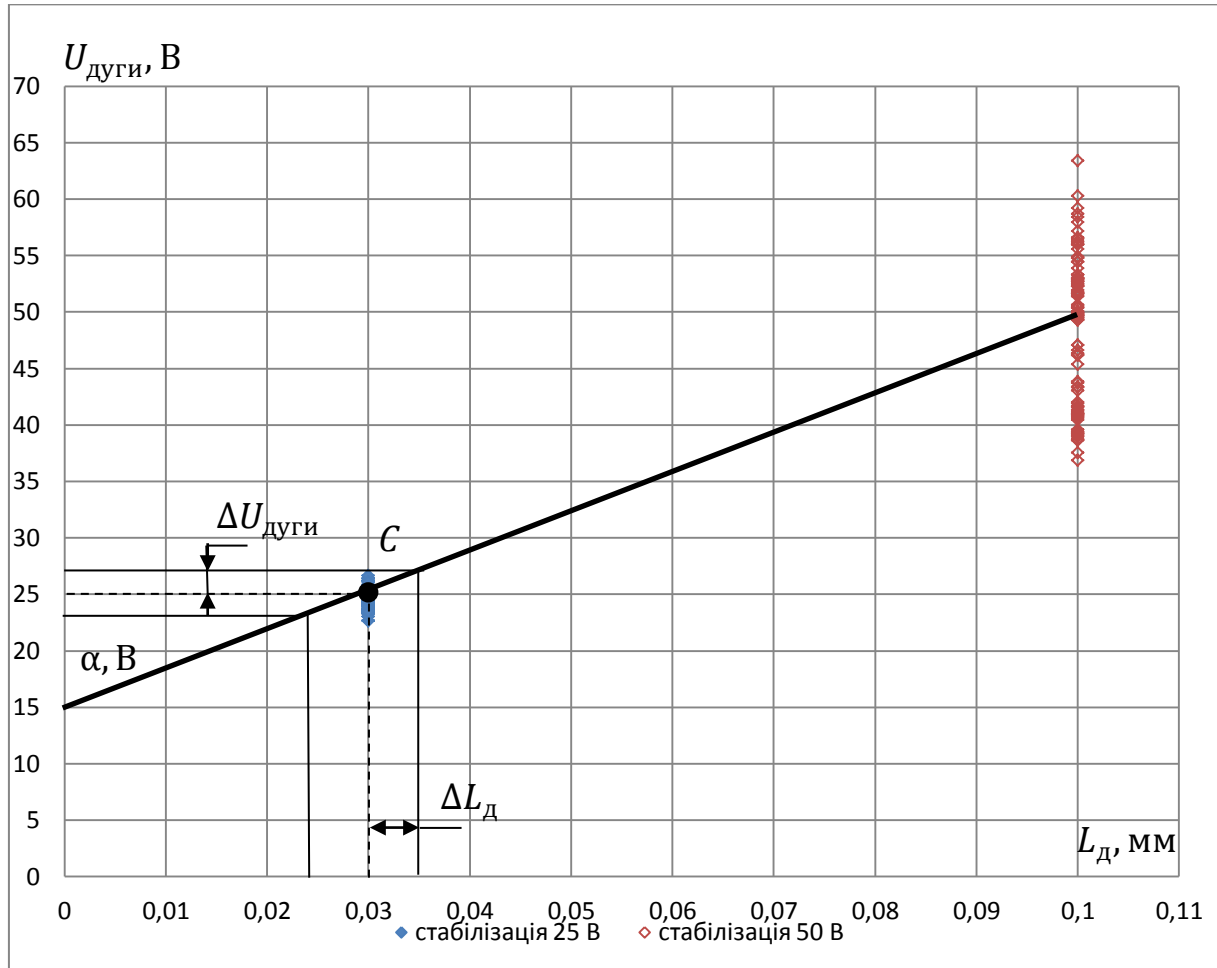


Рис. 2.19. Залежності напруги дуги від довжини дуги

Якщо за вхідну величину процесу розмірної обробки дугою прийняти шлях, пройдений електродом-інструментом S_n , а $S_{\text{ел}}$ за величину електроерозії, то міжелектродний проміжок δ складе:

$$\delta = S_{\text{ел}} - S_n. \quad (2.32)$$

При стаціонарному горінні дуги міжелектродний проміжок можна прийняти рівним довжині стовпа дуги $\delta = L_{\text{д}}$. Виходячи з залежності $U_{\text{дуги}} = f(L_{\text{д}})$, наведений на рис. 2.19, при зміні $L_{\text{д}}$ на вході отримуємо $U_{\text{дуги}}$ на виході об'єкта керування. Отримане значення напруги дуги ($U_{\text{дуги}}$)

порівнюється з напругою за давачем ($U_{з\partial}$) і формується сигнал неузгодження ($U_{зб}$):

$$U_{зб} = U_{з\partial} - U_{\partial yzи} . \quad (2.33)$$

Перейдемо до приростів. Тоді величину $\Delta U_{\partial yzи}$ визначимо з (1.7) і одержимо:

$$\Delta U_{\partial yzи} = \beta \Delta L_{\partial}, \quad \Delta U_{зб} = -\Delta U_{\partial yzи} . \quad (2.34)$$

При малих переміщеннях напругу неузгодження з урахуванням виразів (2.14) і (2.15) можна записати у вигляді:

$$\Delta U_{зб} = -\beta \Delta L_{\partial}, \quad \Delta U_{зб} = -K_{\partial} \Delta L_{\partial} . \quad (2.35)$$

Як видно з цього виразу, структурну схему об'єкта керування при малих переміщеннях електрода-інструмента можна зобразити звичайним підсилювачем з коефіцієнтом підсилення K_{∂} , що дорівнює значенню градієнта напруженості в стовпі дуги β . Виразам (2.32)-(2.35) відповідає структурна схема, яка показана на рис. 2.20.

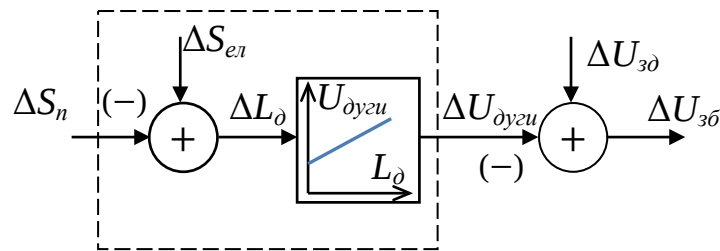


Рис. 2.20. Структурна схема дуги, як елемента об'єкта керування.

Одержані результати використані для побудови загальної математичної моделі САК переміщенням електродів.

2.7 Математична модель електромеханічної системи переміщення електродів

Механічна частина верстата виконана на базі свердлувального верстату. До валу подачі верстата співвісно, через муфту, закріплений черв'ячний редуктор з передавальним числом $u = 12$. Далі, через муфту, планетарний редуктор з передавальним числом $u = 190$ приєднується

високомоментний двигун ДП-60-90-4-24-Р11. Також через муфту виконане кріплення редуктора та високомоментного двигуна до станини верстата. Зовнішній вигляд кріплення приводу подачі ЕІ зображений на рис. 2.6.

Загальне передавальне число редукторів складає $u = 2280$, що дозволяє значно підвищити момент на валу двигуна і, враховуючи широкий діапазон регулювання комплектного електропривода типу ЕШМ-1, дозволяє відпрацьовувати дуже низьку кутову швидкість (частки оберта вихідного валу за хвилину). Обертальний момент за допомогою рейкового редуктора перетворюється в зворотно-поступальний і передається електроерозійній головці (ЕЕГ) і далі на ЕІ.

В зв'язку з тим, що станина свердлувального верстата має недостатню жорсткість конструкції, були введені системи розтяжок, які жорстко закріплюють Г-подібну конструкцію верстата. Зовнішній вигляд експериментального верстата РОД зображений рис. 2.6.

Визначимо конструктивні і технологічні особливості процесу РОД при використанні електромеханічного приводу подачі ЕІ:

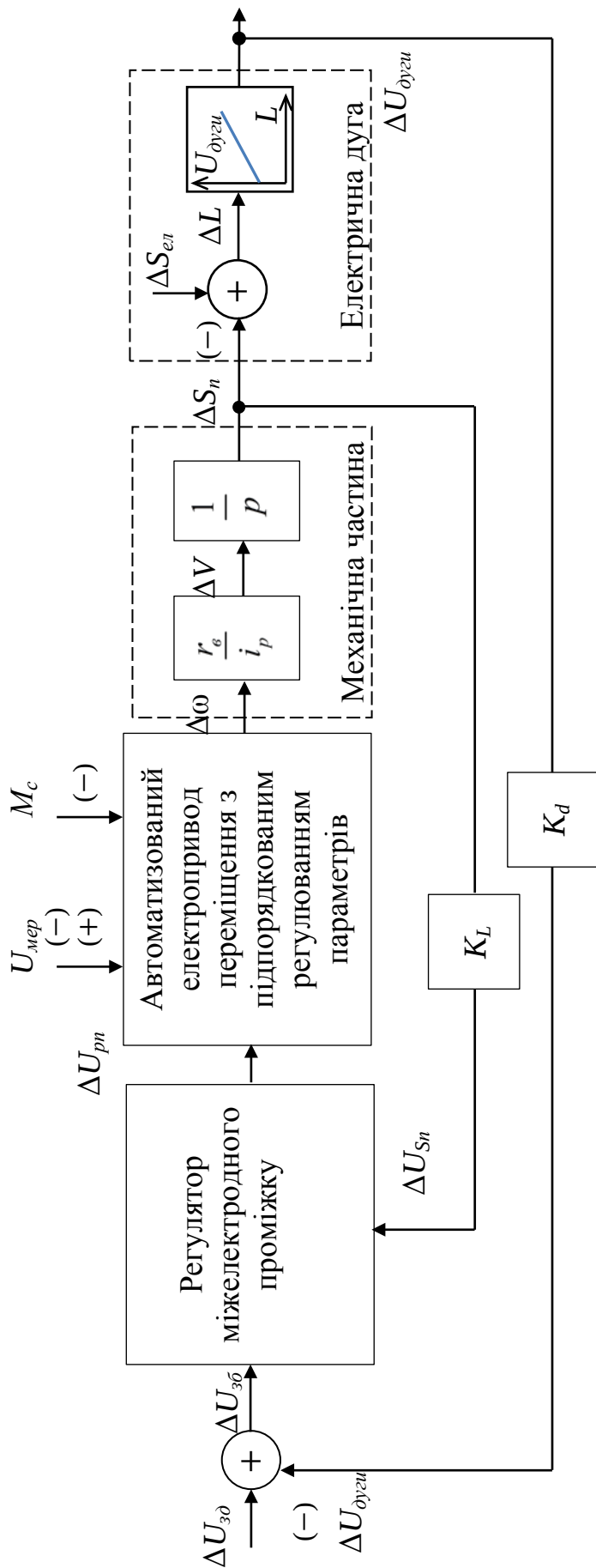
- всі рухомі маси (двигун, компоненти редуктора, рейкова передача, електрод-інструмент), що жорстко з'єднані з двигуном, приведені до його вала;

- при усталеному процесі РОД подача ЕІ виконується лише в одному напрямі, змінюється лише її величина;

- робоча рідина створює зустрічний момент по відношенню до напрямку подачі, що приводить до зменшення люфтів в рухомих масах до мінімуму;

- при Г-подібній станині верстату в конструкцію вносяться додаткові регульовані елементи (розтяжки та штанги). Вони зменшують пружні деформації станини до значення, при якому пружними деформаціями при розрахунку системи переміщення ЕІ можна знехтувати, що дає можливість розглядати електромеханічну систему, як одномасову.

Блок-схема електромеханічної системи переміщення електрода наведена на рис. 2.21. Для компактності зображення впливів від оператора на блок-схемі покажемо тільки для задавача швидкості подачі.



де K_d , K_L – коефіцієнти зворотного зв'язку по напрузі дуги і положенню; i_p – передатне число редуктора; r_e – радіус вала вихідного механізму; M_c – момент опору на валу двигуна; $U_{мер}$ – збурювальна дія мережі живлення ; U_{pn} – уставка регулятора міжелектродного проміжку.

Рис. 2.22. Структурна схема САК подачі електрода-інструмента.

Дуга є нелінійним елементом, що залежить, як уже зазначалося, від дуже великої кількості факторів. Процедура лінеаризації математичної моделі дуги, як елемента об'єкта керування розглянута в 2.6. Отже, під час аналізу і синтезу САК переміщенням електродів перехід від абсолютних значень до приростів дає змогу описати об'єкт керування лінійними рівняннями, а тому можна використовувати методи аналізу та синтезу лінійних САК.

Структурна схема описується такою системою диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta U_{зб}(p) = \Delta U_{з0}(p) - \Delta U_{дуги}(p) \\ \Delta U_{pn}(p) = K_{pn} \cdot \Delta U_{зб}(p) \\ \Delta \omega(p) = \frac{[\Delta M(p) - \Delta M_c(p)] R_\gamma}{C^2 T_m p} \\ \Delta M(p) = C \Delta I_\gamma(p) \\ \Delta V(p) = \frac{\Delta \omega(p) r_\epsilon}{i_p} \\ \Delta S_n(p) = \frac{\Delta \omega(p) r_\epsilon}{i_p p} \\ \Delta L(p) = \Delta S_{en}(p) - \Delta S_n(p) \\ \Delta U_{S_n}(p) = K_L \Delta S_n(p) \\ \Delta U_{дуги}(p) = -K_\delta \Delta L(p) \end{array} \right. \quad (2.36)$$

Саме таку одномасову систему будемо використовувати для аналізу і синтезу САК швидкістю подачі електрода-інструмента процесу РОД

2.8 Методи лінеаризації нелінійностей електроприводу з релейними регуляторами

Вибраний комплектний електропривод подачі ЕШМ-1 є приводом з релейним регулятором. Загальновідомо, що оптимальні по швидкодії системи – релейні. Для позиційних систем електроприводу найбільша швидкодія відповідає перемикаючому знаку максимального значення рушійного моменту двигуна. Близьке до оптимального керування реалізується, якщо побудувати

релейний контур струму спільно з імпульсним підсилювачем потужності і зворотним зв'язком по струму.

При розробці структурних схем прийняті основні припущення, що відповідають «класичному» контуру струму. Імпульсний підсилювач потужності представлений ланцюгом множення, обґрунтування такого математичного представлення наведене в [60].

В якості метода синтезу вибраний метод еквівалентної лінеаризації [113], що дозволяє для однозначних і багатоходових нелінійних ланцюгів мінімізувати середнє значення квадрата відтворення заданого вхідного сигналу. При такому підході вхідним сигналом можуть бути різні періодичні і випадкові сигнали. Також відзначимо, що при синусоїдальному вхідному сигналі отримані результати, що відповідають методу гармонійної лінеаризації. Даний підхід можна перенести на нелінійні ланцюги з багатьма входами і виходами.

У відповідності з [113], якщо вхідний сигнал має цілком визначену форму $x(t) = x_1(t)$, знайдемо такий еквівалентний елемент, який забезпечить рівність:

$$y_1(t) = N(x_1)x_1. \quad (2.37)$$

Матриця еквівалентних функцій N вибрана таким чином, щоб мінімізувати середній квадрат для похибки:

$$\overline{\|\varepsilon(t)\|^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^{+T} \|\varepsilon(t)\|^2 dt, \quad (2.38)$$

де

$$\varepsilon(t) = f(x_1) - N(x_1)x_1. \quad (2.39)$$

В праці [107] автор застосував теорію еквівалентної лінеаризації нелінійних ланцюгів безпосередньо до релейного контуру струму з незалежним завданням частоти реального ковзного режиму. На структурній схемі контуру регулювання частоти перемикання релейного елемента (рис.

2.23) зобразимо вхідною величиною частоту ковзного режиму $f_{кр}$ (при $E = \text{const}$).

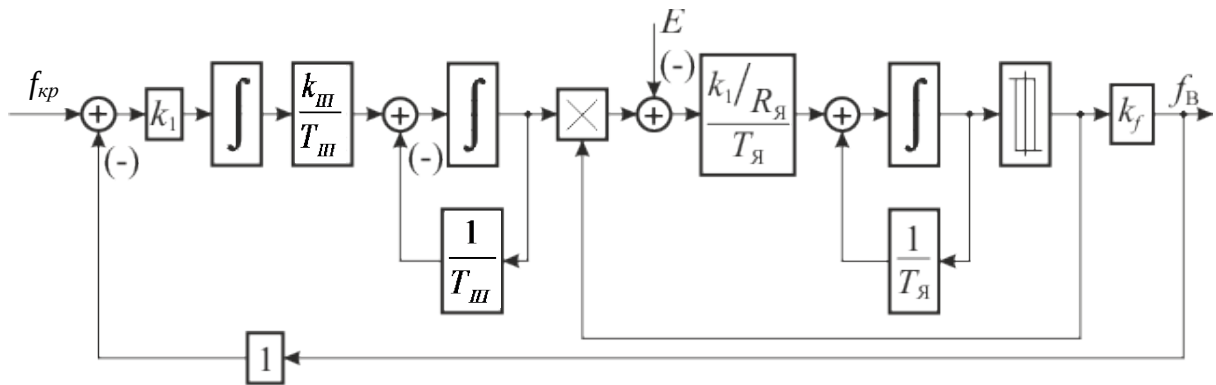


Рис. 2.23. Структурна схема контуру регулювання частоти перемикання релейного елемента

На структурній схемі регульоване джерело живлення представлено аперіодичною ланкою, що і відповідає найбільш розповсюдженій математичній моделі.

В результаті перетворення, розглянутого в праці [107], отримаємо лінеаризовану структурну схему рис. 2.24.

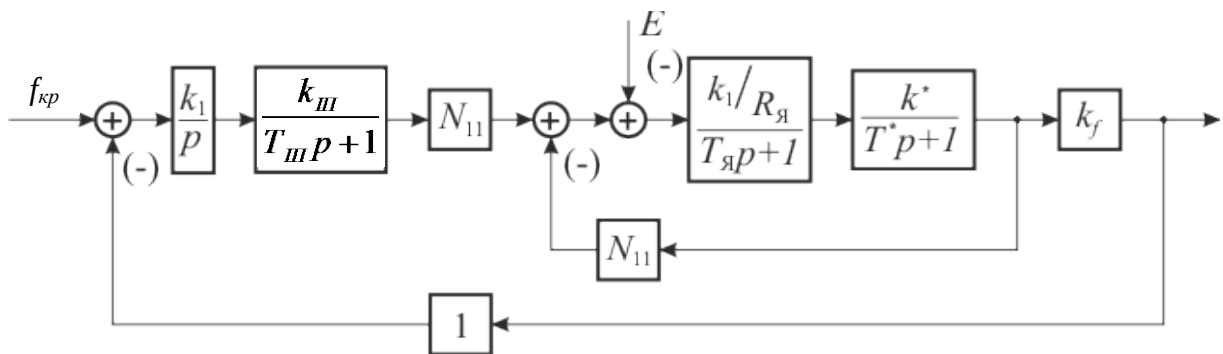


Рис. 2.24. Лінеаризована структурна схема контуру регулювання частоти перемикання релейного елемента

Електропривод постійного струму має ряд специфічних особливостей у порівнянні до загальнопромислового електроприводу. Данні особливості викликані в першу чергу конструкцією електричних машин і їх характеристиками потужності. До таких особливостей віднесемо: досить високе значення активного опору якоря двигуна, лінійність кривої

намагнічування, відносно низький коефіцієнт корисної дії. Ці та інші особливості виділяють мікроелектропривід (двигун потужністю до 1 кВт) постійного струму в окремий клас систем автоматизованого електропривода постійного струму.

Висновки до другого розділу

1. В результаті системного аналізу процесу розмірної обробки дугою виявлено, що при побудові малих верстатів та деяких класів спеціальних верстатів, наприклад, якщо верстат призначений тільки для отримання отворів або порожнин доцільно використання, за рахунок менших питомих енерговитрат, електромеханічної системи подачі електрода замість гідравлічної.

2. Обґрунтовано і реалізовано модернізацію привода подачі електрода-інструмента на базі комплектного електропривода ЕШІМ-1. Обґрунтовано і запропоновано реалізацію програмно-технічного комплексу, що дозволило виконувати збереження, візуалізацію та обробку результатів експериментів, статистичну обробку реалізацій вихідних величин об'єкта керування, які підтвердили доцільність запропонованих автором методик дослідження.

3. Запропоновано методику експериментальних досліджень і технічних принципів процесу керування швидкості подачі при підведенні електрода-інструмента до заготовки при відсутності горіння дуги, яка дозволила обґрунтовано визначити граничне значення тиску, при якому необхідно змінювати швидкість подачі з підвищеної на робочу для мінімізації часу підведення електрода-інструмента в зону обробки деталі.

4. Запропоновано методику визначення рівня стабільності процесу розмірної обробки, що дозволила кількісно оцінити в реальному часі стан об'єкту керування та визначити значення керувального впливу для підтримання стабільного горіння електричної дуги. На основі даної методики запропоновано і обґрунтовано алгоритм дводіапазонної (перший: 15-50 В,

другий: $\bar{u} \pm 5 B$) стабілізації процесу, який покладений у реалізацію регулятора підсистеми стабілізації процесу РОД.

5. Запропоновано методику формування сигналу завдання для забезпечення максимальної продуктивності процесу обробки деталі, що дозволила кількісно оцінити в реальному часі продуктивність процесу.

6. Реалізацію близьких до оптимальної по швидкодії керувань в електроприводі постійного струму запропоновано здійснювати за допомогою релейних контурів регулювання струму. Виконано дослідження релейного контуру струму якоря при керуванні величини напруги на якорі. Для схеми з незалежним завданням частоти ковзного режиму запропонована методика синтезу контуру стабілізації $f_{кр}$, що базується на методі еквівалентної лінеаризації. Показана можливість формування близьких до оптимального по швидкодії керування з використанням замкнених контурів регулювання струму та швидкості на базі релейних регуляторів.

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЕЛЕКТРОДІВ

При досягненні стабільного процесу розмірної обробки дугою електропривод працює в режимі малих переміщень. Для підвищення швидкодії та точності позиціонування проводимо синтез електропривода подачі.

3.1 Статистичні методи дослідження об'єкта керування

Для дослідження динаміки електромеханічної системи подачі необхідно знати вплив збурювальних дій струму дуги на привод. Керувальний вплив на вході системи формується як результат різниці між задавальним сигналом (визначається технологічними умовами) і сигналом зворотного зв'язку по напрузі дуги. Оскільки горіння дуги є випадковим процесом, то необхідно визначати його вплив на параметри привода. Якщо параметри привода (струм двигуна) буде корелюватись з струмом електричної дуги, то для дослідження динаміки необхідно застосовувати стохастичні методи. Для визначення величини і частоти складових процесу застосуємо метод спектрального аналізу.

Статистичні методи дослідження процесів керування є важливим і необхідним інструментом при аналізі та синтезі автоматичних систем. В нашому випадку застосовується математичний апарат кореляційно-спектрального аналізу.

Вибіркова оцінка автокореляційної функції визначається [42, 43, 93] рівністю:

$$R(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{T-|\tau|} \int_0^{T-|\tau|} [I(t) - \bar{I}][I(t + |\tau|) - \bar{I}] dt, & 0 \leq \tau \leq T, \\ 0 & |\tau| > T, \end{cases} \quad (3.1)$$

де $\tau = t_2 - t_1$, - зміщення (запізнення).

Для дискретного часового ряду вибіркова оцінка $R(\tau)$, що відповідає безперервній оцінці (3.1), дорівнює:

$$R_I(\mu \cdot \Delta\tau) = \frac{1}{N-\mu} \sum_{\lambda=0}^{N-\mu} I(\lambda \cdot \Delta\tau) \cdot I(\lambda \cdot \Delta\tau + \mu \cdot \Delta\tau), \quad (3.2)$$

$$\mu = 0, 1, 2, \dots, \theta (\theta \ll N),$$

де I - центрована випадкова величина; $(\lambda \cdot \Delta\tau)$ - послідовність дискретних моментів часу; $(\mu \cdot \Delta\tau)$ - поточне зміщення часу (час затримки), по якому розраховується кореляційна функція; $\tau(N-1) = T$ - повний час реалізації, для якого обчислюється $R_I(\tau)$.

Спектральну щільність процесів доцільно розрахувати по косинус-Фур'є-перетворенню кореляційної функції [31, 42, 43, 93]:

$$S_I(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R_i(\tau) \cos \omega\tau \cdot d\tau. \quad (3.3)$$

Згладжену вибірку оцінку спектра в дискретній формі одержимо за допомогою заміни інтеграла відповідною сумою:

$$S_I^*(f) = 2\Delta t [R_I^*(0) + 2 \sum_{k=1}^{L-1} R_I^*(k) \omega(k) \cos 2\pi f k \Delta t], \quad (3.4)$$

де $L = \tau_m / \Delta t$, ω_k - кореляційне вікно з точкою відсікання τ_m , визначене в дискретні моменти часу $\tau = k \cdot \Delta t$. Функція $R_I^* k$ обчислюється лише при $k \geq 0$ (3.2).

Розроблений програмно-технічний комплекс дозволяє проводити квантування за часом до $\Delta t = 0,01$ мс. Це досить малий інтервал часу в порівнянні з розрахунковим.

На рис 3.1, 3.2 наведені приклади згладжених вибірових оцінок нормованих спектрів струмів електричної дуги, двигуна подачі ЕІ і напруги двигуна подачі ЕІ. Для обчислення спектрів бралися ділянки стаціонарного характеру протікання процесів при РОД.

Для того, щоб отримати достовірні вибірові оцінки спектральних площин, застосовуємо спектральні вікна Rectangle, Triangle, Hann, Hamming, Blackman, Kaiser5, Kaise - Bessel, Nuttall3 при різних розмірах спектрального вікна (додаток Ж).

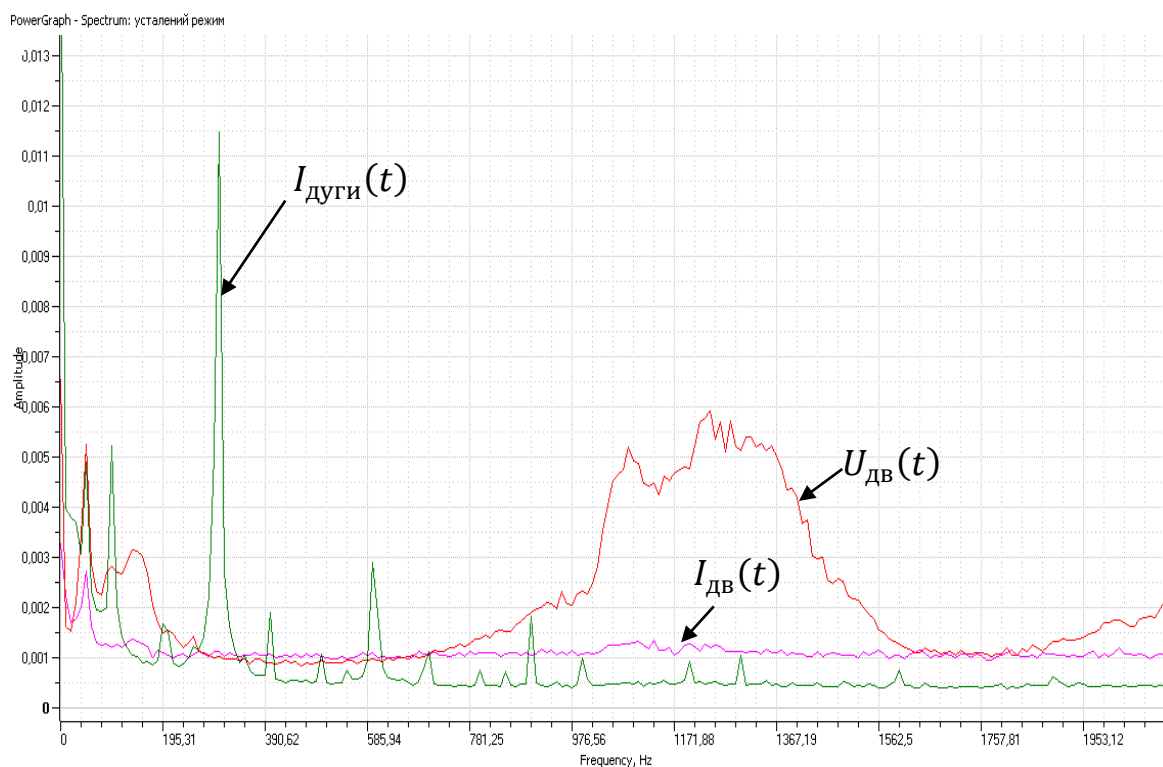


Рис. 3.1. Згладжені вибіркові оцінки нормованих спектрів на частотах від 0 до 2 кГц

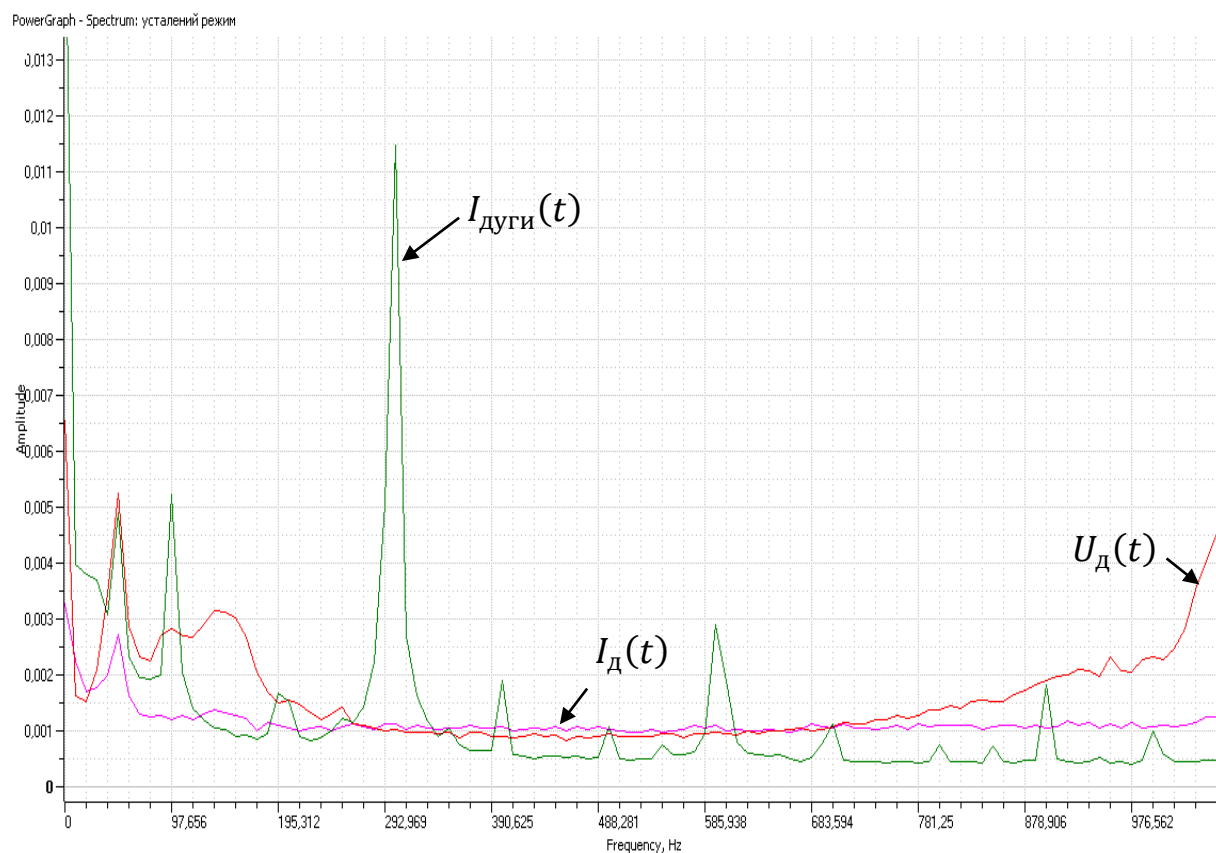


Рис. 3.2. Згладжені вибіркові оцінки нормованих спектрів на частотах від 0 до 1 кГц

Як бачимо з рисунків Ж.1.1-Ж.1.16, при загальній вибірці 340121 точок і при розмірі спектрального вікна, рівного 65536, форма спектрального вікна практично не впливає на характер зміни спектрів. Подібна картина спостерігається і при інших вибірках [32].

При дослідженні часового ряду каналу струму якоря двигуна процес менше схильний до випадкових складових (Ж.1.13-Ж.1.16) - викид енергії на частоті 9 кГц.

Найбільш важливим питанням в практичному спектральному аналізі є вибір ширини смуги частот, а не вибір форми вікна [37, 43]. Емпіричний метод спектрального аналізу був запропонований Дженкінсом, а процедура смуг частот, що поступово стягуються, називається стяганням вікон (Window closing).

Досліджуємо вплив зміни смуги частот, або, що еквівалентно, точки відсікання $L(\tau_m)$ на згладжування вибіркової спектральної оцінки. Зважаючи на відсутність відомого нормованого спектра для досліджуваних параметрів струму електричної дуги в потоці рідини, струму і напруги двигуна подачі ЕІ, простежимо зміни середніх згладжених спектрів при зміні L , що відповідають спектральним вікнам: прямокутну, трикутну, Ханна, Хеммінга, Блекмана, Кайзера, Кайзера-Бесселя, Наттолла.

В [32] та (Ж.1.1-Ж.1.16) наведені приклади стягання спектрального вікна і вплив цієї операції на вигляд спектральної оцінки.

Проаналізуємо зміни оцінки спектральної щільності при введенні різних вагових функцій по каналу струму дуги.

При $L = 62536$. На малих частотах значною величиною стає випадкова складова, після чого з'являються викиди $S_{I_{\text{дуги}}}(f)$ на частотах 50, 100, 200, 400, 500, 600, 700, 900 Гц. Найбільший і широкий пік $S_{I_{\text{дуги}}}(f)$ на частоті $f=300$ Гц, набагато менші піки на вищеперелічених частотах. При $L = 32768$, 16384, 8132, 2048 загальна картина піків мало змінилася, вони залишилися на тих же частотах. Найбільший викид на частоті $f=300$ Гц зберігається і мало змінюється при зміні як розміру вікна, так і вагової функції. Процес стягання

вікна показав, що гарна вибіркова оцінка виходить при L в межах 8192. По наведених даних можна судити про гармонійний склад струму дуги по невеликих піках $S_{I_{\text{дуги}}}(f)$ після частоти $f=600$ Гц.

Пропонуємо наступну інтерпретацію частот струму дуги. Пік на низьких частотах $f < 10$ Гц - це випадкова складова процесу. Пік на частоті 50 Гц ймовірно викликаний наведеннями вимірювальної системи від електромережі.

Причинами появи піків вищих гармонік (окрім основної) на спектрі струму дуги, являються підключені до електромережі споживачі з нелінійною характеристикою.

Порядок вищих гармонік струму перетворювачів визначимо за виразом [47]:

$$\nu = kp \pm 1, \quad (3.5)$$

де p — фазність перетворювача; k — натуральні числа 1, 2, 3... .

Джерелом дуги є зварювальний апарат ВДУ-504, силова схема якого складається з 3-го обмоточного трансформатора з двома вторинними обмотками, які утворюють дві трифазні схеми з нульовим виведенням трансформатора, і із застосуванням зрівняльного реактора. ВДУ є джерелом ряду канонічних гармонік $\nu = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25$. В амплітудних спектрах первинних струмів перетворювачів містяться аномальні гармоніки ($\nu=2, 3, 4, 6, 8, \dots$). Головною причиною їх появи є асиметрія імпульсів керування, викликана несиметрією напруги електромережі. Нелінійність ВАХ електричної дуги також призводить до появи в спектрі струму вищих гармонік і генерує як непарні (3-ю, 5-у, 7-у, 9-у і так далі), так і парні (2-у, 4-у, 6-у, 8-у і так далі) гармоніки струму. Величини цих гармонік носять випадковий характер, тому немає точних формул для їх визначення.

Головними причинами появи аномальних гармонік є безперервна зміна умов горіння дуг і неповне вирівнювання опорів короткої мережі. Еквівалентне діюче значення струмів вищих гармонік в струмі дуги за рахунок аномальних гармонік зростає в 1,8 - 2 рази [47]. Рівень деяких,

окремо взятих аномальних гармонік струму, може досягати до 8% потужності від основної частоти.

В (додатку Ж.1.7) показаний спектр при розмірі вікна $L=1024$, з функцією Rectangle, на якому вже чітко видно піки на частотах <10, 50, 150, 300, 600 Гц, а інші гармоніки вже проявляються слабо.

Аналіз часових рядів (осцилограм) напруги якоря двигуна і струму двигуна. В [32] та в додатку Ж (на рис. Ж.1.8-Ж.1.16) представлені спектри напруги і струмів двигуна при різних спектральних вікнах. Як і при аналізі спектрів струму дуги, вид вікна не особливо впливає на вигляд спектральної щільності. Для достовірності отриманих результатів була проведена процедура стягання вікна при тих же величинах $L = 62536, 32768, 16384, 8132, 2048$ і 1024 та виконане їх порівняння.

Спектри напруги двигуна і струму двигуна мають осцилюючий характер з накладенням високочастотної складової. Спектр струму двигуна має спокійний характер і тільки при частоті 9 кГц має місце викид енергії, особливо це чітко видно при $L = 2048$. Цей пік пояснюється роботою ШІМ перетворювача.

Спектр напруги двигуна (рис. 3.3) складається з декількох піків і при великій ширині вікна піки мають розмитий характер. Процес стягання вікна показує, що вже при $L = 8192$ спектр і особливо його піки, одержують більш чіткі контури. Наявність піків пояснюється технологічними особливостями роботи ШІМ перетворювача.

На рис. 3.3 представлені спільні графіки спектрів в одній системі координат. З графіків видно, що є один пік на частоті 8886,7 Гц, коли співпадають піки струму якоря двигуна $I_a(t)$ і напруга якоря двигуна $U_{\partial\partial}(t)$. Цей пік виникає за рахунок роботи ШІМ перетворювача на цій частоті. Сигнал $I_a(t)$ слабкіший по амплітуді для виміру, тому у нього слабка реакція на піки $U_{\partial\partial}(t)$. Піки спектру дуги $I_{\partial y u}(t)$ не корельовані по частотах із піками спектру напруги двигуна $U_{\partial\partial}(t)$.

На дуже низькій частоті $0 \div 10$ Гц найбільший пік спектру від струму дуги $I_{\text{дуги}}(t)$, що вказує на велику випадкову складову процесу. На цій же частоті $0 \div 10$ Гц пік спектру $U_{\text{ов}}(t)$ набагато більший від піку струму якоря $I_{\text{я}}(t)$, що показує, що останній більше детермінований, тобто менше підвласний випадковим складовим від струму дуги $I_{\text{дуги}}(t)$.

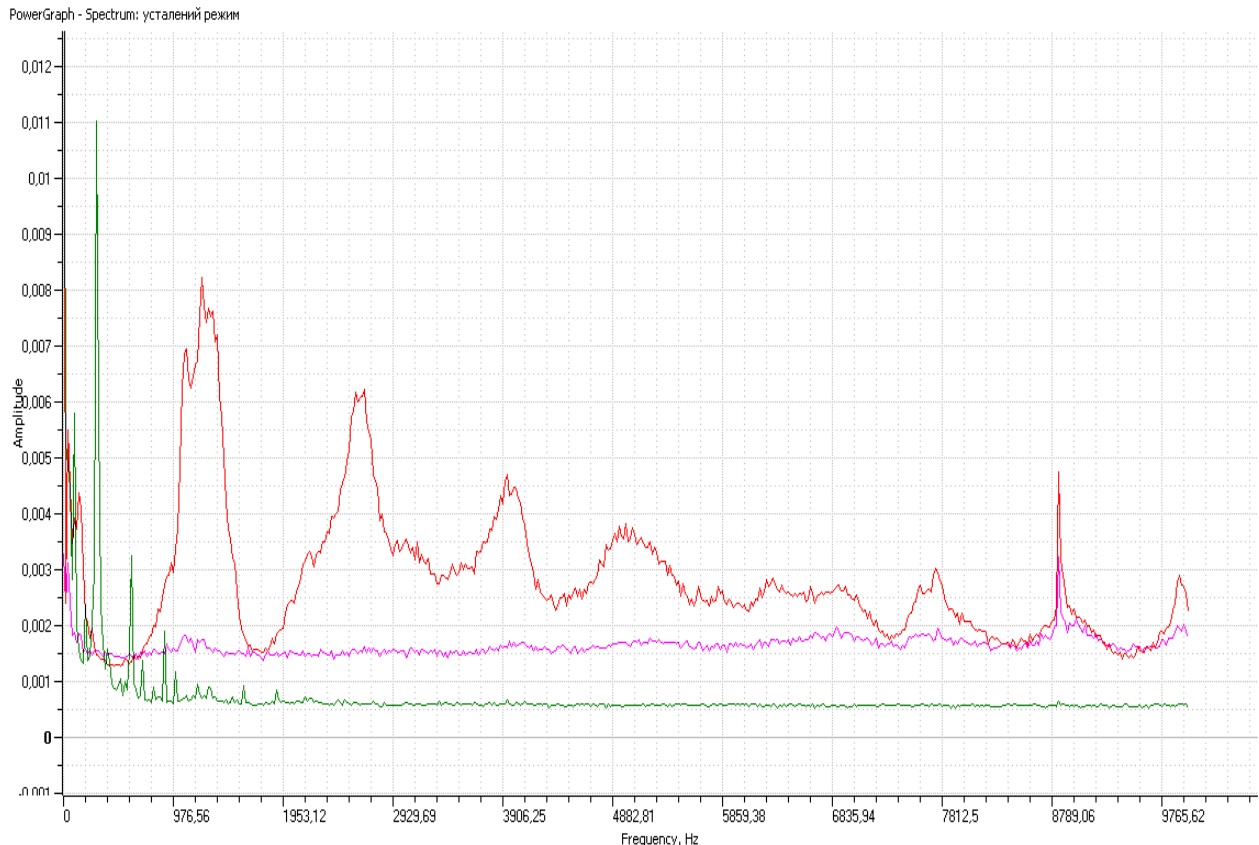


Рис. 3.3. Згладжені вибірккові оцінки нормованих спектрів: $I_{\text{дуги}}(t)$, $U_{\text{ов}}(t)$, $I_{\text{я}}(t)$ на частотах від 0 до 10 кГц (розмір вибірки: 340121, розмір спектрального вікна: 1024, вагова функція: Rectangle, спектр амплітуди: $A = \text{Sqrt}(\text{Re} * \text{Re} + \text{Im} * \text{Im})$)

На частоті $f = 50$ Гц бачимо збіг усіх трьох піків спектрів. Це пояснюється наведеннями мережі, особливо у вимірювальні системи струму якоря двигуна $I_{\text{я}}(t)$ і напруги якоря $U_{\text{ов}}(t)$.

Дуже важливо відзначити наступні особливості аналізу спектрів струму дуги $I_{\text{дуги}}(t)$ і струму якоря двигуна - неспівпадання струмів обох спектрів, навіть при частоті зварювального джерела живлення $f = 300$ Гц. Звідси випливає висновок про дуже слабку кореляцію цих часових процесів.

