

Дульфан Сергей Борисович, директор, департамент транспорта и связи, Харьковский городской совет, Украина.

Лобашов Алексей Олегович, доктор технических наук, профессор, кафедра транспортных систем и логистики, Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова.

Dulfan Sergiy, Kharkov city council, Ukraine, e-mail: dts@citynet.kharkov.ua.

Lobashov Oleksiy, Kharkiv National University of Municipal Economy, Ukraine, e-mail: lobashov61@mail.ru

УДК 681.511.4:004.415.2:621.9.048.4
DOI: 10.15587/2312-8372.2015.36244

**Савеленко Г. В.,
Ермолаев Ю. О.,
Собінов О. Г.,
Гуцул В. І.**

РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО ПРИБОРУ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСА РОЗМІРНОЇ ОБРОБКИ ДУГОЮ

Досліджено програмно-апаратну реалізацію регулятора автоматизованої системи стабілізації процесу розмірної обробки дугою. Запропонований алгоритм стабілізує та підтримує задану стабільність процесу розмірної обробки дугою в зоні горіння дуги при заданих початкових умовах. Розроблена автоматична система керування процесом дозволить замінити застарілу елементну базу системи управління верстатів розмірної обробки дугою, підвищити інформативність та зменшити вплив суб'єктивного фактора на стан процесу.

Ключові слова: стабілізація процесу, розмірна обробка дугою, програмований логічний контролер, подача електрода.

1. Вступ

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. Розмірна обробка дугою (РОД) є різновидом ЕЕО і 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 електричного розряду — електроіскрової та електроімпульсної обробки [1].

Спосіб РОД відбувається лише при відповідних сприятливих умовах, які потребують стабілізації регульованої величини — проміжку між електродами в міжелектродному проміжку (МЕП) при підтриманні інших технологічних параметрів в заданих межах. Для вимірювання МЕП отримали розповсюдження непрямі методи, оскільки їх реалізація є менш витратною. На практиці найчастіше використовується метод вимірювання величини МЕП по величині падіння напруги дуги, так як існує лінійна залежність між даними величинами, що пояснюється в праці [2] та наведено на рис. 1.

Підтримання необхідної величини проміжку в МЕП, що приймає в залежності від режиму обробки значення від сотих до десятків часток міліметра, є достатньо складною технічною задачею. Це обумовлено тим, що МЕП є нестабільною величиною, що безперервно

дискретно змінюється внаслідок дії ряду закономірних і випадкових факторів (електроерозії поверхні електродів, подачі електрода-інструмента, зміни концентрації продуктів ерозії та динамічного тиску технологічної рідини в МЕП та ін.) [3]

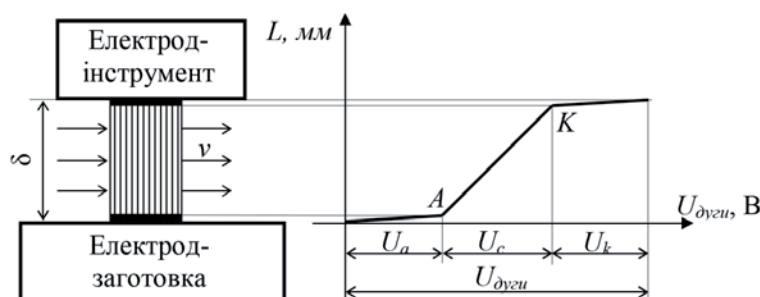


Рис. 1. Параметри електричної дуги при стаціонарному електричному розряді: δ — величина МЕП; U_a , U_c , U_k — відповідно падіння напруги в анодній зоні, в стоплі дуги та в катодній зоні; $U_{дуги}$ — падіння напруги в МЕП; v — швидкість прокачки технологічної рідини; L — довжина дуги

На практиці отримали застосування верстати РОД з гідравлічним та електромеханічним приводами подачі електрода-інструмента (ЕІ). На даний момент, можна виділити певні області раціонального застосування: гідравлічний привод на даний час в основному використовується на великих та середніх верстатах РОД (наприклад, класу «ДУГА 8»); електромеханічний привод доцільно застосовувати на малих верстатах (наприклад, для верстатів класу АМ1).