3.2. Синтез системи регулювання позиційного електропривода подачі електрода-інструмента за допомогою модального керування

Модальний метод синтезу зазвичай використовується при розрахунку систем, що працюють в режимі відпрацювання початкових умов. Модальне керування [33, 107, 108] полягає у формуванні ланцюгів зворотних зв'язків, які забезпечують замкненій системі керування заздалегідь вибрані корені характеристичного рівняння. Кореням відповідають складові вільного руху системи, що називають модами. Оскільки розрахунок ґрунтується на використанні коренів характеристичного рівняння, то і метод синтезу отримав назву модального.

Часто лінійний одноканальний об'єкт зручно описувати за допомогою передаточної функції, тому використаємо операторну методику модального метода синтезу, яка висвітлена в [33]. При модальному методі синтезу корені характеристичного рівняння вибираються на основі вимог до динаміки у вигляді умов за часом перехідного процесу $t_{пер} \leq t_{пер.зад}$ та величини перерегулювання $\sigma \leq \sigma_{зад}$, виконання яких становить основну складність розрахунку для забезпечення заданої точності вихідної координати. При цьому суттєве значення має набір змінних, доступних для вимірювання, за якими будуються ланцюги зворотних зв'язків. Для мікроелектропривода постійного струму найчастіше використовуються зворотні зв'язки за швидкістю та струмом.

При синтезі контуру по положенню виходили з вимог до статичних і динамічних показників мікроелектроприводу (МП), основними з них вважалися: близька до оптимальної швидкодія, при якій забезпечується рух електроду-інструменту з одного положення в інше; забезпечення заданої точності положення.

До сучасних методів синтезу відносяться методи засновані на використанні модальних (кореневих) характеристик систем. Ці методи

розглядаються в роботі Кузовкова Н.Т. [61], Вострікова А.С., Французової Г.А. [33], Симакова Г.М. [107].

По розробленій математичній моделі електропривода електрода-інструмента по положенню у вигляді багатоконтурної структурної схеми, визначимо параметри регуляторів за допомогою методу модального керування. Структурна схема МП в режимі «малих» переміщень приведена на рис. 3.4.

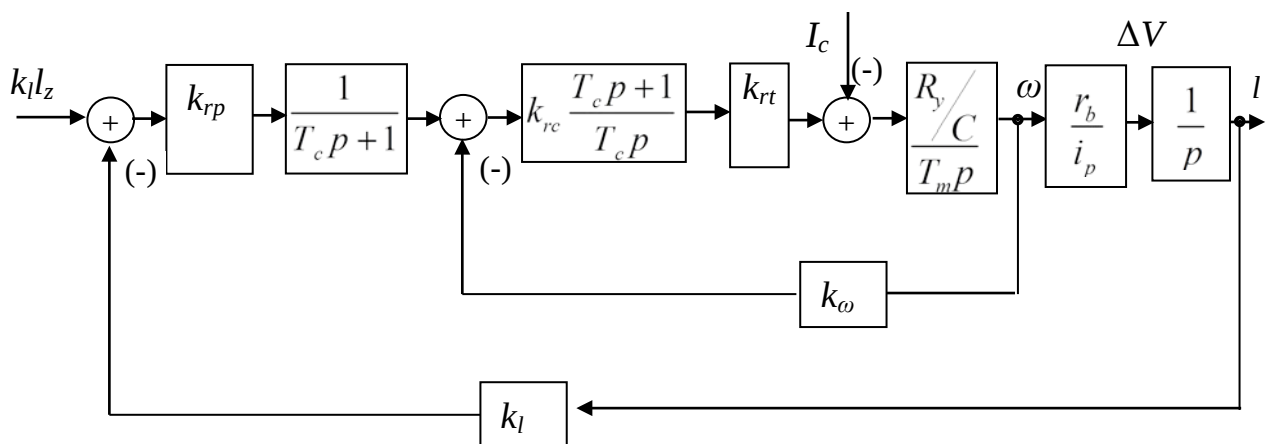


Рис. 3.4. Структурна схема МП в режимі «малих» переміщень з П-регулятором положення: k_{rp} , k_{rc} , k_{rt} – коефіцієнти підсилення регуляторів по положенню, швидкості і струму; k_ω , k_l – коефіцієнти зворотних зв'язків за швидкістю і положенням; C – коефіцієнт зв'язку між моментом і струмом двигуна; R_y – опір якірного ланцюга; i_p – передатне число редуктора; r_b – радіус вала вхідного механізму; ΔV – лінійна швидкість руху електрода; l – переміщення електрода-інструмента; T_c – постійна часу регулятора; T_m – електромеханічна постійна часу привода.

Релейний контур струму якоря представлений безінерційною ланкою з коефіцієнтом посилення k_{rt} , регулятор швидкості вибраний пропорційно-інтегральним, а регулятор положення – пропорційним з коефіцієнтом передачі k_{rp} . Структурна схема МП при даних відмічених особливостях лінійна.

На схемі приводяться передавальні функції замкнутого контуру регулювання швидкості та замкнутого контуру по положенню. Для нашого

випадку переважним є біномінальний розподіл коренів характеристичного рівняння, виходячи з умови відсутності перерегулювання. У загальному випадку (у тому числі, і забезпечення умови аперіодичності) можна сконструювати бажаний характеристичний поліном.

Розглянемо випадок застосування пропорційного регулятора по положенню з приведенням структурної схеми позиційного мікроприводу. Для розробленої системи електроприводу на базі ЕШИМ-1 з двигуном ДП-60-90-4-24 розраховані числові параметри регуляторів.

Допустимість такого рішення виходить з аналізу контуру струму якоря, що було доведене в роботі [33]. Швидкодія релейного контура струму в першу чергу залежить від електромагнітної постійної часу якірного ланцюга T_c . Це пояснюється тим, що в МП постійна часу якоря нижча, ніж електромеханічна T_m , а швидкодія контуру струму вища, ніж у контуру швидкості і тим більше вища ніж у контуру положення.

Регулятор швидкості вибраний пропорційно-інтегральним з передавальною функцією вигляду:

$$W_{rc} = k_{rc} \frac{T_c p + 1}{T_c p} \quad (3.6)$$

Тут k_{rc} - коефіцієнт підсилення регулятора швидкості, T_c – постійна часу регулятора швидкості. Дана ланка повинна усунути помилку в сталому режимі в контурі швидкості.

Регулятор положення вибраний пропорційним з коефіцієнтом передачі k_{rp} , а для компенсації нулів в передавальній функції на вході контура

швидкості поставлений фільтр вигляду $\frac{1}{T_c p + 1}$. Відзначимо, що структурна

схема мікропривода при даних зазначених особливостях лінійна, а «р» є оператором перетворення Лапласа. Структурна схема приведена в абсолютних значеннях величин. Передавальна функція замкнутого контура регулювання швидкості має вигляд:

$$W_{rc}(p) = \frac{k_{rc}(T_c p + 1)k_{rt} \frac{R_y}{C}}{T_c T_m p^2 + k_{rc}(T_c p + 1)k_{rt} \frac{R_y}{C} k_\omega} \quad (3.7)$$

З врахуванням фільтра на вході контура швидкості введемо позначення $k_c = k_{rc} k_{rt} \frac{R_y}{C}$ та запишемо передавальну функцію контура по положенню у вигляді:

$$W_{kp}(p) = \frac{k_{rp} k_c}{T_c T_m p^3 + k_\omega k_c T_c p^2 + k_\omega k_c p + k_{rp} k_c k_l}, \quad (3.8)$$

де $k_l = k_d \frac{r_b}{i_p}$ - коефіцієнт пропорційності по переміщенню; k_d - коефіцієнт передачі датчика положення.

Тоді $W_{kp}(p)$ у загальній прийнятій формі має вигляд:

$$W_{kp}(p) = \frac{\frac{1}{k_l}}{\frac{T_c T_m}{k_{rp} k_c k_l} p^3 + \frac{k_\omega T_c}{k_{rp} k_l} p^2 + \frac{k_\omega}{k_{rp} k_l} p + 1} \quad (3.9)$$

Необхідно, щоб передавальна функція замкнутого контура положення мала вигляд:

$$W(p) = \frac{\frac{1}{k_l}}{T_l^3 p^3 + A_2 \cdot T_l^2 p^2 + A_1 \cdot T_l p + 1}, \quad (3.10)$$

де $T_l = \frac{1}{\Omega_0}$ - постійна часу, яка є величиною зворотною необхідній смузі пропускання мікропривода. T_l - визначає швидкодію контура положення $T_l = 0,0133$ с; $A1$ і $A2$ – коефіцієнти, розраховані залежно від розміщення коренів характеристичного рівняння.

Для системи приводу ЕШИМ-1 смуга пропускання замкнутого швидкісного контуру при вхідному сигналі 0,1 В не менше 75 Гц [134].

Існують різні налаштування залежно від співвідношення коефіцієнтів $A1$ і $A2$ (Біноміальний розподіл, фільтр Баттерворта, кратний комплексно-зв'язаний корінь, мінімальний час регулювання). Для позиційного мікроелектроприводу, виходячи з умови відсутності або незначного перерегулювання, найбільш вагомим є біноміальний розподіл коренів характеристичного рівняння. Для системи третього порядку $A2=A1=3$, у загальному випадку (у цьому числі, і забезпечення умови аперіодичності) можна сконструювати бажаний характеристичний поліном по методиці, викладеній в роботах [21, 92].

Ставлячи у відповідність знаменники необхідної (бажаної) передавальної функції (3.10) і передавальної функції замкнутого контуру регулювання положення по керувальній дії (3.9), отримаємо систему рівнянь для визначення параметрів регуляторів (k_{rp} , k_{rc} , T_c).

$$\begin{cases} \frac{T_c T_m}{k_{rp} k_c k_l} = T_l^3 \\ \frac{k_\omega T_c}{k_{rp} k_l} = A_2 T_l^2 \\ \frac{k_\omega}{k_{rp} k_l} = A_1 \cdot T_l \end{cases} \quad (3.11)$$

З системи рівнянь (3.11) знаходимо параметри регуляторів:

$$k_{rp} = \frac{k_\omega}{A_1 T_l k_l}, \quad (3.12)$$

$$T_c = \frac{A_2 T_l^2 k_{rp} k_l}{k_\omega}, \quad (3.13)$$

$$k_{rp} = \frac{T_c T_m}{T_l^3 k_{rp} k_{rt} \frac{R_y}{c} k_l}. \quad (3.14)$$

Система ЕШИМ-1 з двигуном ДП 60-90-4-24, тахогенератором ТП-11, мережним трансформатором ТСМ-761 і згладжувальним дроселем ДШЛ-320 має наступні параметри: номінальна потужність $P_n=90$ Вт, напруга живлення

$U_n=24$ В, номінальний струм двигуна $I_n=5,5$ А, номінальна частота обертання $n_n=4000$ об/мин., номінальний момент двигуна $M_n=0,216$ Нм, опір обмотки якоря $R_y=1,36$ Ом; опір якірному ланцюгу $R_{yc}=2,24$ Ом; індуктивність якірного ланцюгу $L_{yc}=12,76$ мГн; постійна часу якоря $T_y=5,6 \cdot 10^{-3}$ с; електромеханічна постійна $T_m=0,011$ с; загальний момент інерції $J_\Sigma=0,746 \cdot 10^{-5}$ кг м², коефіцієнт передачі датчика положення $k_d=0,4$ В/мм. Наводимо отримані наступні результати розрахунку параметрів регуляторів приводу: $k_{rp}=20,5$; $T_C=0,0133$ с; $k_{rc}=1,89$.

Розглянемо випадок застосування пропорційно-інтегрального регулятора положення. Структурна схема позиційного мікроелектроприводу з даним видом регулятора положення і пропорційним регулятором швидкості приведена на рис. 3.5. На структурній схемі (рис. 3.5) позначення ті ж, що і на рис. 3.4. T_p – постійна часу регулятора положення.

Передавальна функція замкнутого контуру положення має вигляд:

$$W_{kp}(p) = \frac{1/k_l (T_{II}p + 1)}{\frac{T_p T_m}{k_{rp} k_c k_l} p^3 + \frac{k_\omega T_n}{k_{rp} k_l} p^2 + T_p p + 1} \quad (3.15)$$

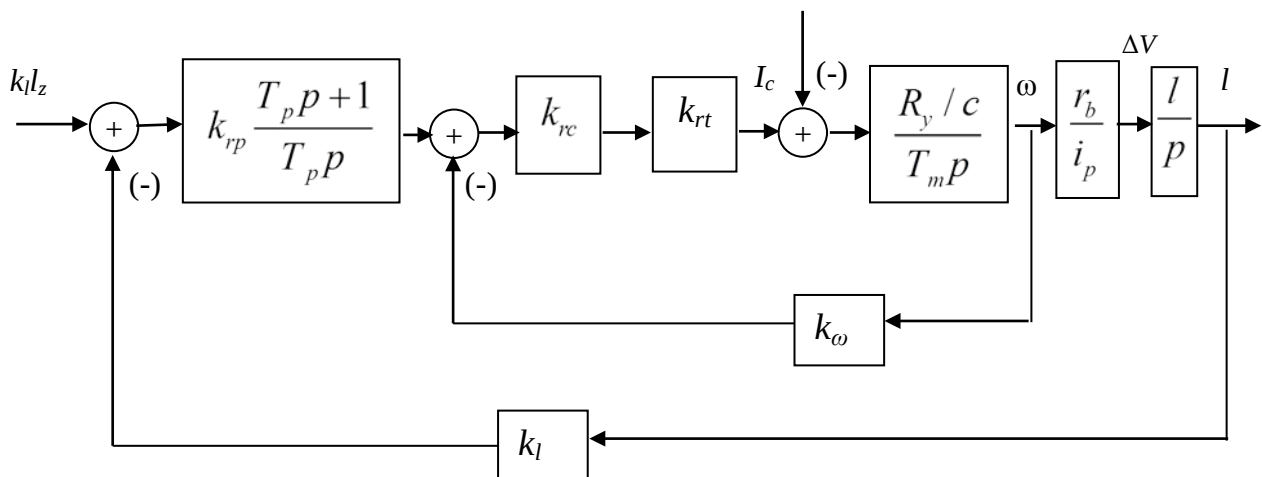


Рис. 3.5. Структурна схема мікроелектропривода в режимі «малих» переміщень з ПІ-регулятором положення

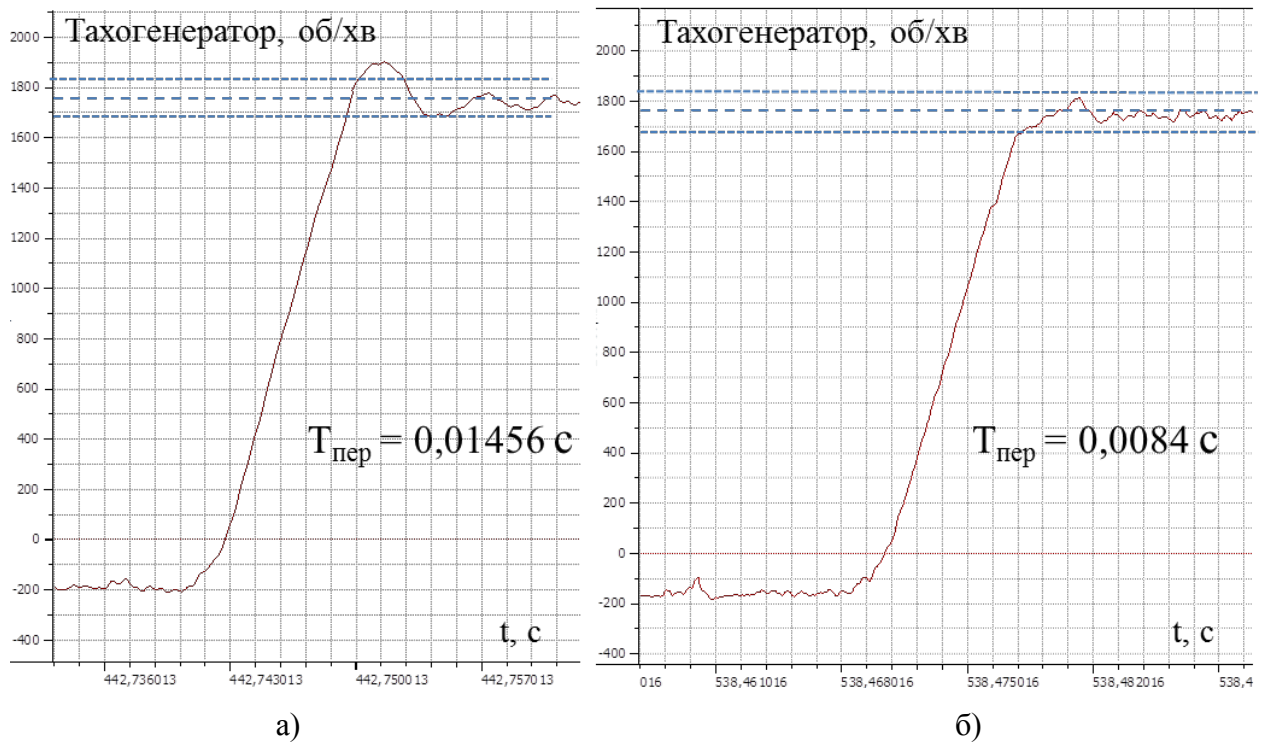


Рис. 3.6. Осцилограми перехідного процесу при реверсі та при різних налаштуваннях регуляторів: а – при стандартних налаштуваннях; б – за допомогою модального керування.

Прирівнявши відповідні коефіцієнти в (3.10) і (3.15), отримаємо розрахункові співвідношення для визначення параметрів регуляторів:

$$T_p = A_1 \cdot T_l, \quad (3.16)$$

$$k_{rp} = \frac{k_\omega T_n}{k_l A_2 T_l^2}, \quad (3.17)$$

$$k_{rc} = \frac{T_p T_m}{T_l^3 k_{rp} k_{kt} \frac{R_y}{c} k_l}. \quad (3.18)$$

Для нашого випадку: $T_p = 0,0399$ с; $k_{rp} = 61,5$; $k_{rc} = 14,6$.

Таким чином, синтез системи електроприводу подачі електрода-інструмента процесу РОД модальним методом з використанням операторної методики можна здійснювати на основі застосування стандартного набору зворотних зв'язків (зворотні зв'язки по струму, швидкості і положенню).

По отриманих параметрах регуляторів були проведені налаштування приводу «ЕШІМ-1». На рис. 3.6 приведено два фрагменти осцилограм обробки збурень: до і після внесення налаштувань. Перехідний процес після внесення налаштувань має значення перерегулювання менше 5%. Тривалість перехідного процесу зменшилась з 0,1456 с до 0,0084 с.

Висновки до третього розділу

1. Виконано спектральний аналіз реалізацій ($I_{\text{дуги}}$, $U_{\text{дуги}}$, $I_{\text{дв}}$, $U_{\text{дв}}$) об'єкта керування та приводу подачі електрода-інструмента з метою визначення частотного діапазону та амплітуд збурювальних впливів. Встановлено, що між стохастичними процесами дуги і параметрами приводу спектри викидів потужності за частотами не співпадають, тому можна зробити припущення про дуже слабку кореляцію цих процесів і відповідно, застосовувати лінійні методи при синтезі системи керування.

2. Для режиму малих переміщень, визначено параметри налаштування багатоконтурної системи позиційного електропривода подачі електрода-інструмента за допомогою модального керування для пропорційно-інтегрального типу регулятора подачі, які дозволили виконати налаштування електропривода подачі на максимальну швидкодію, що дозволило зменшити час перехідного процесу на 42% та перерегулювання до величини менше 5% .

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ПІДСИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОДАЧІ ЕЛЕКТРОДА-ІНСТРУМЕНТА

Як зазначалось, у розділі 1.5 процес розмірної обробки дугою розглядається як багаторежимний об'єкт. Враховуючи, що кожен з робочих режимів виконується тільки в конкретний момент часу і при цьому вони ніколи не накладаються, а тільки переходять з одного в інший, розглянемо принцип роботи кожної з підсистем керування подачі електрода-інструмента та способи їх реалізації.

4.1. Підсистема автоматичного керування подачею електрода-інструмента в режимі підведення його в зону обробки

У підрозділі 2.4.1 визначено, призначення даної підсистеми – при відсутності горіння електричної дуги в міжелектродному проміжку змінювати швидкість подачі електрода-інструмента від максимального значення при великих відстанях між електродом-інструментом і електродом-заготовкою до мінімального заданого значення в момент запалювання електричної дуги.

Функціональна схема підсистеми автоматичного керування подачею електрода-інструмента в режимі підведення його в зону обробки має вигляд, як на рис. 4.1.

Регулятор порівнює середнє значення тиску робочої рідини на вході в міжелектродний проміжок за час вибірки зі значенням задавача і виконує зміну завдання швидкості виходячи з умови:

$$\begin{cases} U_{feed} = \max, & \bar{p} < P_{зав} \\ U_{feed} = \min, & \bar{p} \geq P_{зав} \end{cases}, \quad (4.1)$$

де $\bar{p}$ – середнє значення тиску робочої рідини в одній вибірці, МПа; $P_{зав}$ – порогове значення тиску, при якому необхідно виконувати перемикання швидкості, МПа; U_{feed} – значення напруги завдання подачі, В.

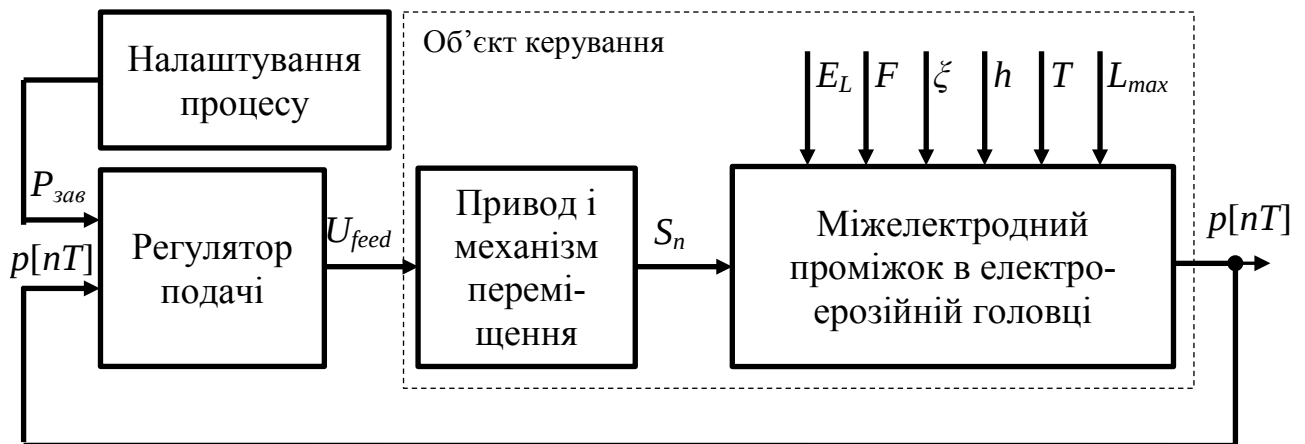


Рис. 4.1. Функціональна схема підсистеми автоматичного керування подачею електрода-інструмента в режимі підведення його в зону обробки: n – кількість точок, що використовується для розрахунку статистичних оцінок; T – період циклу опитування датчиків об'єкта керування; $p[nT]$ – матриця накопичених даних миттєвих значень тиску робочої рідини за час nT .

4.1.1 Визначення значення завдання регулятора

Порогове значення завдання регулятору встановлюється в залежності від умов процесу розмірної обробки дугою і визначається за допомогою системи навчання. У відповідності з методикою розрахунку, наведеною в підрозділі 2.4.1, виконаємо розрахунок граничного значення тиску. Вихідні дані для розрахунку наведені в табл. 2.5.

Знаходимо найбільше ($x_{\max}$) і найменше ($x_{\min}$) вибірконе значення випадкової величини і розраховуємо її розмах ($x_{\max} - x_{\min}$):

$$2,5 - 1,7 = 0,8 \text{ атм.}$$

Визначаємо число інтервалів k за формулою Штюргеса з округленням отриманого значення до найближчої цілої величини:

$$k = 1 + 3,32 \cdot \text{Lg}(30) = 5,904 = 6.$$

Визначаємо ширину інтервалу:

$$0,8/6 = 0,13 \text{ атм.}$$

Інші дані та результати розрахунку заносимо до табл. 4.1.

Експериментальне значення критерію Пірсона $\chi^2 = 2,38325$, а теоретичне при рівні $\alpha = 0,05$ та числі ступеня свободи ($k - 2 = 6 - 2 = 4$) складає при розрахунку за допомогою пакета прикладних програм MS Excel ($\text{ХИ2ОБР}(0,05;4) = 9,487729$), що значно більше експериментального значення. Відповідно, можна стверджувати [31], що дані експерименту підпорядковуються нормальному закону розподілення.

Визначаємо середнє арифметичне значення вибірки за допомогою пакета прикладних програм MS Excel (де (I2:I31) – посилання на комірки з вибіркою даних експерименту):

$$\bar{x} = \text{СРЗНАЧ}(I2:I31) \approx 2 \text{ атм.}$$

Таблиця 4.1 Процедура розрахунку критерію χ^2 Пірсона за даними табл.2.5

Інтервал $x_{i-1} \dots x_i$		$\bar{m}_i$	$F(x_i)$	P_i^*	nP_i^*	$\bar{m}_i - nP_i^*$	χ_i^2
1,7	1,83	3	0,0733876	0,0733876	2,2016283	0,7983717	0,2895118
1,83	1,96	2	0,2293517	0,1559641	4,6789241	-2,678924	1,5338215
1,96	2,09	8	0,4876546	0,2583029	7,7490868	0,2509132	0,0081245
2,09	2,22	10	0,7514574	0,2638027	7,914082	2,0859175	0,549786
2,22	2,35	5	0,9176013	0,1661439	4,9843176	0,0156824	0,000049
2,35	2,5	2	0,9863913	0,0687899	2,0636994	-0,06369	0,0019662
							2,38325

Визначаємо значення довірчого інтервалу за допомогою пакета прикладних програм MS Excel:

$$\delta = (\text{ДОВЕРИТ}(0,05;\text{СТАНДОТКЛОН}(I2:I31);30) \approx 0,07).$$

Визначаємо значення 5δ :

$$5\delta = 5 \cdot 0,07 = 0,35 \text{ атм.}$$

Тоді, порогове значення завдання регулятора, розраховуємо за формулою (2.17):

$$P_{зав} = \bar{x} - 5\delta = 2 - 0,35 = 1,65 \text{ атм} \approx 0,16 \text{ МПа.}$$

4.1.2 Підтвердження ефективності керування підсистеми

На початку роботи оператор вибирає налаштування процесу розмірної обробки дугою за допомогою графічного інтерфейсу, наведеному в додатку 3. Порогове значення вибирається для кожного налаштування процесу обробки з бази даних налаштування. Якщо порогового значення для даних налаштувань процесу обробки немає, то необхідно для них провести навчання системи. Результати розрахунків зберігаються у базі даних налаштувань.

В результаті проведеного дослідження було встановлено, що при використанні електрода циліндричної форми: зовнішній квадрат – 10 мм; зовнішній діаметр електрода 18,5 мм, внутрішній діаметр отвору 6 мм (зовнішній вигляд електрода-інструмента наведений на рис. 4.2) процес запалювання дуги розпочинався при тиску технологічної рідини в межах 0,1667...0,245 МПа (1,7...2,5 тех. атм).

В якості порогового значення спрацювання підсистеми автоматичного керування для зміни швидкості подачі електрода-інструмента була встановлена величина тиску технологічної рідини рівна 0,16 МПа. Осцилограми параметрів процесу розмірної обробки дугою при керуванні швидкості подачі електрода-інструмента в режимі підведення його в зону обробки наведені на рис. 4.3.



Рис. 4.2. Зовнішній вигляд електрода-інструмента

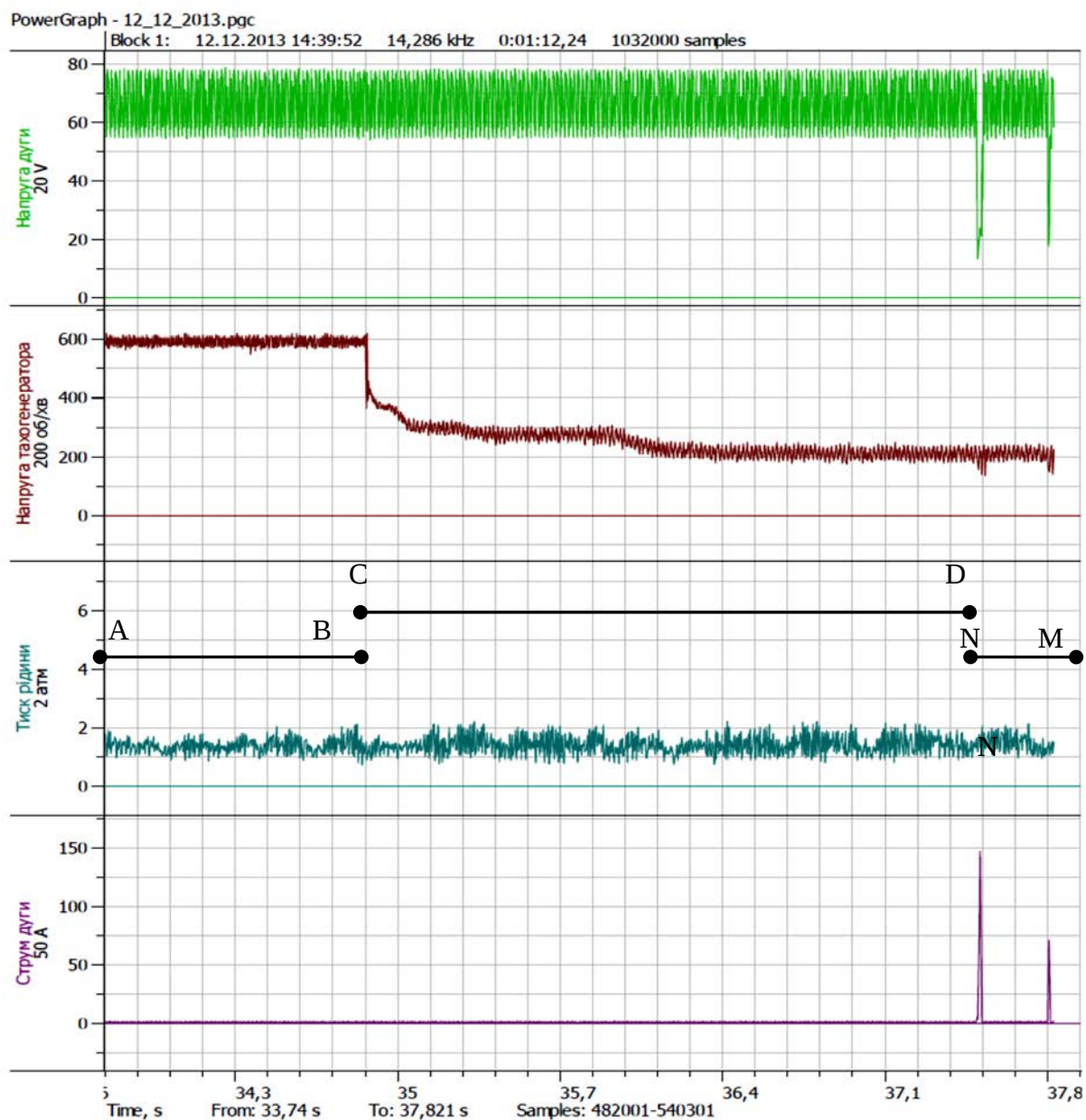


Рис. 4.3. Осцилограми параметрів процесу розмірної обробки дугою в режимі підведення електрода-інструмента в зону обробки

На осцилограмі (рис. 4.3) відрізок АВ – відповідає часу підведення електрода-інструмента при підвищеній швидкості подачі, відрізок CD – відповідає часу підведення на робочій швидкості подачі, відрізок NM – початок процесу запалювання дуги.

В системі подачі, що розглядається, максимальна лінійна швидкість подачі електромеханічної системи складає 0,807 мм/с, а робоча – 0,0616 мм/с.

Сума часу запізнювання системи керування приводом та часу перехідного процесу приводу складає $T_z = 0,04$ с.

Виходячи з формули (2.18), перевіримо виконання умови $V_{max} < V_{critical}$.
 $V_{critical} = 0,8/0,04 = 20$ мм/с. Оскільки $V_{max} \ll V_{critical}$ ($0,807 < 20$) умова виконується, тому система при підведенні електрода-інструмента на максимальній швидкості буде налаштована майже оптимально.

Швидкість підведення електрода-інструмента до впровадження запропонованого алгоритму керування швидкістю в САК складала втричі збільшену робочу швидкість і становила 0,1848 мм/с. При відстані між електродом-інструментом і електродом-заготовкою 5 мм час підведення складав 27 с, а після налаштування – 7 с. Тобто час підведення (при відстані 5 мм) зменшився на 20 с.

4.2. Підсистема автоматичного керування подачею електрода-інструмента в режимі стабілізації процесу розмірної обробки дугою

Загальновідомо, що досягнення максимальної продуктивності обробки можливе лише при стабільному процесі ЕЕО [38]. В розділі 2.4.2 наведений, запропонований автором, спосіб визначення рівня стабільності процесу, який і був покладений у алгоритм роботи підсистеми автоматичної стабілізації процесу РОД. Структурна схема такої підсистеми наведена на рис. 4.4.

Для визначення рівня стабільності параметрів дуги в якості вхідної інформації використані вибірки миттєвого значення напруги дуги $u_d = [mT]$. Вихідним сигналом програмованого логічного контролера є значення напруги завдання U_{feed} , яка подається на вхід комплектного електропривода, при якій встановлюється рівність швидкостей ерозії металу та швидкості подачі, що призводить до стабілізації процесу РОД.

Конструктивно в програмованому логічному контролері передбачений дводіапазонний режим стабілізації параметрів: перший діапазон – для стабілізації нестационарного процесу горіння; другий діапазон – для

виведення параметрів стаціонарного процесу горіння в зону квазіоптимальної обробки і підтримання їх в цій зоні.

Вибір меж діапазонів залежить від параметрів джерела живлення, від матеріалу електрода-інструмента і електрода-заготовки, режиму обробки (чистова або чорнова), режиму прокачки (пряма або зворотна) та інших чинників.

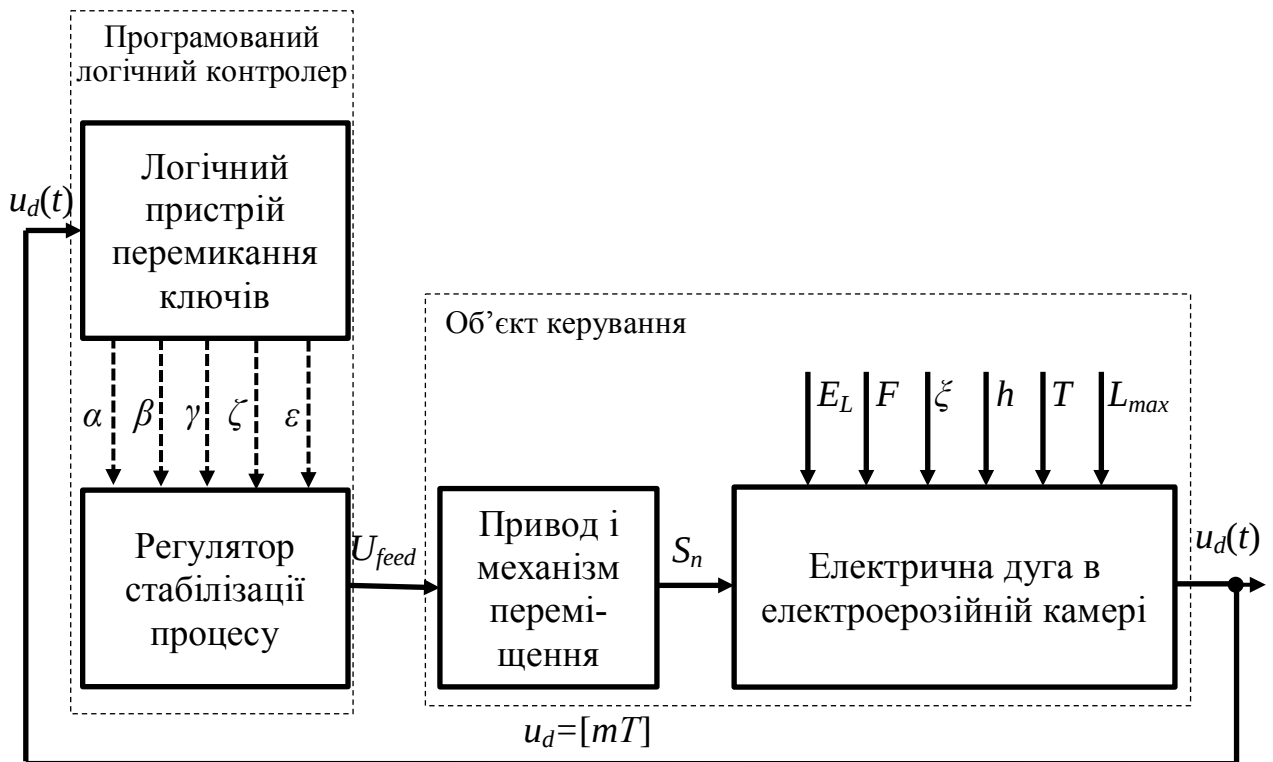


Рис. 4.4. Структурна схема автоматичної системи стабілізації параметрів розмірної обробки

В процесі стабілізації стаціонарної дуги при коливанні стовпа дуги, миттєві значення напруги можуть лежати в межах 15...50 В. При максимально досягнутій стабільності процесу розмах напруги дуги не перевищує 10 В [102]. Тому по замовченню, для першого діапазону, за яким працює автоматична система стабілізації, вибрані межі: нижня – 15 В, верхня – 50 В. Для другого діапазону межі горіння дуги визначаються на кожній ітерації, як середнє значення напруги дуги в вибірці ± 5 В. Тобто на першому діапазоні зона стабільного горіння складе 35 В, на другому – 10 В. Структурна схема програмованого логічного контролера наведена на рис. 4.5.

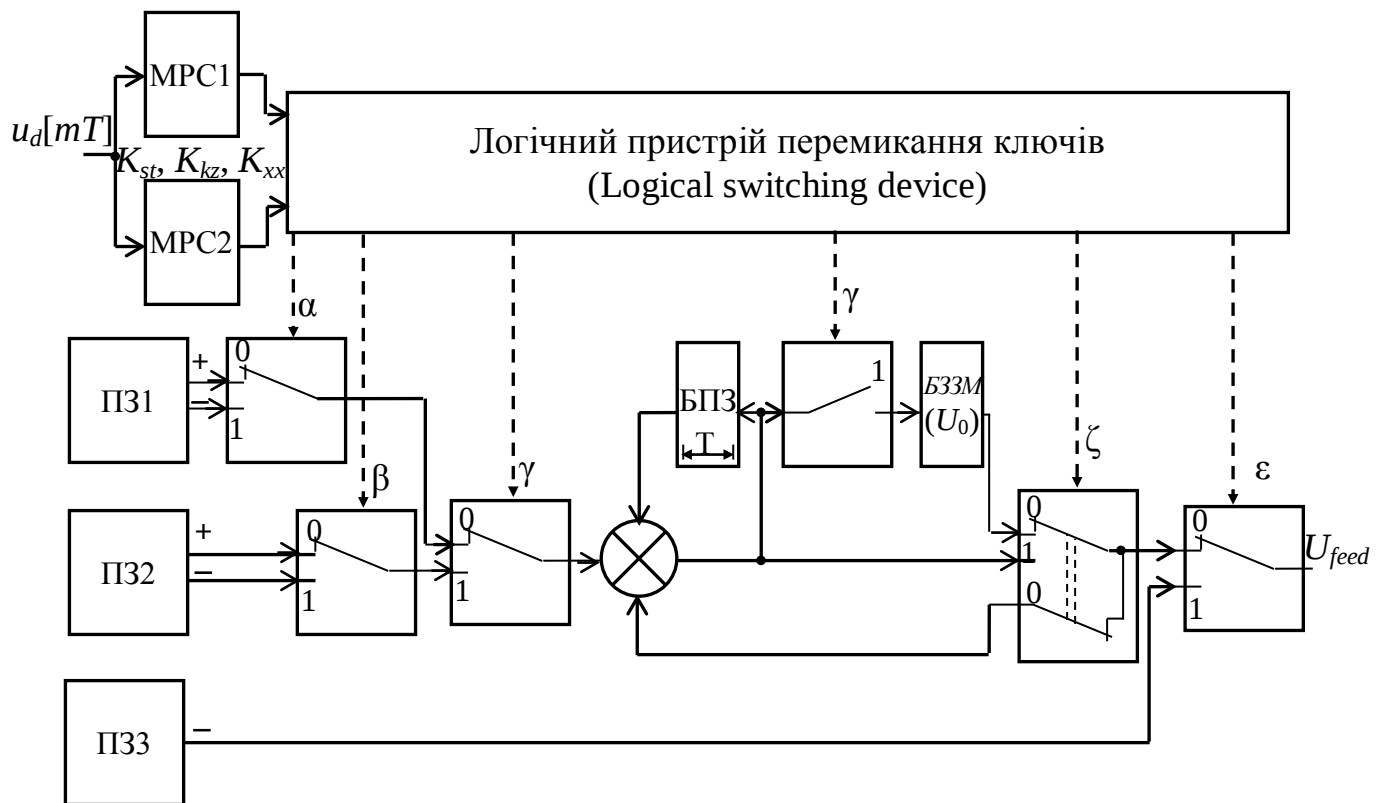


Рис. 4.5. Структурна схема програмованого логічного контролера

Розглянемо його роботу більш детально. Вхідний сигнал $u_d = [mT]$ (вибірка миттєвих значень напруги дуги за період ітерації) поступає на модулі розрахунку стабільності (MPC1 – для першого діапазону і MPC2 – для другого діапазону), де розраховуються коефіцієнти K_{xx} , K_{st} , K_{kz} , що характеризують відповідно приналежність точок миттєвого значення вхідного сигналу до зон холостого ходу, стабільності або короткого замикання. Спосіб розрахунку коефіцієнтів представлений в (2.22). Значення коефіцієнтів поступають на логічний пристрій перемикання ключів (Logical switching device (LSD)), який, керуючись їх значенням та (4.2), перемикає ключі (α , β , γ , ζ , ε) в стан «1» або «0». Стан ключів LSD і їх відповідність стану процесу розмірної обробки дугою наведено в табл. 4.2.

Перемикання ключів змінює величину кроку, що встановлюється програмними задавачами ПЗ1, ПЗ2, ПЗ3, як відсоток від значення подачі при максимально досягнутій стабільності, подачі ЕІ при роботі на першому діапазоні на $\pm 5\%$; при роботі на другому діапазоні на $\pm 0,5\%$ (значення

відсотків встановлено експериментально і може змінюватись при налаштуванні). Значення кроку з відповідним знаком складається зі значенням на попередньому циклі, яке надходить від блока постійної затримки (БПЗ) і їх результуюча буде вихідною величиною контролера.

Таблиця 4.2 Стан логічного пристрою перемикання ключів і їх відповідність станам процесу розмірної обробки дугою

№	Стан процесу	Стан модуля перемикання ключів				
		α	β	γ	ζ	ϵ
1	Перший цикл (період) роботи ПЛК	0	-	0	0	0
2	Процес стабілізації на 1 діапазоні	0 або 1	-	0	1	0
3	Стабільний процес. Йде стабілізація на 2 діапазоні	-	0 або 1	1	1	0
4	Режим короткого замикання	-	-	-	-	1

При розрахунку на першому циклі роботи контролера або після короткого замикання, значення на попередньому циклі (U_0) надходить з блоку запам'ятовування завдання максимуму (БЗЗМ), в якому зберігається значення вихідної напруги контролера при максимально досягнутій стабільності процесу. Вихідна величина U_{feed} при короткому замиканні формується з напруги ПЗЗ, яка забезпечує реверс привода подачі електрода-інструмента до закінчення режиму короткого замикання. Коли значення стабільності горіння дуги на першому діапазоні стабілізації досягне ($K_{st_1} > 0,95$), стабілізація горіння дуги продовжиться на другому діапазоні.

Розроблений нами математичний закон керування контролером можна представити наступною функціональною залежністю:

$$\left\{ \begin{array}{l}
MPC1 = \left\{ K_{xx_I} = \frac{1}{m} \sum_{u_d > 50} \Theta(u_d); K_{st_I} = \frac{1}{m} \sum_{20 \leq u_d \leq 50} \Theta(u_d); K_{kz_I} = \frac{1}{m} \sum_{u_d < 20} \Theta(u_d), \right. \\
MPC2 = \left\{ K_{xx_{II}} = \frac{1}{m} \sum_{u_d > \bar{u}+5} \Theta(u_d); K_{st_{II}} = \frac{1}{m} \sum_{\bar{u}-5 \leq u_d \leq \bar{u}+5} \Theta(u_d); K_{kz_{II}} = \frac{1}{m} \sum_{u_d < \bar{u}-5} \Theta(u_d), \right. \\
LSD = \left\{ \begin{array}{l}
\alpha = \begin{cases} 0, K_{xx_I} > K_{kz_I} \text{ and } K_{st_I} < 0,95 \\ 1, K_{xx_I} < K_{kz_I} \text{ and } K_{st_I} < 0,95 \end{cases}; \quad \beta = \begin{cases} 0, K_{xx_{II}} > K_{kz_{II}} \text{ and } K_{st_{II}} > 0,95 \\ 1, K_{xx_{II}} < K_{kz_{II}} \text{ and } K_{st_{II}} > 0,95 \end{cases}, \\
\gamma = \begin{cases} 0, K_{st_I} < 0,95 \text{ or } K_{st_{II}} < 0,5 \\ 1, K_{st_{II}} \geq 0,95 \end{cases}; \quad \varepsilon = \begin{cases} 0, K_{kz_I} < 1 \\ 1, K_{kz_I} = 1 \end{cases}, \\
\delta = \begin{cases} 0, \text{The first cycle of the controller or the first cycle after the short circuit} \\ 1, \text{The second and subsequent cycles of the controller or} \\ \text{the second and subsequent cycles after the short circuit} \end{cases}, \\
U_{feed_i} = \begin{cases} U_{feed_{i-1}} \pm \Delta U_{feed_i}, \varepsilon = 0, \\ -k, \varepsilon = 1 \end{cases}.
\end{array} \right.
\end{array} \quad (4.2)$$

де $U_{feed_{-1}}$ – значення виходу логічного контролера на попередньому циклі обробки; ΔU_{feed_i} – значення напруги, на яке збільшується або зменшується значення $U_{feed_{-1}}$ при формуванні вихідного сигналу на поточному циклі обробки; k – значення опорної напруги ПЗЗ, величина якої відповідає напрузі реверсу електропривода; $\Theta(x)$ – функція Хевісайда.

Вхідну величину програмованого логічного контролера можна описати наступними залежностями:

$$\begin{aligned}
u_d &= u_s - L di/dt - Ri, \\
u_d &= u_0 + El + S_a i, \\
u_s &= u_{xx} + S_s i
\end{aligned} \quad (4.3)$$

де u_s – напруга джерела живлення, В; L – повна індуктивність ланцюга джерела дуги, Гн; R – сумарний активний опір ланцюга, Ом; i – струм ланцюга, А; u_0 – сума приелектродних падінь напруги, В; E – напруженість електричного поля в стовпі дуги, В/м; l – довжина дугового проміжку, м; S_a – крутизна вольт-амперної характеристики дуги, В/А; S_s – крутизна вольт-

амперної характеристики джерела живлення, В/А; u_{xx} – напруга холостого ходу, В.

Таким чином, реалізується досягнення максимально можливої стабільності процесу розмірної обробки дугою при даних параметрах струму дуги та швидкості прокачки технологічної рідини.

Запропонована система автоматичної стабілізації процесу розмірної обробки дугою забезпечує стабілізацію параметра: напруга дуги. За іншими параметрами (струм дуги, тиск робочої рідини, глибина обробки) спостерігає оператор, який може змінити їх налаштування.

Типова осцилограма зміни напруги дуги при роботі підсистеми подачі електрода-інструмента в режимі стабілізації наведена на рис. 4.6.

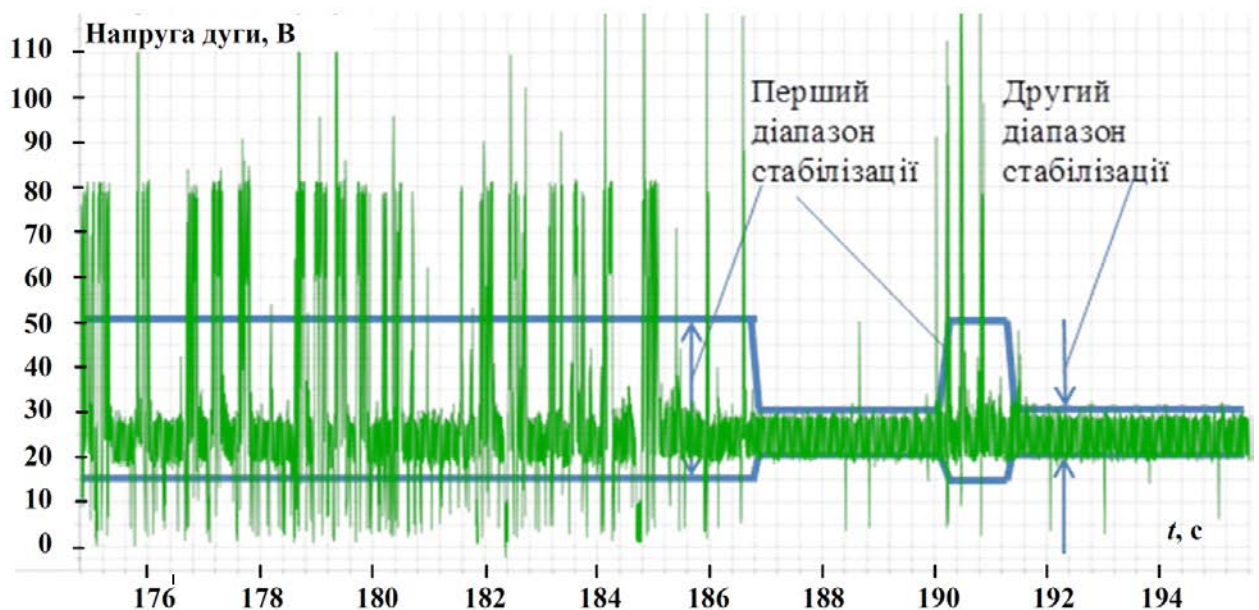


Рис. 4.6. Зміна напруги дуги при роботі підсистеми автоматичної стабілізації процесу РОД

Як зазначалось вище, при нестационарному горінні дуги та її переході до стаціонарного горіння за рахунок стабілізації виконується алгоритм першого діапазону роботи контролера. При стаціонарному горінні дуги стабілізація параметрів дуги виконується по другому діапазону стабілізації.

Після досягнення при стабілізації параметрів дуги другого діапазону автоматична система намагається підтримати стан дуги в усталеному режимі.

Після кожної ітерації контролера можливий дрейф другого діапазону вгору чи вниз, як це показано на рис. 4.7.

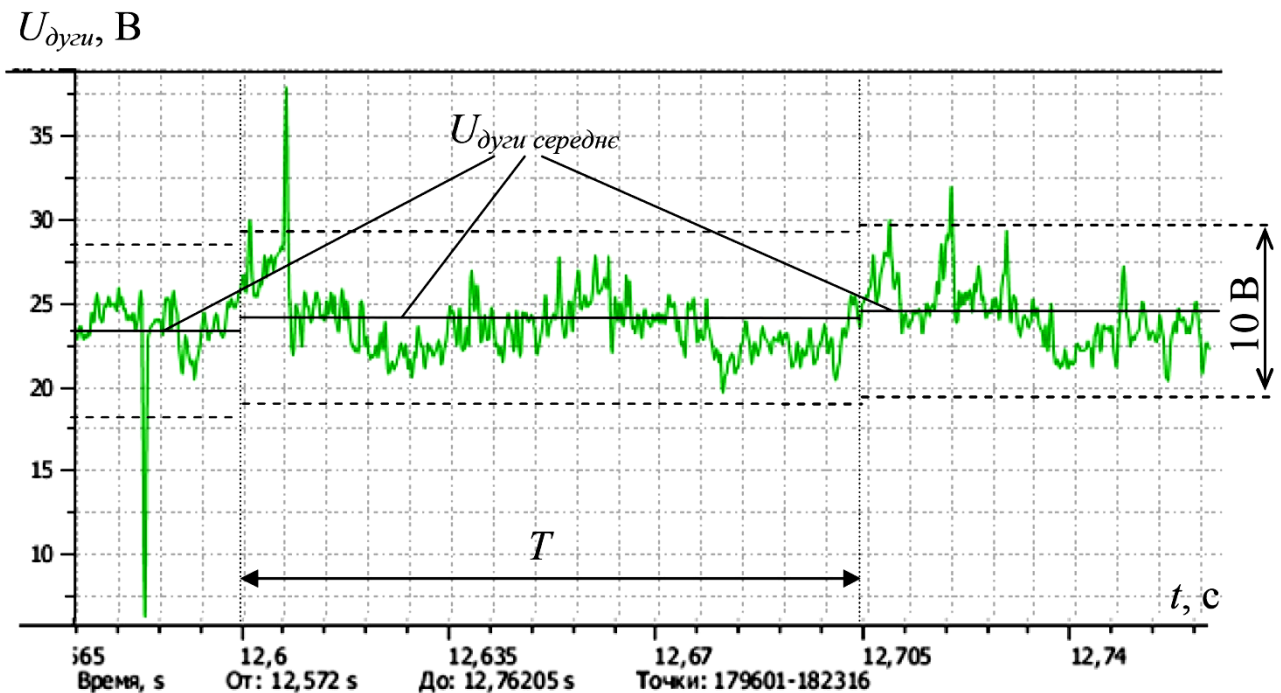


Рис. 4.7. Дрейф напруги дуги при її стабілізації на другому діапазоні на кожній ітерації контролера

Якщо рівень стабільності процесу при стабілізації на другому діапазоні випадково зменшився і дуга почала горіти нестійко, автоматична система перемикається на роботу в перший діапазон і швидко усуває нестійкий процес горіння.

4.3. Підсистема автоматичного керування подачею електрода-інструмента при екстремальному по продуктивності режимі процесу розмірної обробки дугою

Як зазначалось у розділі 1.4 та [100, 101] підсистема автоматичного пошуку екстремуму по продуктивності обробки починає працювати тільки після стабілізації процесу розмірної обробки дугою при значенні рівня стабільності процесу не менше 95%. Враховуючи стохастичний режим

процесу рівень стабільності в процесі обробки деталі може коливатись відносно значення 95% менше і більше на протязі всього процесу обробки. Це в свою чергу призводить до перемикавання підсистеми стабілізації на екстремальну підсистему і навпаки. Тому для спрощення сприйняття алгоритму роботи функціональна схема підсистеми автоматичної стабілізації параметрів дуги була доповнена функціональними блоками підсистеми пошуку екстремуму по продуктивності обробки. Структурна схема роботи регулятора такої підсистеми наведена на рис. 4.8.

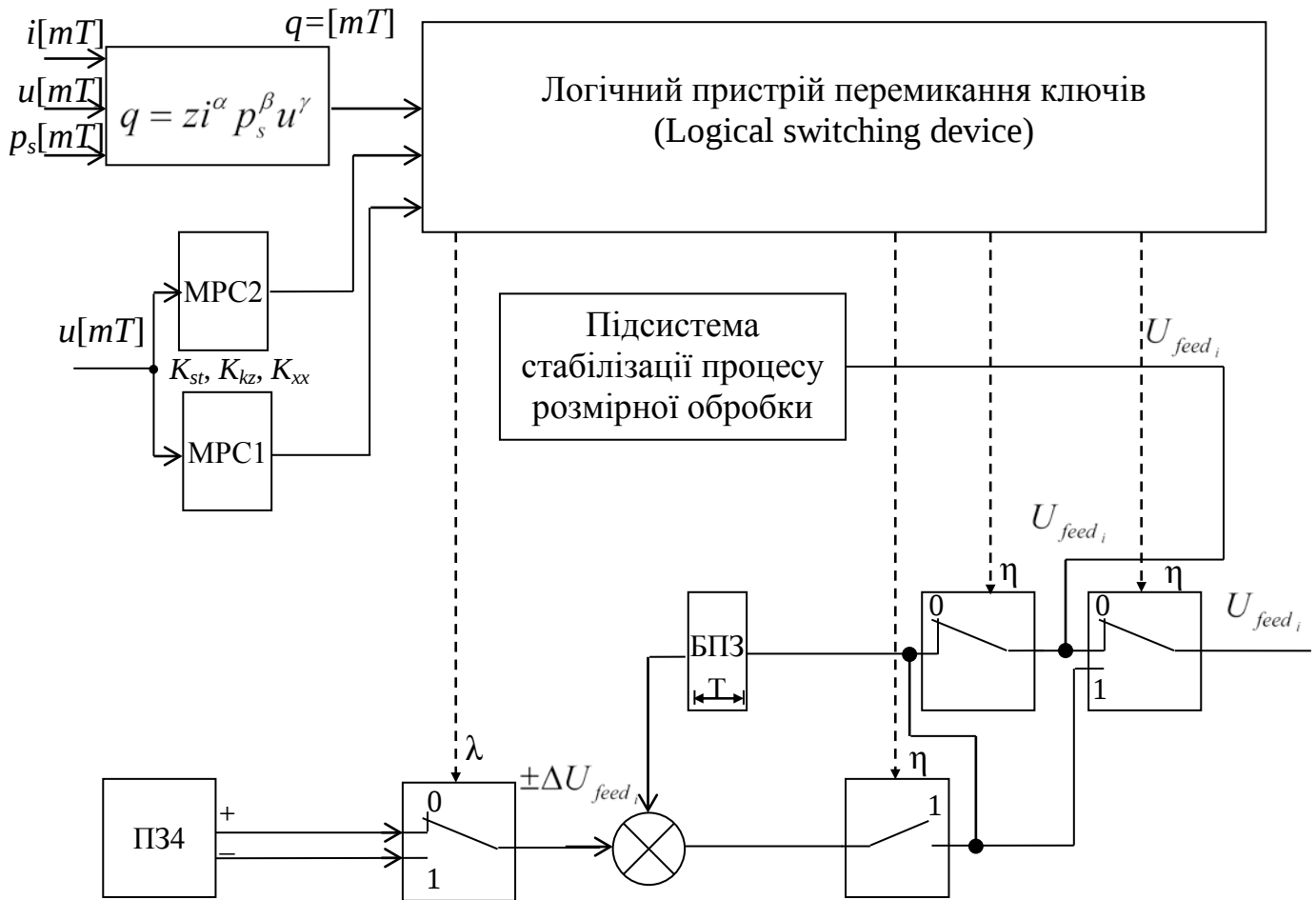


Рис. 4.8. Структурна схема програмованого логічного контролера для екстремальної підсистеми.

Значення коефіцієнтів K_{st} , K_{kz} , K_{xx} та значення продуктивності за період опитування (ітерацію) поступають на логічний пристрій перемикавання ключів (Logical switching device (LSD)), який перемикає ключі (η , λ) в стан «1» або «0».

Вхідну величину програмованого логічного контролера можна описати наступними функціональними залежностями:

$$u_d = \begin{cases} u_s - L di/dt - Ri, \\ 333L_\partial + 15, \text{ при } L_\partial > 0 \end{cases}, \quad (4.4)$$

де L_∂ – довжина дуги при стабільному горінні, мм.

На вхід регулятора поступають миттєві значення струму дуги i , напруги дуги u та статичного тиску на вході в міжелектродний проміжок p_s , що характеризують рівень стабільності і продуктивність процесу РОД. На виході регулятор формує напругу U_{feed_i} , яка надходить на вхід системи електропривода подачі електрода-інструмента.

Розроблений нами математичний закон керування контролером можна представити наступною функціональною залежністю:

$$\left\{ \begin{array}{l} MPC2 = \begin{cases} K_{xx_{II}} = \frac{1}{m} \sum_{u_d > \bar{u} + 5} \Theta(u_d), \\ K_{st_{II}} = \frac{1}{m} \sum_{\bar{u} - 5 \leq u_d \leq \bar{u} + 5} \Theta(u_d), \\ K_{kz_{II}} = \frac{1}{m} \sum_{u_d < \bar{u} - 5} \Theta(u_d), \end{cases} \\ LSD = \begin{cases} \eta = \begin{cases} 0, & K_{st_{II}} < 0,95 \\ 1, & K_{st_{II}} \geq 0,95 \end{cases}; \quad q[mT] = k_2 i^\alpha p^\beta u^\gamma; \quad \bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m q_i; \\ S_x^2 = \frac{1}{m-1} \left[\sum_{i=1}^m q_i^2 - \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^m q_i \right)^2 \right]; \quad \mu = \frac{\bar{x}}{S_x^2}, \quad \nu = \mu \cdot \bar{x}; \\ \lambda = \begin{cases} 0, & \mu_i, \nu_i \geq \mu_{i-1}, \nu_{i-1} \\ 1, & \mu_i, \nu_i < \mu_{i-1}, \nu_{i-1} \end{cases}, \end{cases} \\ U_{feed_i} = \begin{cases} U_{feed_{i-1}} + \Delta U_{feed_i}, & \lambda = 0 \\ U_{feed_{i-1}} - \Delta U_{feed_i}, & \lambda = 1 \end{cases}, \end{array} \right. \quad (4.5)$$

На початку роботи регулятор по параметрам процесу РОД (i , u_d , p_s) стабілізує горіння дуги. Регулятор конструктивно виконаний таким чином,

що першочерговим є підтримання заданого рівня стабільності процесу, а вже потім підтримання максимальної продуктивності процесу в заданих межах рівня стабільності процесу. Тому при рівні стабільності процесу вище 95 % на другому діапазоні стабілізації, регулятор працює за алгоритмом пошуку екстремуму по продуктивності, а нижче 95 % - регулятор працює за алгоритмом стабілізації процесу.

4.4. Підсистема автоматичного керування процесом РОД на задану глибину

При роботі на існуючих верстатах РОД контроль за глибиною обробки деталі покладається на оператора-верстатника. Він, керуючись значеннями індикатора-глибиноміра, вмикає подачу ЕІ при досягненні заданої глибини обробки. При плавкому електроді-інструменті оператору при визначенні глибини обробки необхідно враховувати зміну довжини ЕІ, так як глибина обробки складає:

$$h = S - \Delta S_{EI}, \quad (4.6)$$

де h – глибина обробки; S – переміщення електрода-інструмента; ΔS_{EI} – лінійний знос електрода-інструмента.

На практиці при обробці партії однакових деталей величину ΔS_{EI} можна визначити експериментально і по величині переміщення S приблизно визначити величину h .

При РОД на верстатах з електромеханічним приводом, на відміну від гідравлічних приводів, що отримали розповсюдження, при стаціонарному режимі немає необхідності на головну подачу електрода-інструмента накладати релаксаційні або вібраційні зворотно-поступальні рухи, так як продукти ерозії видаляються за рахунок подачі з заданими технологічними параметрами потоку рідини та конструктивними особливостями електрода-інструмента.

Автором запропонована підсистема автоматичного керування процесом РОД на задану глибину, структурна схема якої розглянута на рис. 4.9.

Процес обробки деталі відбувається в автоматичному режимі. Оператор виставляє глибину обробки деталі в блоці завдання глибини обробки, величину потужності джерела дуги і дає команду на початок роботи. Блок завдання глибини формує команду «Початок роботи» регулятору МЕР, блоку нормалізації напруги дуги та видає напругу завдання, рівень якої відповідає глибині обробки деталі з врахуванням лінійного зносу електрода-інструмента, на блок порівняння.

Регулятор МЕР керує подачею електрода-інструмента за допомогою електромеханічного приводу і підтримує міжелектродний проміжок в заданих межах в електроерозійній камері.

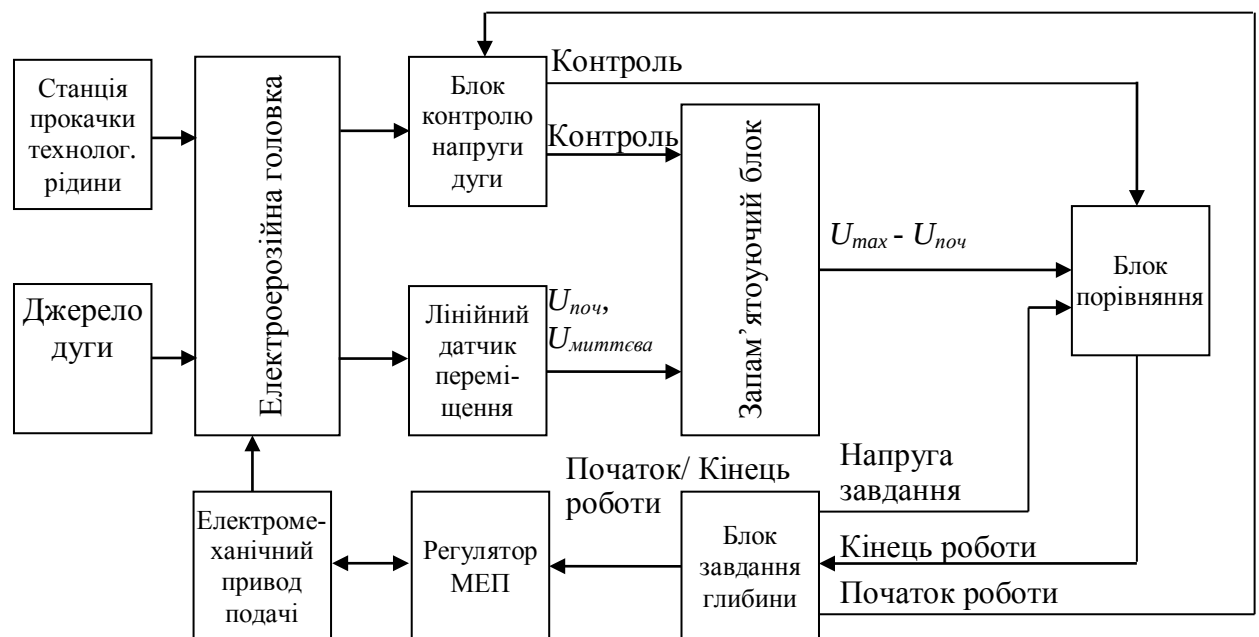


Рис. 4.9. Структурна схема підсистеми автоматичного керування процесом РОД на задану глибину

Лінійний датчик переміщення видає напругу, прямо пропорційну відстані переміщення електрода-інструмента. Напруга з виходу датчика переміщення потрапляє в запам'ятовувальний блок, де фіксується її найбільше із середніх значень за час вибірки напруги, що відповідає «нульовій» глибині обробки деталі. Процесу горіння дуги при РОД передують

процес запалення дуги при короткому замиканні між електродом-інструментом та ЕЗ.

Блок контролю напруги дуги при надходженні на нього команди «Початок роботи» починає відслідковувати рівень напруги дуги МЕР в електроерозійній головці АМН-1 і при виникненні першого короткого замикання видає команду «Контроль» запам'ятовувальному блоку, після чого переходить в режим чекання, з якого виходить на початку обробки нової заготовки, що відбувається при надходженні команди «Початок роботи» від блоку завдання глибини.

Запам'ятовувальний блок запам'ятовує середнє значення напруги вибірки, що надходить від лінійного датчика переміщення в момент надходження команди «Контроль» від блока контролю напруги дуги, що відповідає положенню електрода-інструмента при першому короткому замиканні, тобто запам'ятовується значення напруги при «нульовій» глибині обробки $U_{поч}$.

В процесі роботи РОД значення напруги від датчика переміщення постійно надходить у запам'ятовувальний блок, де фіксується максимальна середня напруга вибірки U_{max} , а інша (менша) напруга - ігнорується. Якщо значення U_{max} більше напруги поточної вибірки $U_{ном}$, що поступає від датчика переміщення, то відбувається відведення електрода-інструмента (процес короткого замикання), і значення U_{max} в запам'ятовувальному блоці не змінюється. Якщо значення U_{max} менше напруги $U_{ном}$, то відбувається підведення електрода-інструмента, і значення U_{max} в запам'ятовувальному блоці приймає поточне значення напруги $U_{ном}$. Напруга з виходу запам'ятовувального блока формується з різниці між напругами $(U_{max} - U_{поч})$ і її значення надходить на один з входів блока порівняння.

Блок порівняння, після надходження команди «Контроль» від блока нормалізації напруги дуги, починає порівнювати напругу завдання, що надходить з блоку завдання глибини з напругою, яка надійшла від запам'ятовувального блока. Якщо напруги в блоці порівняння стають

однаковими, то формується команда «Кінець роботи», яка передається на блок завдання глибини, а далі на регулятор МЕР. Регулятор МЕР виводить електрод-інструмент з робочої зони і переводить привод подачі електрода-інструмента в режим «Заборона роботи».

Розглянута підсистема дозволяє автоматизувати процес перемикання режиму роботи електроерозійних верстатів і може входити, як окремий закінчений модуль, до складу регуляторів підтримання стаціонарного горіння дуги в МЕР, регуляторів приводів подачі електрода-інструмента та в цифрових системах контролю подачі електроерозійних верстатів.

Висновки до четвертого розділу

1. Експериментально підтверджено, що розраховане за запропонованою автором методикою значення статичного тиску робочої рідини в електроерозійній камері (наприклад, для електрода квадрат з фаскою, наведеного на рис. 2.3, б – складає $P_{зав} = 0,16$ МПа) при його використанні в якості граничного значення, за яким підсистема виконує перемикання швидкості з максимальної на робочу при підведенні електрода-інструмента в зону обробки, дозволяє автоматично виконувати дану операцію. Виявлено, що при початковій встановленій відстані між електродом-інструментом і деталлю в 5 мм, час підведення скорочується на 20 с.

2. Експериментально підтверджено, що розроблена на основі методики визначення рівня стабільності процесу РОД підсистема дводіапазонної стабілізації по значенню напруги електричної дуги дозволяє автоматично стабілізувати параметри дуги в умовах стохастичного процесу її горіння.

3. Експериментально підтверджено, що розроблена на основі методу моментів екстремальна підсистема по продуктивності обробки деталі

забезпечує автоматичний пошук і підтримання максимальної продуктивності РОД.

4. Обґрунтовано використання запропонованої автором підсистеми відключення процесу РОД при досягненні заданої глибини обробки, що дозволяє організувати автоматичну зупинку процесу обробки деталі.

5. Виявлено, що впровадження запропонованих автором підсистем подачі електрода-інструмента дозволило зменшити час обробки деталі та зменшити вплив суб'єктивного людського фактору на процес РОД.

РОЗДІЛ 5

МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОДАЧІ ЕЛЕКТРОДА-ІНСТРУМЕНТА ПРИ РОД ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ЇЇ РОБОТИ

5.1. Розробка та реалізація алгоритмів роботи мікропроцесорної системи керування подачі електрода-інструмента

Як вже зазначалось у попередніх розділах, для отримання максимальної продуктивності процесу РОД необхідно забезпечити переміщення електрода-інструмента з такою швидкістю, яка відповідає швидкості електроерозії металу, і при якій в МЕП буде підтримуватись стабільне горіння електричної дуги. Це досягається при використанні в САК подачі електрода-інструмента запропонованого автором мікропроцесорного пристрою. Об'єднання в одному мікропроцесорному пристрої функцій підсистем, розглянутих в розділах 4.1 – 4.4, дозволить спростити загальну схему САК подачі електрода-інструмента. Загальна функціональна схема керування процесом розмірної обробки дугою наведена в додатку Й.

Всі алгоритми роботи регуляторів вищезгаданих підсистем реалізуються програмно (додаток К). Реалізація алгоритмів цифрової обробки сигналів зводиться до написання і відлагодження програмного коду на мові програмування Сі. Серед мікропроцесорів для вбудованих систем одним з самих перспективних і швидкодіючих є мікропроцесори, побудовані на ядрі ARM.

В якості середовища для написання і компіляції програми був вибраний інструмент Coocox CoIDE 1.7.4, який орієнтований на розробку програм для 32-разрядних процесорів ARM різних виробників: Atmel, Energy Micro, Freescale, Holtec, NXP, TI, STM.

32-разрядні процесори CortexM4 виділяються оптимальною ціною і продуктивністю. Для апаратної реалізації нами був вибраний старший з

лінійки Discovery від STMicroelectronics контролер з високопродуктивним мікропроцесором STM32F429ZIT6. До складу плати контролера входить 2,4” QVGA TFT LCD дисплей з сенсорною панеллю, зовнішня пам'ять SDRAM 64 Мбіт, вбудований відладчик ST-LINK/V2 та інші інтерфейси.

До складу контролера входять також подвійний АЦП, таймер загального застосування, I2C, SPI, CAN, USB і годинник реального часу. Однак кожний з цих периферійних пристроїв має багато особливостей. Наприклад, 12 - бітний АЦП містить вбудований температурний датчик і підтримує множину режимів перетворення, а пристрої з подвійним АЦП можуть перелаштувати обидва АЦП відразу на роботу в одному з дев'яти режимів перетворення. Аналогічно кожен з чотирьох таймерів містить чотири пристрою захвату / порівняння, і кожен таймер може об'єднуватися з іншими для утворення складних масивів таймерів. Таймер з розширеними функціями призначений для додатків керування приводами, він містить шість комплементарних виходів ШІМ з програмуванням за часом і з вхідною лінією екстреного відмикання, яка переводить виходи ШІМ в означений безпечний стан. Модуль SPI містить апаратний генератор надлишкового циклічного коду (CRC) для 8- і 16-бітних слів, що використовується при під'єднанні до SD і MMC карт пам'яті.

STM32 містить модуль прямого доступу до пам'яті (DMA) на сім каналів, що взагалі незвично для невеликих контролерів. Кожен канал може бути використаний для передачі 8/16 або 32-бітових даних в і з будь-якого регістра периферійних пристроїв. Кожний з периферійних пристроїв, в залежності від задач, може бути або відправником, або одержувачем даних від DMA контролера.

STM32 має кілька апаратних особливостей для підтримки цілісності системи. У їх число входить детектор падіння напруги живлення, система безпеки системи синхронізації і два окремих сторожових таймера. Перший сторожовий таймер віконного типу. Він повинен оновлюватися в певний часовий інтервал. Якщо оновлення відбудеться раніше або пізніше, то

спрацює сторожовий таймер, який згенерує переривання. Другий сторожовий таймер є незалежним, має свій власний зовнішній осцилятор, відокремлений від основної системи синхронізації. Система синхронізації підтримує функції детектування несправностей основного зовнішнього осцилятора, і у разі їх виникнення, забезпечує перемикання на вбудований 8 МГц RC-осцилятор.

Функціональні можливості та продуктивність вибраного контролера задовольняють всі вищезначені вимоги до САК процесом РОД.

Виходячи з функціональних та структурних схем (рис. 4.1, 4.4, 4.5, 4.8, 4.9) та математичних законів керування (4.1), (4.2), (4.5) був складений програмний алгоритм роботи контролера (ПЛК), спрощений вигляд якого наведений на рис. 5.1, а окремі програмні модулі наведені у додатку К.

Для візуалізації і вибору режимів керування та контролю за технологічними параметрами при написанні програмного коду і функціонуванні ПЛК було вирішено задіяти вбудований в плату ПЛК TFT екран.

ПЛК при РОД працює в агресивному середовищі (наявність часток індустріального мастила, гасу, їх суміші, водної емульсії, продуктів ерозії, тощо), тому було прийнято

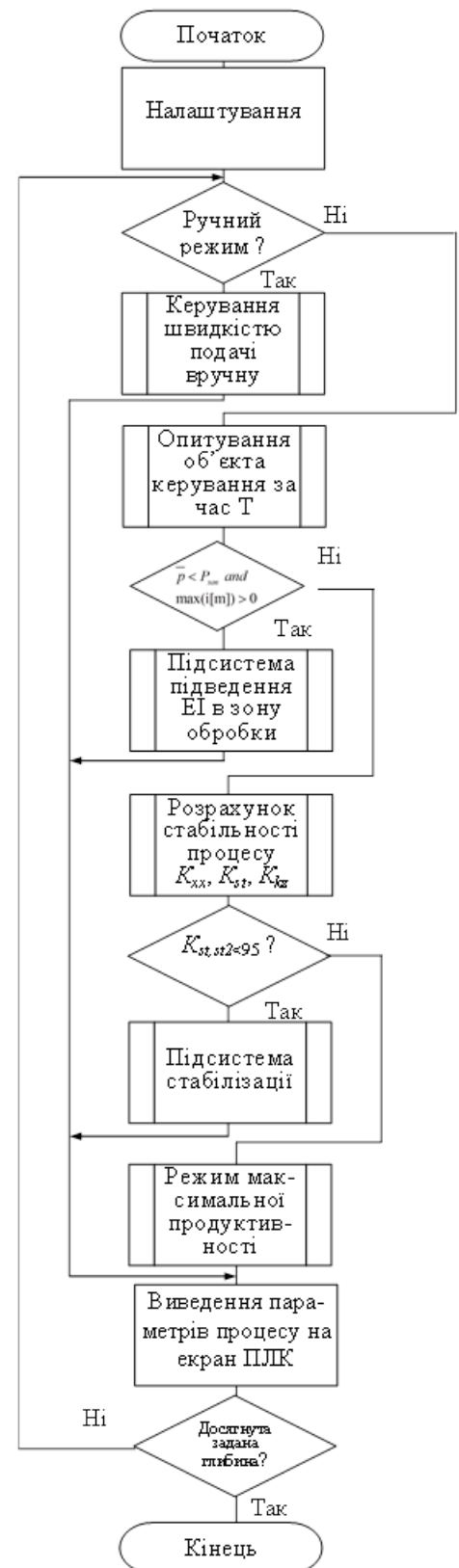


Рис. 5.1. Блок-схема спрощеного алгоритму роботи програмованого логічного контролера

рішення використовувати для введення даних додаткову клавіатуру, а не вбудований сенсорний інтерфейс екрану TFT. Плату ПЛК в пластиковому корпусі з зовнішньою клавіатурою наведено в додатку Л. В додатку М наведено графічний інтерфейс ПЛК, розроблений для взаємодії оператора-верстатника з САК процесом РОД.

5.2. Експериментальні дослідження розробленої мікропроцесорної САК подачі електрода-інструмента

Експериментальні дослідження проводились для підтвердження теоретичних результатів, отриманих в 2, 3, 4-й розділах роботи.

Дослідження проводились на електроерозійному верстаті типу АМН-1 з електромеханічним приводом подачі електрода-інструмента. Конструктивні особливості верстата описані в [77] і розділі 2. Результати експериментальних досліджень були отримані за допомогою програмно-технічного комплексу власної розробки, реалізація якої наведена в розділі 2.3 та [96]. В якості робочої рідини використовувались суміш гасу і мастила типу «Індустріальне-12» у співвідношенні 1:1. Матеріалом електрода-інструмента у всіх дослідках був графіт марки МПГ-7, а матеріал ЕЗ – метал марки Ст3сп, лемішна сталь Л53, Л65. Були введені технологічні обмеження по силі робочого струму від 40 до 100 А і статичного тиску на вході в МЕП в межах 5...10 атм. У всіх проведених дослідках використовувалась зворотна полярність електродів («+» на електрода-інструмента, «-» на ЕЗ).

Для порівняння роботи базової системи стабілізації і запропонованої мікропроцесорної САК були проведені дослідження при однакових технологічних умовах та параметрах процесу РОД. Типові ділянки осцилограми дослідів при стабільному процесі ($K_{стl} > 0,95$) для базової і нової системи наведені на рис. 5.3.



Рис. 5.3. Осцилограма продуктивності процесу РОД при базовій і новій системі подачі електрода-інструмента :

а – базова; б - запропонована автоматизована система керування

Результати оцінок ділянок стабільного процесу за двома системами наведені в додатку Н. Статистичні оцінки якості процесу РОД, розраховані по (2.10), для запропонованої автоматичної системи показали більш якісне керування процесом порівняно з типовою системою стабілізації процесу (табл. 5.1, табл.5.2).

На підставі проведених експериментів було встановлено, що зменшення амплітуди коливання миттєвого значення напруги призводить до збільшення стабільності процесу РОД і при сталому процесі різниця амплітуди коливань напруги дуги не перевищує 15 В.

Таблиця 5.1 Порівняльна статистична оцінка якості процесу керування для базової і запропонованої автором САК

№ п/п	Показник статистичної оцінки	За базовим варіантом САК	За варіантом САК, запропонованою автором
1	Різниця максимального і мінімального значення вибірки (Max - Min)	3456	1956
2	Середнє арифметичне значення вибірки (Mean)	1823	1784
3	Значення дисперсії вибірки (Variance)	1273	580
4	Значення стандартного відхилення (Std Deviation)	35,7	24,1

Таблиця 5.2 Порівняльна статистична технологічна оцінка процесу керування для базової і запропонованої автором САК

№ п/п	Показник технологічної оцінки	За базовим варіантом САК	За варіантом САК, запропонованою автором
1	Час операції, хв	4,5	4,0
2	Електрична енергія, що споживається за операцію, кВт	0,266	0,253
3	Підвищення продуктивності обробки деталі, %	-	12
4	Зменшення витрат електроенергії, %	-	5

Отримані результати, що підтверджуються проведеними натурними випробуваннями на верстаті АМН-1, доводять ефективність САК і запропонованих моделей і алгоритмів. За допомогою користувацького інтерфейсу є можливість виконати: швидко переналаштувати ПЛК на роботу в новому діапазоні горіння дуги при різних інтервалах стабілізації, встановити величину кроків на першому і другому діапазоні стабілізації, провести навчання системи на роботу з електродами різних форм та розмірів.

Також є можливість змінювати алгоритми роботи програми ПЛК шляхом її перепрошивки по USB-порту.

Висновки до п'ятого розділу

1. Експериментально доведено, що розроблена мікропроцесорна системи дозволила автоматично керувати процесом РОД. Дослідження ефективності алгоритмів роботи мікропроцесорної системи керування засвідчило, що час на прошивку контрольної деталі зменшився на 30 с за рахунок підвищення продуктивності процесу обробки, а час підведення електрода-інструмента до заготовки зменшився на 10 с. В цілому економія часу на обробку одного отвору склала 40 с, що враховуючи загальний час на обробку деталі 4,5 хв дозволило скоротити час операції на 15 %

2. Виявлено, що розроблений графічний інтерфейс для введення завдання по керуванню процесом РОД дозволяє виконувати процес обробки автоматично від початку до кінця. Так наприклад, при введенні глибини прошивання отвору в деталі, завершення процесу обробки відбудеться автоматично, що створює умови для багатOVERстатного обслуговування.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної складної науково-прикладної задачі автоматизації процесу РОД. Практичним результатом дисертаційної роботи є підвищення продуктивності та енергоефективності процесу розмірної обробки дугою за рахунок впровадження сучасної швидкодіючої електромеханічної системи подачі ЕІ, за рахунок автоматичної стабілізації режиму горіння дуги в умовах стохастичного процесу та впровадження регуляторів додаткових підсистем для керування різними режимами.

В результаті проведення теоретичних та експериментальних досліджень отримані наступні основні наукові і практичні результати.

1. Аналіз існуючих систем автоматики, які використовуються на верстатах РОД, показав, що вибір значення міжелектродного проміжку, від якого залежать енергетичні можливості дуги, виконується оператором. На діючих верстатах використовується гідропривід подачі. Такий стан справи, як людський фактор та недосконалий привод (інерційність, підвищена витрата електроенергії, шумність, забрудненість навколишнього середовища) не дозволяє досягти максимальної ефективності процесу РОД. Доведено, що впровадження електромеханічної САК подачі приведе до підвищення енергоефективності та зростання продуктивності процесу РОД.

2. Для розв'язання задач автоматизації керування процесом розмірної обробки дугою визначені впливи як різних технологічних чинників на об'єкт дослідження, так і шляхи підвищення продуктивності процесу РОД.

3. Реалізована автоматична система підведення електрода-інструмента в зону обробки. Для керування швидкістю підведення використовується величина статичного тиску робочої рідини в електроерозійній камері. Виявлено, що при початковій установленій відстані між ЕІ і деталлю в 5 мм для квадратного отвору з фаскою зі стороною квадрата 10 мм при

перемиканні швидкості подачі при статичному тиску 0,16 МПа час підведення скоротився на 20 с.

4. Для підвищення продуктивності та енергоефективності реалізована методика визначення рівня стабільності процесу розмірної обробки, яка дозволила кількісно оцінити в реальному часі стан об'єкту керування. На основі даної методики запропоновано і обґрунтовано алгоритм дводіапазонної (перший: 15-50 В, другий: $\bar{u} \pm 5 B$) стабілізації процесу, який покладений в основу реалізації підсистеми САК стабілізації процесу РОД.

5. Запропоновано алгоритм формування сигналу завдання з використанням статистичних моментів для забезпечення максимальної продуктивності процесу обробки деталі, що дозволило керувати в реальному часі продуктивністю процесу РОД.

6. Застосовано системний підхід для аналізу процесу РОД, що дозволило запропонувати програмно-технічний вимірювальний комплекс, який є завершеним продуктом та може бути використаний для керування та дослідження процесу РОД, а також, для моделювання аналогічних систем.

7. Впровадження принципів модального керування для систем позиційного електроприводу подачі електрода-інструмента дозволило у порівнянні із стандартними налаштуваннями зменшити час перехідного процесу на 42% та перерегулювання до величини менше 5%. Експериментально доведено, що розроблена мікропроцесорна САК дозволила автоматично ефективно керувати процесом РОД. Дослідження ефективності алгоритмів роботи мікропроцесорної системи керування засвідчило, що час на прошивку контрольної деталі зменшився на 30 с за рахунок підвищення продуктивності процесу обробки, а час підведення електрода-інструмента до заготовки зменшився на 10 с. В цілому економія часу на обробку одного отвору склала 40 с, що враховуючи загальний час на обробку деталі 4,5 хв, дозволило скоротити час операції на 15 % (табл. 5.2 дисертаційної роботи).