Авторами [4, 5] розроблений електромеханічний привод подачі електрода-інструмента (ЕІ) для електро-

ерозійного верстату АМН-1. Стабільність процесу електроерозійної обробки є основною умовою отримання високої продуктивності, що можлива при даному режимі обробки, матеріалі і формі електродів, тиску технологічної рідини на вході в МЕР та інших заданих факторах [6]. Тому постає актуальна задача реалізації програмно-апаратного пристрою автоматизованої системи стабілізації процесу розмірної обробки дугою.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В [7] розглянуто поняття стабільності процесу РОД та наведений спосіб її визначення, який був покладений в програмний алгоритм, що показано в даній статті. Нестабільність процесу виражена в недопустимо великих відхиленнях регульованих величин (наприклад, падіння напруги дуги, струму дуги, статичного тиску на вході МЕР, тощо) від заданого значення, що призводить до різкого зниження продуктивності процесу РОД або й зовсім до його припинення. Як показав аналіз робіт [3, 8], на верстатах з гідроприводом і електроприводом подачі ЕІ нестабільність процесу може бути обумовлена наступними основними причинами:

- неправильно встановлені технологічні параметри, а саме: струму дуги та динамічного тиску технологічної рідини, що прокачується через МЕР;
- дестабілізація процесу відбувається під впливом роботи автоматичного регулятора, якщо сума постійних часу процесу РОД і приводу подачі ЕІ більше постійної часу регулятора. Причому зазначимо, що величина постійної часу процесу РОД може змінюватись в процесі обробки деталі.

На характер і ефективність РОД впливає велика кількість чинників: фізико-технологічні характеристики заготовки і інструменту, полярність включення електродів, електричні і часові параметри напруги і струму дуги, гідродинамічний режим обробки (динамічний тиск робочої рідини P_d , або статичний тиск робочої рідини $P_{ст}$), параметри оточуючого середовища. У зв'язку з умовами обробки, вихідні характеристики процесу змінюються в широких межах. Це впливає на якість і продуктивність обробки виробу.

Автор способу РОД Носуленко В. І. в [2] доводить, що електрична дуга володіє своїм електричним опором, який залежить від зовнішніх умов і параметрів розряду, і таким чином електричний опір дуги є функцією багатьох змінних. Електрична дуга має нелінійну статичну характеристику, тобто між струмом і напругою немає пропорційного зв'язку. Зокрема, напруга дуги розподіляється по довжині дуги нерівномірно, як це показано на рис. 1. При цьому в катодній і анодній областях дуги опір значний, а в стовпі дугового розряду на порядок менший. Сумарне значення катодного і анодного падіння напруги складає 10...20 В.

Для контролю за характером стабільності процесу використовують значення падіння напруги дуги на її лінійній ділянці АК (рис. 1).

Напрацьовані дослідження процесу РОД у більшості випадків стосуються технологічних методів отримання відповідних параметрів деталей і вимагають від оператора устаткування РОД постійного візуального контролю за ходом технологічного процесу [9].

Проблемою підтримки режиму горіння дуги при РОД займалися Смірнова Н. В., Смірнов В. В. в [10–12], 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 [13], то вибір значень на кінцях інтервалу, які є випадковою величиною, можуть дати помилкове значення коефіцієнту нестабільності. На думку авторів статті, доцільним при розрахунку даного коефіцієнту була б обробка необхідної довжини вибірки даних за допомогою статистичних методів. Також 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 призводить до незадовільної якості статистичного відстеження процесу, тому що в даному випадку розглядається вибірка розміром 2 мс, яка є недостатньою для адекватного опису процесу на даній ділянці обробки. Окрім цього, побудова програмно-апаратного пристрою (закон управління якого буде описаний по даному методу), який повинен буде виробляти керуючий вплив за малий час вибірки, буде вимагати високої швидкодії приводу подачі, що не відповідає реальному часу постійної приводу та процесу РОД, які вимірюються в секундах.

В [14] розглянуто аналіз перехідного і сталого процесу РОД металів непрофільним електродом і встановлено, що продуктивність обробки не залежить від твердості та в'язкості металу.

Існуючі системи автоматичного керування (САК) розроблені в одиничних екземплярах і інформація про їх конструктивні особливості відсутня в наукових виданнях. Часто виявляється, що дані системи налаштовуються тільки при розробці верстата, мають індивідуально розроблену схему управління, а керування верстатом відбувається по жорсткій або програмованій логіці [15], що ускладнює зміну алгоритму його керування.

Найближчим сучасним зарубіжним аналогом САК для переміщення ЕІ є такі системи, як ARCOS і SIMELT (Siemens VAI), HI-REG (Danieli), EMPERE (Amec Spie) та інші, але їх структура, принципи роботи та математичні моделі в літературі практично не освітлені [16], а також їх висока вартість обмежує їх використання на верстатах РОД.

Тому в даній роботі обґрунтовується функціональна схема системи стабілізації процесу РОД з врахуванням нелінійності дуги [2] та пропонується її програмно-апаратна реалізація на базі сучасного контролера.

3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єктом дослідження є система управління подачі електрода-інструмента електромеханічним приводом для процесу розмірної обробки дугою на базі програмованого логічного контролера.