8. В результаті проведення техніко-економічного аналізу підтверджено економічну ефективність застосування мікропроцесорної САК подачі електрода-інструмента в порівнянні з існуючими. Очікуваний розрахунковий економічний ефект для запропонованої в роботі САК складає 6452 грн. в рік, а термін окупності – 1 рік (додаток П дисертаційної роботи).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Behrens A., Ginzel J.. (2003) Neuro-Fuzzy Process Control System for Sinking EDM. Journal of Manufacturing Processes Vol. 5. No. 1, 33-39
2. Blackman R.B., Tukey J.W. The Measurement of Power Spectra from the Point of View of Communicatios Engineering, Dover, New York, 1958, 190 p. - Access mode: <http://catalog.hathitrust.org/Record/000358001>
3. Das, M., Kumar, K., Barman, T., and Sahoo, P. (2012). Optimization of material removal rate in EDM using taguchi method. Advanced Materials Engineering and Technology, 626, 270-274.
4. Fuller A.T. Absolute optimality of non-linear control system with integral-square error criterion /A.T. Fuller //Journal of Electronics and Control. - 1964. V. 17, № 3. - P. 301-317
5. Hongge Zhao. NN-Based Approximate Model Control for the EAF Electrode Regulator System. Mathematical Problems in Engineering Volume 2013 (2013), Article ID 874890, 11 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/874890>
6. Meshcheriakov G. N. Electro-phisical Processes in Electropulse Machining // Process and Metal Transfer. – Annals of the CIRP Vol 18, 1970. – P. 491-499.
7. Nikalje, A. M., Kumar, A., and Srinadh, K. V. S. (2013). Influence of parameters and optimization of EDM performance measures on MDN 300 steel using taguchi method. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1-9.
8. Ping Guan, Xiaohe Liu. Application of Fuzzy Neural Control in the Electrode regulator system of arc furnace. Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on (Volume:2). DOI: 10.1109/WCICA.2006.1713478
9. Savelenko, G. Optimization of arc ignition process for machines of arc dimensional machining / Gregory Savelenko, Yury Yermolaev, Vitaly Yuriev

// Technology audit and production reserves. – 2016. – Vol. 6, N 2(32). - P. 44-51.
– Way of Access : DOI : 10.15587/2312-8372.2016.86081.

10. Xiao-he Liu, Rong Kuai, Ping Guan, Xiao-Mei Ye, Zheng-Lan Wu. Fuzzy-PID control for arc furnace electrode regulator system based on Genetic Algorithm. Machine Learning and Cybernetics, 2009 International Conference on (Volume:2). DOI: 10.1109/ICMLC.2009.5212457

11. Yazovskikh, V. M. Estimation of the welding electrodes quality by the computer analyses of oscillograms of welding current and voltage [Text] : Proc. Of the 8th Intern. conf. / V. M. Yazovskikh, V. I. Shumyakov, V. N. Boronenkov // Computer technology in welding, 1998. – 10 p.

12. Zhang, M., Zhang, Q., Dou, L., Zhu G., Dong C. (2016). An independent discharge status detection method and its application in EAM milling. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 1-10. DOI: 10.1007/s00170-016-8537-0

13. А. с. 368965 СССР, МКИ В 23 Р 1/02. Способ электрофизической обработки металлов / В. И. Носуленко (СССР). - № 1223593/25-8; Заявлено 04.03.68.

14. А. с. 70010 СССР. Способ обработки металлов, сплавов и иных токопроводящих материалов / Б. Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко (СССР). – Заявлено 03.04.43; Опубл. в 1971, Бюл. № 7.

15. Автоматизированный электропривод промышленных установок / [Онищенко Г.Б., Аксенов М.И., Грехов В.П. та ін.]; под ред. Г.Б. Онищенко. – Москва: РАСНХ, 2001. – 520 с.

16. Александров А. Г. Оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие для вузов по спец. "Автоматика и управление в техн. системах" / А. Г. Александров. - Москва: Высш. школа, 1989. - 262 с.

17. Аржанов В. В. Адаптивные системы широкорегулируемого электропривода постоянного тока для механизмов подач : дис. канд. техн. наук : 05.09.03. / Аржанов Владимир Викторович – Томск, 1984. – 305 с.

18. Арменский Е.В. Электрические микромашины.[Учебн. пособие для вузов] / Е.В. Арменский, Т.Б. Фалк. - [3-е изд.]. - Москва: Высшая школа, 1985. - 231 с.
19. Бартлетт М. Введение в теорию случайных процессов / М. Бартлетт. - Москва: Иностранной литературы, 1958 – 385 с.
20. Башарин А.В. Управление электроприводами: [Учебное пособие для вузов] /А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский - Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. - 382 с.
21. Бендат, Джулиус С. Прикладной анализ случайных данных / Д. С. Бендат, А. Д. Пирсол ; пер. с англ. В. Е. Привальского, А. И. Кочубинского под ред. И. Н. Коваленко. – М.: Мир, 1989. - 540 с.
22. Боков В. М. Гідродинаміка процесу біполярної обробки електричною дугою двох твердосплавних прокатних валків / В. М. Боков, О. Ф. Сіса, М. І. Попова // Зб. наукових праць КНТУ / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація / - Вип. 25. – Кіровоград: КНТУ, 2012. - С. 155-161.
23. Боков В. М. Методологія та техніка керування гідродинамічним режимом при розмірній обробці електричною дугою / В. М. Боков, О. Ф. Сіса, П. М. Великий, І. А. Гросул // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонГТУ, 2002. - Вып. 19. – С. 7-12.
24. Боков В. М. Оброблюваність матеріалів електричною дугою: монографія / В. М. Боков, О. Ф. Сіса ; Кіровоград. нац. техн. ун-т. - Кіровоград : Імекс, 2013. - 172 с.
25. Боков В. М. Оптимізація геометричних параметрів електрода-інструмента для розмірного прошивання отворів електричною дугою / В. М. Боков, М. І. Попова // Зб. наук. праць – Кіровоград, КІСМ, 1998 – С. 117-123.
26. Боков В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою / В. М. Боков. – Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс-ЛТД», 2002. – 300 с.

27. Бор-Раменский, Арнольд Евгеньевич. Быстродействующий электропривод / А. Е. Бор-Раменский, Б. Б. Воронецкий, В. А. Святославский. - Москва : Энергия, 1969. - 168 с.
28. Борцов Ю. А. Автоматические системы с разрывным управлением / Ю. А. Борцов, И. Б. Юнгер. - Л. : Энергоатомиздат, 1986 Ленингр. отд-ние. - 167 с.
29. Борцов, Ю. А. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением / Ю. А. Борцов, Н. Д. Поляхов, В. В. Путов. - Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. - 215 с.
30. Вахрушев В. И. Исследование крутильных колебаний двигателя ЗТД / В.И. Вахрушев, А.Н. Дороженко, В.Г. Кондратенко / Харьковское конструкторское бюро по двигателестроению // ПиКАД. - 2009. - № 1. - С. 30-32.
31. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель - Москва: «Высшая школа», 2001. – 575 с.
32. Використання інформаційних технологій на базі кореляційно-спектрального аналізу вибірок осцилограм технологічних параметрів функціональних вузлів електроерозійного верстату для розмірної обробки дугою: звіт про НДР (закл.) / Кіровоградський національний технічний університет; керівн. Ю.О. Єрмолаєв; викон. Г. В. Савеленко. – Кіровоград: КНТУ, 2012. – 135 с. – Інв. № 0111U007658.
33. Востриков А. С. Основы теории непрерывных и дискретных систем регулирования / А.С. Востриков, Г.А. Французова, Е.Б. Гаврилов – [5-е изд. перераб. и доп.: учеб. пособие] – Новосибирск: НГТУ, 2008. – 476 с.
34. Врублевский А. Н. Техническое решение для исследования рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания / А.Н. Врублевский, А.А. Дзюбенко, В.И. Вахрушев / ХНАДУ // ПиКАД.- 2008.- № 4.- С. 12-15.
35. Гайдукевич В. И. Вероятностная обработка осциллограмм электрических величин / В. И. Гайдукевич, А. А. Мельникова. - Москва: Энергия, 1972. - 112 с.

36. Гарнов В. К. Унифицированные системы автоуправления электроприводами в металлургии / В.К. Гарнов, В.Б. Рабинович, Л.М. Вишневецкий - Л.-М.: Из-во «Металлургия», 1971. – 216 с.
37. Грибанов Ю. И. Спектральный анализ случайных процессов / Ю. И. Грибанов, В. Л. Мальков. - Москва : Энергия, 1974. - 239 с.
38. Гуткин Б. Г. Автоматизация электроэрозионных станков / Б. Г. Гуткин. - Ленинград: Машиностроение, 1971. – 160 с.
39. Девин Л. Н. Применение пакета PowerGraph для исследования процесса резания / Л. Н. Девин, А. Г. Сулима // ИСМ им. В.Н. Бакуля // ПиКАД.- 2008.- № 3.- С. 24-26.
40. Демиденко С. Н. Модульные КАМАК-системы автоматизации эксперимента / С. Н. Демиденко, Л. С. Апанасенко, В. Н. Дашук , Э. Б. Куновский. - Минск: Навука і тэхніка.- 1990. - 208 с
41. Деруссо П., Рой Р., Клоуз Ч. Пространство состояний в теории управления. Перев. с англ. – М.: Наука, 1970. – 620 с.
42. Дженкинс Г. Спектральный анализ и его приложения / Г. Дженкинс, Д. Ваттс // Выпуск 1. Перевод с английского В.Ф. Писаренко. - Москва: «Мир», 1971 – 317 с.
43. Дженкинс Г. Спектральный анализ и его приложения / Г. Дженкинс, Д. Ваттс // Выпуск 2. Перевод с английского В.Ф. Писаренко. - Москва: «Мир», 1972 – 286 с.
44. Єрмолаєв Ю. О. Розробка САК електромеханічного приводу верстата типу “ДУГА” на базі “ЭШИМ–1” / Ю.О. Єрмолаєв, Г.В. Савеленко // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград: КНТУ. - 2004. - Вип.15. - С. 270-273.
45. Єрмолаєв Ю. О. Синтез регуляторів позиційного електропривода подачі електрода-інструмента на верстатах РОД з використанням стандартних налаштувань / Ю. О. Єрмолаєв, Г. В. Савеленко // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету.

Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград: КНТУ. - 2013. - Вип. 26. - С. 280-284. - Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/j-pdf/znpkntu_2013_26_48.pdf

46. Єрмолаєв Ю.О. Дослідження САК процесу РОД на верстаті з електромеханічним приводом. І. Основні фактори, що впливають на процес / Ю.О. Єрмолаєв, П.М. Великий, Г.В. Савеленко // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград: КНТУ. - 2007.- Вип.19. – С. 270-273.

47. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энерггоатомиздат, 2000. – 331 с.

48. Захаров С. ЦЛД. Система управления приводами электроэрозионных станков Mitsubishi Electric / С. Захаров, Ю. Зенкевич // Журнал ИТО. – 2014. - № 4. С. 52-54. - Режим доступу: <http://www.ito-news.ru/archive/2014/1404ito52abamet.pdf>.

49. Зленко В.О. Автоматизований комплекс досліджень терморезистивних властивостей наноструктурованих плівкових систем / В.О. Зленко, С.І. Проценко, Р. Сафаріч // Ж. нано- та електронної фізики. - 2009.-1 №2. - С. 34-41

50. Золотых Б. Н. Основные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде: Автореф. дис. д-ра техн. наук / МИЭМ. – М., 1968. – 52 с.

51. Золотых Б. Н. Физические основы электроискровой обработки металлов. – М.: Гостехиздат, 1953. – 107 с.

52. Иоффе В.Ф. Автоматизированные электроэрозионные станки. / В.Ф.Иоффе, М.В. Коренблюм, В.А. Шавырин. – Л.: Машиностроение, 1984. – 227 с.

53. Каган В. Г. Электроприводы с предельным быстродействием для систем воспроизведения движений / В. Г. Каган. - Москва : Энергия, 1975. - 241 с.
54. Казакевич В. В. Системы автоматической оптимизации / В. В. Казакевич, А. Б. Родов. - Москва : Энергия, 1977. - 288 с.
55. Казаков И.Е. Статистические методы проектирования систем управления / И.Е. Казаков - Москва: Машгиз, 1969.
56. Ким Д. П. Теория автоматического управления: учеб. пособие для студ. вузов, обуч. по напр. "Автоматизация и управление" / Д. П. Ким. Изд. - 2-е, испр. и доп. - М. : Физматлит, 2007. Т.2 : Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. - 2007. - 440 с.
57. Корреляционный анализ нагрузок выемочных машин / [Докукин А.В., Красников Ю.Д., Хургин З.Я., Шмарьян Е.М.] - Москва: Наука, 1969.- 136 с.
58. Котюк, А. Ф. Методы и аппаратура для анализа характеристик случайных процессов / А. Ф. Котюк, В. В. Ольшевский, Э. И. Цветков. - Москва: Энергия, 1967. - 240 с.
59. Кохановская Т. С. К вопросу о линейном сервоприводе / Т.С. Кохановская // Журнал ИТО. – 2000. - № 3. С. 42-44.
60. Кромм А. А. Позиционный микроэлектропривод с переменной структурой универсальной измерительной установки: дис. канд. техн. наук: 05.09.03./ Кромм Андрей Артурович - Новосибирск, 1992. - 178 с.
61. Кузовков Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства / Н.Т. Кузовков. - Москва: Машиностроение, 1976. – 184 с.
62. Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И. Физика искрового способа обработки металлов. – М.: ЦБТИ, Министерство электропромышленности СССР, 1946.
63. Ланкин, Ю. Н. Показатели стабильности процесса дуговой сварки плавящим электродом [Текст] / Ю. Н. Ланкин // Автоматическая сварка. – 2011. – № 1. – С. 7–15.

64. Лебедев А. М. Следящие электроприводы станков с ЧПУ / А.М. Лебедев, Р.Т. Орлова, А.В. Пальцев. - Москва: Энергоатомиздат, 1988. – 223 с.
65. Левин, Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники: [монография]: в 3-х кн. / Б. Р. Левин. - 2-е изд., перераб. - Москва: Сов. радио, 1974 - 1976. - Кн. 1. - 1974. - 550 с.
66. Лившиц А. Л. Основы экстремального регулирования электроимпульсных станков / А. Л. Лившиц. - Москва: Отдел научно-технической информации, 1962. – 98 с.
67. Лившиц Н. А. Вероятностный анализ систем автоматического управления / Н. А. Лившиц, В. Н. Пугачев // Т. 1. - Москва: «Советское радио», 1963 – 896 с.
68. Лукомский Я. И. Теория корреляции и ее применение к анализу производства / Я.И. Лукоморский. - М. : Госстатиздат, 1961. - 375 с.
69. Мазунин В. П. Быстродействующие регулируемые электроприводы. Прикладная оптимизация и технические решения / В. П. Мазунин; Рос. акад. наук. Уральское отд-ние. Институт машиноведения. Екатеринбург: УрО РАН, 1999. — 297 с
70. Маргелов А. Датчики тока компании Honeywell / А. Маргелов// Журнал Chip News. – 2005. - №7. - С. 95-99
71. Марущак Я. Ю. Динаміка двомасових систем стабілізації режиму в електродугових печах: монографія / Я. Ю. Марущак, А. О. Лозинський, А. П. Кушнір. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 224 с.
72. Мещеряков Г. Н. Обработка металлов импульсами электрического тока: Дис. д-ра техн. наук. – Киев: Институт электросварки АН УССР, 1960. – 420 с.
73. Мещеряков Г. Н. Электрообработка глубоких отверстий. Труды НИАТ. – М.: Машгиз, 1951. – 50 с.
74. Мирский Г.Я. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов / Г.Я. Мирский. - Москва; - Ленинград: Энергия, 1967. - 432 с.

75. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений; 2-е изд., перераб. и доп. / А.К. Митропольский - Москва, Наука, 1971 г., 576 с
76. Мицкевич М. К. Электроэрозионная обработка металлов / М. К. Мицкевич, А. И. Бушик, И. А. Баку то и др.; Под ред. И. Г. Некрашевача. – Минск: Наука и техника, 1988. – 216 с.
77. Модернізація електромеханічної частини привода подачі електроерозійного верстата для розмірної обробки дугою: звіт про НДР (закл.) / Кіровоградський національний технічний університет; керівн. Ю.О. Єрмолаєв; викон. Г. В. Савеленко. – Кіровоград: КНТУ, 2011. – 34 с. – Інв. № 0111U007656.
78. Носуленко В. И. О физической природе, об общем и отличиях, технологических возможностях электрических разрядов и классификации способов электроразрядной обработки металлов [Текст] / В. И. Носуленко // Электронная обработка материалов. – 2006. – № 1. – С. 4–14.
79. Носуленко В. И., Мещеряков Г. М. Размерная обработка металлов электрической дугой // Электронная обработка материалов. – 1981. - № 1. – С.19-23.
80. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою: Дис. д-ра техн.. наук: 05.03.07 / Носуленко Віктор Іванович – Кіровоград, 1998. – 389 с.
81. Носуленко В. І. Сталість процесу розмірної обробки металів електричною дугою не профільованим електродом. [Текст] / В. І. Носуленко, О. Ф. Сіса // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград: КНТУ. – 2006. – Вип. 17. – С. 148–153.
82. Носуленко В. Собственное магнитное поле разряда при электроэрозионной обработке / Виктор Носуленко, Петр Великий, Михаил Москаленко, Ольга Чумаченко // Восточно-Европейский журнал передовых

технологий. – 2012. – Т. 5, N 5(59). - С. 45-51. – Режим доступа : DOI : 10.15587/1729-4061.2012.4574.

83. Носуленко В.И. Размерная обработка металлов стационарной электрической дугой: дис. канд. техн. наук: 05.03.04. / Носуленко Віктор Іванович – Кировоград, 1977. – 202 с.

84. Носуленко В.И. Размерная обработка металлов электрической дугой / В.И. Носуленко // Электронная обработка материалов, 2005, № 1. – С. 8-17.

85. Носуленко В.І. Розмірна обробка металів електричною дугою: Автореферат дис. д-ра. техн. наук: 05.03.07 / Кіровоградський держ. техн. ун-т. / В.І. Носуленко. – Київ: 1999. – 36 с.

86. Орлов, А. И. Математика случая: Вероятность и статистика – основные факты [Текст]: уч. пос. / А. И. Орлов. – М.: МЗ-Пресс, 2004. – 110 с.

87. Охоткин Г. П. Развитие теории динамических процессов и разработка быстродействующих полупроводниковых преобразователей для электропривода : дис. докт. техн. наук : 05.09.12. / Охоткин Григорий Петрович – Чебоксары, 2006. – 425 с.

88. Патент 2063316 Рос. Федерация: МПК В 23 К 31/12, В 23 К 9/073. Метод оценки стабильности горения дуги / Язовских В. М., Беленький В. Я., Кривоносова Е. А. и др.; заявитель и патентообладатель Пермский гос. техн. унив-т. – №94037567/08; заявл. 07.10.1994; опубл. 10.07.1996

89. Петров Ю.П. Оптимальное управление электроприводом / Ю.П. Петров. - Москва-Ленинград: Госэнергоиздат, 1961. - 187 с.

90. Полетаев, В. А. Экспериментальные исследования адаптивной системы управления процессом электроэрозионной обработки / В. А. Полетаев, И. С. Сыркин // Вестник кузбасского государственного технического университета. – 2007. – № 6. – С. 72-75.

91. Попова М. І. Прогнозування технологічних характеристик та інтенсифікація процесу розмірної обробки електричною дугою складнопрофільних отворів: Дис. канд. техн. наук 05.03.07 / Попова

Маргарита Іванівна – Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". - К., 2002. - 182 с.

92. Походня, И. К. Металлургия дуговой сварки: Процессы в дуге и плавление электродов [Текст]. / И. К. Походня, В. Н. Горпенюк, С. С. Миличено и др.; под ред. И. К. Походни. – Киев: Наук. Думка, 1990. – 224 с.

93. Пугачев В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления / В.С. Пугачев. - Москва : Наука, 1962. - 883 с.

94. Разработка и исследование высокопроизводительных способов обработки титановых сплавов: Отчёт о НИР № 435 / КИСМ. – ГР 80046173; Инд. № 02815014492. – Кировоград, 1982. – 98 с. ДСП.

95. Разработка конструкции, изготовление и исследование станка для прошивки отверстий и полостей стационарным электрическим разрядом: отчет о НИР № 158 / КИСМ. – № ГР 73067774; Инв. № Б 562681. Кировоград: КИСМ, 1976. – 124 с. ДСП.

96. Розробка інформаційно-вимірювального комплексу для реєстрації стохастичних параметрів роботи електроерозійного верстата для розмірної обробки дугою: звіт про НДР (закл.) / Кіровоградський національний технічний університет; керівн. Ю.О. Єрмолаєв; викон. Г. В. Савеленко. – Кіровоград: КНТУ, 2012. – 25 с. – Инв. № 0111U007657.

97. Руководство пользователя V1.2. m-DAQ12. Микросистема сбора данных с интерфейсом USB. ХОЛИТ Дэйта Системс. - [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.holit.ua/download/common/docs/hds/m-DAQ.pdf>

98. Савеленко Г. В. Дослідження робочого процесу розмірної обробки дугою на верстаті з електромеханічним приводом / Г. В. Савеленко, Ю. О. Єрмолаєв // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. - 2014. - № 14. - С. 164-169. - Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Kitonv_2014_14_27.pdf.

99. Савеленко Г. В. Дослідження САК процесу РОД на верстаті з електромеханічним приводом. II. Інформаційно-вимірювальний комплекс для проведення експериментальних досліджень / Г. В. Савеленко, Ю. О.

Єрмолаєв, В. М. Каліч // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград: КНТУ. - 2012. - Вип. 25(2). - С. 266-271. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/znpkntu_2012_25\(2\)__48.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/znpkntu_2012_25(2)__48.pdf).

100. Савеленко Г. Обґрунтування структури екстремального регулятора по продуктивності автоматизованого процесу електроерозійної обробки / Григорій Савеленко, Юрій Єрмолаєв // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2014. – Т. 6, N 4(20). - С. 42-47. – Режим доступу : DOI: 10.15587/2312-8372.2014.32750.

101. Савеленко Г. Розробка програмно-апаратного пристрою автоматизованої системи стабілізації процесу розмірної обробки дугою/ Григорій Савеленко, Юрій Єрмолаєв, Олександр Собінов, Василь Гуцул // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. – Т. 1, N 3(21). - С. 22-28. – Режим доступу : DOI: 10.15587/2312-8372.2015.36244.

102. Савеленко Г. Спосіб автоматичного визначення стабільності процесу розмірної обробки дугою / Григорій Савеленко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – Т. 1, N 5(73). - С. 9-13. – Режим доступу : DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36226.

103. Савеленко Г.В. Обоснование алгоритма работы экстремального регулятора подачи электрода-инструмента на станках размерной обработки дугой / Г.В. Савеленко // Автоматизированное проектирование в машиностроении: Материалы I международной заочной научно-практической конференции / НОЦ«МС». – Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2013. - С. 115-122.

104. Санковский Е. А. Вопросы теории автоматического управления: стат. анализ и синтез САК: [учебное пособие для вузов по специальности "Автоматика и телемеханика"] / Е. А. Санковский. - Москва : Высш. школа, 1971. - 231 с.

105. Свешников А. А. Прикладные методы теории случайных функций / А. А. Свешников. - Москва : Наука, 1968. - 465 с.
106. Симаков Г. М. К вопросу о предельных по быстродействию возможностях электропривода постоянного тока / Г. М. Симаков // Автоматизация производственных процессов: [Межвуз. сб. науч. трудов]. - Новосибирск, 1969. - вып. 7. - С. 107-115.
107. Симаков Г. М. Развитие теории и основы построения быстродействующего позиционного микроэлектропривода постоянного тока с разрывным управлением : дис. докт. техн. наук : 05.09.03. / Симаков Геннадий Михайлович – Новосибирск, 2004. – 349 с.
108. Симаков Г. М. Системы автоматического управления электроприводами: учеб. пособие / Г. М. Симаков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 116 с.
109. Сіса О. Ф. Розмірна обробка твердосплавних прокатних валків біполярним інструментом / О. Ф. Сіса, В. М. Боков // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2009. Вип. 38. – 276 с. – С. 209-213.
110. Сіса О.Ф. Розмірна чорнова обробка електричною дугою твердосплавних прокатних валків: Дис. канд. техн. наук: 05.03.07 / Сіса Олег Федорович – Кировоград, 2013 – 285 с.
111. Смирнова, Н. В. Определение параметров вольт-амперной характеристики дуги при изменении величины межэлектродного промежутка. / Н. В. Смирнова, В. В. Смирнов // Збірник наукових праць КНТУ: Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград: КНТУ. - 2012. – Вип. 25, Ч. 1. – С. 372-277.
112. Собінов, О. Г. Моделювання швидкості знімання матеріалу при технологічному процесі розмірної обробки дугою [Текст] / О. Г. Собінов // Збірник наукових праць КНТУ: Техніка в сільськогосподарському

виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград: КНТУ. – 2006. – Вип. 17. – С. 247–252.

113. Современная теория автоматического управления и ее применение [Текст] / Д. Сю, А. Мейер ; под. ред. Ю. И. Топчиева ; пер. с англ. В. С. Бочкова [и др.] = Modern control principles and applications / J.Hsu, A. Meyer. - М. : Изд-во "Машиностроение", 1972. - 544 с.

114. Солодовников В. В. Статистическая динамика линейных систем автоматического регулирования / В. В. Солодовников. - Москва : Физматгиз, 1960. - 655 с.

115. Спирин Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента : [конспект лекций (отдельные главы из учебника для вузов)] / Спирин Н.А., Лавров В.В. ; под общ. ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ - УПИ, 2004. – 257 с.

116. Справочное руководство ПО «PowerGraph» [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.powergraph.ru>

117. Сыркин И. С. Разработка системы управления электроэрозионным станком с использованием нейронных сетей и нечетких множеств. Дис. канд. техн. наук 05.13.06 / Сыркин Илья Сергеевич - Кузбасский государственный технический университет. – Кемерово, 2009. – 191 с.

118. Усачев М. В. Система автоматического управления энергетическим режимом электродуговых печей переменного тока: дис. канд. техн. наук: 05.13.06./ Усачев Максим Валерьевич - Москва, 2009. – 137 с.

119. Финкельбург В. Электрические дуги и термическая плазма [Текст] / В. Финкельбург, Г. Меккер. – М.: Изд-во иностр. литер., 1961. – 371 с.

120. Французова Г. А. Синтез систем экстремального регулирования для нелинейных нестационарных объектов на основе принципа локализации: дис. докт. техн. наук : 05.13.01. / Французова Галина Александровна – Новосибирск, 2004. – 346 с.

121. Фуллер А.Т. Оптимизация релейных систем регулирования по различным критериям качества /А.Т. Фуллер //Труды I конгресса ИФАК (Москва, 1960). М.: Наука, 1961. -Т. 2. - С. 584-605
122. Хан Г. Статистические модели в инженерных задачах [Текст] = Statistical Models in Engineering : научное издание / Г. Хан, С. Шапиро ; пер. Е. Г. Коваленко ; ред. В. В. Налимов. - М. : Мир, 1969. - 396 с
123. Хренов, К. К. Электрическая сварочная дуга [Текст] / К. К. Хренов. – М.; Киев: Машгиз, 1949. – 204 с.
124. Чаки Ф. Современная теория управления Нелинейные, оптимальные и адаптивные системы : пер. с англ. / Ф. Чаки. - М. : Мир, 1975. - 424 с.
125. Чеголин П. М. Методы, алгоритмы и программы статистического анализа / П.М. Чеголин, В.Н. Пойда. - Минск : Наука и техника, 1971. - 224 с.
126. Чиликин М. Г. Теория автоматизированного электропривода : учеб. пособ. для вузов по спец. "Электропривод и автоматизация промышленных установок" / М. Г. Чиликин, В. И. Ключев, А. С. Сандлер. - Москва: Энергия, 1979. - 616 с.
127. Чистов В. П. Оптимальное управление электрическими приводами / В. П. Чистов, В. И.Бондаренко, В. А. Святославский. - Москва: Энергия, 1968. - 232 с.
128. Чумаченко О. С. Розмірна обробка електричною дугою листових деталей: Дис. канд. техн. наук 05.03.07 / Чумаченко Ольга Сергіївна – Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". - К., 2002. - 245 с.
129. Чураков Е. П. Оптимальные и адаптивные системы: учебное пособие для студентов вузов по спец. "Автоматика и телемеханика" / Е. П. Чураков. - Москва : Энергоатомиздат, 1987. - 254 с.
130. Шафранский, Л. Г. Оценка устойчивости дуги переменного тока [Текст] / Л. Г. Шафранский, Л. Н. Орлов, А. В. Абрашин // Автоматическая сварка. – 1972. – № 4. – С. 18–19.
131. Шмельов В.М. Розмірна обробка електричною дугою спряжених робочих деталей розділових штампів. Дис. канд. техн. наук 05.03.07 /

Шмельов Віталій Миколайович – Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". - К., 2013. - 199 с.

132. Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов. Ч.1. Электроприводы постоянного тока с подчиненным регулированием координат / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. проф.-пед. ун-та, 1997. – 279 с.

133. Электро-импульсная обработка материалов / [Лившиц А. Л., Кравец А. Т., Рогачев И. С., Сосенко А. Б.] – М.: Машиностроение, 1967. – 275 с.

134. Электроприводы комплектные многокоординатные транзисторные постоянного тока типа ЭШИМ-1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ИГЕВ654773.002-03.18 №2427.

135. Юферов В. Г. Электрические машины автоматических устройств.[Учебник для вузов] / В.Г. Юферов.- Москва: Высшая школа, 1976. - 416 с.

136. Язовских В. М. Методика оценки стабильности горения сварочной дуги тока [Текст] / В. М. Язовских, В. Я. Беленький, Л. Н. Кротов, И. Ю. Летугин // Свароч. пр-во. – 1997. – № 4. – С. 18–20.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК Б.1

Основні реалізації технологічних схем формоутворення при розмірній обробці дугою

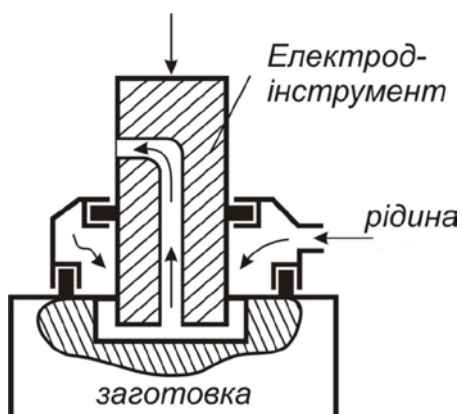


Рис. Б.1.1. Технологічна схема прошивання з об'ємним копіюванням форми електрода-інструмента

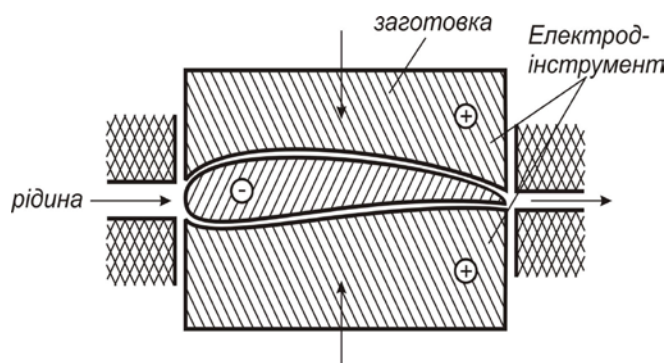


Рис. Б.1.2. Технологічна схема формоутворення турбінних лопаток

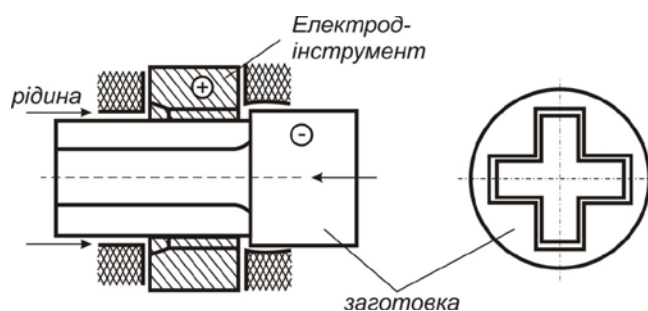


Рис. Б.1.3. Технологічна схема формоутворення фасонних зовнішніх поверхонь

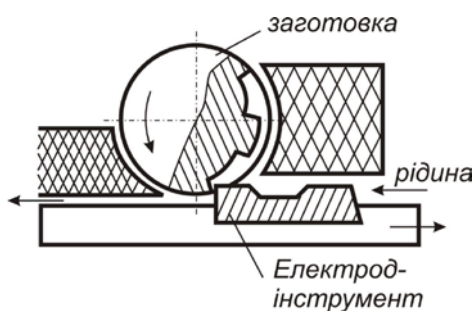
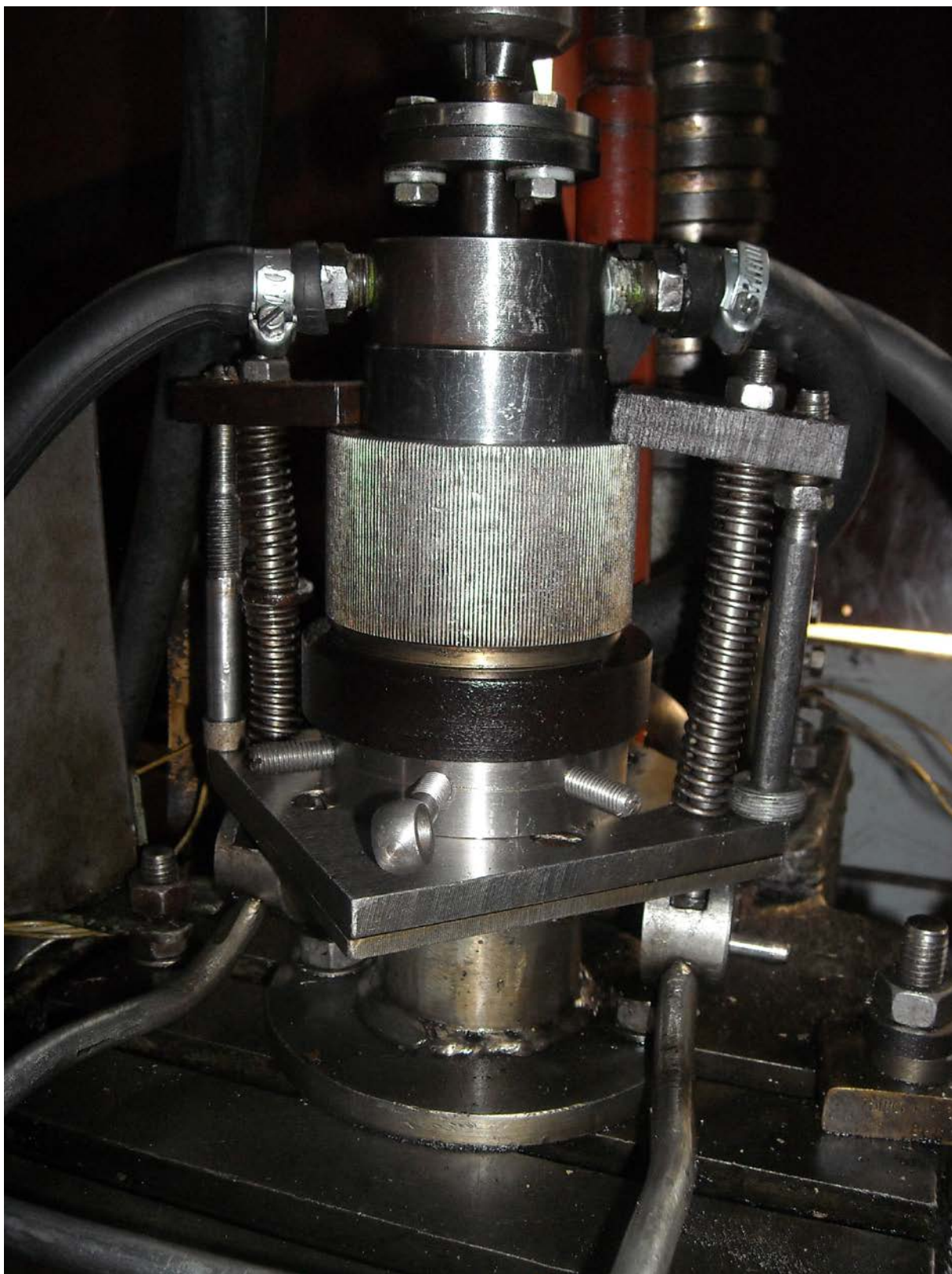


Рис. Б.1.4. Технологічна схема формоутворення по принципу обкатки

ДОДАТОК Б.2

Пристосування призначене для відведення робочої рідини та продуктів електроерозії при наскрізному прошиванні отворів



ДОДАТОК В

Основні технічні параметри комплектного електроприводу ЕШІМ-1

Електроприводи комплектні багатокоординатні транзисторні постійного струму типу ЕШІМ-1 призначені для використання в механізмах подач і переміщення верстатів, у промислових роботах та пресах з високою швидкодією.

Електроприводи виробляються у двох кліматичних виконаннях УХЛ і О категорії розміщення 4 по ГОСТ 15150-69 і можуть вбудовуватись у шафи комплектних пристроїв керування при умові, що температура повітря всередині шафи не перевищує 35°C для УХЛ 4 та 45°C для О4.

Номінальні значення кліматичних факторів навколишнього середовища по ГОСТ 15150-69 та ГОСТ 15543-70, при цьому: висота над рівнем моря не більше 1000 м.

Навколишнє середовище не вибухонебезпечне, не містить значної кількості агресивних газів і парів у концентраціях, що руйнують метали та ізоляцію, не насичена водяними парами, струмопровідним пилом.

У часті корозійної активності атмосфери, електроприводи відповідають групі умов експлуатації „1” для виконання УХЛ і категорії „4”, та умов експлуатації „2” для виконання О і категорії „4” по ГОСТ 15150-69.

У частині впливу механічних факторів навколишнього середовища електроприводи, за виключенням двигуна, відповідають групі умов експлуатації М1 по ГОСТ 17516-72.

Робоче положення приводів вертикальне, допускається відхилення від вертикального положення 5° у будь-який бік.

Ступінь захисту – ІР00 по ГОСТ 14254-80.

Живлення електроприводів здійснюється через узгоджувальний трансформатор від трьохфазної мережі:

- напругою 380, 415 та 500 В частоти 50 Гц;

- напругою 220, 230, 380, 400, 415 та 440 В частоти 60 Гц.

Електроприводи повинні зберігати працездатність при зміні напруги живлячої мережі у межах від +10% до -15% номінальної напруги. При цьому допустимі коливання частоти живлячої мережі повинні бути у межах $\pm 2\%$ від номінального значення.

Таблиця В.1 - Типи і основні параметри блоків регулювання і двигунів електроприводу ЕШІМ -1

Блок регулювання				Двигун		
Тип	Шифр	Номінальний струм, А	Макс. напруга живлення силового ланцюга, В	Тип	Тривалий момент при мінімальній швидкості, Нм	Максимальна швидкість, об/хв
БС3001-263Ф	1	4	60	ДП35-25	0,06	4000
				ДП40-40	0,0955	4000
БС3001-293Ф	2	8	60	ДП50-60	0,143	4000
				ДП60-90	0,21	4000
				ДПУ87-75	0,7	2000

Електроприводи в режимі регулювання швидкості забезпечують технічні характеристики згідно таблиці В.2.

Таблиця В.2 - Технічні характеристики електроприводів в режимі регулювання швидкості

Швидкість двигуна	Похибка швидкості, %, не більше			Коефіцієнт нерівномірності обертання, не більше
	Сумарна похибка $\Delta \Sigma$	Похибка при зміні навантаження ΔH	Похибка при реверсі ΔP	
$n_{\text{макс}}$	1,5	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	0,05
0,5 $n_{\text{макс}}$	2,0	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	0,05
0,1 $n_{\text{макс}}$	2,5	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$	0,1
0,01 $n_{\text{макс}}$	5,0	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$	0,1
0,001 $n_{\text{макс}}$	15,0	$\pm 5,0$	$\pm 5,0$	0,15
0,0001 $n_{\text{макс}}$	25,0	$\pm 10,0$	$\pm 10,0$	0,25

Привод в регульованому режимі повинен забезпечувати наступні динамічні характеристики:

- смуга пропускання замкнутого швидкісного контуру при вхідному сигналі 0,1В повинна бути не менше ніж 75Гц. У випадку насичення регулятора допускається зниження амплітуди задаючого сигналу;

- перерегулювання при стрибкоподібній подачі на вхід управляючої напруги повинно бути не більше 15% при швидкості $0,5n_{\text{макс}}$.

Номінальний режим роботи електроприводів – тривалий (S1) при швидкості не менше ніж 0,1 об/хв. Допускається робота у короткочасному (S2) та повторно-короткочасному (S3) режимах при дотриманні наступних умов:

- 1) максимальна кратність перевантаження за струмом не більше 2,5 на протязі 5с.
- 2) середньоквадратичний струм за час циклу не перевищує номінального.

ДОДАТОК Г

Межі вимірювання технологічних параметрів, що підлягають запису

Таблиця Г.1 – Аналіз технологічних параметрів електроерозійного верстату з електромеханічним приводом подачі ЕІ

№	Назва технологічного параметра	Позначення	Одиниця вимірювання (розмірність)	Діапазон в якому може змінюватися	Примітка
1	Тиск робочої рідини	P	кгс/см ²	0...20	Тиск та швидкість потоку рідини, що прокачується, задані згідно технології процесу і коливаються при усталеному режимі в певних незначних межах, що дає нам можливість з практичною точністю прийняти їх мало змінними величинами.
2	Напруга дуги	$U_{дуги}$	В	0...90	
3	Струм дуги	$I_{дуги}$	А	0...200	
4	Подача ЕІ	h	мм	0...25	Відстань обмежена конструктивними особливостями станини та лінійного датчика переміщення, при необхідності можна змінити.
5	Напруга на двигуні подачі	$U_{дв}$	В	0...27	
6	Струм на двигуні подачі	$I_{дв}$	А	0...40	Номінальний струм 5,5 А Пусковий струм 40 А
7	Напруга на тахогенераторі	$U_{тг}$	В	0...30	Напруга на тахогенераторі прямопропорційна швидкості подачі ЕІ.
8	Напруга задавача	$U_{зад}$	В	±10	Задає швидкість подачі та відведення ЕІ.

ДОДАТОК Д

Засоби вимірювання технічних параметрів процесу РОД на верстаті з електромеханічним приводом

Вимірювання значення струму. Існує декілька методів вимірювання струму, однак в промисловості найбільш широке розповсюдження отримали три з них: резистивний (з використанням шунта), на основі ефекту Холла та трансформатора струму.

В побудованій вимірювальній системі в якості первинного перетворювача струму двигуна подачі ЕІ може використовуватися як шунт 75ШСМ3-5-0,5, так і датчик Холла типу ACS712ELC-20A. В іншому вимірювальному каналі по реєстрації струму дуги в якості первинного перетворювача використовуватись датчики Холла типу:

- LEM LF 305-S/SP11, зображений на рис. Д.1.1;
- Honeywell CSLA1CH, зображений на рис. Д.1.2.



Рис. Д.1.1. Лінійний датчик струму LF 305-S/SP11



а)



б)

Рис. Д.1.2. Лінійний датчик струму CSLA1CH: а) зовнішній вигляд сенсора 91SS12-2; б) зовнішній вигляд датчика

Технічні параметри датчика CSLA1CH наведені в таблиці Д.1.

Таблиця Д.1. – Основні технічні характеристики датчика струму відкритого типу компанії Honeywell [70]

Тип датчика струму	Сенсор	Діапазон, А	Напруга зсуву, В	Температурний дрейф, %/°C	Час відключення, мкс	Струм споживання, мА	Напруга живлення, В	Робоча температура, °C
CSLA1CH	91SS12-2	±150	$U_e / 2$	±0,005	3	19	8...16	-40...150

Вибраний датчик струму підключається до модуля спряження авторської розробки [96].

Вимірювання значення тиску. Гідродинамічний потік прокачки органічною рідиною створює станція прокачки, конструктивне виконання якої розглядається в звіті [77]. Штатна система для контролю гідродинамічного тиску в нагнітаючій магістралі приєднаної до електроерозійної головки АМН-1 комплектується манометром типу МП2-У, який візуально показує поточне усереднене значення тиску в магістралі, що звичайно не дає змогу проводити автоматичний запис значень тиску в реальному часі. Для створення вимірювального каналу тиску рідини прокачки був використаний датчик тиску серії 628CR, зовнішній вигляд якого наведений на рис. Д.1.3.



Рис. Д.1.3. Зовнішній вигляд датчика тиску серії 628CR

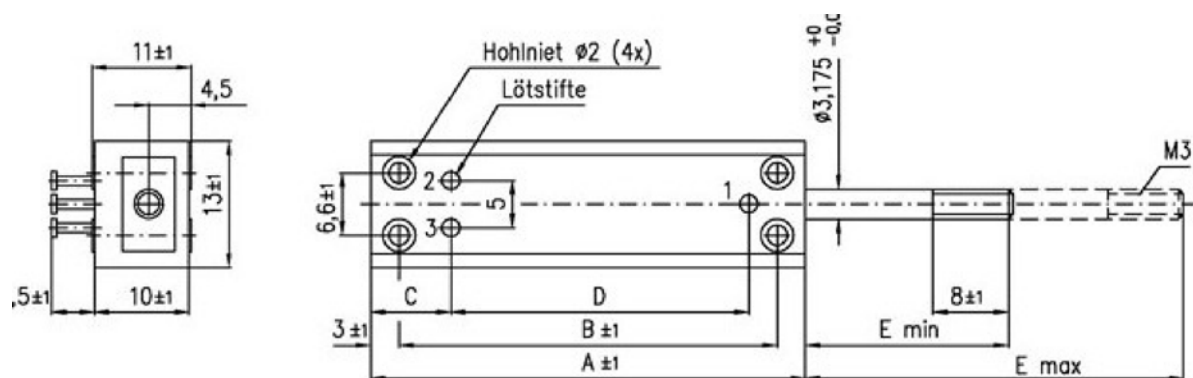
Датчик приєднується до модуля спряження авторської розробки [96].

Вимірювання значення величини подачі ЕІ. Для вимірювання величини переміщення ЕІ в системі використовується стрілочний індикатор годинникового типу. Для організації вимірювального каналу по

переміщенню ЕІ в систему введений потенціометричний датчик лінійних переміщень фірми Megatron типу CLPR13-25, зовнішній вигляд якого зображений на рис. Д.1.4. Установчі розміри наведені на рис. Д.1.5.



Рис. Д.1.4 – Зовнішній вигляд потенціометричного датчика лінійних переміщень типу CLPR13-25



$A = 51 \text{ мм}$; $B = 45 \text{ мм}$; $C = 8,5 \text{ мм}$; $D = 36,5 \text{ мм}$; $E_{\min} = 35 \pm 1 \text{ мм}$; $E_{\max} = 60,4 \pm 3 \text{ мм}$;

Рис. Д.1.5 – Установчі розміри потенціометричного датчика лінійних переміщень типу CLPR13-25

Даний потенціометричний датчик має розподільну здатність менше ніж 0,01 мм, що є достатнім для вимірювання переміщення ЕІ. Датчик приєднується до модуля спряження авторської розробки [96].

Вимірювання значення напруги. Вимірювальні канали по реєстрації напруги дуги, напруги двигуна подачі ЕІ, напруги на тахогенераторі двигуна подачі ЕІ, напруги задавача побудовані за однаковим принципом і приєднуються до модуля спряження власної розробки, причому канали напруги двигуна подачі ЕІ і напруги на тахогенераторі двигуна подачі ЕІ гальванічно розв'язуються за допомогою модуля МГР2 АЦЮА.656111.001-01.

ДОДАТОК Е

Обґрунтування швидкості запису процесів

Швидкість запису процесу визначає крок квантування за часом Δt , від якого залежить точність обчислення ймовірнісних характеристик.

Крок квантування запису процесу визначається роздільною здатністю вимірювального приладу. При побудові кореляційної функції $R(\tau)$ і спектральної густини $S(f)$ важливе значення має визначення довжини інтервалу τ_{max} , довжини інтервалу інтегрування T , кроку інтегрування (квантування) Δt за часом. У першому наближенні τ_{max} і T можна віднайти наступним чином [114]:

1. Аналізуючи осцилографічні записи випадкових процесів, визначаємо робочі межі частот. На підставі аналізу раніше знятих осцилограм: для $I_{\text{дуги}}(t)$ максимальною (цікавою для нас) є частота вихідного струму ВДУ (джерело живлення дуги) по вкладу дисперсії в загальний процес, яка дорівнює 300 Гц; для напруги тахогенератора проявляються нижчі частоти; допускаємо, що в процесах $I_d(t)$, $U_d(t)$, $U_{\text{дуги}}(t)$ мають бути присутніми частоти власних коливань механічної системи у вертикальній площині, а також високі частоти ШІМ. Отже ми зіткнулися зі складним питанням вибору кроку квантування і τ_{max} , оскільки маємо дуже великий розкид частот: частота роботи ШІМ лежить в межах 10-12 кГц, частота збурень з боку дуги - 300 Гц. Частотний діапазон коливань механічної системи апіорі не відомий, можна допустити, що він знаходиться в межах 45-75 Гц.

2. По нижчій частоті спектру вибираємо τ_{max} . τ_{max} вибирається на підставі емпіричної нерівності:

$$\tau_{max} \geq \frac{1}{f_{min}} = \frac{2\pi}{\omega_{\text{ниж}}}, \quad (\text{Е.1})$$

де $\omega_{\text{ниж}}(f_{min})$ - нижча частота випадкового процесу. Тобто, період нижчої гармоніки спектру випадкового процесу не повинен перевищувати τ_{max} [114]:

$$\tau_{max} \geq \frac{1}{45 \div 75} = 0,022 \div 0,013 \text{ с.}$$

3. По визначеному τ_{max} находимо T .

Для вибору інтервалу інтегрування T цікавою є тільки нижча частота $\omega_{ниж}$ (f_{min}). Від вибору T залежить похибка обчислення $R(\tau)$. При допустимій величині похибки 2% (рекомендації Солодовникова В. В.) [114]:

$$T \geq \frac{50}{\omega_{ниж}} \approx 10\tau_{max} = 0,22 \div 0,13 \text{ с.}$$

Через скінченність T кореляційна функція є випадковою функцією від T , τ і значень підінтегральних функцій на кінцях інтервалу інтегрування, що дає можливість прийняти, в якості міри точності визначення кореляційної функції, дисперсію $\delta^2 R_I(\tau)$. Приймаємо умову:

$$\delta^2 R_I(\tau) \leq 0,05 R_I^2(0). \quad (E.2)$$

Уточнення T відбувається на підставі критерія середньоквадратичної похибки [36, 37]:

$$T \geq 20 \left(\frac{\alpha}{\alpha^2 + \beta^2} + \frac{1}{\alpha} \right), \quad (E.3)$$

де $\alpha = \frac{3}{2\pi} \omega_{ниж} = \frac{3}{\tau_{max}}$ – характеризує швидкість затухання кореляційної функції.

$$\text{Нехай } \tau_{max} = 0,02 \text{ с, } \alpha = \frac{3}{0,02} = 150;$$

Параметр β характеризує коливальні властивості кореляційної функції і знаходиться в межах $\omega_{ниж} < \beta < \omega_{верх}$.

$$\omega_{ниж} = 2\pi f_{min} = 2\pi(45 \div 75) = 282 \div 471 \text{ 1/с,}$$

$$\omega_{верх} = 2\pi f_{max} = 2\pi \cdot 300 = 1884 \text{ 1/с}$$

Нехай $\beta = 100$. Тоді:

$$T \geq 20 \left(\frac{150}{150^2 + 1000^2} + \frac{1}{150} \right) = 0,136 \text{ с.}$$

Сенс цього уточнення зводиться до визначення інтервалу інтегрування T , що відповідає вибраному τ_{max} , щоб середньоквадратична похибка, обумовлена скінченністю T , не перевершувала наперед заданого значення. Остаточно τ_{max} уточнюється в процесі обчислення кореляційної функції.

4. Вибір кроку інтегрування (квантування) Δt . При обчисленні кореляційної функції точність обчислення залежить від кроку квантування -

відстані між наступними ординатами процесу $I(t)$. Величина Δt вибирається в залежності від спектрального складу процесу. Це дуже важливий параметр при обробці осцилограм, бо завищення Δt при дискретизації процесу призводить: до часткової втрати інформації, росту відносної середньоквадратичної помилки відповідної оцінки при заданій тривалості реалізації $T=const$, появі похибок, так званого, фіктивного накладення високочастотних складових. Надмірне зменшення Δt при часовому усередненні викликає сильно корельовані відліки реалізації, які не прийнятні, більш того, вони збільшують об'єм обчислення і підвищують вимоги до швидкодії обчислювального пристрою. Тому доцільно використовувати при обробці лише слабо корельовані або некорельовані відліки реалізації. Для нормальних процесів такі відліки можна вважати незалежними, при цьому усереднення є еквівалентним усередненню по множині реалізацій, а класичній вибірці з ансамблю незалежних реалізацій відповідає вибірка незалежних часових відліків довільно узятій реалізації процесу [58, 59].

Є декілька рекомендацій: в [31, 35] крок Δt вибирається, виходячи із співвідношення:

$$\Delta t = \frac{T_{min}}{5 \div 10}, \quad (E.4)$$

де T_{min} - період, який відповідає високочастотній складовій процесу $\omega_{вищ} (f_{max})$;

$$\Delta t = \frac{0,0033}{5 \div 10} = 0,66 \cdot 10^{-3} \div 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ с},$$

в [114] при 2% похибці по верхній частоті спектра $\omega_{вищ} (f_{max})$ крок Δt :

$$\Delta t = \frac{\pi}{10\omega_{вищ}} = \frac{1}{20f_{max}}; \quad (E.5)$$

$$\Delta t = \frac{1}{20 \cdot 300} = 0,000166 \text{ с} = 0,16 \text{ мс}.$$

У [114] приймають крок квантування:

$$\Delta t \leq \frac{2\pi}{10\omega_{вищ}} \leq \frac{1}{10f_{max}}. \quad (E.6)$$

У [125] крок квантування вибирається таким, щоб на періоді самої високочастотної складової процесу вміщалося 8 - 10 точок. Відповідно, усі рекомендації виходять з малої зміни значення функції упродовж кроку розбиття.

Згідно теорії Котельникова сигнал, що описується функцією з обмеженим спектром, повністю визначається своїми значеннями через інтервал часу $\Delta t = \frac{1}{2} f_{max}$ [65, 67, 105].

В [114] продемонстрований вплив кроку дискретизації процесу на кореляційні функції синусоїди. Виявилось, що вибір кроку квантування навіть рівним $\frac{\pi}{2}$, не позначається на формі кореляційної функції. Слід враховувати роль вибраної заздалегідь високочастотної складової f_{max} в енергетичному спектрі процесу, щоб ця величина не була завищеною і не попадала за межі ширини спектра процесу Δf .

Таким чином, при $f_{max} = 300$ Гц та $T_{min} = 0,0033$ с по (Е.4), (Е.6) і [125] крок квантування для нашого випадку знаходиться в межах $\Delta t = 0,33 \div 0,16$ мс. При спектральному аналізі максимально можлива частота виділеної скритої періодичності визначається частотою Найквіста [42, 43] $f_{max} = \frac{1}{2} \Delta t$.

При $\Delta t = 0,33 \div 0,16$ мс можливо виділити приховану періодичність з $f_{max} = 1515 \div 3125$ Гц, що нас цілком влаштовує.

Програмно-технічний комплекс, розглянутий в розділі 2.2, дозволяє робити швидкість запису на частотах дискретизації до 100 кГц. Вибір необхідної частоти дискретизації виконується програмно за допомогою програмного забезпечення, яке входить до його складу.

Квантування по рівню передбачає розподіл діапазону, в якому змінюється випадкова величина I на N інтервалів квантування по рівню ΔI і відповідає округленню ординат миттєвих значень I в кожному інтервалі до величини середнього значення I в цьому інтервалі. Це округлення впливає на дисперсію оцінок характеристик. Проте для процесів з скінченим інтервалом частот ($\Delta\omega \neq \infty$) цей вплив або незначний, або може бути відкоригований за допомогою поправок Шепарда [58, 74]. Вплив квантування по рівню на точність обчислення характеристик процесу зазвичай менш значний, чим це здається на перший погляд. Рекомендується проводити квантування по восьми, а в деяких випадках навіть по чотирьох інтервалах.

ДОДАТОК Ж

Вибіркові оцінки спектрів при різних розмірах і типах спектрального вікна

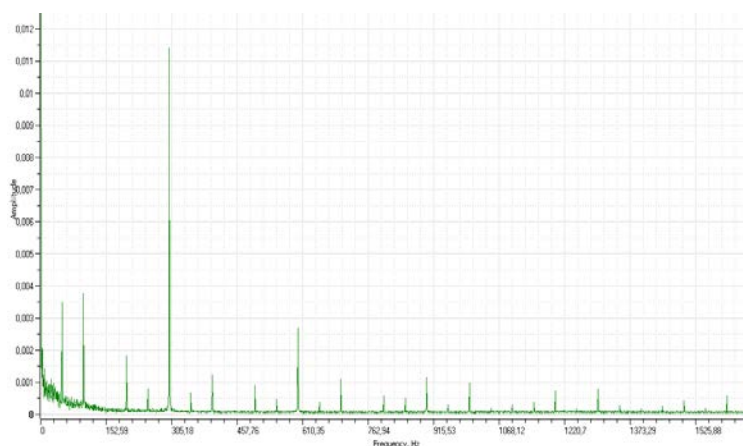


Рис. Ж.1.1. Згладжена вибіркова нормована оцінка спектра: $I_{\text{дуги}}(t)$ на частотах від 0 до 1,6 кГц (розмір вибірки: 340121, розмір спектрального вікна: 65536, вагова функція: Rectangle)

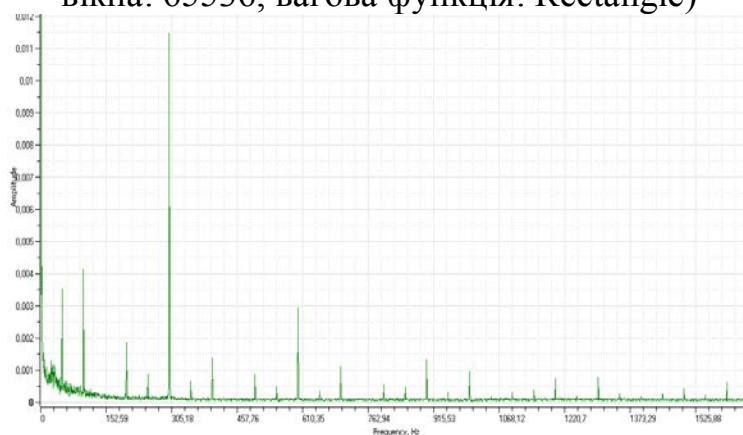


Рис. Ж.1.2. Згладжена вибіркова нормована оцінка спектра: $I_{\text{дуги}}(t)$ на частотах від 0 до 1,6 кГц (розмір вибірки: 340121, розмір спектрального вікна: 65536, вагова функція: Triangle)

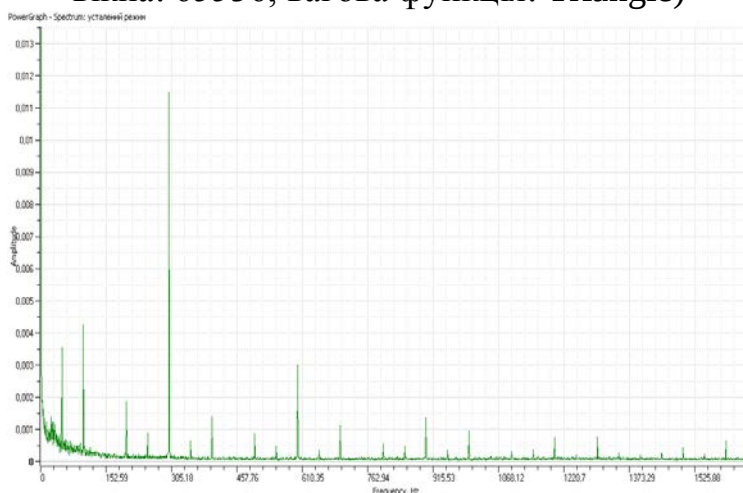


Рис. Ж.1.3. Згладжена вибіркова нормована оцінка спектра: $I_{\text{дуги}}(t)$ на частотах від 0 до 1,6 кГц (розмір вибірки: 340121, розмір спектрального вікна: 65536, вагова функція: Hann)

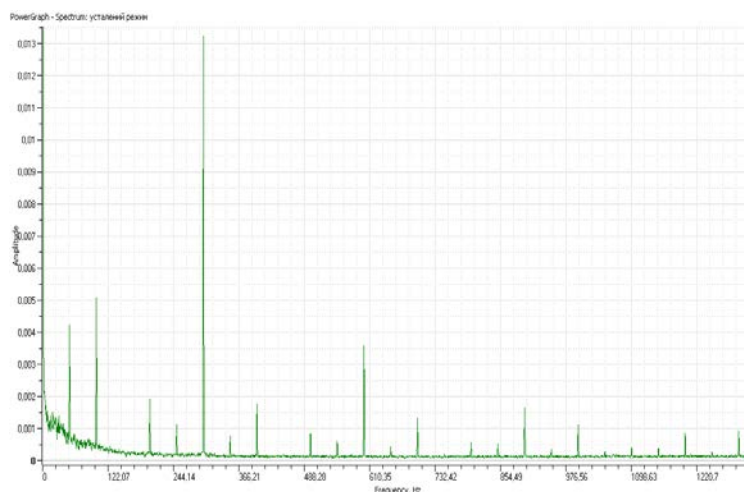


Рис. Ж.1.4. Згладжена вибіркова нормована оцінка спектра: $I_{\text{дуги}}(t)$ на частотах від 0 до 1,3 кГц (розмір вибірки: 340121, розмір спектрального вікна: 32768, вагова функція: Hamming)

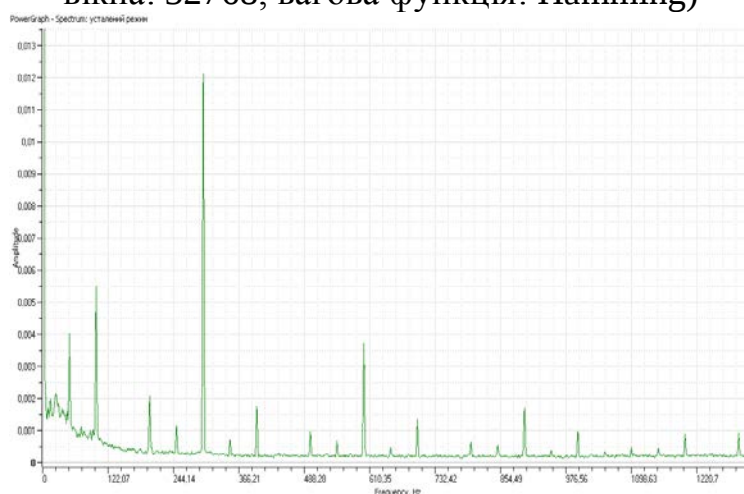


Рис. Ж.1.5. Згладжена вибіркова нормована оцінка спектра: $I_{\text{дуги}}(t)$ на частотах від 0 до 1,3 кГц (розмір вибірки: 340121, розмір спектрального вікна: 16384, вагова функція: Blackman)

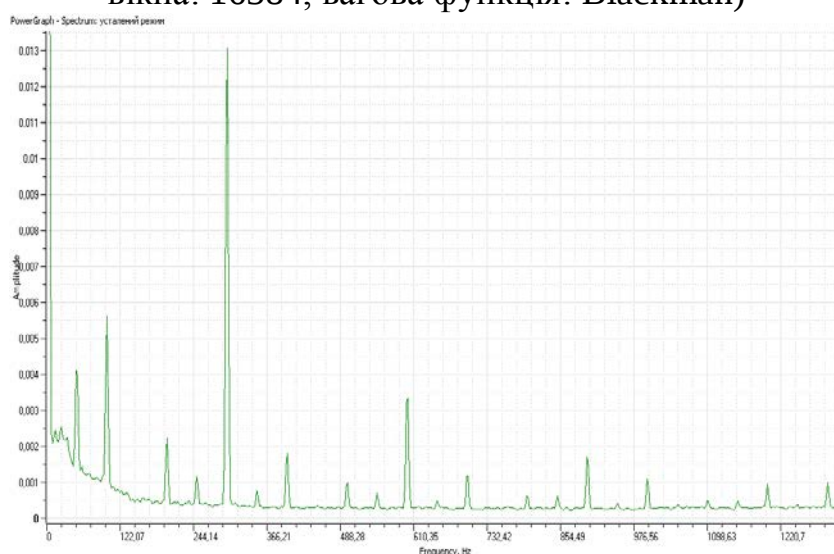


Рис. Ж.1.6. Згладжена вибіркова нормована оцінка спектра: $I_{\text{дуги}}(t)$ на частотах від 0 до 1,3 кГц (розмір вибірки: 340121, розмір спектрального вікна: 8192, вагова функція: Kaiser5)

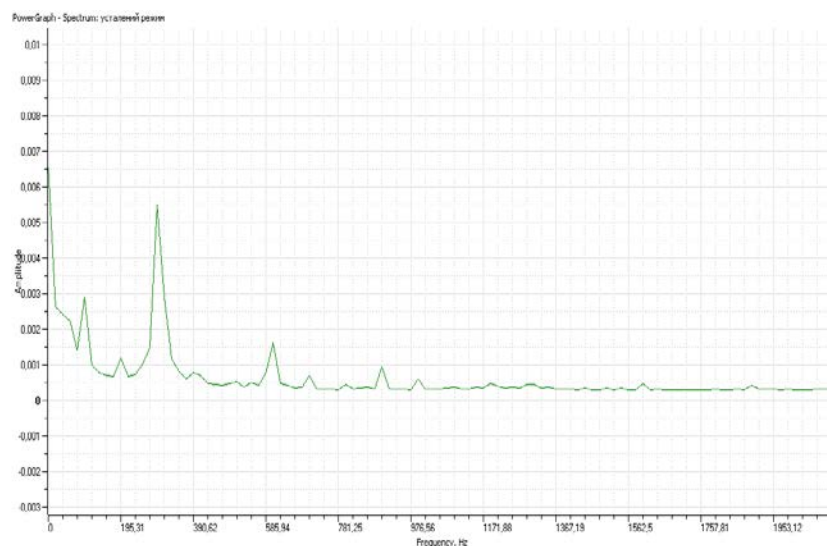


Рис. Ж.1.7. Згладжена вибіркова нормована оцінка спектра: $I_{\text{дуги}}(t)$ на частотах від 0 до 2 кГц (розмір вибірки: 340121, розмір спектрального вікна: 1024, вагова функція: Rectangle)

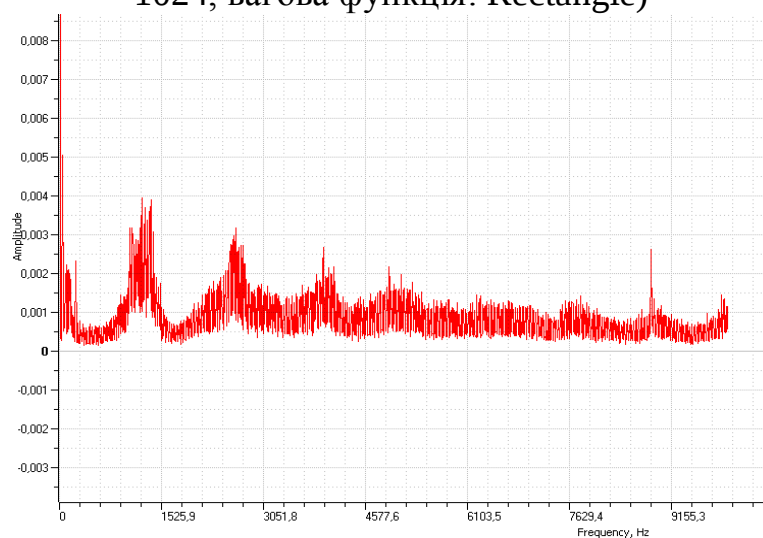


Рис. Ж.1.8. Згладжена вибіркова нормована оцінка спектра: $U_{\text{двиг}}(t)$ на частотах від 0 до 10 кГц (розмір вибірки: 340121, розмір спектрального вікна: 65536, вагова функція: KaiserBessel)

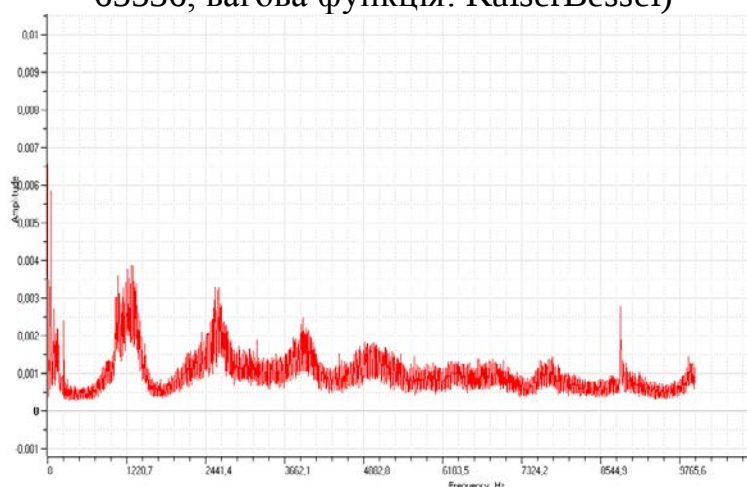


Рис. Ж.1.9. Згладжена вибіркова нормована оцінка спектра: $U_{\text{двиг}}(t)$ на частотах від 0 до 10 кГц (розмір вибірки: 340121, розмір спектрального вікна: 32768, вагова функція: Rectangle)

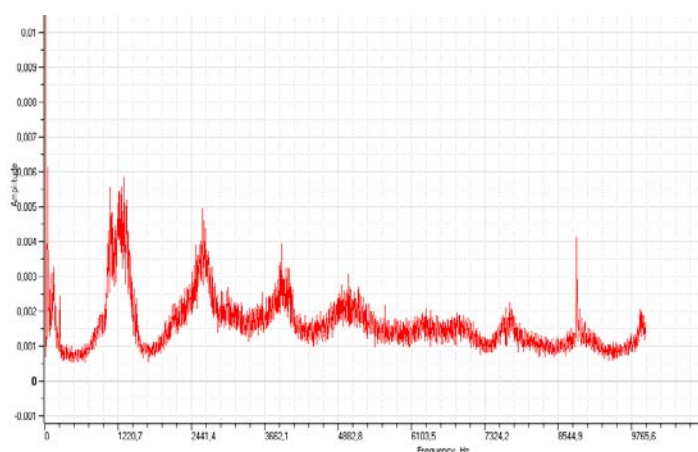


Рис. Ж.1.10. Згладжена вибіркова нормована оцінка спектра: $U_{\text{двиг}}(t)$ на частотах від 0 до 10 кГц (розмір вибірки: 340121, розмір спектрального вікна: 16384, вагова функція: Triangle)

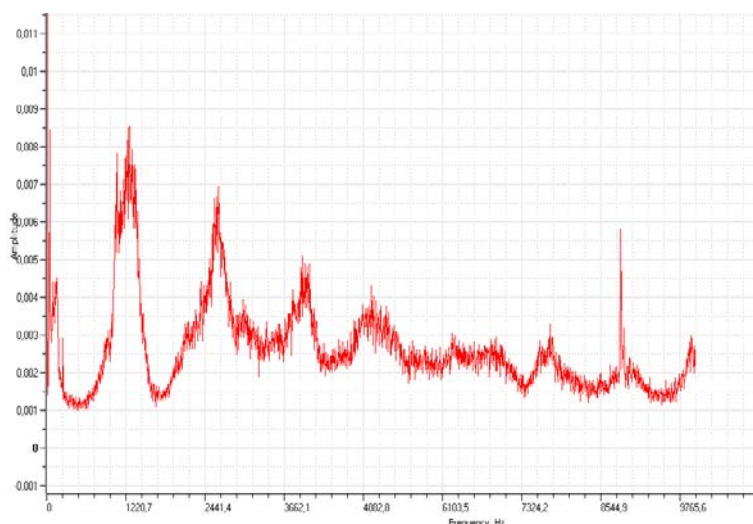


Рис. Ж.1.11. Згладжена вибіркова нормована оцінка спектра: $U_{\text{двиг}}(t)$ на частотах від 0 до 10 кГц (розмір вибірки: 340121, розмір спектрального вікна: 8192, вагова функція: Blackman)

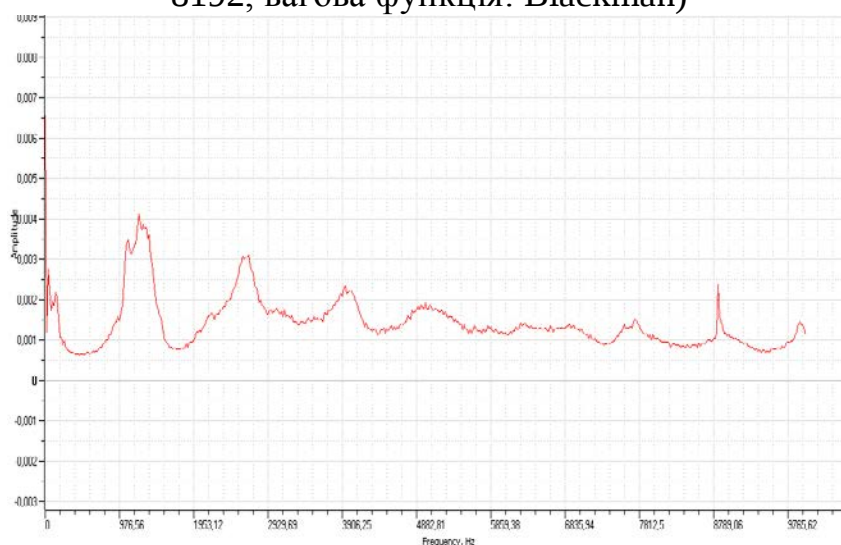


Рис. Ж.1.12. Згладжена вибіркова нормована оцінка спектра: $U_{\text{двиг}}(t)$ на частотах від 0 до 10 кГц (розмір вибірки: 340121, розмір спектрального вікна: 1024, вагова функція: Rectangle)

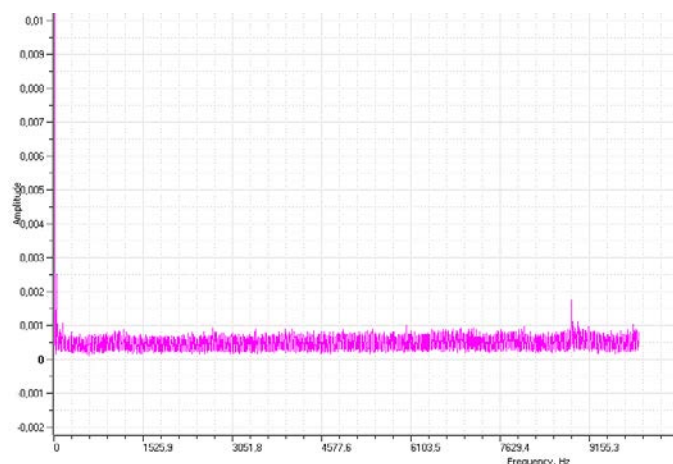


Рис. Ж.1.13. Згладжена вибіркова нормована оцінка спектра: $I_{\text{двиг}}(t)$ на частотах від 0 до 10 кГц (розмір вибірки: 340121, розмір спектрального вікна: 65536, вагова функція: Nuttall3)

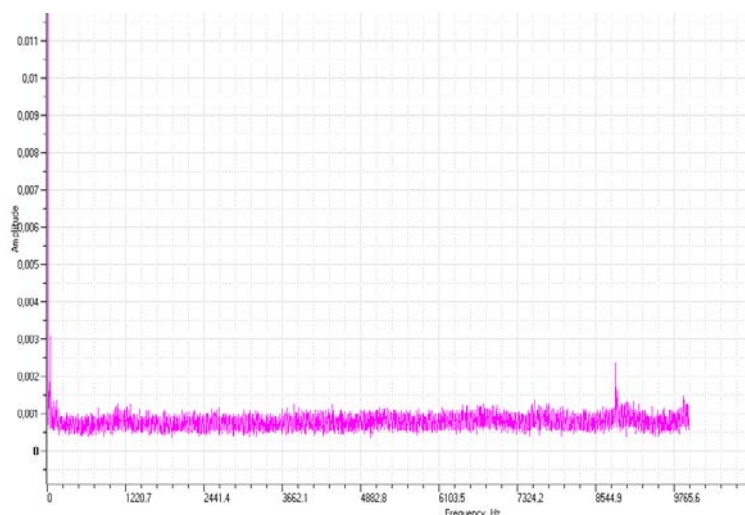


Рис. Ж.1.14. Згладжена вибіркова нормована оцінка спектра: $I_{\text{двиг}}(t)$ на частотах від 0 до 10 кГц (розмір вибірки: 340121, розмір спектрального вікна: 32768, вагова функція: Blackman)

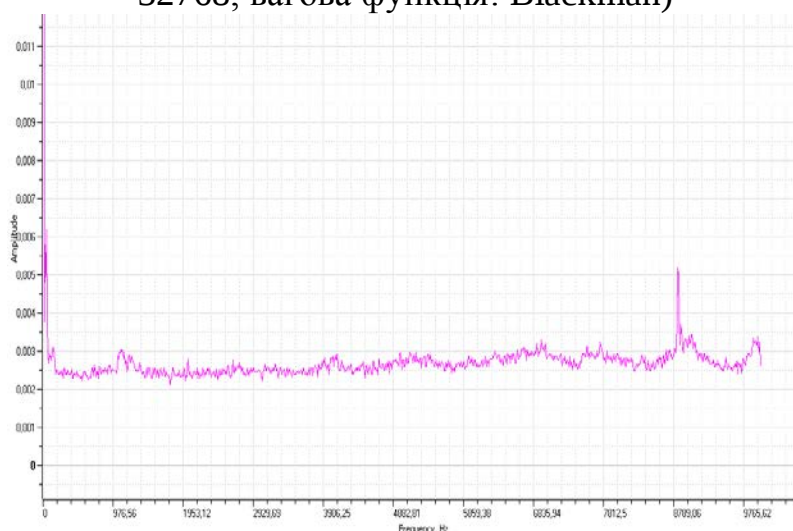


Рис. Ж.1.15. Згладжена вибіркова нормована оцінка спектра: $I_{\text{двиг}}(t)$ на частотах від 0 до 10 кГц (розмір вибірки: 340121, розмір спектрального вікна: 2048, вагова функція: Triangle)

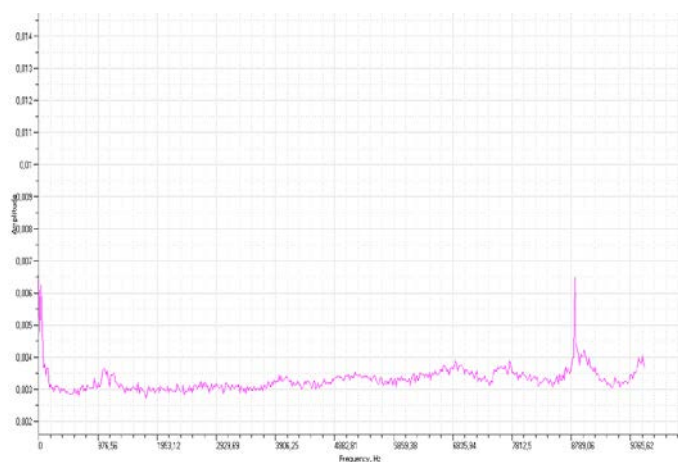


Рис. Ж.1.16. Згладжена вибіркова нормована оцінка спектра: $I_{\text{двиг}}(t)$ на частотах від 0 до 10 кГц (розмір вибірки: 340121, розмір спектрального вікна: 1024, вагова функція: Rectangle)

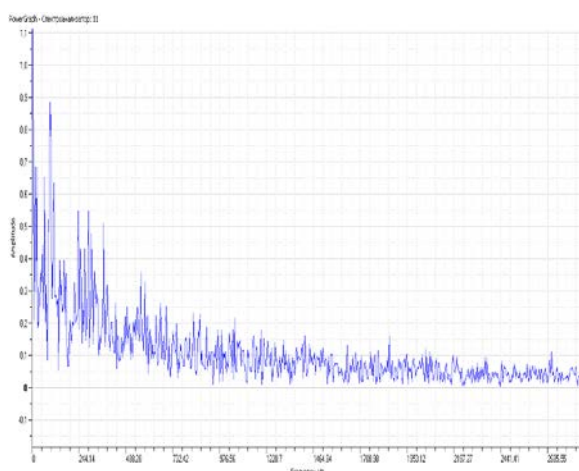


Рис. Ж.1.17. Згладжена вибіркова нормована оцінка спектра: $U_{\text{дуги}}(t)$ на частотах від 0 до 2,7 кГц (розмір вибірки: 52401, розмір спектрального вікна: 4096, вагова функція: Rectangle)

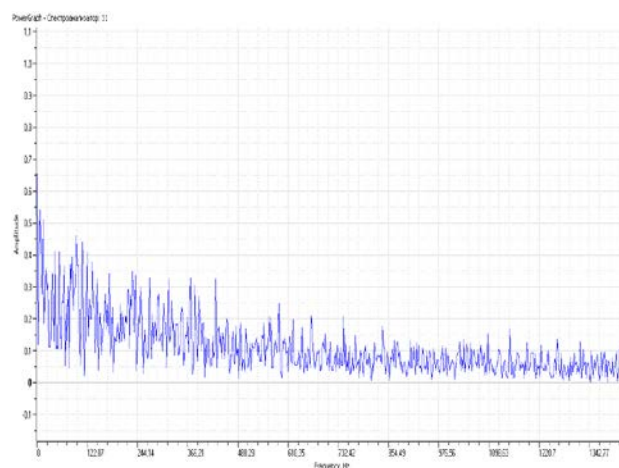


Рис. Ж.1.18. Згладжена вибіркова нормована оцінка спектра: $U_{\text{дуги}}(t)$ на частотах від 0 до 1,4 кГц (розмір вибірки: 52401, розмір спектрального вікна: 8192, вагова функція: Rectangle)

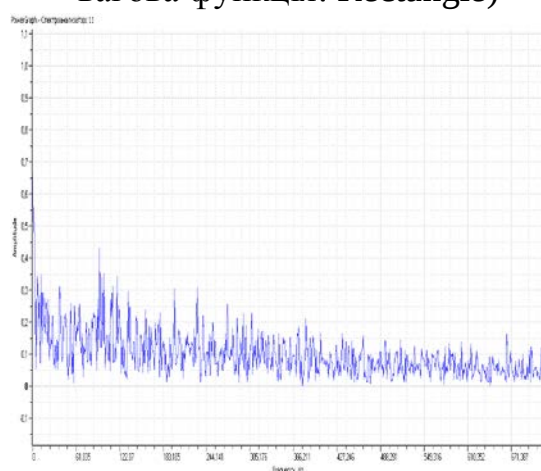


Рис. Ж.1.19. Згладжена вибіркова нормована оцінка спектра: $U_{\text{дуги}}(t)$ на частотах від 0 до 0,7 кГц (розмір вибірки: 52401, розмір спектрального вікна: 16384, вагова функція: Rectangle)

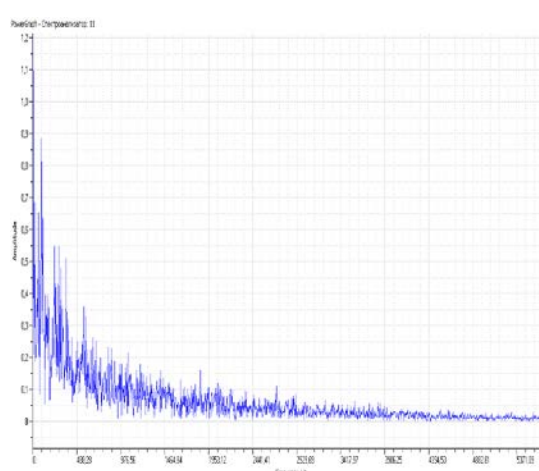
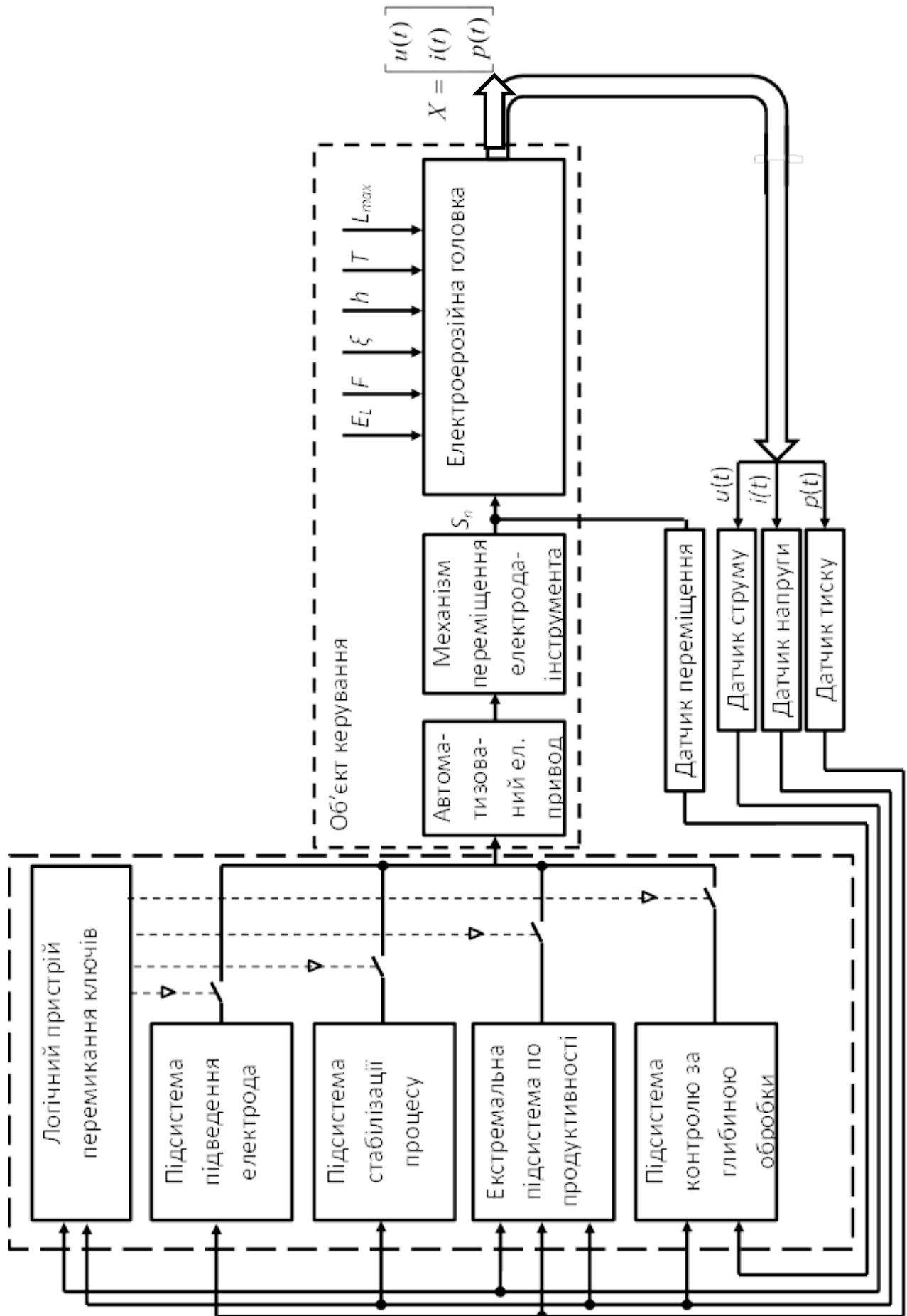