Метою дослідження була розробка функціональної структури програмної частини програмно-апаратного пристрою та перевірка працездатності його реалізації, яка виробляє керуючі сигнали автоматизованому

електроприводу подачі електрода-інструмента на електроерозійному верстаті типу АМН-1.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні основні задачі:

- розробити математичну систему рівнянь, які необхідні для формування законів керування процесом РОД;
- скласти програмний алгоритм та його реалізацію на базі сучасного контролера і перевірити його працездатність по стабілізації процесу РОД.

4. Матеріали та методи дослідження конструкції та роботи програмно-апаратного пристрою автоматизованої системи стабілізації процесу РОД

4.1. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувались в експерименті. Дослідження проводились на електроерозійному верстаті типу АМН-1 з електро-механічним приводом подачі ЕІ. Конструктивні особливості верстату описані в роботах [4, 5]. Результати експериментальних досліджень були отримані за допомогою інформаційно-вимірювального комплексу, який описаний в роботі [17].

В якості робочої рідини використовувалась суміш гасу і масла «Індустріальне-12» у співвідношенні 1:1; матеріал ЕІ був вибраний графіт з марки МПГ 7; в якості матеріалу електрода-заготовки (ЕЗ) вибраний метал марки Ст3сп згідно 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 МЕР $P_{ст} = 5...10$ атм. У всіх проведених дослідах, що висвітлюються в даній статті, використовувалась зворотна полярності електродів («+» на ЕІ, «-» на ЕЗ).

Апаратним пристроєм програмованого логічного контролера (ПЛК) вибрана сучасна плата з LCD екраном марки STM32F429I-DISCO на базі 32 розрядного контролера STM32F429ZI [18].

4.2. Розробка функціональної схеми програмних модулів, що реалізують стабілізацію процесу РОД. В наведеній на рис. 2 функціональній схемі використовується спосіб визначення стабільності параметрів дуги, наведений в [7].

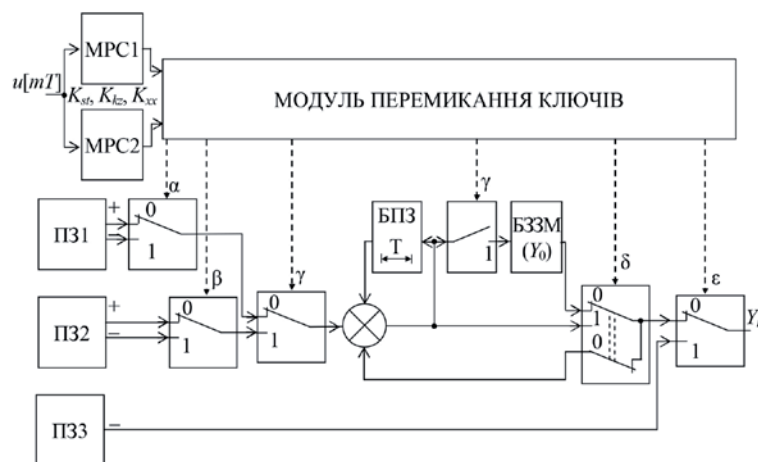


Рис. 2. Функціональна схема роботи програмних модулів ПЛК

За даним способом для визначення стабільності параметрів дуги, необхідно в якості вхідної інформації для ПЛК використовувати вибірки миттєвого значення падіння напруги дуги $u[mT]$. Вихідним сигналом ПЛК є значення напруги завдання Y_i , яке подається на вхід комплектного електропривода, який керує швидкістю подачі ЕІ. Вихідний сигнал ПЛК змінює швидкість подачі ЕІ після обробки кожної вибірки даних, що поступають з об'єкта управління (електрична дуга).

Розглянемо роботу програмних модулів ПЛК більш детально. Вхідний сигнал ПЛК $u[mT]$ поступає на модуль розрахунку стабільності (МРС1 і МРС2), де розраховуються коефіцієнти K_{xx} , K_{st} , K_{kz} , що характеризують відповідно приналежність точок миттєвого значення вхідного сигналу до зон холостого ходу, стабільності та короткого замикання. Детально спосіб розрахунку коефіцієнтів розглянутий в роботі [7]. Значення коефіцієнтів поступають на модуль перемикачів ключів (МПК), який керується їх значенням, перемикає ключі (α , β , γ , δ , ϵ) в стан «1» або «0». Стан ключів МПК і їх відповідність стану процесу РОД наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Стан модуля перемикачів ключів і їх відповідність станам процесу РОД

№	Стан процесу	Стан модуля перемикачів ключів				
		α	β	γ	δ	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

В алгоритмі роботи ПЛК використовується дводіапазонний режим роботи. Вибір межі діапазонів залежить від матеріалу електрода-інструмента (ЕІ) і електрода-заготовки (ЕЗ), режиму обробки (чистова або чорнова), режиму прокачки (пряма або обернена) та інших факторів. По замовченню для першого діапазону, за яким працює МРС1, вибрані межі: нижня — 15 В, верхня — 50 В.