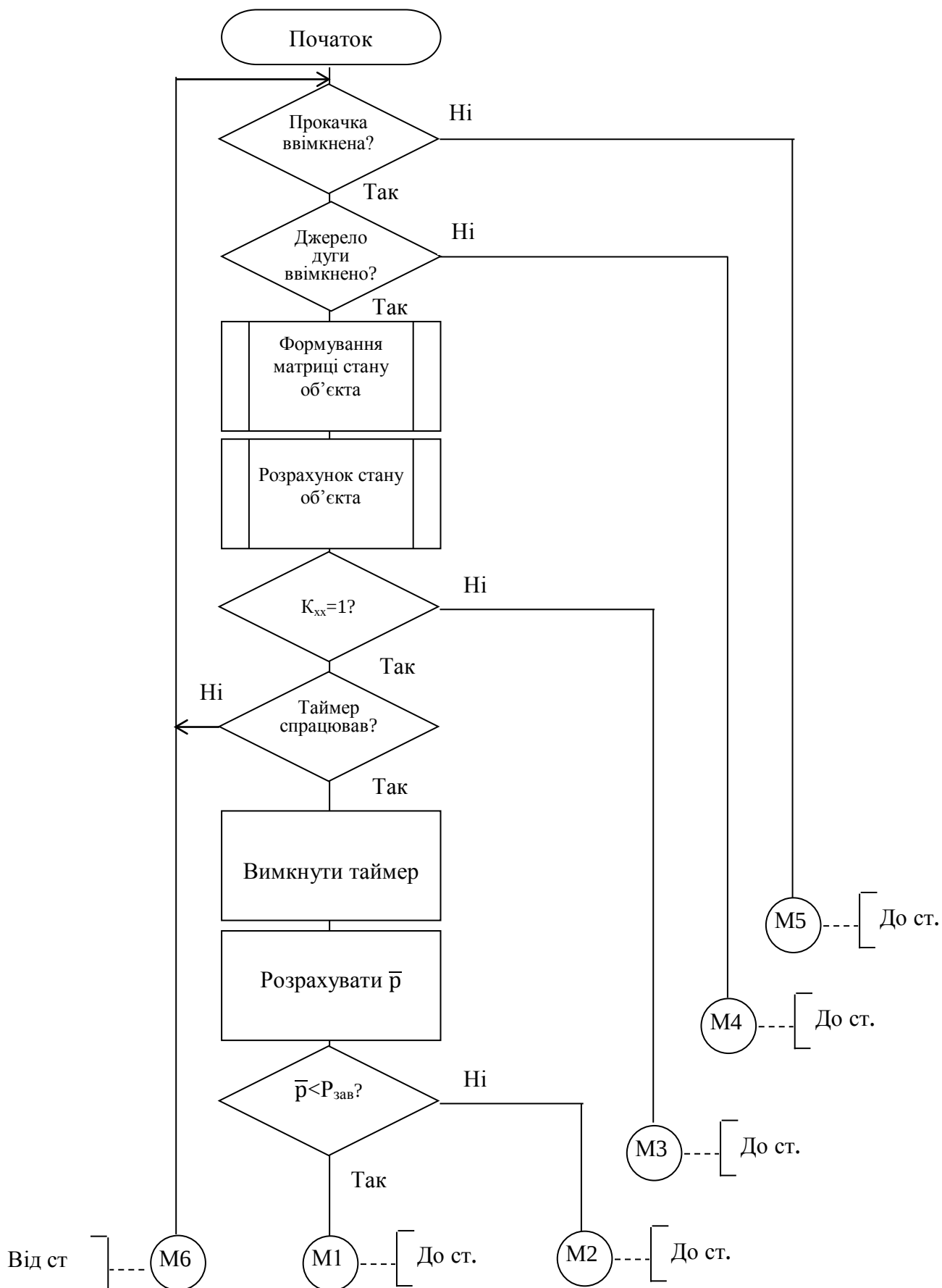
Рис. Ж.1.20. Згладжена вибіркова нормована оцінка спектра: $U_{\text{дуги}}(t)$ на частотах від 0 до 6 кГц (розмір вибірки: 52401, розмір спектрального вікна: 4096, вагова функція: Rectangle)

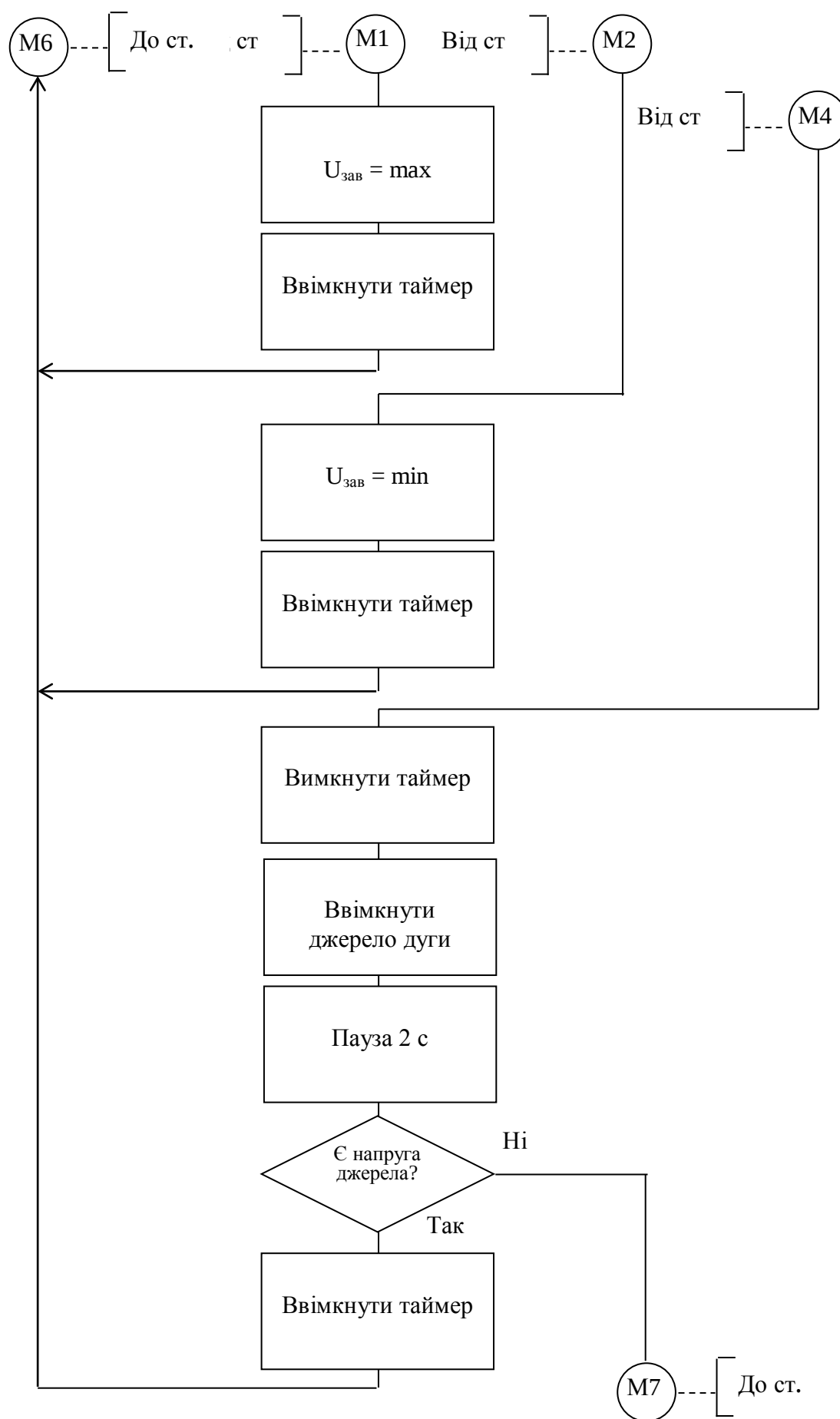
Структурна система автоматичного керування подачі електрода-інструмента при РОД

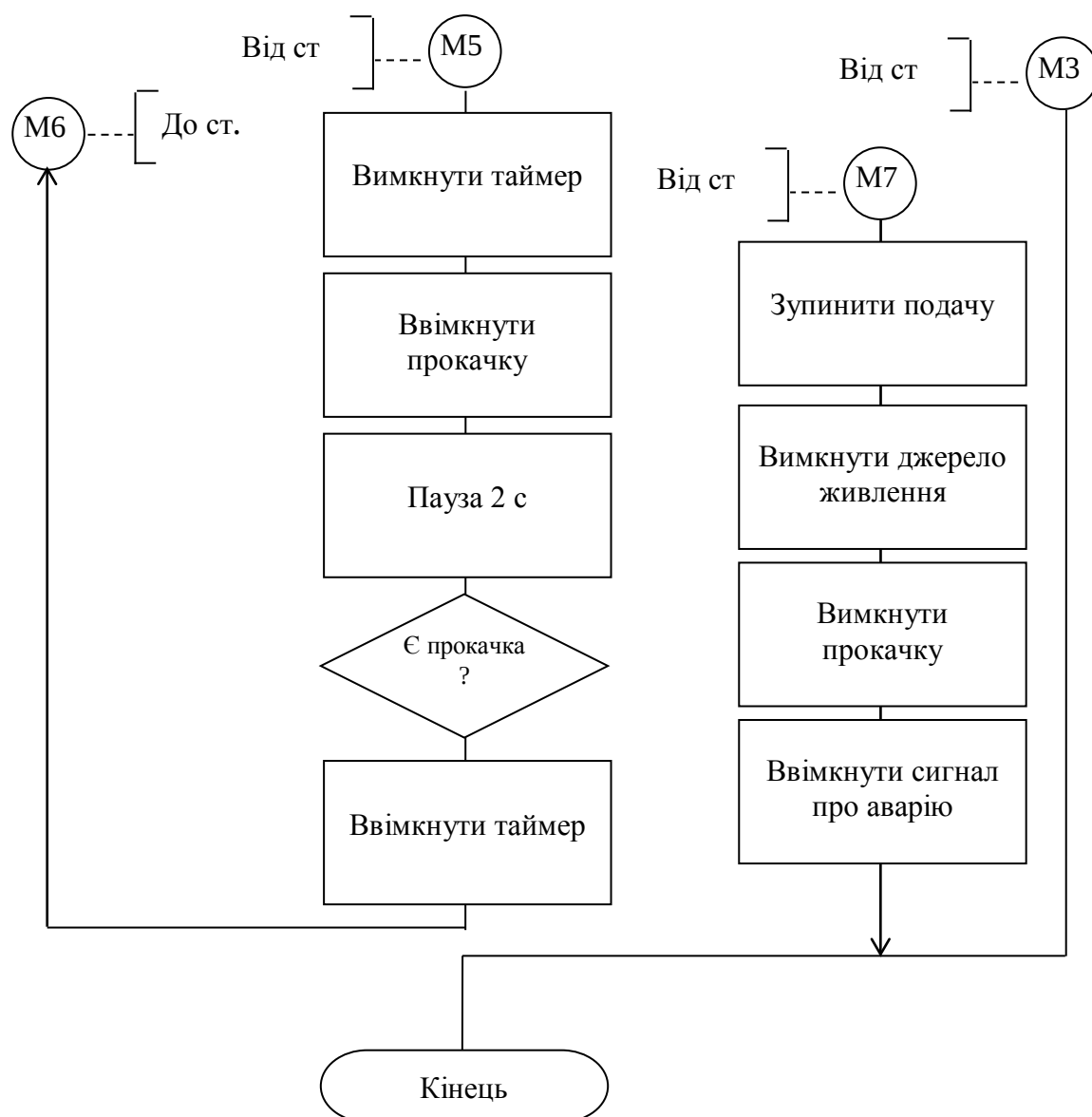


ДОДАТОК К.1

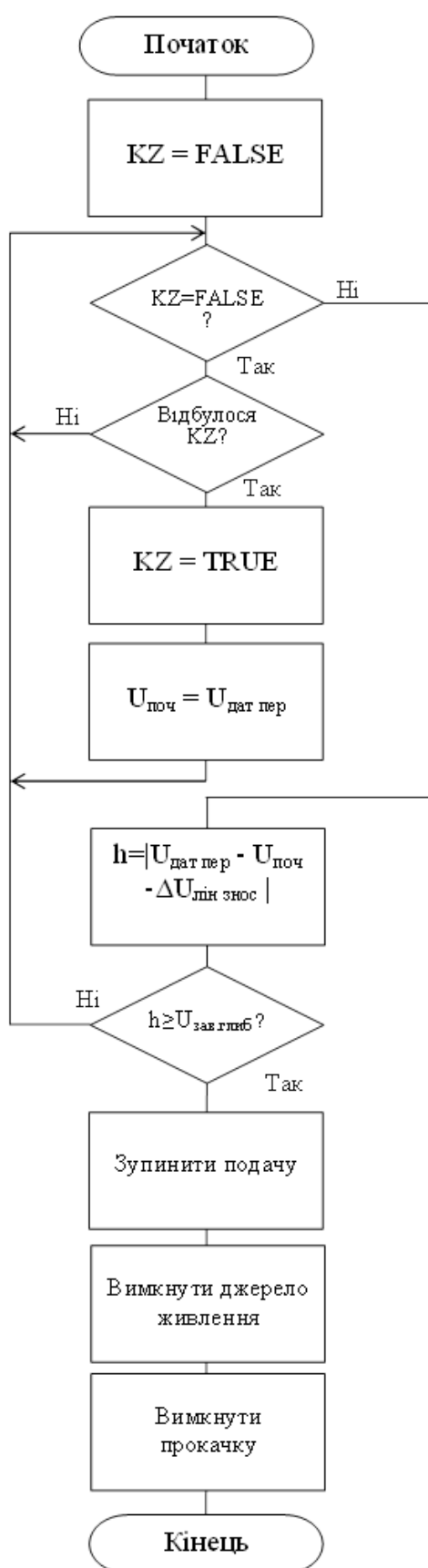
Програмний алгоритм роботи ПЛК
Блок-схема алгоритма підведення електрода-інструмента до заготовки



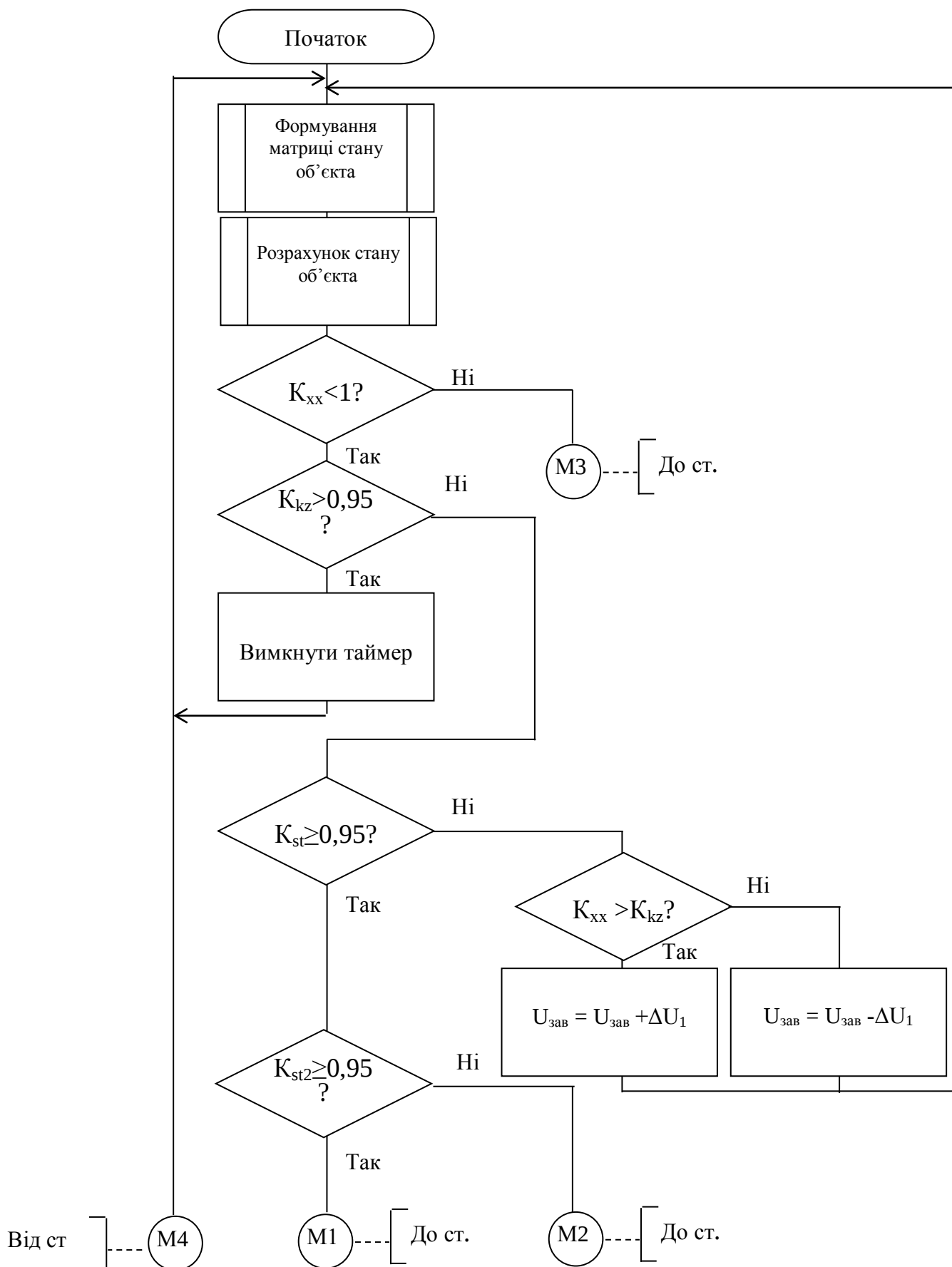


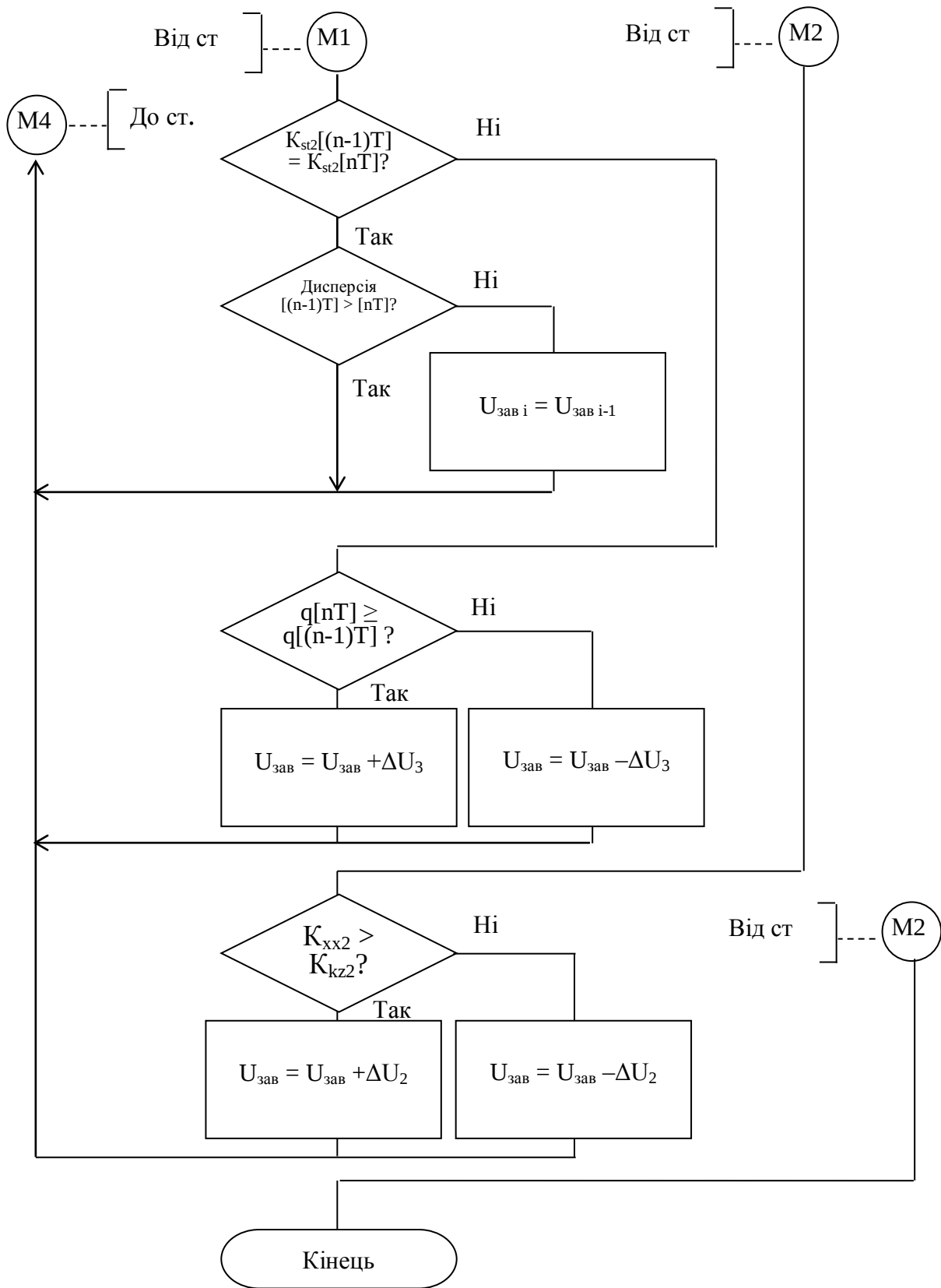


Блок-схема спрощеного алгоритму обробки деталі на задану глибину

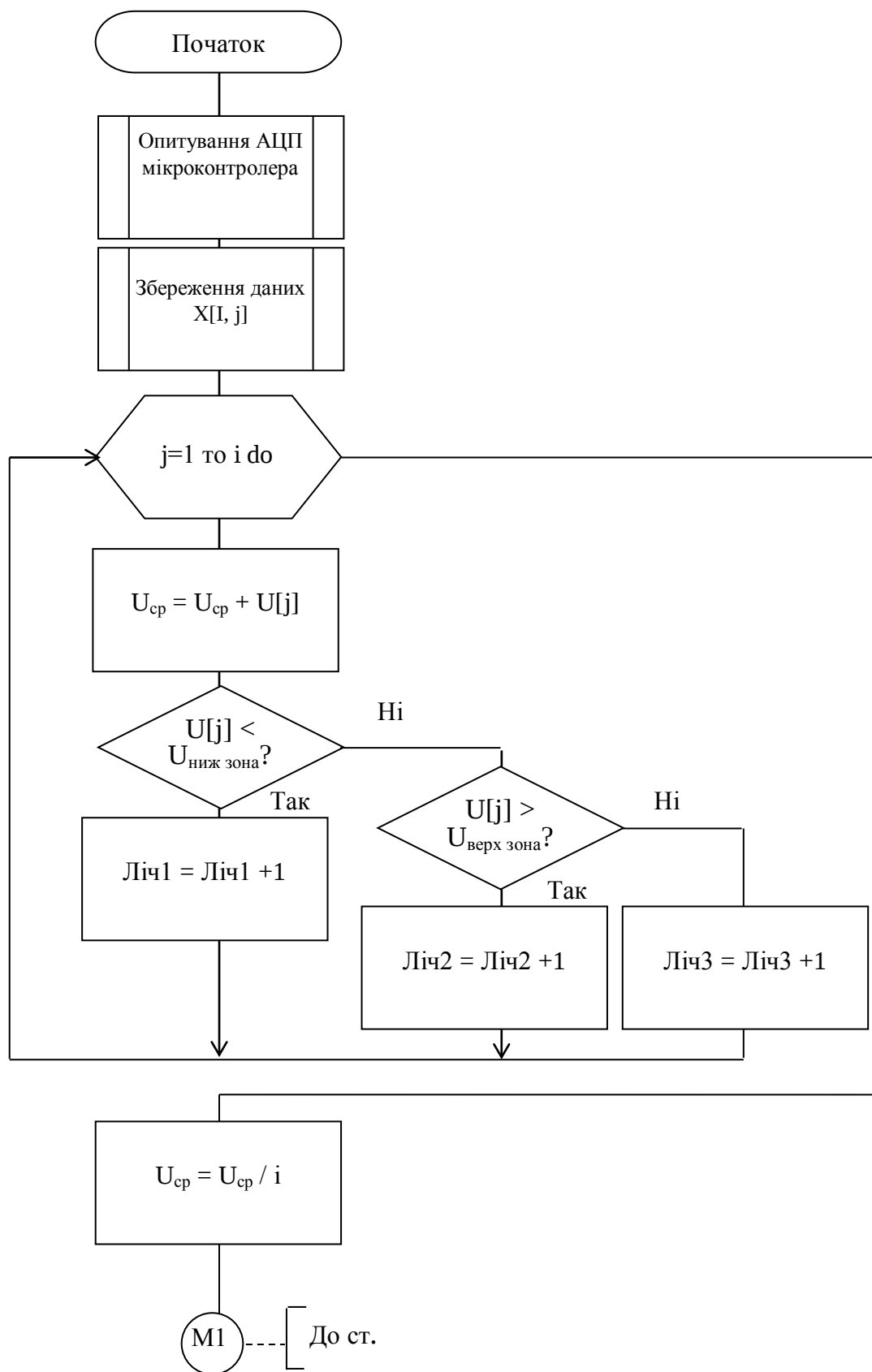


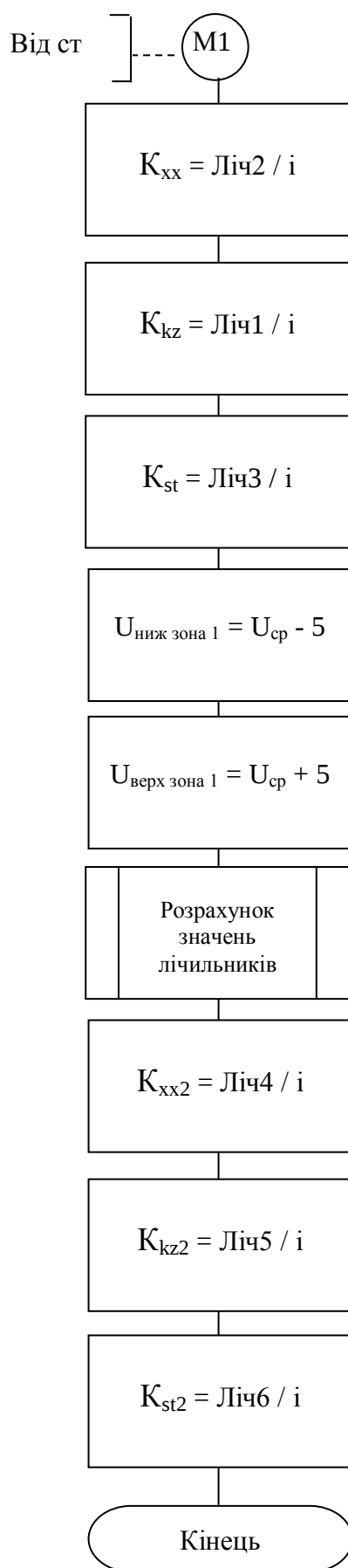
Блок-схема алгоритма формування завдання регулятора при стабілізації параметрів дуги та екстремальному режимі по продуктивності обробки деталі





Блок схема алгоритма розрахунку стану об'єкта (стабільності РОД)





ДОДАТОК К.2

Програмний код головного модуля ПЛК

```
//-----
// File      : main.c
// Datum     : 1.04.2017
// Version    : 0.01.02
// Autor     : Savelenko Grigory
// EMail      :
// CPU       : STM32F429
// IDE       : CoCoX CoIDE 1.7.4
// GCC       : 4.7 2012q4

//-----Підключення системних модулів -----
#include "stm32f4xx.h"
#include "stm32_ub_lcd_ili9341.h"
#include "stm32_ub_font.h"
#include "stm32_ub_adc1_dma.h"
#include "stm32_ub_graphic.h"
#include "keys.h"
#include <stdio.h>

//-----Встановлення значень для попередньої обробки сигналу-----
unsigned int HighLimit = 2000; // Високий ліміт напруги мВ
unsigned int LowLimit  = 1000; // Низький ліміт напруги мВ
unsigned int CountLimit = 100; // Кількість вимірів на прийняття рішення
int DIM_BUFF=50;             // Ширина фільтру вимірювання, впливає на частоту вимірювання
//-----
void clrscr(void); //Очищення дисплею
void workpiece(void); //Вибір матеріалу обробки
void setting(void); // Встановлення параметрів початкового регулювання
void process(void); // Регулювання процесом
void adc_input(void); // Ініціалізація АЦП
void regular(void); // Вибір ручного або автоматичного режиму
void Graphic_DrawBr(int16_t x1, int16_t y1, int16_t x2, int16_t y2, int16_t color); //Графічний примітив
void Zastavka(void); // Головна початкова заставка
void RESERV(void); // Системні налаштування процесу
void Interval_1(void); // Налаштування пешого інтервалу регулювання
void Interval_2(void); // Налаштування другого інтервалу регулювання
void manual_mode(void); // Режим ручного керування
void auto_mode(void); // Режим автоматичного керування
//-----
void DAC_INIT(void); // Ініціалізація ЦАП
void LCD_INIT(void); // Ініціалізація LCD
//-----
char buf[40]; // Буфер виведення даних в DMA
int a=0;
int i, p_key;
volatile char key_pred=' ';
volatile int window=5; //змінна до інтерфейсу
volatile int flag=1; // Прапор стану початкового завантаження даних
uint16_t tmp;
uint16_t counter = 0;
//-----
int var_0=0; //змінна вибору режиму
int var_1=0; //змінна вибору варіанту
int var_metal=30000; //Стан зазору по замовченню мВ
//-----
int min_intr =20000; // Нижній порог коридору регулювання
int max_intr =50000; // Верхній порог коридору регулювання
int stab_intr=10000; // Інтервал стабілізації
int P_st_1=95; // Початковий коефіцієнт стабілізації
int P_st_2=50; // Нижній коефіцієнт стабілізації
int dUbx_1=100; // Мінімальний крок зміщення в першому інтервали регулювання
int dUbx_2=50; // Мінімальний крок зміщення в другому інтервали регулювання
//-----Додаткові коефіцієнти стабілізації-----
int Pxx=0;
int Pst=0;
int Pkz=0;
int Udug_sr=0;
//-----
volatile unsigned int Uout=800; //Напруга на виході
//-----Структура даних зчитана з АЦП -----
struct ResultReadADC {
unsigned int lowCount;
```

```

unsigned int highCount;
unsigned int totalCount;
} ResultADC;
//-----
////////// ГОЛОВНИЙ МОДУЛЬ -//////////
//-----
int main(void)
{
    SystemInit(); // Ініціалізація системних функцій
    DAC_INIT();   // Ініціалізація ЦАП
    LCD_INIT();   // Ініціалізація LCD
    key_init();   // Ініціалізація клавішної матриці 4X4
    if ((window==5)&&(flag==1))
    {
        Zastavka();//Початкова заставка (повне скидування)
    }
    //-----
    //Головний цикл обробки даних та виведення інтерфейсу користувача
    //-----
    while(1)
    {
        p_key=0;//Змінна для фільтрації натиснення
        key_pred=read_key();//зчитування натиснутої клавіші
        for(i=0;i<4;i++)//цикл запобігання залипання клавіш
            if (key_pred== read_key())//визначення натиснутої клавіші
            {
                p_key++;
                if (key_pred>0 && p_key>3)
                {
                    //----- Вибір відповідних вікон налаштування -----
                    if(key_pred=='C')
                    {
                        clrscr();
                        window--;
                        if( window<0)
                            window=0;
                    }
                    if(key_pred=='D')
                    {
                        clrscr();
                        window++;
                        if( window>4) window=0;
                    }
                    //-----Інтерфейс вибору режиму-----
                    if((key_pred=='1') && (window==3))
                    {
                        clrscr();
                        var_0=0;//Стан ручний
                    }

                    if((key_pred=='2') && (window==3))
                    {
                        clrscr();
                        var_0=1;//Стан автоматичний
                    }

                    //-----Умови вибору для матеріалу обробки -----
                    if ((key_pred=='1') && (window==1))
                    {
                        clrscr();
                        var_1=1;
                    }
                    if ((key_pred=='2') && (window==1))
                    {
                        clrscr();
                        var_1=2;
                    }
                    if ((key_pred=='3') && (window==1))
                    {
                        clrscr();
                        var_1=3;
                    }
                    //-----
                    if((key_pred=='#') && (window==1))
                    {

```

```

        clrscr();
        switch(var_1)
        {
            case 1: var_metal=1000;break;
            case 2: var_metal=1250;break;
            case 3: var_metal=1500;break;
        }
    }
}
//-----Встановлення початкового зазору mV-----
    if ((key_pred=='1') && (window==2))
    {
        clrscr();
        Uout+=10;
    }
    if ((key_pred=='2') && (window==2))
    {
        clrscr();
        Uout-=10;
    }
//-----
    if ((key_pred=='1' ) && (window==4))
    {
        clrscr();
        window=6;
    }
//-----
    if ((key_pred=='2' ) && (window==4))
    {
        clrscr();
        window=7;
    }
    if ((key_pred=='#' ) && (window==6))
    {
        clrscr();
        window=4;
    }
    if ((key_pred=='#' ) && (window==7))
    {
        clrscr();
        window=4;
    }
//-----
    if((key_pred=='1') && (window==6))
    {
        min_intr-=100;
        if(min_intr<0)
        {
            min_intr=20000;
        }
    }
    if((key_pred=='4') && (window==6))
    {
        min_intr+=100;
        if(min_intr>50000)
        {
            min_intr=20000;
        }
    }
//-----

    if((key_pred=='2') && (window==6))
    {
        max_intr+=100;
        if(max_intr>70000)
        {
            max_intr=50000;
        }
    }
    if((key_pred=='5') && (window==6))
    {
        max_intr-=100;
        if(max_intr<20000)
        {
            max_intr=50000;
        }
    }
//-----
    if((key_pred=='3') && (window==6))

```

```

{
stab_intr-=100;
if(stab_intr<0)
{
stab_intr=0;
}
}
if((key_pred=='6') && (window==6))
{
stab_intr+=100;
if(stab_intr>40000)
{
stab_intr=40000;
}
}
if ((key_pred=='*') && (window==6))
{

min_intr=20000;
max_intr=50000;
stab_intr=10000;
}

//-----
-----
if((key_pred=='1') && (window==7))
{
P_st_1-=1;
if(P_st_1<0)
{
P_st_1=0;
}
}

if((key_pred=='4') && (window==7))
{
P_st_1+=1;
if(P_st_1>100)
{
P_st_1=100;
}
}

if((key_pred=='2') && (window==7))
{
P_st_2-=1;
if(P_st_2<0)
{
P_st_2=0;
}
}

if((key_pred=='5') && (window==7))
{
P_st_2+=1;
if(P_st_2>50)
{
P_st_2=50;
}
}

if((key_pred=='3') && (window==7))
{
dUbx_1-=1;
if(dUbx_1<0)
{
dUbx_1=0;
}
}

if((key_pred=='6') && (window==7))
{
dUbx_1+=1;
if(dUbx_1>200)
{
dUbx_1=200;
}
}

if((key_pred=='A') && (window==7))
{
dUbx_2-=1;
if(dUbx_2<0)

```

```

        {
            dUbx_2=0;
        }
    }
    if((key_pred=='B') && (window==7))
    {
        dUbx_2+=1;
        if(dUbx_2>50)
        {
            dUbx_2=50;
        }
    }
    if ((key_pred=='*') && (window==7))
    {
        P_st_1=95;
        P_st_2=50;
        dUbx_1=100;
        dUbx_2=50;
    }
}
//-----
    if ((key_pred=='*') && (window==4))
    {
        clrscr();
        window=1;
    }
//-----
    if((key_pred=='#') &&(window==4))
    {
        clrscr();
        window=3;
    }
//-----
    if((key_pred=='#') && (window==1))
    {
        clrscr();
        window=4;
    }
//-----
    if((key_pred=='#') && (window==3) &&(var_0==0))
    {
        clrscr();
        window=8;
    }
    if((key_pred=='#') && (window==3) &&(var_0==1))
    {
        clrscr();
        window=9;
    }
//-----
    if((key_pred=='*') && (window==8))
    {
        clrscr();
        var_0=1;
        window=9;
    }
    if((key_pred=='*') && (window==9))
    {
        clrscr();
        var_0=0;
        window=8;
    }
}

//-----

    switch(window)
    {
        case 0: adc_input(); break; //Запуск регістратора або регулятора
        case 1: workpiece(); break; //Вибір матеріалу
        case 2: setting(); break; //Встановлення початкового зазору
        case 3: regular(); break; //Вибір регулятора
        case 4: RESERV(); break; //Системні налаштування
        case 6: Interval_1(); break; //Налаштування інтервалу
        case 7: Interval_2(); break; //Налаштування коридору
        case 8: manual_mode(); break; //Режим моніторингу ручного
        case 9: auto_mode(); break; //Режим моніторин автоматичного
    }
}

```

```

    }

//-----
//-----
//-----
void DAC_INIT(void)
{
    //Налаштування ЦАП
    RCC_APB1PeriphClockCmd(RCC_APB1Periph_DAC, ENABLE);
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_5;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AIN;
    GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStructure);
    DAC->CR |= DAC_CR_EN2;
    DAC->DHR12R2 = 2000;
    ResultADC.highCount = 0;
    ResultADC.lowCount = 0;
    ResultADC.totalCount = 0;
}
//-----
void LCD_INIT(void)
{
    //Налаштування LCD
    UB_ADC1_DMA_Init();           // ADC (im DMA-Mode)
    UB_LCD_Init();                // Init LCD
    UB_LCD_LayerInit_Fullscreen(); // Init Layer
    UB_LCD_SetLayer_1();           // auf Hintergrund schalten
    UB_LCD_FillLayer(RGB_COL_WHITE); // Hintergrund komplett mit einer Farbe fllen
    UB_LCD_SetLayer_2();           // auf Vordergrund schalten
    UB_LCD_FillLayer(RGB_COL_BLUE); // Vordergrund komplett mit einer Farbe fllen
    UB_LCD_Rotate_180();
}
//-----Зчитування даних з АЦП-----
uint32_t read_adc()
{
    int a = 0;
    uint16_t adc_wert[DIM_BUFF];
    // Медианний фільтр
    for(a=0; a<DIM_BUFF; a++)
    {
        adc_wert[a]=UB_ADC1_DMA_Read(ADC_PC3);
    }
    while(a<(DIM_BUFF-1)){
        if(adc_wert[a+1]<adc_wert[a])
        {
            tmp = adc_wert[a];
            adc_wert[a] = adc_wert[a+1];
            adc_wert[a+1] = tmp;
            if( a>0 ) a--;
        }else
        {
            a++;
        }
    }
    return adc_wert[DIM_BUFF / 2];
}
//-----
void adc_input(void)
{
    unsigned int res = 3*read_adc()/4; //Отримали вимір напруги
    ResultADC.totalCount++;           //Кількість вимірів рахуємо
    if(res > HighLimit)
    {
        //Якщо ліміт перевищено, то збільшуємо лічильник
        ResultADC.highCount++;
    }else
    {
        if(res < LowLimit)
        {
            //Також рахуємо зменшення по ліміту
            ResultADC.lowCount++;
        }
    }

    if( ResultADC.totalCount==CountLimit)
    {
        uint16_t ut = 2000;           //По замовчанню подається
        середня напруга
        if( (ResultADC.highCount*2) > ResultADC.totalCount ) ut=3000; //Переважає частина "пе-
        ревищення" - даємо більш високу напругу
    }
}

```

```

if( (ResultADC.lowCount*2) > ResultADC.totalCount ) ut=1000; //Переважна частина "низько" -
даємо занижену напругу
DAC->DHR12R1 = ut;
DAC->DHR12R2 = ut;

sprintf(buf,"High = %4d ",ResultADC.highCount);
UB_Font_DrawString(10,140,buf,&Arial_11x18,RGB_COL_WHITE,RGB_COL_BLUE);
sprintf(buf,"Low = %4d ",ResultADC.lowCount);
UB_Font_DrawString(10,180,buf,&Arial_11x18,RGB_COL_WHITE,RGB_COL_BLUE);

ResultADC.highCount = 0; //Занулюємо лічильники для нового пере-рахунку
ResultADC.lowCount = 0;
ResultADC.totalCount = 0;
}
//-----
-----

sprintf(buf,"ZAZOR = %4d mV",res);
UB_Font_DrawString(10,100,buf,&Arial_13x19,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_BLUE);
if(var_0==0)
{
UB_Font_DrawString(15,10,
"_____",&Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_BLUE);
UB_Font_DrawString(55,40, "MANUAL CONTROL",&Arial_11x18, RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_RED);
UB_Font_DrawString(15,60,
"_____",&Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_BLUE);
}
if(var_0==1)
{
UB_Font_DrawString(15,10,
"_____",&Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_BLUE);
UB_Font_DrawString(45,40, "AUTOMATIC CONTROL",&Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_RED);
UB_Font_DrawString(15,60, "_____"
,&Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_BLUE);
}
//-----
void workpiece(void)
{
UB_Font_DrawString(1,10,"CHOSE OF WORKSIECE: ",&Arial_13x19,RGB_COL_GREY,RGB_COL_BLUE);
UB_Font_DrawString(60,30,"MATERRIAL: ",&Arial_13x19,RGB_COL_GREY, RGB_COL_BLUE);
UB_Font_DrawString(1,45,"_____",&Arial_13x19,RGB_COL_WHITE,RGB_COL_BLUE);
if( var_1==0 )
{
UB_Font_DrawString(10,90, "ALUMINUM - PRESS 1",&Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_BLUE);
UB_Font_DrawString(10,120,"CAST IRON - PRESS 2",&Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_BLUE);
UB_Font_DrawString(10,150,"STEEL - PRESS 3",&Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_BLUE);
Uout=Uout;
}else
if( var_1==1 )
{
UB_Font_DrawString(10,90, "ALUMINUM - PRESS 1",&Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_RED);
UB_Font_DrawString(10,120,"CAST IRON - PRESS 2",&Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_BLUE);
UB_Font_DrawString(10,150,"STEEL - PRESS 3",&Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_BLUE);
Uout=1000;
}else
if( var_1==2 )
{
UB_Font_DrawString(10,90, "ALUMINUM - PRESS 1",&Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_BLUE);
UB_Font_DrawString(10,120,"CAST IRON - PRESS 2",&Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_RED);
UB_Font_DrawString(10,150,"STEEL - PRESS 3",&Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_BLUE);
Uout=1250;
}else
if( var_1==3 )
{
UB_Font_DrawString(10,90, "ALUMINUM - PRESS 1",&Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_BLUE);
UB_Font_DrawString(10,120,"CAST IRON - PRESS 2",&Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_BLUE);
UB_Font_DrawString(10,150,"STEEL - PRESS 3",&Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_RED);
Uout=1500;
}
UB_Font_DrawString(1,200,"_____",
&Arial_11x18,RGB_COL_WHITE,RGB_COL_BLUE);
UB_Font_DrawString(20,230,"System setup - #",
&Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_RED);
}
//-----
void setting(void)