Для МРС2, що розраховує коефіцієнти по межах другого діапазону, вказується величина інтервалу горіння дуги (розмах падіння напруги дуги), яка по замовченню складає 10 В. Причому для МРС2 зона стабілізації визначається на кожній ітерації, як середнє значення напруги дуги за період \pm половина вибраного інтервалу горіння дуги при налаштуванні. Перемикачів ключів змінює величину кроку (встановлюється програмними задатчиками ПЗ1, ПЗ2, ПЗ3, як відсоток від значення подачі при максимально досягнутій стабільності) подачі ЕІ при роботі на першому діапазоні на $\pm 0,83$ %; при роботі на другому діапазоні на $\pm 0,42$ % (значення відсотків встановлено експериментально і може змінюватись за допомогою програмного інтерфейсу ПЛК при налаштуванні). Значення кроку з відповідним знаком складається з значенням на попередньому циклі, яке надходить від блока постійної затримки (БПЗ) і їх результуюча

буде вихідною величиною ПЛК. А при розрахунку на першому циклі роботи ПЛК або після короткого замикання, значення на попередньому циклі (Y_0) надходить з блоку запам'ятовування завдання максимуму (БЗЗМ), в якому зберігається значення вихідної напруги ПЛК при максимально досягнутій стабільності процесу. Вихідна величина ПЛК Y_i при короткому замиканні формується з напруги ПЗЗ, яка забезпечує реверс привода подачі ЕІ до закінчення режиму короткого замикання. При стабілізації процесу РОД в першому діапазоні горіння ($K_{stI} > 0,95$), алгоритм починає стабілізувати параметри в другому діапазоні. Таким чином, реалізується досягнення максимально можливої стабільності процесу РОД при даних параметрах струму дуги та швидкості прокачки технологічної рідини.

Розроблений математичний закон управління ПЛК можна представити наступною системою нерівностей:

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{MPC1} = \begin{cases} K_{xxI} = \frac{1}{m} \sum_{u_n > 50} \Theta(u_n), \\ K_{stI} = \frac{1}{m} \sum_{20 \leq u_n \leq 50} \Theta(u_n), \\ K_{kzI} = \frac{1}{m} \sum_{u_n < 20} \Theta(u_n), \end{cases} \\
 \text{MPC2} = \begin{cases} K_{xxII} = \frac{1}{m} \sum_{u_n > \bar{u} + 5} \Theta(u_n), \\ K_{stII} = \frac{1}{m} \sum_{\bar{u} - 5 \leq u_n \leq \bar{u} + 5} \Theta(u_n), \\ K_{kzII} = \frac{1}{m} \sum_{u_n < \bar{u} - 5} \Theta(u_n), \end{cases} \\
 \text{MPK} = \begin{cases} \alpha = \begin{cases} 0, K_{xxI} > K_{kzI} \text{ and } K_{stI} < 0,95, \\ 1, K_{xxI} < K_{kzI} \text{ and } K_{stI} < 0,95, \end{cases} \\ \beta = \begin{cases} 0, K_{xxII} > K_{kzII} \text{ and } K_{stII} > 0,95, \\ 1, K_{xxII} < K_{kzII} \text{ and } K_{stII} > 0,95, \end{cases} \\ \gamma = \begin{cases} 0, K_{stI} < 0,95 \text{ or } K_{stII} < 0,5, \\ 1, K_{stII} \geq 0,95, \end{cases} \\ \delta = \begin{cases} 0, \text{The first cycle of the controller or} \\ \text{the first cycle after the short circuit,} \\ 1, \text{The second and subsequent cycles of the controller or} \\ \text{the second and subsequent cycles after the short circuit,} \end{cases} \\ \varepsilon = \begin{cases} 0, K_{kzI} < 1, \\ 1, K_{kzI} = 1, \end{cases} \\ Y_i = \begin{cases} \varepsilon = 0, Y_{i-1} \pm \Delta Y_i, \\ \varepsilon = 1, -k, \end{cases} \end{cases} \end{array} \right\} \quad (1)$$

де $\bar{u} = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m u_n$; m — кількість значень в одній вибірці;

K_{xxI} , K_{stI} , K_{kzI} — відповідно коефіцієнти, які характери-

зують приналежність значень у вибірці до зони холостого ходу, зони стабільного горіння та зони короткого замикання для першої ступені стабілізації; K_{xxII} , K_{stII} , K_{kzII} — відповідно коефіцієнти, які характеризують приналежність значень у вибірці до зони холостого ходу, зони стабільного горіння та зони короткого замикання для другої ступені стабілізації; Y_{i-1} — значення виходу ПЛК на попередньому циклі обробки; ΔY_i — значення наруги, на яке збільшується або зменшується значення Y_{i-1} при формуванні вихідного сигналу ПЛК на поточному циклі обробки; k — значення опорної напруги ПЗЗ, величина якої відповідає напрузі реверсу електропривода; $\Theta(x)$ — функція Хевісайда, яка наведена в (2).

$$\Theta(x) = \begin{cases} 1, \text{ при } x \geq 0, \\ 0, \text{ при } x < 0. \end{cases} \quad (2)$$

Вхідну величину ПЛК можна описати наступною системою нерівностей:

$$u_n = \begin{cases} u_s = u_s - L di/dt - Ri, \\ u_n = u_0 + El + S_a i, \\ u_s = u_{xx} + S_s i, \end{cases} \quad (3)$$

де u_s — напруга джерела живлення, В; L — повна індуктивність ланцюга РОД, Гн; R — сумарний активний опір ланцюга, Ом; i — струм ланцюга, А; u_0 — сума приєктродних 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.

4.3. Розробка програмної реалізації ПЛК.

Згідно функціональної схеми рис. 2 та залежності (1) складений алгоритм роботи ПЛК, спрощений вигляд якого наведений на рис. 3.

В середовищі СооСоХ на мові програмування С у відповідності з програмним алгоритмом реалізоване програмне забезпечення на базі відлагодженої плати STM32F429I-DISCO.

На рис. 4 зображений зовнішній вигляд ПЛК.

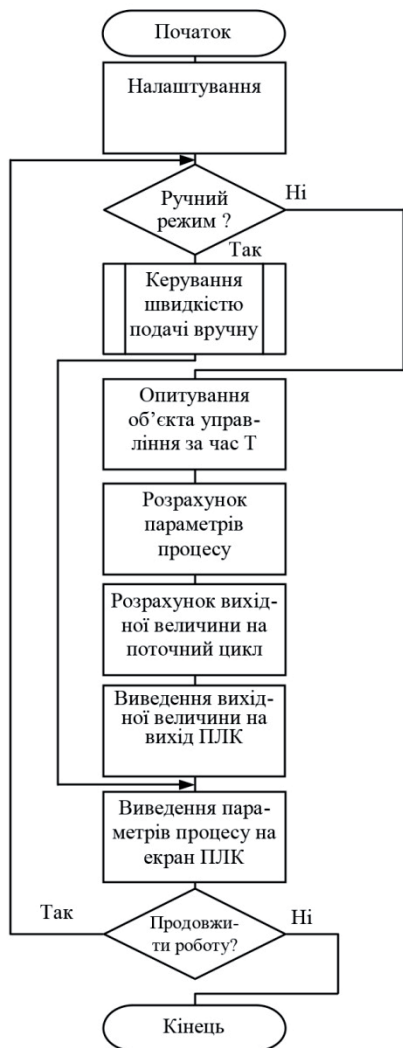


Рис. 3. Програмний алгоритм роботи ПЛК



а

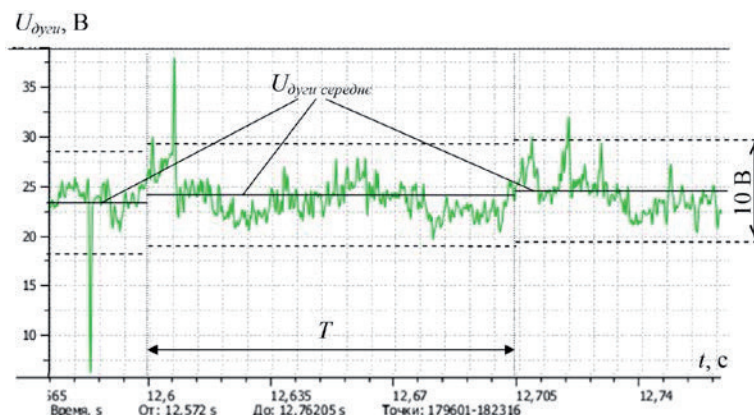


б

Рис. 4. Загальний вигляд ПЛК: а — складові частини; б — в зборі

5. Результати досліджень роботи системи стабілізації

На підставі проведених експериментів було встановлено, що при стабільному процесі ($K_{stII} > 0,95$) характер миттєвих значень напруги дуги матиме вигляд, подібний наведеному на рис. 5, на якому показано зміщення зон стабільного горіння дуги при роботі ПЛК.

Рис. 5. Зміна амплітуди усередненої напруги дуги при стабільному процесі РОД: T — час ітерації регулятора

Авторами статті було визначено, що зменшення амплітуди коливання миттєвого значення напруги за рахунок зміни швидкості подачі ЕІ призводить до збільшення стабільності процесу РОД і при сталому процесі різниця амплітуди коливань напруги дуги не перевищує 10 В.