```

```

{
    UB_Font_DrawString(15,10,"INITIAL PARAMETRS: ", &Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_BLUE);
    UB_Font_DrawString(1, 35, "_____",
    &Arial_11x18,RGB_COL_WHITE,RGB_COL_BLUE);
    UB_Font_DrawString(15,55,"U out - ",
    &Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_BLUE);

    sprintf(buf,"%5d   mV",Uout);
    UB_Font_DrawString(75,55,buf,&Arial_11x18,RGB_COL_WHITE,RGB_COL_RED);
    UB_Font_DrawString(1,75, "_____",
    &Arial_11x18,RGB_COL_WHITE,RGB_COL_BLUE);

    UB_Font_DrawString(15,100,"MORE > (1)", &Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_BLUE);
    UB_Font_DrawString(15,140,"LESS < (2)", &Arial_11x18,RGB_COL_WHITE, RGB_COL_BLUE);
}

//-----
void regular(void)
{
    if(var_0==0)
    {
        UB_Font_DrawString(15,10,"  MANUAL CNTR - 1",      &Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_BLACK);
        UB_Font_DrawString(1, 35, "_____",
        &Arial_11x18,RGB_COL_WHITE,RGB_COL_BLUE);
        UB_Font_DrawString(15,55,"  AUTOMATIC CNTR -2",
        &Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_BLUE);
        UB_Font_DrawString(1,75, "_____",
        &Arial_11x18,RGB_COL_WHITE,RGB_COL_BLUE);
    }else
    if(var_0==1)
    {
        UB_Font_DrawString(15,10,"  MANUAL CNTR - 1",      &Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_BLUE);
        UB_Font_DrawString(1, 35, "_____",
        &Arial_11x18,RGB_COL_WHITE,RGB_COL_BLUE);
        UB_Font_DrawString(15,55,"  AUTOMATIC CNTR -2",
        &Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_BLACK);
        UB_Font_DrawString(1,75, "_____", &Arial_11x18,RGB_COL_WHITE,RGB_COL_BLUE);
    }

    UB_Font_DrawString(1,100, " The  transition of  ",
    &Arial_11x18,RGB_COL_BLACK,RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(1,118, "      PROSESSES      ",
    &Arial_11x18,RGB_COL_BLACK,RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(1,136, "      that use the the  ",
    &Arial_11x18,RGB_COL_BLACK,RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(1,154, "      DATA      ",
    &Arial_11x18,RGB_COL_BLACK,RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(1,172, "      KEY - #      ",
    &Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_RED);
}

//-----
void clrscr()
{
    int i;
    for(i=0;i<480;i+=17)
    {
        UB_Font_DrawString(1,i,"
        ",&Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_BLUE);
    }
}

//-----
void Graphic_DrawBr(int16_t x1, int16_t y1,int16_t x2,int16_t y2, int16_t color)
{
    int16_t x;
    int16_t y;
    for (y=y1;y<y2;y++)
    {
        for(x=x1;x<x2;x++)
        {
            UB_Graphic_DrawPixel(x,y,color) ;
        }
    }
}

//-----
-
void Zastavka(void)

```

```

{
    Graphic_DrawBr(10,5,230,55,RGB_COL_CYAN);
    UB_Font_DrawString32(62,16, " R O D ",&Arial_18x27, RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_RED);
    UB_Graphic_DrawLine(14,9,226,9, RGB_COL_BLACK);
    UB_Graphic_DrawLine(14,9,14,51, RGB_COL_BLACK);
    UB_Graphic_DrawLine(14,51,226,51,RGB_COL_BLACK);
    UB_Graphic_DrawLine(226,9,226,51,RGB_COL_BLACK);
    ///////////////////////////////////
    Graphic_DrawBr(10,55,230,135,RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(55,75, "MANAGEMENT",&Arial_14x22, RGB_COL_BLUE,RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(55,97," SYSTEM", &Arial_14x22, RGB_COL_BLUE,RGB_COL_YELLOW);
    UB_Graphic_DrawLine(14,58,226,58, RGB_COL_BLACK);
    UB_Graphic_DrawLine(14,58,14,131, RGB_COL_BLACK);
    UB_Graphic_DrawLine(14,131,226,131,RGB_COL_BLACK);
    UB_Graphic_DrawLine(226,58,226,131,RGB_COL_BLACK);
    ///////////////////////////////////
    Graphic_DrawBr(10,140,230,315,RGB_COL_RED);
    UB_Font_DrawString(25,160,"SCOLLING WINDOWS:", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE,RGB_COL_RED);
    UB_Font_DrawString(35,200,"KEY C - PaUp ", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE,RGB_COL_BLUE);
    UB_Font_DrawString(35,220,"KEY D - PaDn ", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE,RGB_COL_BLUE);
    UB_Graphic_DrawLine(16,144,226,144, RGB_COL_WHITE);
    UB_Graphic_DrawLine(16,144,16,310, RGB_COL_WHITE);
    UB_Graphic_DrawLine(16,310,226,310, RGB_COL_WHITE);
    UB_Graphic_DrawLine(226,144,226,310,RGB_COL_WHITE);
    UB_Graphic_DrawLine(16,250,226,250, RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(30,280,"KNTU /Savelenko G./ 2015", &Arial_8x13,
    RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_RED);
}

//-----

void RESERV(void)
{
    UB_Font_DrawString(0,1, " ", &Arial_7x10,
    RGB_COL_RED,RGB_COL_RED);
    UB_Font_DrawString(0,10," SYSTEM SETUP ", &Arial_11x18,
    RGB_COL_WHITE,RGB_COL_RED);
    //-----
    UB_Font_DrawString(0,28, " ", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE,RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,46, " Interval ARC ", &Arial_11x18, RGB_COL_BLUE, RGB_COL_WHITE);
    //-----
    sprintf(buf," %4dmV-",min_intr);
    UB_Font_DrawString(0,64,buf,&Arial_11x18,RGB_COL_BLACK,RGB_COL_WHITE);
    sprintf(buf," %4dmV",max_intr);
    UB_Font_DrawString(88,64,buf,&Arial_11x18,RGB_COL_BLACK,RGB_COL_WHITE);
    //-----
    UB_Font_DrawString(0,82, " ", &Arial_11x18, RGB_COL_BLUE, RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,100," Interval stab.", &Arial_11x18, RGB_COL_BLUE, RGB_COL_WHITE);

    sprintf(buf," %4dmV ",stab_intr);
    UB_Font_DrawString(0,118,buf,&Arial_11x18,RGB_COL_BLACK,RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,136," ", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE,RGB_COL_WHITE);
    ///////////////////////////////////
    UB_Font_DrawString(180,28, " ", &Arial_11x18, RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(180,46, " ", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(180,64, " ", &Arial_11x18, RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(180,82, "KEY 1", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(180,100," ", &Arial_11x18, RGB_COL_RED ,RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(180,118," ", &Arial_11x18, RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(180,136," ", &Arial_11x18, RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_YELLOW);
    ///////////////////////////////////
    //
    UB_Font_DrawString(0,172," ", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE,RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,190," Switch 2 stage ", &Arial_11x18, RGB_COL_BLUE, RGB_COL_WHITE);

    sprintf(buf," Pst1 >= %2d %%",P_st_1);
    UB_Font_DrawString(0,208,buf,&Arial_11x18,RGB_COL_BLACK,RGB_COL_WHITE);

    UB_Font_DrawString(0,226," ", &Arial_11x18, RGB_COL_BLUE, RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,244," Switch 1 stage ", &Arial_11x18, RGB_COL_BLUE, RGB_COL_WHITE);

    sprintf(buf," Pst2 < %2d %%",P_st_2);
    UB_Font_DrawString(0,262,buf,&Arial_11x18,RGB_COL_BLACK,RGB_COL_WHITE);

    ///////////////////////////////////
    //
    UB_Font_DrawString(0,280," ", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE,RGB_COL_WHITE);
}

```

```

UB_Font_DrawString(180,172,"      ", &Arial_11x18, RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_YELLOW);
UB_Font_DrawString(180,190,"____", &Arial_11x18, RGB_COL_RED , RGB_COL_YELLOW);
UB_Font_DrawString(180,208,"      ", &Arial_11x18, RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_YELLOW);
UB_Font_DrawString(180,226,"KEY 2", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
UB_Font_DrawString(180,244,"____", &Arial_11x18, RGB_COL_RED , RGB_COL_YELLOW);
UB_Font_DrawString(180,262,"      ", &Arial_11x18, RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_YELLOW);
UB_Font_DrawString(180,280,"      ", &Arial_11x18, RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_YELLOW);
////////////////////////////////////
UB_Font_DrawString(0,300,"*- GO IN.SEG.| #-Mode ", &Arial_11x18,
RGB_COL_WHITE,RGB_COL_RED);
}
//-----

void Interval_1(void)
{
    UB_Font_DrawString(0,1, "                                ", &Arial_7x10,
RGB_COL_RED,RGB_COL_RED);
    UB_Font_DrawString(0,10, " Interval Setup ", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE,RGB_COL_RED);
    //-----
    UB_Font_DrawString(0,28, "      ", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE,RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,46, " Interval ARC ", &Arial_11x18, RGB_COL_BLUE, RGB_COL_WHITE);
    sprintf(buf," min - %4dmV ",min_intr);
    UB_Font_DrawString(0,64, buf, &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK,RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,82, "      ", &Arial_11x18, RGB_COL_BLUE, RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,100,"      ", &Arial_11x18, RGB_COL_BLUE, RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,118," Interval ARC ", &Arial_11x18, RGB_COL_BLUE,RGB_COL_WHITE);
    sprintf(buf," max - %4dmV ",max_intr);
    UB_Font_DrawString(0,136,buf, &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK,RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,154,"      ", &Arial_11x18, RGB_COL_BLUE,RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,172,"      ", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE,RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,190," Interval STB ", &Arial_11x18, RGB_COL_BLUE,RGB_COL_WHITE);
    sprintf(buf," %4dmV ",stab_intr);
    UB_Font_DrawString(0,208,buf, &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK,RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,226,"      ", &Arial_11x18, RGB_COL_BLUE,RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,28, "      ", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE,RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,244,"      ", &Arial_11x18,RGB_COL_WHITE,RGB_COL_BLUE);
    UB_Font_DrawString(20,280,"OK - #", &Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_RED);
    UB_Font_DrawString(110,280,"RETURN - *", &Arial_11x18, RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_RED);
    //////////////////////////////////////
    UB_Font_DrawString(180,10, "____", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(180,28, "      ", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(180,46, "KEY 1", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(180,64, "KEY 4", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(180,82, "____", &Arial_11x18, RGB_COL_RED , RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(180,100,"      ", &Arial_11x18, RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(180,118,"KEY 2", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(180,136,"KEY 5", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(180,154,"____", &Arial_11x18, RGB_COL_RED , RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(180,172,"      ", &Arial_11x18, RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(180,180,"KEY 3", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(180,198,"KEY 6", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(180,216,"____", &Arial_11x18, RGB_COL_RED , RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(180,234,"      ", &Arial_11x18, RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_YELLOW);
}
//-----

void Interval_2(void)
{
    UB_Font_DrawString(0,1, "                                ", &Arial_7x10,
RGB_COL_RED,RGB_COL_RED);
    UB_Font_DrawString(0,10, " Stage Setup ", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE,RGB_COL_RED);
    //-----
    UB_Font_DrawString(0,28, "      ", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE,RGB_COL_WHITE);
    sprintf(buf,"Pst1 >= %2d (+-1)", P_st_1);
    UB_Font_DrawString(0,46, buf, &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK,RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,64, "      ", &Arial_11x18, RGB_COL_BLUE, RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,82, "      ", &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK,RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,100,"      ", &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK,RGB_COL_WHITE);
    sprintf(buf," Pst2 < %2d (+-1)",P_st_2);
    UB_Font_DrawString(0,118, buf, &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,136,"      ", &Arial_11x18, RGB_COL_BLUE, RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,154,"Supplyng Step ", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE,RGB_COL_RED);
    //-----
    UB_Font_DrawString(0,172,"      ", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE,RGB_COL_WHITE);
    sprintf(buf," d Ubx1= %3d mV ", dUbx_1);
    UB_Font_DrawString(0,190,buf, &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK,RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,208,"      ", &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK,RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,226,"      ", &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK,RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(0,244,"      ", &Arial_11x18,RGB_COL_WHITE,RGB_COL_WHITE);
    sprintf(buf," d Ubx2= %3d mV ", dUbx_2);

```

```

UB_Font_DrawString(0,262,buf, &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK,RGB_COL_WHITE);
UB_Font_DrawString(0,280,"", &Arial_11x18,RGB_COL_WHITE,RGB_COL_WHITE);
UB_Font_DrawString(20,300,"OK - # RETURN - *" ,
&Arial_11x18,RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_RED);

////////////////////////////////////

UB_Font_DrawString(180,10, "____", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
UB_Font_DrawString(180,28, "____", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
UB_Font_DrawString(180,46, "KEY 1", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
UB_Font_DrawString(180,64, "KEY 4", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
UB_Font_DrawString(180,82, "____", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
UB_Font_DrawString(180,100, "____", &Arial_11x18, RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_YELLOW);
UB_Font_DrawString(180,118, "KEY 2", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
UB_Font_DrawString(180,136, "KEY 5", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
UB_Font_DrawString(180,154, "____", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
UB_Font_DrawString(180,172, "____", &Arial_11x18, RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_YELLOW);
UB_Font_DrawString(180,190, "KEY 3", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
UB_Font_DrawString(180,208, "KEY 6", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
UB_Font_DrawString(180,226, "____", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
UB_Font_DrawString(180,244, "____", &Arial_11x18, RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_YELLOW);
UB_Font_DrawString(180,262, "KEY A", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
UB_Font_DrawString(180,280, "KEY B", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
// UB_Font_DrawString(180,298, "____", &Arial_11x18, RGB_COL_YELLOW,RGB_COL_YELLOW);

}
//-----
void manual_mode(void)
{
    UB_Font_DrawString(1,2, "MANUAL MODE", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE,
    RGB_COL_RED);
    UB_Font_DrawString(1,20, "____", &Arial_11x18, RGB_COL_YELLOW, RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(1,38, "I/II", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(1,56, "STABILZAT", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(1,72, "STAGE", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(1,90, "____", &Arial_11x18, RGB_COL_YELLOW, RGB_COL_YELLOW);
    //-----
    sprintf(buf,"|| Pxx=2%d %%", Pxx);
    UB_Font_DrawString(104,20,buf, &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(104,38,"||", &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_WHITE);
    sprintf(buf,"|| Pst=2%d %%", Pst);
    UB_Font_DrawString(104,56,buf, &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(104,72,"||", &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_WHITE);
    sprintf(buf,"|| Pkz=2%d %%", Pkz);
    UB_Font_DrawString(104,90,buf, &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_WHITE);

    UB_Font_DrawString(1,126, "Increase", &Arial_11x18, RGB_COL_GREEN, RGB_COL_BLACK);
    UB_Font_DrawString(1,144, "upply key-1", &Arial_11x18, RGB_COL_GREEN, RGB_COL_BLACK);
    UB_Font_DrawString(1,162, "____", &Arial_11x18, RGB_COL_GREEN, RGB_COL_BLACK);
    UB_Font_DrawString(1,180, "Rduse", &Arial_11x18, RGB_COL_GREEN, RGB_COL_BLACK);
    UB_Font_DrawString(1,198, "upply key-2", &Arial_11x18, RGB_COL_GREEN, RGB_COL_BLACK);
    UB_Font_DrawString(1,216, "____", &Arial_11x18, RGB_COL_GREEN, RGB_COL_BLACK);

    UB_Font_DrawString(130,126, "Go to", &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_GREY);
    UB_Font_DrawString(130,144, "automatic", &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_GREY);
    UB_Font_DrawString(130,162, "mode", &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_GREY);
    UB_Font_DrawString(130,180, "____", &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_GREY);
    UB_Font_DrawString(130,198, "key-*", &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_GREY);
    UB_Font_DrawString(130,216, "____", &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_GREY);

    UB_Font_DrawString(30,240, "____", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE, RGB_COL_RED);
    UB_Font_DrawString(30,258, "Stop the flow", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE, RGB_COL_RED);
    UB_Font_DrawString(30,276, "key - #", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE, RGB_COL_RED);
    UB_Font_DrawString(30,294, "____", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE, RGB_COL_RED);
}
//-----
void auto_mode(void)
{
    UB_Font_DrawString(1,2, "AUTO MODE", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE,
    RGB_COL_RED);
    UB_Font_DrawString(1,20, "____", &Arial_11x18, RGB_COL_YELLOW, RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(1,38, "I/II", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(1,56, "STABILZAT", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(1,72, "STAGE", &Arial_11x18, RGB_COL_RED, RGB_COL_YELLOW);
    UB_Font_DrawString(1,90, "____", &Arial_11x18, RGB_COL_YELLOW, RGB_COL_YELLOW);
    //-----
    sprintf(buf,"|| Pxx=2%d %%", Pxx);
    UB_Font_DrawString(104,20,buf, &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_WHITE);
    UB_Font_DrawString(104,38,"||", &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_WHITE);
    sprintf(buf,"|| Pst=2%d %%", Pst);

```

```

UB_Font_DrawString(104,56,buf, &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_WHITE);
UB_Font_DrawString(104,72,"||", &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_WHITE);
    sprintf(buf,"|| Pkz=2%d %% ", Pkz);
UB_Font_DrawString(104,90,buf, &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_WHITE);

UB_Font_DrawString(1,126,"_____", &Arial_11x18, RGB_COL_GREEN, RGB_COL_BLACK);
UB_Font_DrawString(1,144,"_____", &Arial_11x18, RGB_COL_GREEN, RGB_COL_BLACK);

    UB_Font_DrawString(1,162," U dug sr ", &Arial_11x18, RGB_COL_GREEN, RGB_COL_BLACK);
    sprintf(buf," 4%d mv ",Udug_sr);
UB_Font_DrawString(1,180,buf, &Arial_11x18, RGB_COL_GREEN, RGB_COL_BLACK);
UB_Font_DrawString(1,198,"_____", &Arial_11x18, RGB_COL_GREEN, RGB_COL_BLACK);
UB_Font_DrawString(1,216,"_____", &Arial_11x18, RGB_COL_GREEN, RGB_COL_BLACK);

UB_Font_DrawString(130,126," Go to ", &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_GREY);
UB_Font_DrawString(130,144," manual ", &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_GREY);
UB_Font_DrawString(130,162," mode ", &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_GREY);
UB_Font_DrawString(130,180,"_____", &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_GREY);
UB_Font_DrawString(130,198," key- * ", &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_GREY);
UB_Font_DrawString(130,216,"_____", &Arial_11x18, RGB_COL_BLACK, RGB_COL_GREY);

UB_Font_DrawString(30,240,"_____", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE, RGB_COL_RED);
UB_Font_DrawString(30,258," Stop the flow ", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE, RGB_COL_RED);
UB_Font_DrawString(30,276," key - # ", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE, RGB_COL_RED);
UB_Font_DrawString(30,294,"_____", &Arial_11x18, RGB_COL_WHITE, RGB_COL_RED);
}

```

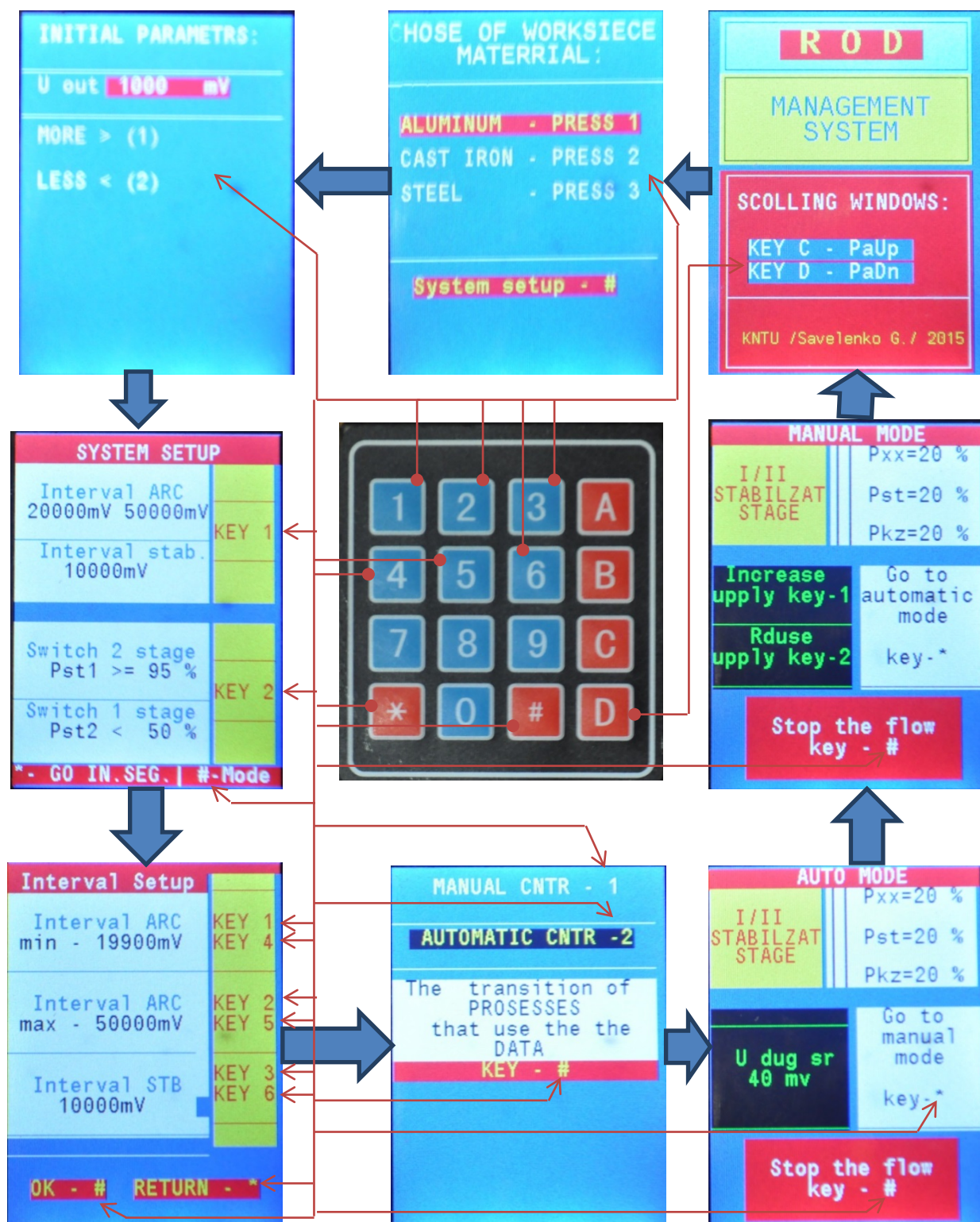
ДОДАТОК Л

Зовнішній вигляд ПЛК на базі плати STM32F4



ДОДАТОК М

Графічний інтерфейс ПЛК



ДОДАТОК Н

Таблиця Н.1. Результати оцінок якості роботи САК за базовим варіантом (по напрузі електричної дуги).

№ досліду	Ділянка з рівнем стабільності >95% : розмір вибірки, точок	Різниця максимального і мінімального значення вибірки (Max - Min), V	Середнє арифметичне значення вибірки (Mean), V	Середнє квадратичне значення вибірки (RMS), V	Значення дисперсії вибірки (Variance), V	Значення стандартного відхилення (Std Deviation), V
1	773	18,29663	25,85784	25,99054	6,880467	2,623065
2	897	19,59033	25,0006	25,1335	6,66286	2,581252
3	937	19,40552	26,05128	26,18221	6,838488	2,61505
4	813	52,67212	26,79473	27,03939	13,17125	3,629222
5	809	12,93701	23,27435	23,36951	4,438548	2,106786
6	879	23,65625	23,08989	23,21244	5,674188	2,382056
7	847	27,90698	23,29474	23,4341	6,511916	2,551846
8	901	23,47143	25,95314	26,09407	7,334998	2,70832
9	965	28,64624	24,53109	24,65952	6,317804	2,513524
10	905	71,52319	25,72425	26,00726	14,64052	3,826294
11	919	29,20068	25,9722	26,16289	9,941273	3,152978
12	915	28,64624	23,3901	23,72322	15,6943	3,961604
13	847	30,86401	23,79617	24,01475	10,4506	3,232738
Середнє арифметичне		29,7551	24,8254	25,0018	8,8121	2,9142

Таблиця Н.2. Результати оцінок якості роботи САК за запропонованим варіантом (по напрузі електричної дуги).

№ досліджу	Ділянка з рівнем стабільності >95% : розмір вибірки, точок	Різниця максимального і мінімального значення вибірки (Max - Min), V	Середнє арифметичне значення вибірки (Mean), V	Середнє квадратичне значення вибірки (RMS), V	Значення дисперсії вибірки (Variance), V	Значення стандартного відхилення (Std Deviation), V
1	1151	13,12183	23,5772	23,67421	4,583844	2,140991
2	1371	15,89404	24,63795	24,74554	5,312939	2,304981
3	741	16,26367	24,42324	24,52057	4,76357	2,18256
4	1331	13,30664	23,48222	23,56911	4,088631	2,022036
5	1351	12,56738	23,49169	23,59995	5,097831	2,257838
6	1211	13,12183	22,8236	22,94288	5,459101	2,336472
7	1171	17,00293	24,76279	24,87854	5,745964	2,397074
8	1461	16,26367	25,21965	25,33342	5,751855	2,398303
9	1181	13,49146	24,43602	24,54672	5,42279	2,328688
10	1181	13,49146	24,43602	24,54672	5,42279	2,328688
11	1491	15,15479	23,95227	24,07429	5,860136	2,420772
12	1251	14,23071	25,30789	25,4104	5,198881	2,280106
13	1371	12,7522	22,21892	22,33307	5,085531	2,255112
14	1361	13,86108	21,96478	22,08072	5,106593	2,259777
Середнє арифметичне		14,3231	23,9096	24,0183	5,2072	2,2795

ДОДАТОК П

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВАРІАНТІВ ВИГОТОВЛЕННЯ КВАДРАТНИХ ОТВОРІВ З ФАСКАМИ В ДЕТАЛЯХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ

Згідно з базовим варіантом отвори виготовляються на верстаті розмірної обробки дугою типу АМН-1 з автоматизованою системою керування подачі. Технологічний параметр, що характеризує стабільність дуги: напруга дуги, підтримується за допомогою регулятора стабілізації.

Запропоновано нову автоматичну систему керування подачі. Технологічний параметр, що характеризує стабільність дуги: напруга дуги, підтримується за допомогою мікропроцесорного регулятора.

П.1. Базовий варіант

Вихідні дані по трудомісткості операцій базового технологічного процесу та параметрах обладнання для розрахунку технологічної собівартості наведені в таблицях П.1 і П.2.

Таблиця П.1

Отримання квадрату і фаски способом РОД

Операція	Штучний час, хв $t_{шт\ i}$	Підг. закл. час, хв $t_{п.з.}$	Розряд робітника	Тарифна ставка
Прошивання квадрату і фаски	4,5	30	IV	15,039
Годинна тарифна ставка наладчика	-	-	V	17,044

Таблиця П.2

Параметри обладнання

№	Модель	Габарити, м		Площа в плані, м ²	Коефіцієнт додаткової площі	Встановлена потужність, кВт	ККД двигун а, %
		L	B				
1	АМН-1+2Н118	1,86	0,85	1,581	4	0	0,8
2	ВДУ-504УХЛЗ	1,27	0,81	1,0287	4	5	0,8
3	ЕШІМ-1М + редуктор	0,8	0,5	0,4	4	0,5	0,8
4	Регулятор МЕР	0,15	0,2	0,03	4	0,05	0,8
5	Станція прокачки робочої рідини	1	1	1	4	0,75	0,8

Продовження табл. П.2

№	Вартість обладнання, грн	Умовна ремонтна складність, UPE		Витрати на IUPE, грн		Тривалість ремонтного циклу, годин	Амортизаційн і відрахування, %
		R_M	R_e	W_M	W_e		
1	8000	6		500		50000	0,15
2	10770	0	5	0	180	50000	0,15
3	10000	4	15	100	300	50000	0,15
4	1500	3	10	50	100	50000	0,15
5	5000	10	4	300	100	50000	0,15

Розрахунок змінних витрат на операції прошивання квадратних отворів з фасками представлений в таблиці П.3.

Таблиця П.3

№ статті витрат	Позначка	Найменування	Розмірність	Значення
1.1. Мо 0	ар	Норма витрати металу	кг	0
	ач	Чиста маса	кг	0
	Цм	Ціна 1 кг матеріалу	грн	10,05
	Цвідх	Ціна 1 кг відходів	грн	3,4
	Ктр	Коеф трансп-загот витрат	1,05...1,08	0,7
1.2. Зо.д.с. 2,487074625	тшт	Штучний час	хв	4,5
	Lгод	Годинна тарифна ставка	грн	15,039
	Кпр	Коеф премій за виконання плану	0,3...0,32	0,3
	Кд	Коеф доплат за фактично відроблений час	0,075...0,08	0,08
	КдI	Коеф премій за вик плану	0,08...0,1	0,09
	Кс	Відрахування на соцстрах	0,5	0,5
1.3. Вел 0,125916525	Нуст	Встановлена потужність	кВт	6,3
	ККД	ККД	-	2
	Цел	Ціна 1 кВт.год електроенергії	грн	2,35
	Код	Коеф одночасної роботи двигунів	0,6...1,3	0,7
	KN	Коеф завантаження за потужністю	BC-0,8;ДС-0,5	0,5
	Кдв	Коеф завантаження за часом	BC-0,8;ДС-0,6	0,6
	Кw	Коеф втрат ел енергії в мережі	BC-1,04;ДС-1,08	1,08
1.4. Врем 0,020025	Wм	Витрати на ремонт механічної частини	грн	6550
	We	Витрати на ремонт електричної частини	грн	6800
	Wел	Витрати на ремонт електронної частини	грн	0
	Тр.ц.	Тривалість міжремонтного циклу	год	50000

Продовження табл. П.3

№ статті витрат	Позначка	Найменування	Розмірність	Значення
1.5. <i>Вам.обл</i> 0,105979567	<i>Сб</i>	Балансова вартість обладнання	грн	35270
	<i>На.р.</i>	Норма амортизаційних відрахувань		0,15
	<i>Фд.о.</i>	Дійсний річний фонд часу роботи обладнання	год	4680
	<i>лн</i>	Коефіцієнт завантаження обладнання за часом		0,8
1.6. <i>Ве.прим</i> 0,141777933	<i>Св.пп</i>	Виробнича площа в плані	м ²	4,0397
	<i>Kf</i>	Коефіцієнт додаткової виробничої площі		4
	<i>Скз</i>	Річні витрати, пов'язані з використанням 1м*м площі	грн	438
1.7. <i>Вр.рід</i> 0,93	<i>Qp.рід.</i>	Витрати робочої рідини	кг	0,2
	<i>Цр.рід.</i>	Вартість робочої рідини (масла)	грн/кг	62
1.8. <i>Вел.грф</i> 0,553896	<i>Q ел.грф</i>	Витрати графітових електродів	мм/хв	0,05
	<i>Ц ел.грф</i>	Вартість графітових електродів	грн/г	0,7
	<i>h ел.грф</i>	Питома вага	г/мм ³	2,1
	<i>П</i>	Площа робочої поверхні	мм ²	100,48

Розрахунок постійних витрат представлений в таблиці П4

Таблиця П.4

№ п/п статті	Позначка	Найменування	Розмірність	Значення
2.1. <i>Знал</i> 93,955	<i>тп.з.</i>	Підготовчо-заклучний час	хв	30
	<i>Lгод.нал</i>	Годинна тарифна ставка наладчика	грн/год	17,044
	<i>A</i>	Кількість партій (що відповідає кількості переналагоджень)	-	5
2.2. <i>Зі</i> 2700	<i>Ці</i>	Пристрій	грн	2700
	<i>Тсл</i>	Строк експлуатації до повного зносу	років	1

П.2. Проектований варіант

Вихідні дані по трудомісткості та параметрах обладнання для розрахунку технологічної собівартості наведені в таблицях П.5 і П.6.

Таблиця П.5

Отримання квадрату і фаски способом РОД

Операція	Штучний час, хв $t_{шт\ i}$	Підг. закл. час, хв $t_{п.з.}$	Розряд робітника	Тарифна ставка
Прошивання квадрату і фаски	4	40	IV	15,03
Годинна тарифна ставка наладчика	-	-	V	17,044

Таблиця П.6

Параметри обладнання

№	Модель	Габарити, м		Площа в плані, м ²	Коефіцієнт додаткової площі	Встановлена потужність, кВт	ККД двигуна, %
		L	B				
1	АМН-1+2Н118	1,86	0,85	1,581	4	0	0,8
2	ВДУ-504УХЛЗ	1,27	0,81	1,0287	4	5	0,8
3	ЕШІМ-1М + редуктор	0,8	0,5	0,4	4	0,5	0,8
4	Мікроконтролер	0,15	0,2	0,03	4	0,05	0,8
5	Станція прокачки робочої рідини	1	1	1	4	0,75	0,8

Продовження табл. П.6

№	Вартість обладнання, грн	Умовна ремонтна складність, УРЕ		Витрати на ІУРЕ, грн		Тривалість ремонтного циклу, годин	Амортизаційн і відрахування, %
		R _м	R _е	W _м	W _е		
1	8000	6		500		50000	0,15
2	10770	0	5	0	180	50000	0,15
3	10000	4	15	100	300	50000	0,15
4	8000	3	10	50	100	50000	0,15
5	5000	10	4	300	100	50000	0,15

Розрахунок змінних витрат на операції прошивання квадратних отворів з фасками представлений в таблиці П.7.

Таблиця П.7

№ статті витрат	Позначка	Найменування	Розмірність	Значення
1.1. Мо 0	ар	Норма витрати металу	кг	0
	ач	Чиста маса	кг	0
	Цм	Ціна 1 кг матеріалу	грн	10,05
	Цвідх	Ціна 1 кг відходів	грн	3,4
	Ктр	Коеф трансп-загот витрат	1,05...1,08	0,7
1.2. Зо.д.с. 2,210733	тшт	Штучний час	хв	4
	Lгод	Годинна тарифна ставка	грн	15,039
	Кпр	Коеф премій за виконання плану	0,3...0,32	0,3
	Кд	Коеф доплат за фактично відроблений час	0,075..0,08	0,08
	Кд1	Коеф премій за вик плану	0,08...0,1	0,09
	Кс	Відрахування на соцстрах	0,5	0,5
1.3. Вел	Нуст	Встановлена потужність	кВт	6,3
	ККД	ККД	-	2
	Цел	Ціна 1 кВт.год електроенергії	грн	2,35

№ статті витрат	Позначка	Найменування	Розмірність	Значення
0,1119258	<i>Код</i>	<i>Коеф одночасної роботи двигунів</i>	0,6...1,3	0,7
	<i>KN</i>	<i>Коеф завантаження за потужністю</i>	BC-0,8;ДС-0,5	0,5
	<i>Кдв</i>	<i>Коеф завантаження за часом</i>	BC-0,8;ДС-0,6	0,6
	<i>Кw</i>	<i>Коеф витрат ел енергії в мережі</i>	BC-1,04;ДС-1,08	1,08
1.4. <i>Врем</i> 0,0178	<i>Wм</i>	<i>Витрати на ремонт механічної частини</i>	<i>грн</i>	6550
	<i>We</i>	<i>Витрати на ремонт електричної частини</i>	<i>грн</i>	6800
	<i>Wel</i>	<i>Витрати на ремонт електронної частини</i>	<i>грн</i>	0
	<i>Тр.ц.</i>	<i>Тривалість міжремонтного циклу</i>	<i>год</i>	50000
1.5. <i>Вам.обл</i> 0,111565171	<i>Сб</i>	<i>Балансова вартість обладнання</i>	<i>грн</i>	41770
	<i>На.р.</i>	<i>Норма амортизаційних відрахувань</i>		0,15
	<i>Фд.о.</i>	<i>Дійсний річний фонд часу роботи обладнання</i>	<i>год</i>	4680
	<i>лн</i>	<i>Коефіцієнт завантаження обладнання за часом</i>		0,8
1.6. <i>Ве.прим</i> 0,126024829	<i>Св.пп</i>	<i>Виробнича площа в плані</i>	<i>м²</i>	4,0397
	<i>Кf</i>	<i>Коефіцієнт додаткової виробничої площі</i>		4
	<i>Скг</i>	<i>Річні витрати, пов'язані з використанням 1м*м площі</i>	<i>грн</i>	438
1.7. <i>Вр.рід</i> 0,826666667	<i>Ор.рід.</i>	<i>Витрати робочої рідини</i>	<i>кг</i>	0,2
	<i>Цр.рід.</i>	<i>Вартість робочої рідини (масла)</i>	<i>грн/кг</i>	62
1.8. <i>Вел.грф</i> 0,492352	<i>Q ел.грф</i>	<i>Витрати графітових електродів</i>	<i>мм/хв</i>	0,05
	<i>Ц ел.грф</i>	<i>Вартість графітових електродів</i>	<i>грн/г</i>	0,7
	<i>h ел.грф</i>	<i>Питома вага</i>	<i>г/мм³</i>	2,1
	<i>П</i>	<i>Площа робочої поверхні</i>	<i>мм²</i>	100,48

Розрахунок постійних витрат представлений в таблиці П.8

Таблиця П.8

№ п/п статті	Позначка	Найменування	Розмірність	Значення
2.1. <i>Знал</i> 125,273	<i>тп.з.</i>	<i>Підготовчо-заклучний час</i>	<i>хв</i>	40
	<i>Lгод.нал</i>	<i>Годинна тарифна ставка наладчика</i>	<i>грн/год</i>	17,044
	<i>A</i>	<i>Кількість партій (що відповідає кількості переналагоджень)</i>	-	5
2.2. <i>Зі</i> 2700	<i>Ці</i>	<i>Пристрій</i>	<i>грн</i>	2700
	<i>Тсл</i>	<i>Строк експлуатації до повного зносу</i>	<i>років</i>	1

Для розмежування області ефективного використання варіантів технологічного процесу, розраховуємо критичну програму, при якій варіанти рівноцінні, тобто $C_{баз} = C_{проект}$.

Критична програма випуску визначається за формулою, шт

$$N_{кр} = \frac{P_1 - P_2}{v_2 - v_1},$$

де P_1 і P_2 – відповідно, постійні витрати по базовому варіанту ($P_1 = 494$ грн) та по проектуваному ($P_2 = 588$ грн);

v_1 і v_2 – відповідно, змінні витрати по базовому варіанту ($v_1 = 4,36$ грн) та по проектуваному ($v_2 = 3,89$ грн).

$$N_{кр} = (588 - 494) / (4,36 - 3,89) = 201 \text{ шт}$$

При програмі випуску деталей, яка перевищує $N_{кр}$, в тому числі, для заданої програми (14000 шт/рік), більш ефективним є проектуваний варіант.

Розрахунки таблиць зведені в порівняльну калькуляцію витрат (табл. П.9).

Таблиця П.9

Калькуляція витрат на операцію (для річної програми випуску 14000 шт.)

№ п/п	Витрати	Розмір витрат, грн	
		РОД (базовий)	РОД (новий)
1	Змінні	4,3647	3,8971
1.1.	Основні матеріали	0	0
1.2.	Заробітна плата	2,4871	2,2107
1.3.	Електроенергія	0,1259	0,1119
1.4.	Ремонт	0,0200	0,0178
1.5.	Амортизація	0,1060	0,1116
1.6.	Експлуатація приміщень	0,1418	0,1260
1.7.	Робоча рідина	0,9300	0,8267
1.8.	Електрод графітовий	0,5539	0,4924
2	Постійні (на програму)	493,9551	587,9101
2.1.	Налагодження	93,9551	187,9101
2.2.	Вартість пристосувань	400	400

Економічний ефект від впровадження при програмі випуску 14000 шт:

$$E = (C_{баз} - C_{проект}) N$$

$$E = (4,39995 - 3,93906) 14000 = 6452,476 \text{ грн.}$$

Строк окупності:

$$T_{ок} = \frac{K_2 - K_1}{E}$$

$$T_{ок} = (41770 - 35270) / 6452,476 = 1 \text{ рік}$$

Розширені результати розрахунків економічного ефекту та терміну окупності при програмі випуску від 4000 до 18600 шт виробів зводимо до таблиці П.10.