Стабілізація процесу горіння дуги в заданих межах відбувається за рахунок регулювання швидкості подачі ЕІ до значення, близького до швидкості електроерозії металу. В залежності від значення коефіцієнтів $K_{хв1}$, K_{st1} , K_{kz1} , $K_{хв2}$, K_{st2} , K_{kz2} , які розраховуються програмними модулями MPC1 і MPC2 (рис. 2), по (1)–(2) визначається «знак», за допомогою якого збільшується або зменшується швидкість подачі на один крок. Значення кроку залежить від матеріалів ЕІ та ЕЗ.

На рис. 6 наведені осцилограми стабільного процесу РОД, параметри якого стабілізовані за допомогою розробленого ПЛК.

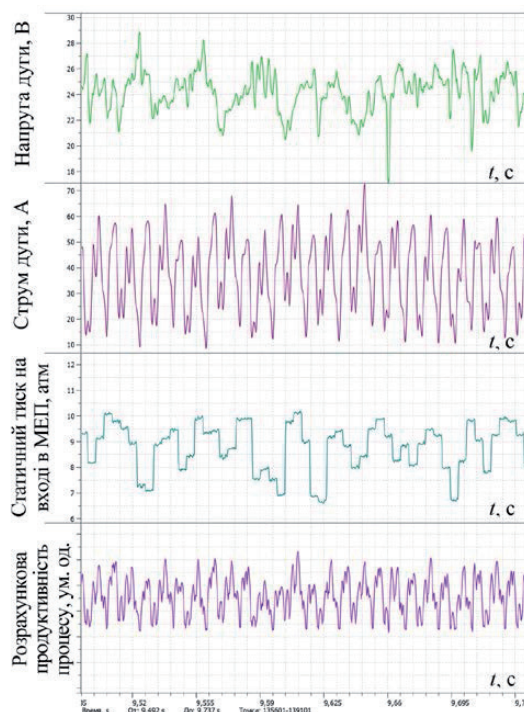


Рис. 6. Осцилограми стабільного процесу РОД

6. Обговорення результатів дослідження автоматизованої системи стабілізації процесу РОД

Отримані результати доводять правильність запропонованих моделей і алгоритмів, що підтверджується проведеними натурними випробуваннями на верстаті АМН-1. За допомогою користувацького інтерфейсу є можливість виконати: швидко переналадку ПЛК на роботу в новому діапазоні горіння дуги при різних інтервалах стабілізації, встановити величину кроків на першому і другому діапазоні роботи ПЛК. Також є можливість змінювати алгоритм роботи програми ПЛК шляхом її перепрошивки по USB-порту.

Також було встановлено, що зменшення амплітуди коливання миттєвого значення напруги до інтервалу в 10 В і менше, призводить до стабілізації процесу РОД. Це досягається шляхом вирівнювання швидкостей подачі ЕІ та електроерозії ЕЗ, що створює таку величину МЕР, при якій значення напруги стовпа дуги відповідає значенню U_c напруги дуги на відрізку АК (рис. 1).

Стабілізація процесу горіння дуги починається, коли напруга стовпа дуги лежить на відрізку АК (рис. 7). Загальновідомо, що зміна миттєвого значення напруги дуги є стохастичним процесом, тому стабілізація параметрів дуги може відбутися в будь-якій точці (U_1, U_2, \dots, U_n) відрізка АК, як це показано на рис. 7.

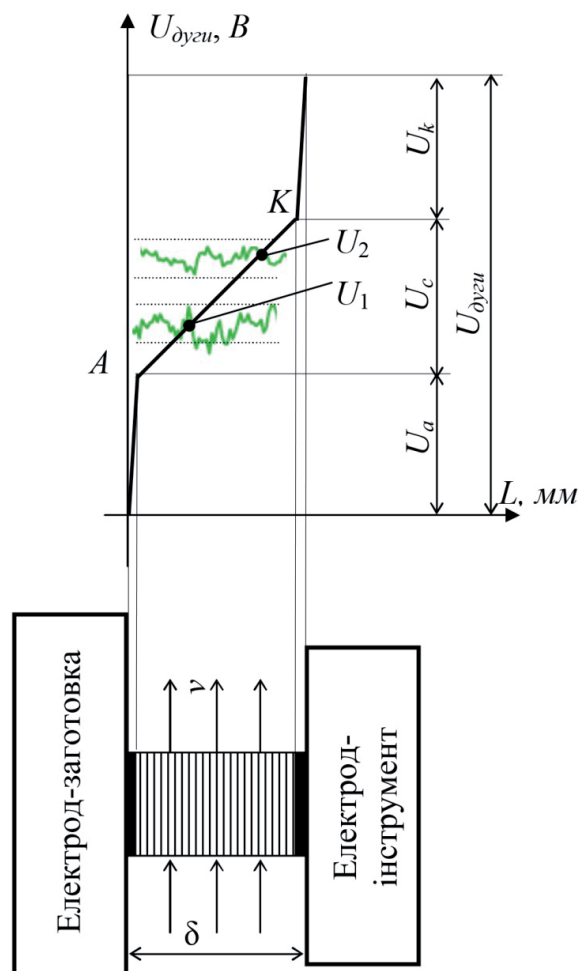


Рис. 7. Стабілізація дуги при стаціонарному електричному розряді

Також розроблену систему стабілізації, що реалізована на основі ПЛК, можна використовувати, як прилад, що показує рівень стабільності процесу РОД. Використання даного приладу на інших верстатах РОД спрощує налаштування стабільного режиму горіння дуги для оператора-верстатника.

Перспективним напрямом є дослідження і реалізація комплексної автоматизації всіх процесів на верстатах РОД.

7. Висновки

Проведені дослідження показують, що розроблений програмно-апаратний пристрій виконує стабілізацію процесу РОД в інтервалі горіння дуги (відрізок АК, рис. 7). Автоматизована система стабілізації процесу горіння дуги при РОД забезпечує обробку деталі з мінімальною кількістю режимів короткого замикання і обриву дуги, що зменшує час обробки деталі.

Разом з тим, дану систему можна розглядати, як одну з складових частин екстремальної системи керування по продуктивності РОД, так як тільки при стабільному процесі досягається максимальна продуктивність процесу. В [13] розглядається обґрунтування необхідності системи стабілізації для екстремальної системи керування процесом РОД. Запропонована автоматизована система стабілізації процесу РОД розроблялась з урахуванням можливості її об'єднання з екстремальною системою керування процесом РОД, розглянутої в [13], що дозволить досягти максимальної продуктивності процесу РОД з мінімальними витратами.

Література

1. Носуленко, В. И. Размерная обработка металлов электрической дугой [Текст] / В. И. Носуленко // Электронная обработка материалов. — 2005. — № 1. — С. 8–17.
2. Носуленко, В. И. О физической природе, об общем и отличиях, технологических возможностях электрических разрядов и классификации способов электроэрозионной обработки металлов [Текст] / В. И. Носуленко // Электронная обработка материалов. — 2006. — № 1. — С. 4–14.
3. Савеленко, Г. В. Обоснование алгоритма работы экстремально-го регулятора подачи электрода-инструмента на станках размерной обработки дугой [Текст]: материалы I Международной заочной научно-практической конференции «Автоматизированное проектирование в машиностроении», НОЦ «МС» / Г. В. Савеленко. — Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2013. — С. 115–122.
4. Модернізація електромеханічної частини привода подачі електроерозійного верстата для розмірної обробки дугою [Текст]: звіт про НДР / КНТУ; керів. Ю. О. Єрмолаєв. — № держреєстрації 0111U007656. — Кіровоград, 2011. — 34 с.
5. Єрмолаєв, Ю. О. Розробка САУ електромеханічного привода верстата типу «ДУГА» на базі «ЭШИМ-1» [Текст] / Ю. О. Єрмолаєв, Г. В. Савеленко // Збірник наукових праць КНТУ. — Кіровоград: КНТУ, 2004. — Вип. 15. — С. 270–273.
6. Гуткин, Б. Г. Автоматизация электроэрозионных станков [Текст] / Б. Г. Гуткин. — Л.: Машиностроение, 1971. — 160 с.
7. Савеленко, Г. В. Спосіб автоматичного визначення стабільності процесу розмірної обробки дугою [Текст] / Г. В. Савеленко // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2015. — № 1/5(73). — С. 9–13. doi:10.15587/1729-4061.2015.36226
8. Єрмолаєв, Ю. О. Дослідження САУ процесу РОД на верстаті з електромеханічним приводом. I. Основні фактори, що впливають на процес [Текст] / Ю. О. Єрмолаєв, П. М. Великий, Г. В. Савеленко // Збірник наукових праць КНТУ. — Кіровоград: КНТУ, 2007. — Вип. 19. — С. 270–273.
9. Собінов, О. Г. Моделювання швидкості знімання матеріалу при технологічному процесі розмірної обробки дугою [Текст] / О. Г. Собінов // Збірник наукових праць КНТУ. — Кіровоград: КНТУ, 2006. — Вип. 17. — С. 247–252.