Таблиця П.10

Результати розрахунку економічного ефекту та строку окупності

Програма випуску, шт	Технологічна собівартість		Економічний ефект, грн	Строк окупності, років
	Базовий варіант	Проектуємий варіант		
4000	4,488158	4,044045	1776,454	3,658975
4200	4,482278	4,037046	1869,974	3,475984
4400	4,476932	4,030683	1963,495	3,310424
4600	4,472051	4,024874	2057,015	3,159919
4800	4,467577	4,019549	2150,535	3,022503
5000	4,463461	4,014649	2244,056	2,896541
5200	4,459661	4,010127	2337,576	2,780658
5400	4,456143	4,00594	2431,097	2,67369
5600	4,452876	4,002051	2524,617	2,574648
5800	4,449834	3,998431	2618,138	2,482681
6000	4,446995	3,995052	2711,658	2,397057
6200	4,44434	3,991892	2805,178	2,317143
6400	4,44185	3,988928	2898,699	2,242385
6600	4,439511	3,986145	2992,219	2,172301
6800	4,43731	3,983525	3085,74	2,106464
7000	4,435235	3,981055	3179,26	2,044501
7200	4,433275	3,978722	3272,781	1,986079
7400	4,43142	3,976515	3366,301	1,930903
7600	4,429664	3,974424	3459,822	1,87871
7800	4,427997	3,972441	3553,342	1,829264
8000	4,426414	3,970556	3646,862	1,782354
8200	4,424908	3,968764	3740,383	1,73779
8400	4,423474	3,967057	3833,903	1,6954
8600	4,422106	3,965429	3927,424	1,655029
8800	4,420801	3,963875	4020,944	1,616536
9000	4,419554	3,962391	4114,465	1,579792
9200	4,41836	3,960971	4207,985	1,544682
9400	4,417218	3,959611	4301,505	1,511099
9600	4,416123	3,958308	4395,026	1,478945
9800	4,415073	3,957058	4488,546	1,44813
10000	4,414065	3,955858	4582,067	1,418574
10200	4,413097	3,954706	4675,587	1,3902

Програма випуску, шт	Технологічна собівартість		Економічний ефект, грн	Строк окупності, років
	Базовий варіант	Проектуємий варіант		
10400	4,412165	3,953597	4769,108	1,362938
10600	4,411269	3,952531	4862,628	1,336726
10800	4,410406	3,951504	4956,149	1,311502
11000	4,409575	3,950514	5049,669	1,287213
11200	4,408773	3,949559	5143,189	1,263807
11400	4,407999	3,948639	5236,71	1,241237
11600	4,407252	3,947749	5330,23	1,21946
11800	4,40653	3,94689	5423,751	1,198433
12000	4,405833	3,94606	5517,271	1,178119
12200	4,405158	3,945257	5610,792	1,158482
12400	4,404505	3,94448	5704,312	1,139489
12600	4,403872	3,943727	5797,832	1,121109
12800	4,40326	3,942998	5891,353	1,103312
13000	4,402666	3,942291	5984,873	1,086071
13200	4,40209	3,941606	6078,394	1,069361
13400	4,401532	3,940941	6171,914	1,053158
13600	4,40099	3,940296	6265,435	1,037438
13800	4,400463	3,93967	6358,955	1,022181
14000	4,399952	3,939061	6452,476	1,007365
14200	4,399455	3,93847	6545,996	0,992973
14400	4,398972	3,937895	6639,516	0,978987
14600	4,398502	3,937335	6733,037	0,965389
14800	4,398045	3,936791	6826,557	0,952164
15000	4,3976	3,936261	6920,078	0,939296
15200	4,397167	3,935746	7013,598	0,926771
15400	4,396745	3,935243	7107,119	0,914576
15600	4,396333	3,934754	7200,639	0,902698
15800	4,395933	3,934277	7294,159	0,891124
16000	4,395542	3,933812	7387,68	0,879843
16200	4,395161	3,933358	7481,2	0,868845
16400	4,394789	3,932916	7574,721	0,858117
16600	4,394426	3,932484	7668,241	0,847652
16800	4,394072	3,932062	7761,762	0,837439
17000	4,393726	3,93165	7855,282	0,827469
17200	4,393388	3,931248	7948,803	0,817733
17400	4,393058	3,930855	8042,323	0,808224
17600	4,392735	3,930471	8135,843	0,798934
17800	4,39242	3,930096	8229,364	0,789854
18000	4,392112	3,929729	8322,884	0,780979

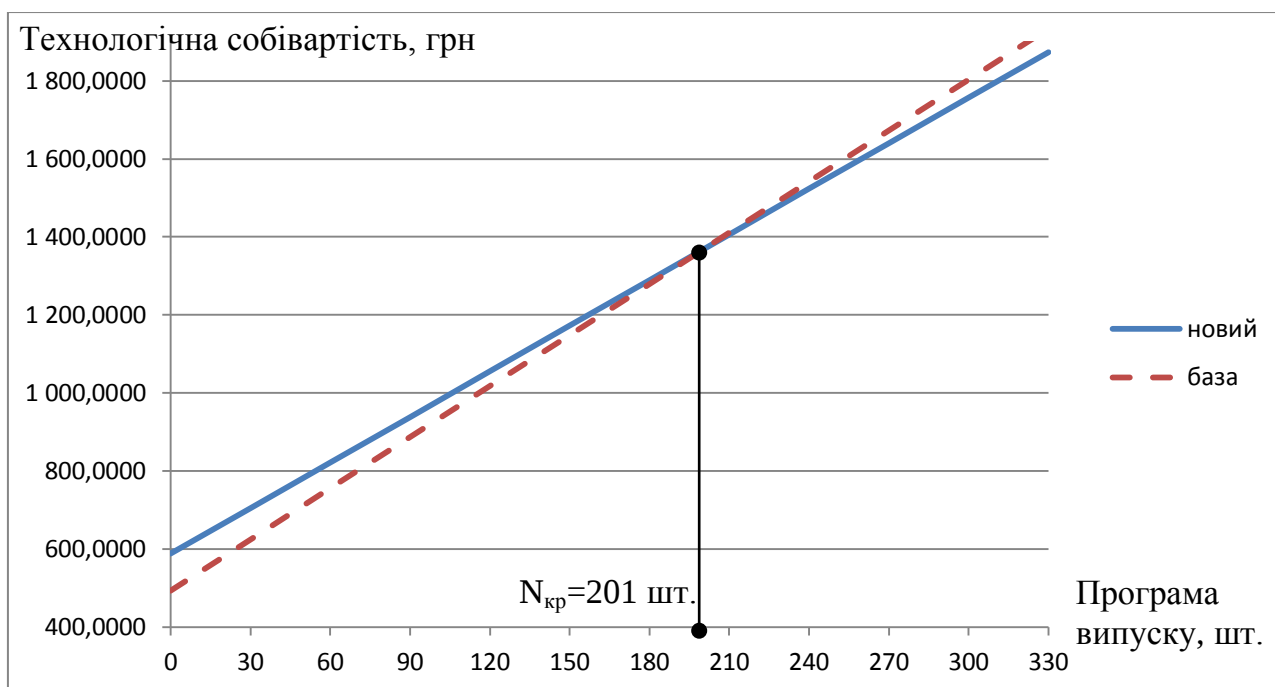


Рис. П.1.1. Графіки технологічної собівартості варіантів в залежності від програми випуску

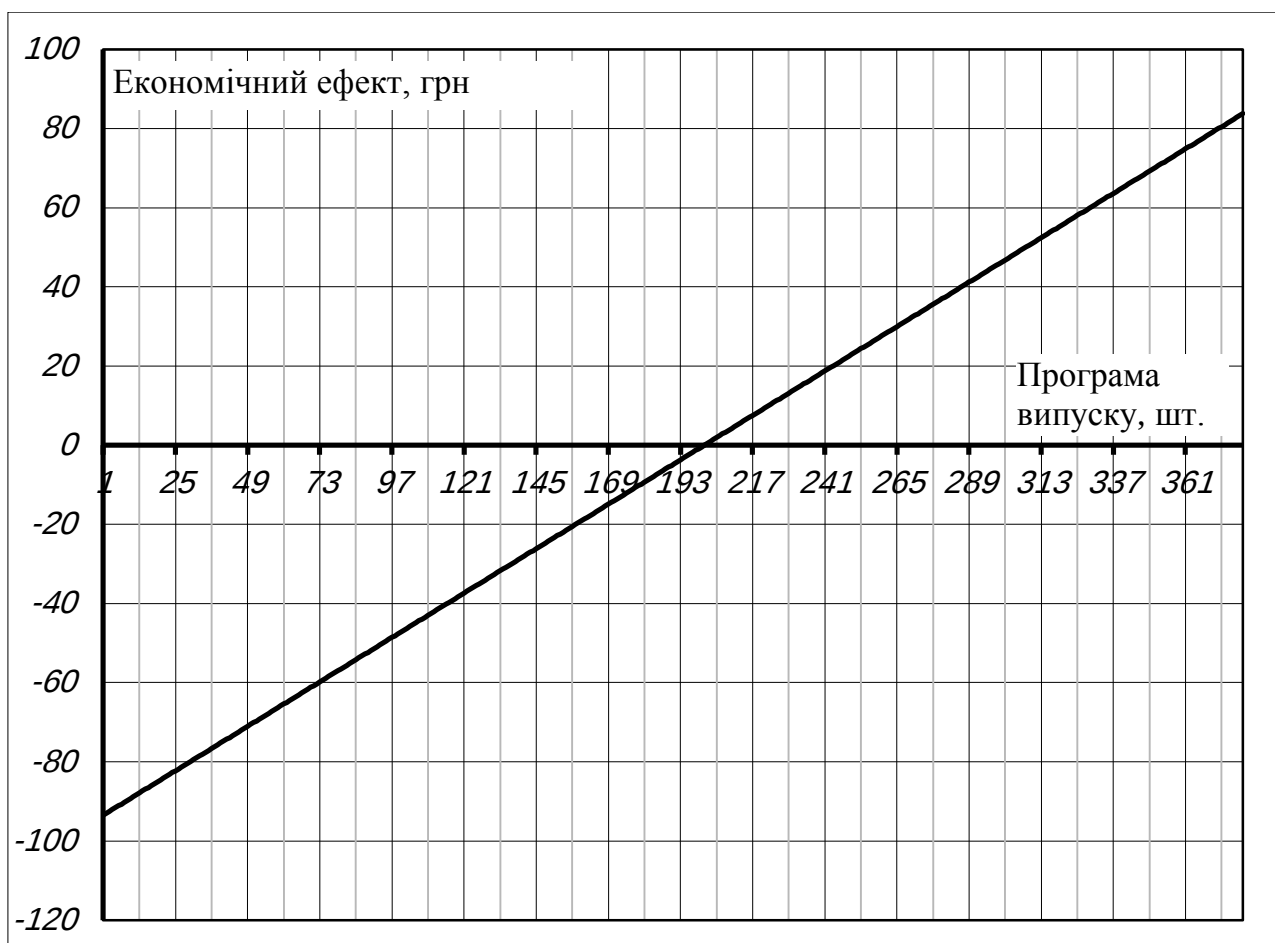


Рис. П.1.2. Графік економічного ефекту в залежності від програми випуску

П.3. Методика визначення технологічної собівартості

Витрати, що складають технологічну собівартість:

Змінні – v , величина яких в річній технологічній собівартості змінюється пропорційно зміні програми випуску продукції N_B , грн./дет.;

Постійні – p , величина яких суттєво не змінюється зі зміною обсягу річного випуску продукції, грн./дет.

Технологічна вартість продукції в обсязі річного випуску визначається за формулою:

$$C_{річ} = v_I \cdot N_B + p_I. \quad (П.1)$$

В даній роботі проводиться порівняння собівартості технологічних процесів із застосуванням поелементного розрахунку.

Формула технологічної собівартості при РОД має вигляд, грн./дет.:

$$C_{річ} = (M_0 + Z_{о.д.с.} + B_{ел} + B_{а.об.} + B_{еп} + B_{ел.гр.} + B_{р.р.})N_B + Z_{нал} + B_{а.сп.} \quad (П.2)$$

де M_0 – вартість основних матеріалів. Враховується у випадку коли змінюється спосіб розкрою або марка матеріалу;

$Z_{о.д.с.}$ – заробітна плата основна і додаткова виробничих робітників з відрахуванням на соцстрах;

$B_{ел}$ – витрати на електроенергію;

$B_{сп}$ – витрати на стиснене повітря;

B_B – витрати на воду технічну;

$B_{а.об.}$ – витрати на амортизацію обладнання;

$B_{еп}$ – витрати на експлуатацію приміщень;

$B_{р.р.}$ – витрати на робочу рідину;

$Z_{нал}$ – витрати на налагодження;

$B_{а.сп.}$ – вартість спеціальних пристроїв механізації і автоматизації.

Розрахунки по зазначених статтях ведуть за наступними формулами.

П.3.1. Змінні витрати

1. Вартість основних матеріалів з відрахуванням повернених відходів:

$$M_0 = a_p \cdot \Pi_m \cdot K_{тр} - q_{відх} \cdot \Pi_{відх} \quad (П.3)$$

де a_p – норма витрат металу, кг;

$q_{відх}$ – маса відходів ($q_{відх} = a_p - a_{ч}$), кг;

$a_{ч}$ – чиста маса деталі, кг;

Π_m – ціна 1 кг металу, грн;

$K_{тр}$ – коефіцієнт, що враховує транспортно-заготівельні витрати

(приймається 1,05...1,08);

$\Pi_{\text{відх}}$ – ціна 1 кг відходів, *грн.*

2. Заробітна плата основна і додаткова виробничих робітників з відрахуваннями на соціальне страхування

$$З_{\text{о.д.с.}} = L_{\text{год.}i} \cdot \frac{t_{\text{шт.}i}}{60} \cdot (1 + K_{\text{пр}} + K_{\text{д}} + K'_{\text{д}} + K_{\text{шк}}) \cdot (1 + \frac{K_{\text{с}}}{100}), \quad (\text{П.4})$$

де $L_{\text{год.}i}$ – годинна тарифна ставка (табл. 1 за даними ПАТ “Червона зірка” станом на 1.01.2016;), *грн*;

Таблиця П.11

Розряд	III	IV	V
Ставка	13,535	15,039	17,044

$t_{\text{шт.}i}$ – штучний час на операцію, *хв*;

$K_{\text{пр}}$ – коефіцієнт, що враховує премії відрядникам за виконання плану і якість робіт, $K_{\text{пр}} = 0,3...0,32$;

$K_{\text{д}}$ – коефіцієнт, що враховує доплати за фактично відроблений час, $K_{\text{д}} = 0,075...0,08$;

$K'_{\text{д}}$ – коефіцієнт, що враховує доплати за невідроблений час, $K'_{\text{д}} = 0,08...0,1$;

$K_{\text{с}}$ – коефіцієнт, що враховує відрахування на соціальне страхування $K_{\text{с}} = 50\%$;

$K_{\text{шк}}$ – коефіцієнт, що враховує шкідливість робіт (при плазмовому різанні), $K_{\text{шк}} = 0,08$.

3. Витрати на силову електроенергію

$$B_{\text{ел}} = \frac{N_{\text{уст}} \cdot K_{\text{од}} \cdot K_{\text{н}} \cdot K_{\text{дв}} \cdot K_{\omega}}{\eta_{\text{м}}} \cdot \frac{t_{\text{шт.}i}}{60} \cdot \Pi_{\text{ел}} \quad (\text{П.5})$$

де $N_{\text{уст}}$ – встановлена потужність електродвигуна [63, табл. 8.1...8.3], *кВт*;

$K_{\text{од}}$ – коефіцієнт одночасної роботи двигунів устаткування, $K_{\text{од}} = 0,6...1,3$ [63, ст. 55];

$K_{\text{н}}$ – середній коефіцієнт завантаження двигуна за потужністю, приймається для М та ВС – 0,8; ДС та О – 0,5;

$K_{\text{дв}}$ – середній коефіцієнт завантаження двигуна за часом, приймається для М та ВС – 0,8; ДС та О – 0,6;

K_{ω} – коефіцієнт, що враховує витрати електроенергії в мережі, приймається для М та ВС – 1,04; ДС та О – 1,08;

η_M – ККД електродвигунів [63, табл. 7.7];

$\Pi_{\text{ел}}$ – ціна 1 $\text{кВт}\cdot\text{год}$ електроенергії, приймається 2,35 $\text{грн}/\text{кВт}\cdot\text{год}$ (за даними ПАТ “Червона зірка”, 2016 р.)

4. Витрати на ремонт устаткування, грн

$$B_{\text{рем}} = \frac{(W_M \cdot R_M + W_e \cdot R_e) \cdot t_{\text{шт. } i}}{T_{p.ц.} \cdot 60} \quad (\text{П.6})$$

де W_M , W_e , $W_{\text{ел}}$ – витрати на всі види ремонту за ремонтний цикл [63, табл. 7.21];

R_M , R_e , $R_{\text{ел}}$ – умовна ремонтна складність відповідно механічної, електричної та електронної частини устаткування [63, табл. 8.1...8.3];

$T_{p.ц.}$ – тривалість міжремонтного циклу [63, табл. 7.4, 7.5].

5. Витрати на амортизацію універсального устаткування

$$B_{\text{ам. об.}} = \frac{C_{\text{б}} \cdot H_{a. \text{відр.}} \cdot t_{\text{шт. } i}}{\Phi_{\text{д.о.}} \cdot \lambda_{\text{н}} \cdot 100 \cdot 60}, \quad (\text{П.7})$$

де $C_{\text{б}}$ – балансова вартість обладнання, грн ;

$H_{a. \text{відр.}}$ – норма амортизаційних відрахувань, приймається 12 %;

$\Phi_{\text{д.о.}}$ – дійсний річний фонд часу роботи обладнання ;

$\lambda_{\text{н}}$ – нормативний коефіцієнт завантаження обладнання за часом .

6. Витрати на експлуатацію приміщень

$$B_{\text{еп}} = \frac{S_{\text{в.пп}} \cdot K_f \cdot C_{\text{кг}} \cdot t_{\text{шт. } i}}{\Phi_{\text{д.о.}} \cdot \lambda_{\text{н}} \cdot 60}, \quad (\text{П.8})$$

де $S_{\text{в.пп}}$ – виробнича площа в плані, що зайнята одиницею устаткування, м^2 , приймається за [63, табл. 8.1...8.3];

K_f – коефіцієнт, що враховує додаткову виробничу площу (на проходи, проїзди, побутові та службові приміщення), приймають за табл. П.12

Таблиця П.12

$S_{\text{в.пп}}, \text{ м}^2$	До 2	2-4	4-6	6-10	10-20	20 і більше
K_f	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5

$C_{\text{кг}}$ – річні витрати, пов'язані з використанням 1 м^2 виробничої площі, $\text{грн/м}^2 \cdot \text{рік}$, величина $C_{\text{кг}}$ складає для О та ДС – 438; для ВС та М – 438.

7. Витрати на стиснене повітря

$$B_{\text{с.пов}} = Q_{\text{с.пов}} \cdot \Pi_{\text{с.пов}} \cdot K_{\text{ТВ}} \cdot \frac{t_{\text{шт.і}}}{60}, \quad (\text{П.9})$$

де $Q_{\text{с.пов}}$ – витрати стисненого повітря, $\text{м}^3/\text{год}$;

$\Pi_{\text{с.пов}}$ – ціна 1 м^3 стисненого повітря, прийнято $0,8 \text{ грн/м}^3$;

$K_{\text{ТВ}}$ – коефіцієнт, що враховує тип виробництва, для ДС – 0,85; для М – 1,15.

8. Витрати на воду

$$B_{\text{вод}} = Q_{\text{вод}} \cdot \Pi_{\text{вод}} \cdot K_{\text{ТВ}} \cdot \frac{t_{\text{шт.і}}}{60}, \quad (\text{П.10})$$

де $Q_{\text{вод}}$ – витрата води, $\text{м}^3/\text{год}$;

$\Pi_{\text{вод}}$ – ціна 1 м^3 води, прийнято 13 грн/м^3 .

9. Витрати на електроди вольфрамові

$$B_{\text{ел.вфр}} = Q_{\text{ел.вфр}} \cdot \Pi_{\text{ел.вфр}} \cdot \frac{t_{\text{шт.і}}}{60}, \quad (\text{П.11})$$

де $Q_{\text{ел.вфр}}$ – витрата вольфрамового електрода гр/м ;

$\Pi_{\text{ел.вфр}}$ – ціна 1 гр вольфрамового електрода, грн/гр .

10. Витрати на електроди графітові

$$B_{\text{ел.гр}} = Q_{\text{ел.гр}} \cdot \Pi_{\text{ел.гр}} \cdot h_{\text{ел.гр}} \cdot \Pi, \quad (\text{П.12})$$

де $Q_{\text{ел.гр}}$ – витрата графітового електрода мм/хв (приймається 0,05);

$\Pi_{\text{ел.гр}}$ – ціна 1 гр графітового електрода, грн/гр ;

$h_{\text{ел.гр}}$ – питома вага графіту, гр/мм^3 ;

Π – площа робочої поверхні електрода, мм^2 .

11. Витрати на кисень

$$B_{O_2} = Q_{O_2} \cdot \Pi_{O_2} \cdot \frac{t_{\text{шт.і}}}{60}, \quad (\text{П.13})$$

де Q_{O_2} – витрата кисню (залежить від товщини металу) $кг/год$;

Π_{O_2} – ціна кисню, $грн/кг$.

12. Витрати на гелій

$$B_{He} = Q_{He} \cdot \Pi_{He} \cdot \frac{t_{шт. i}}{60}, \quad (П.14)$$

де Q_{He} – витрата гелію, $кг/год$;

Π_{He} – ціна гелію, $грн/гр$.

13. Витрати на азот

$$B_{N_2} = Q_{N_2} \cdot \Pi_{N_2} \cdot \frac{t_{шт. i}}{60}, \quad (П.15)$$

де Q_{N_2} – витрата азоту, $кг/год$;

Π_{N_2} – ціна азоту, $грн/гр$.

14. Витрати на вуглекислоту

$$B_{CO_2} = Q_{CO_2} \cdot \Pi_{CO_2} \cdot \frac{t_{шт. i}}{60}, \quad (П.16)$$

де Q_{CO_2} – витрата вуглекислоти, $кг/год$;

Π_{N_2} – ціна азоту, $грн/гр$.

15. Витрати на робочу рідину

$$B_{p.рід.} = Q_{p.рід.} \cdot \Pi_{p.рід.} \cdot \frac{t_{шт. i}}{60}, \quad (П.17)$$

де $Q_{p.рід.}$ – витрата робочої рідини, $кг/рік$;

$\Pi_{p.рід.}$ – ціна робочої рідини, $грн$.

П.3.2. Постійні витрати

1. Витрати на налагодження

$$Z_{\text{нал}} = A \cdot L_{\text{год.нал } i} \cdot \frac{t_{\text{п.з. } i}}{60} \cdot (1 + K_{\text{пр}} + K_{\text{д}} + K'_{\text{д}}) \cdot (1 + \frac{K_{\text{с}}}{100}), \quad (\text{П.18})$$

де A – кількість партій, що відповідає кількості переналагоджень на рік;

$L_{\text{год.нал } i}$ – годинна тарифна ставка наладчика, *грн/год*;

$t_{\text{п.з. } i}$ – підготовчо-заключний час на даній операції, *хв*.

2. Витрати на штампи на річну програму

$$Z_{\text{ш}} = \frac{Ц_{\text{ш}} + p \cdot C_{\text{ш}}}{T_{\text{сл}}} \cdot (1 + b), \quad (\text{П.19})$$

де $Ц_{\text{ш}}$ – первинна вартість штампа, *грн*;

$C_{\text{ш}}$ – ціна однієї переточки, *грн*;

p – кількість переточок;

$T_{\text{сл}}$ – строк служби, протягом якого штамп повинен бути списаний;

b – кількість дублерів.

3. Витрати на амортизацію засобів механізації та автоматизації

$$B_{\text{а.сп.}} = \frac{C_{\text{б}} \cdot H_{\text{а.р.}}}{100}, \quad (\text{П.20})$$

де $C_{\text{б}}$ – балансова вартість пристрою, *грн*. $Q_{\text{р.рід.}}$ $Ц_{\text{р.рід.}}$

АСТРА-С**АСТРА - С**

25011, Кіровоград, вул.Генерала Родимцева,83а
 ТЕМ/ФАКС (0522) 220522, 225735, 244931
 р/р 2600401551370 у Кіровоградському відділенні Укресімбанку, МФО 323389
 код ЗКПО 30285899, інд. под. номер 302858911236, свід. платника ПДВ № 15222867

исх. № 25 big 19.02.2015

Затверджую

Директор ТОВ АСТРА-С

В.В. Смірнов

20__р.

**АКТ**

про використання результатів досліджень, виконаних в
 дисертаційній роботі Савеленка Г.В.

Цим актом засвідчується, що результати, отримані в кандидатській дисертації Савеленка Григорія Володимировича «Автоматизація процесу керування подачею електрода-інструмента при розмірній обробці дугою», використані в ТОВ АСТРА-С при розробці систем керування електромеханічних приводів подач.

Зокрема передбачено використання:

- системи позиціонування при керуванні електродвигуна постійного струму;
- раціональних по швидкодії алгоритмів керування електромеханічних приводів подачі;
- аналізу динаміки електромеханічної системи на збурювальні дії навантаження.

Головний конструктор,
 АСТРА-С, м. Кіровоград

Ю.В. Лебедєв

PROFESSIONAL DESIGN AGENCY

УКРАЇНА, 25004,
м. Кіровоград, вул. Острівська, 2, кorr. 2
тел./факс: (0522) 22-38-10, 23-20-93

Art-Салон
ДИЗАЙН-ЦЕНТР

Вих. № 60 від 15.06. 2015 р.
на № _____

АКТ

про використання результатів досліджень,
виконаних в дисертаційній роботі Савеленка Г.В.

Цим актом засвідчується, що результати, отримані в кандидатській дисертації Савеленка Григорія Володимировича «Автоматизація процесу керування подачею електрода-інструмента при розмірній обробці дугою», використані в ПП «ДЦ Арт-Салон» при розробці систем керування електромеханічних приводів подач.

Зокрема були використані:

- раціональні по швидкодії алгоритми управління приводами подач верстатів і механізмів з використання програного логічного контролера;
- вимірювальний програмно-технічний комплекс для відпрацювання осцилограм струмів двигунів механізмів з ціллю визначення резонансних частот за допомогою спектрального аналізу.

Це дозволило збільшити надійність обладнання.

Директор

ПП «ДЦ Арт-Салон»



[Handwritten signature]

Г.А. Шульга

ПАТ "ЗАВОД СЕГМЕНТ"



25011, Кіровоградська обл. м. Кіровоград вул. Генерала Родимцева, 83 тел./факс (0522) 22 – 28 – 94

№ 47 від 23.04.2015.

АКТ

про використання результатів досліджень, виконаних в дисертаційній
роботі Савеленка Г.В.

Цим актом засвідчується, що результати, отримані в кандидатській дисертації Савеленка Григорія Володимировича «Автоматизація процесу керування подачею електрода-інструмента при розмірній обробці дугою», використані на ПАТ «Завод «Сегмент» при впровадженні електроерозійного верстата для забезпечення ефективності виробництва при виготовленні штампів та матриць.

Зокрема передбачено використання:

- раціональних по швидкодії алгоритмів управління приводами подач верстатів і механізмів з використанням програмного логічного контролера;
- комбінованої побудови регуляторів з використанням релейного та широтно-імпульсного способів регулювання;
- програмно-технічного вимірювального комплексу для відпрацювання осцилограм технологічних параметрів механізмів з ціллю визначення резонансних частот за допомогою спектрального аналізу.

Голова правління ПАТ «Завод «Сегмент»,
м. Кіровоград



Є.І. Федоренко

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

О.М.Левченко

(підпис)

“ 12 ” 05

20 17 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор

В.М.Кропівний

(підпис)

“ 05 ” 20 17 р.

А К Т

про використання у навчальному процесі результатів дисертаційної роботи

Савеленка Григорія Володимировича

на тему «Автоматизація процесу керування подачею електрода-інструмента при розмірній обробці дугою»

Акт складений у тому, що результати, отримані в дисертаційній роботі Савеленка Г.В., використовуються в навчальному процесі на підставі рішення кафедри автоматизації виробничих процесів (протокол засідання кафедри № 14 від 26.04.2017 року).

Результати використовуються при виконанні практичних робіт з курсу дисципліни «Приводи в системах автоматики» для студентів спеціальності 151 – Комп'ютеризовані системи управління та автоматика (освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр)

Начальник навчального відділу

Л.І. Кондратець

Завідувач кафедри АВП

С.І. Осадчий



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **110050** (13) **C2**
 (51) МПК

B23H 7/26 (2006.01)
B23H 7/32 (2006.01)
B23H 1/02 (2006.01)
B23H 7/18 (2006.01)
G05B 13/02 (2006.01)
H05B 7/152 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ
 УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(21) Номер заявки: а 2013 11270 (22) Дата подання заявки: 23.09.2013 (24) Дата, з якої є чинними права на винахід: 10.11.2015 (41) Публікація відомостей про заявку: 10.12.2014, Бюл.№ 23 (46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.11.2015, Бюл.№ 21	(72) Винахідник(и): Савеленко Григорій Володимирович (UA), Єрмолаєв Юрій Олексійович (UA) (73) Власник(и): КІРОВОГРАДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, пр. Університетський, 8, м. Кіровоград, 25006 (UA) (56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: UA 12713 C1, 28.02.1997 SU 142142, 1961 SU 348318, 23.08.1972 EP 0280735 A1, 07.09.1988 US 2004140226 A1, 22.07.2004 US 4709131 A, 24.11.1987 US 2004238498 A1, 02.12.2004 SU 921740, 23.04.1982
---	---

(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ПРОЦЕСУ ЗАПАЛЮВАННЯ ДУГИ ТА ЗМІНИ РЕЖИМУ РУХУ ПРИ ХОЛОСТОМУ ХОДІ ЕЛЕКТРОДА-ІНСТРУМЕНТА ВЕРСТАТА РОЗМІРНОЇ ОБРОБКИ ДУГОЮ

(57) Реферат:

Винахід належить до металообробки. Спосіб визначення моменту процесу запалювання дуги та зміни режиму руху при холостому ході електрода-інструмента верстата розмірної обробки стаціонарною дугою полягає у регулюванні міжелектродного проміжку шляхом подачі електрода-інструмента за допомогою команд регулятора міжелектродного проміжку, зв'язаного зворотним від'ємним зв'язком по напрузі джерела живлення дуги та додатковим зворотним від'ємним зв'язком по тиску технологічної рідини в камері електроерозійної головки. По значенню напруги холостого ходу джерела живлення та по мінімальному тиску в камері визначають режим холостого ходу, при якому автоматично збільшують до максимального значення швидкість подачі електрода-інструмента. По збільшенню тиску в камері і відсутності зміни напруги дуги визначають момент процесу запалювання дуги, при якому автоматично зменшують подачу електрода-інструмента до мінімального, робочого значення. Технічним результатом є підвищення динамічних характеристик перехідних режимів способу при одночасному зниженні вірогідності поломки електрода-інструмента при запалюванні дуги.

UA 110050 C2

UA 110050 C2

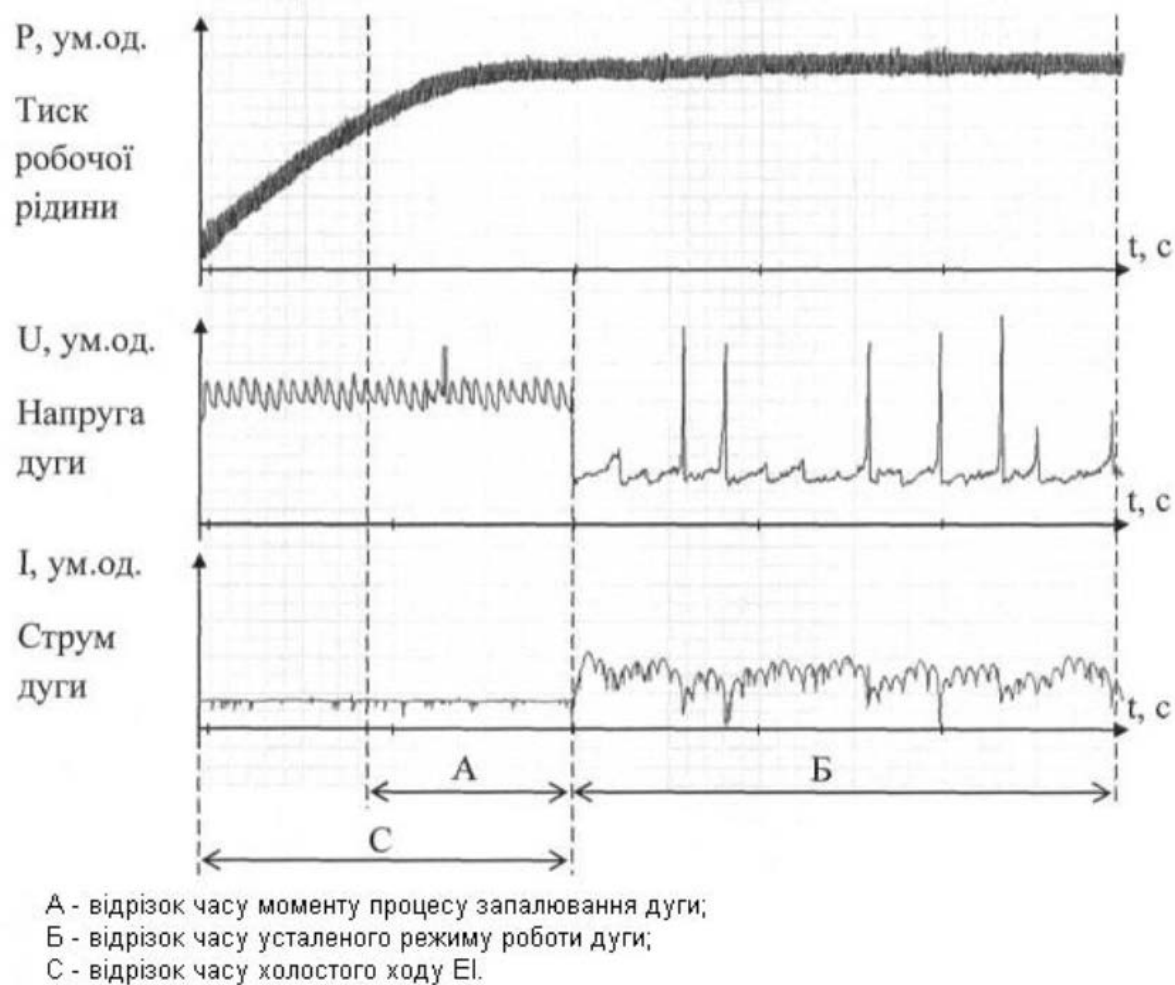


Fig. 2

Винахід належить до галузі спеціальної металообробки, а саме до розмірної обробки електричною дугою і може бути використана в системах автоматичного регулювання міжелектродним проміжком, застосовуваних на верстатах електроерозійної розмірної обробки металів та їх сплавів електричною дугою (РОД).

- 5 Найбільш близьким до технічного рішення, що заявляється, є рішення [А.с. СССР № 142142. Г.И. Алкин. Регулятор подачи для электроэрозионных станков // А.с. СССР № 410370. Е.И. Самецкий. Устройство для регулирования станков при обработке металла электроискровым способом // Лившиц А.Л. Основы экстремального регулирования электроимпульсных станков. М.: ОНТИ ЭНИМС, 1962.-98 с, С. 73]. Характерною особливістю даних регуляторів є те, що процес обробки здійснюється з використанням нестационарних форм електричних розрядів, наприклад електроімпульсних [Электроэрозионная и электрохимическая обработка. Расчет, проектирование и применение электродов-инструментов. Часть 1./Под ред. А.Л. Лившиц, А. Роша. М.:НИИМАШ, 1980.-224 с, С. 7]. Дана особливість суттєво впливає на процес електроерозії, так як електроімпульсні розряди створюються за допомогою спеціальних генераторів імпульсів (ГІ) і процес електроерозії відбувається без етапу запалювання дуги на відміну від застосування стаціонарної дуги, яка використовується при розмірній обробці дугою [Носуленко В.І. Розмірна обробка металів електричною дугою: Автореферат дис. д-ра. техн. наук: 05.03.07 / Кіровоградський держ. техн. ун-т. - Київ: 1999.-36 с]. Процесу запалювання стаціонарної дуги при РОД передують коротке замикання в міжелектродному проміжку, а далі процес електроерозії контролюється, в більшості випадків, по напрузі дуги в міжелектродному проміжку.

- Недоліком відомого рішення є його нездатність змінювати швидкість подачі електрода-інструмента (ЕІ) до мінімального заданого значення в момент запалювання дуги, який відбувається в процесі короткочасного з'єднання ЕІ з деталлю, що підлягає обробці, і до максимального заданого значення при великих відстанях між ЕІ і деталлю (холостий хід). Дана зміна швидкості необхідна для збереження цілісності форми крихкого ЕІ, наприклад, графітового, і пом'якшення збурюючої дії по навантаженню на систему стабілізації процесу РОД та покращення динамічного режиму запуску. Вирішення даної задачі і є предметом розгляду даного патенту.

- 30 Поставлена задача реалізується наступним чином: у відомий пристрій, який складається з Г- або П-подібної станини, електроерозійної головки АМН-1, що живиться струмом від звичайного зварювального випрямляча, та технологічної рідини від станції подачі робочої рідини, а подача електрода-інструмента здійснюється за допомогою електромеханічного привода подачі, що керується регулятором міжелектродного проміжку, зв'язаним зворотним зв'язком по напрузі дуги. Додатково введені: датчик тиску технологічної рідини та задатчик тиску, сигнали з яких порівнюються на блоці порівняння, і сигнал неузгодженості потрапляє на вхід регулятора міжелектродного проміжку (МЕП).

- Нові ознаки дозволяють розширити можливості регулятора міжелектродного проміжку шляхом введення зворотного зв'язку по тиску технологічної рідини в камері електроерозійної головки. Стає можливим визначати час моменту запалювання електричної дуги та збільшити подачу ЕІ при холостих режимах.

- На фіг. 1 представлена блок-схема пропонованого застосування. Застосування складається з привода подачі ЕІ 1, регулятора МЕП 2, станції подачі технічної рідини 3, електроерозійної головки АМН-1 4, датчика тиску 5, пристрою порівняння 6, джерела стаціонарної дуги 7, датчика 8.

Застосування працює наступним чином.

- Процесу запалювання передують наступні дії. Спочатку вмикають станцію подачі робочої рідини, яка створює заданий технологічно (динамічний тиск потоку рідини в зоні обробки не менше 1...2 кПа) потік охолоджуючої та транспортує продукти ерозії рідини. Наступною дією вмикають джерело напруги дуги і паралельно встановлюють на ньому потужність електричної дуги. При цьому між електроодом-інструментом і деталлю існує певний проміжок, заповнений технологічною рідиною, який не дозволяє запалити електричну дугу в міжелектродному проміжку до короткочасного замикання ЕІ на деталь. Електроерозійна головка АМН-1 конструктивно виконана таким чином, що робоча рідина прокачується через ЕІ. Дана особливість призводить до того, що при зменшенні МЕП відбувається зменшення площини каналу, по якому прокачується технологічна рідина, що в свою чергу призводить до підвищення тиску в камері електроерозійної головки. В момент торкання ЕІ і деталі тиск в камері електроерозійної головки буде максимальним і паралельно в цей час відбувається короткочасне коротке замикання джерела дуги через ЕІ та деталь. Через малий проміжок часу (який залежить від конструктивних особливостей привода подачі ЕІ) регулятор МЕП дає

UA 110050 C2

команду приводу подачі на усунення режиму короткого замикання, тобто відводить EI від деталі. В цей час утворюється МЕР, який починає збільшуватись від нульового значення і відбувається загорання електричної дуги. Збільшення МЕР призводить до зменшення тиску технологічної рідини в камері до певного значення, так як настає момент, коли регулятор МЕР (згідно з уставкою) або оператор змінюють швидкість подачі EI до значення, яке наближається до швидкості електроерозії деталі. В процесі обробки деталі при РОД середнє значення тиску в камері змінюється декілька разів і по ньому можливо визначити, якому моменту циклу обробки відповідає значення тиску.

На початку циклу до запалювання дуги МЕР максимальний, що відповідає мінімальному значенню тиску в камері. В момент часу запалювання електричної дуги тиск в камері максимальний, а в процесі обробки деталі він зменшується і приймає значення задане технологічно. Якщо відбудеться коротке замикання в процесі обробки деталі і робочий режим не стабілізувався, то регулятор МЕР відводить EI від деталі, збільшуючи при цьому МЕР. Якщо відбувся обрив дуги, то процес електроерозії відновиться починаючи з її запалювання. Процес буде продовжуватись доти, поки не буде досягнута задана глибина обробки деталі. На фіг.2 наведена типова діаграма процесу зміни тиску технологічної рідини, струму і напруги дуги в момент запалювання дуги.

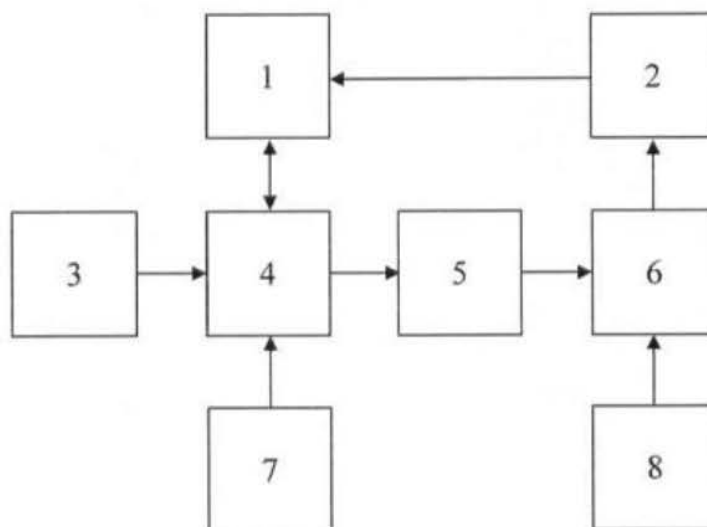
Алгоритмічно в регуляторі МЕР закладається пріоритетність сигналу напруги дуги в МЕР над сигналом значення тиску в камері.

Коливання тиску технологічної рідини дають можливість автоматично визначати момент запалювання електричної дуги та зменшити витрати часу при підводі EI в холостому режимі, що значно підвищить динамічні характеристики перехідних режимів системи в цілому і знизить вірогідність поломки EI при запалюванні дуги.

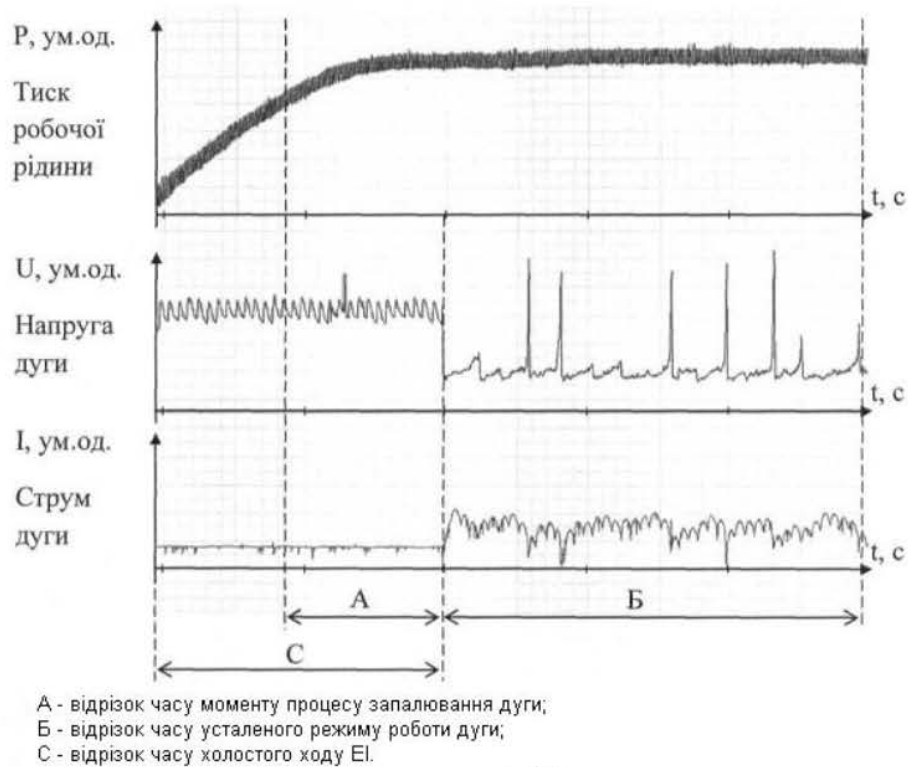
25 ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Спосіб визначення моменту процесу запалювання дуги та зміни режиму руху при холостому ході електрода-інструмента верстата розмірної обробки стаціонарною дугою, при якому регулюють міжелектродний проміжок шляхом подачі електрода-інструмента за допомогою команд регулятора міжелектродного проміжку, зв'язаного зворотним від'ємним зв'язком по напрузі джерела живлення дуги, за рівнем якої визначають напрям подачі електрода-інструмента, а при холостому ході та в момент запалювання перед коротким замиканням дуги змінюють відповідно швидкість подачі електрода-інструмента, який відрізняється тим, що регулятор міжелектродного проміжку забезпечують додатковим зворотним від'ємним зв'язком по тиску технологічної рідини в камері електроерозійної головки, та по значенню напруги холостого ходу джерела живлення та по мінімальному тиску в камері визначають режим холостого ходу, при якому автоматично збільшують до максимального значення швидкість подачі електрода-інструмента, а по збільшенню тиску в камері і відсутності зміни напруги дуги визначають момент процесу запалювання дуги, при якому автоматично зменшують подачу електрода-інструмента до мінімального робочого значення.

UA 110050 C2



Фиг. 1



Фиг. 2

Комп'ютерна верстка Д. Шеверун

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601