10. Смирнова, Н. В. Определение параметров вольт-амперной характеристики дуги при изменении величины межэлектродного промежутка [Текст] / Н. В. Смирнова, В. В. Смирнов // *Збірник наукових праць КНТУ: Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. — Кіровоград: КНТУ, 2012. — Вип. 25, Ч. 2. — С. 272–277.
11. Смирнова, Н. В. Корреляционный метод определения параметров рабочей точки дуги в процессе размерной обработки деталей электрической дугой [Текст] / Н. В. Смирнова // *Научно-практический журнал «Отраслевые аспекты технических наук»*. — ИНГН, 2011. — № 3. — С. 25–28.
12. Смирнова, Н. В. Управления режимом горения дуги в процессе размерной обработки деталей электрической дугой [Текст]: матеріали II Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві», м. Суми, 17–20 квітня 2012 р.; у 3-х ч. / Н. В. Смирнова, В. В. Смирнов; ред. кол.: О. Г. Гусак, В. Г. Євтухов. — Суми: СумДУ, 2012. — Ч. 1. — С. 153.
13. Савеленко, Г. В. Обоснование структуры экстремального регулятора по производительности автоматизированного процесса электроэрозионной обработки [Текст] / Г. В. Савеленко, Ю. А. Ермолаев // *Технологический аудит и резервы производства*. — 2014. — № 6/4(20). — С. 42–47. doi:10.15587/2312-8372.2014.32750
14. Носуленко, В. І. Сталість процесу розмірної обробки металів електричною дугою не профільованим електродом [Текст] / В. І. Носуленко, О. Ф. Сіса // *Збірник наукових праць КНТУ*. — Кіровоград: КНТУ, 2006. — Вип. 17. — С. 148–153.
15. Зеленёва, И. Я. Система автоматизированного проектирования композиционных микропрограммных устройств управления [Текст] / И. Я. Зеленёва, Л. И. Дорожко, А. Н. Мирошкин // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Проблеми моделювання та автоматизації проектування*. — 2007. — Вип. 6(127). — С. 54–61.
16. Николаев, А. А. Разработка усовершенствованной системы автоматического управления положением электродов дуговых сталеплавильных печей и агрегатов ковш-печь [Текст] / А. А. Николаев, Г. П. Корнилов, П. Г. Тулупов, И. А. Якимов, Е. В. Повелица, А. В. Ануфриев // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. — 2014. — Т. 1, № 1. — С. 48–58. — Режим доступа: \www/URL: <http://www.electrical-engineering.ru/issues/2014/2014-1-8.pdf>
17. Савеленко, Г. В. Дослідження робочого процесу розмірної обробки дугою на верстаті з електромеханічним приводом [Текст] / Г. В. Савеленко, Ю. О. Ермолаев // *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. — 2014. — № 14. — С. 164–169. — Режим доступу: \www/URL: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Kitonv_2014_14_27.pdf
18. POR P. D. R. ARM Cortex-M4 32b MCU+ FPU, 225DMIPS, up to 2MB Flash/256+ 4KB RAM, USB OTG HS/FS, Ethernet, 17 TIMs, 3 ADCs, 20 comm. interfaces, camera & LCD-TFT [Electronic resource]. — Available at: \www/URL: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00071990.pdf>. — April 2014.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ДУГОЙ

Исследована программно-аппаратная реализация регулятора автоматизированной системы стабилизации для процесса размерной обработки дугой. Предложенный алгоритм стабилизирует и поддерживает заданную стабильность процесса размерной обработки дугой в зоне горения дуги при заданных начальных условиях. Разработанная автоматическая система управления процессом позволит заменить устаревшую элементную базу системы управления станков размерной обработки дугой, повысить информативность и уменьшить влияние субъективного фактора на состояние процесса.

Ключевые слова: стабилизация процесса, размерная обработка дугой, программируемый логический контроллер, подача электрода.

Савеленко Григорій Володимирович, асистент, кафедра економіки та організації виробництва, Кіровоградський національний технічний університет, Україна, e-mail: savelenko@mail.ru.

Ермолаєв Юрій Олексійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автоматизації виробничих процесів, Кіровоградський національний технічний університет, Україна, e-mail: ermolaevua@ukr.net.

Собінов Олександр Георгійович, викладач, кафедра програмного забезпечення, Кіровоградський національний технічний університет, Україна, e-mail: sag_sob@mail.ru.

Гуцул Василь Іванович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра вищої математики, Кіровоградський національний технічний університет, Україна, e-mail: vgutsul@yandex.ru.

Савеленко Григорій Владимирович, асистент, кафедра економіки та організації виробництва, Кіровоградський національний технічний університет, Україна.

Ермолаєв Юрій Алексеевич, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автоматизації виробничих процесів, Кіровоградський національний технічний університет, Україна.

Собінов Олександр Георгиевич, преподаватель, кафедра програмного забезпечення, Кіровоградський національний технічний університет, Україна.

Гуцул Василь Іванович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра вищої математики, Кіровоградський національний технічний університет, Україна.

Savelenko Gregory, Kirovograd National Technical University, Ukraine, e-mail: savelenko@mail.ru.

Yermolaev Yuriy, Kirovograd National Technical University, Ukraine, e-mail: ermolaevua@ukr.net.

Sobinov Alexander, Kirovograd National Technical University, Ukraine, e-mail: sag_sob@mail.ru.

Gutsul Vasyl, Kirovograd National Technical University, Ukraine, e-mail: vgutsul@yandex.ru.