

МІКРОКОНТРОЛЕРНИЙ РЕГУЛЯТОР СТРУМУ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ

Ю.М. Ланкін, В.Ф. Семікін, І.Ю. Романова, Є.М. Байштрук, П.П. Осечков, І.В. Крикуненко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: semikin.kiev@gmail.com

Описано мікроконтролерний регулятор контактного зварювання з компенсацією збурень напругою мережі живлення на зварювальний струм. В алгоритмі роботи регулятора нелінійні регулюючі характеристики представлено в табличній формі. Описано алгоритм визначення необхідного кута відкриття тиристорів при коливаннях напруги мережі живлення. Обґрунтовано вибір параметрів, які впливають на створення регулятора з використанням мікроконтролерів широкого застосування. Бібліогр. 9, табл. 3, рис. 2.

Ключові слова: контактне зварювання, напруга мережі, зварювальний струм, регулятор струму, алгоритм роботи, мікроконтролер

Вступ. Регулятори контактного зварювання, які побудовані на сучасній елементній базі з використанням мікроконтролерів, мають в своєму складі функцію стабілізації зварювального струму шляхом компенсації збурень при коливаннях напруги мережі живлення. Регулятори струму компенсаційного типу простіші та надійніші за замкнені системи регулювання та отримали широке розповсюдження в зварювальному виробництві. Вони мають малу інерційність, що є важливим для зварювання на жорстких режимах. Як показали перші дослідження [1] та аналізи, проведені за допомогою комп'ютерних систем управління та контролю [2, 3], компенсація впливу коливань напруги мережі живлення на зварювальний струм збільшує стабільність міцності зварюваних точок.

Робота регуляторів струму контактного зварювання ґрунтується на використанні регулюючих характеристик зварювального струму в залежності від кута відкриття тиристорів для різних $\cos \varphi$ зварювальної машини [4, 5]. При розробці регуляторів струму контактного зварювання частіше за все регулюючі характеристики апроксимуються залежностями, зручними для реалізації управління [6]. Разом з тим в Інституті кібернетики ім. В.М. Глушкова спільно з ІЕЗ ім. Є.О. Патона було запропоновано концепцію побудови цифрових регуляторів контактного зварювання [7], яка ґрунтується на представленні регулюючих характеристик у вигляді таблиць з певною дискретизацією. Перші цифрові регулятори були створені з кроком дискретизації $\pi/32$ рад (близько 6 ел. град.) та показали свою працездатність і принципову можливість покращення з розвитком засобів обчислювальної техніки. Останнім часом розроблено та випробувано регулятор контактного зварювання з кроком дискретизації по куту відкриття тиристо-

рів $\pi/200$ рад (менше за 1 ел. град.), в якому використовується простий мікроконтролер [8].

Мета роботи – створення регулятора струму контактного зварювання компенсаційного типу шляхом компенсації збуджень при коливаннях напруги мережі живлення та зміні коефіцієнта потужності зварювальної машини з використанням мікроконтролерів широкого застосування. Для цього здійснити раціональне перетворення регулювальних характеристик у табличну форму для ефективного використання ресурсів мікроконтролерів та вибору їх параметрів.

Розрахункові дослідження. Залежності зварювального струму від кута відкриття тиристорів α для різних $\cos \varphi$ зварювальної машини можуть бути описані матрицею $L[\alpha, \varphi]$, елементами якої є діючий струм в % від повнофазного для кутів α і φ , наведених у цілочисельному вигляді в межах $1 \dots N$ з кроком дискретизації π/N рад. Зворотна задача визначення кута відкриття α для заданого зварювального струму [9], в даному випадку для цифрового регулятора, полягає в пошуку матриці $\alpha[I_3, \varphi]$. Задача вирішується шляхом підстановки в якості елементів матриці $\alpha[I_3, \varphi]$ кутів відкриття α для заданого струму I_3 з матриці $L[\alpha, \varphi]$. Процедура отримання матриці $\alpha[I_3, \varphi]$ виконується на персональному комп'ютері при підготовці до програмування мікроконтролера. При цьому характеристики в табличному вигляді можуть бути представлені без спотворень, що характерні для лінеаризації або іншої апроксимації нелінійних характеристик. Об'єм пам'яті для табличного подання залежить від кроку дискретизації та обмежується ресурсами мікроконтролера та необхідною точністю. З метою раціонального використання програмної пам'яті мікроконтролера розглянемо особливості залежності кута відкриття $\alpha = n \cdot \pi/200$ від заданого струму

Ланкін Ю.М. – <https://orcid.org/0000-0001-6306-8086>, Семікін В.Ф. – <https://orcid.org/0000-0002-7407-5887>,

Романова І.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-7154-1830>

© Ю.М. Ланкін, В.Ф. Семікін, І.Ю. Романова, Є.М. Байштрук, П.П. Осечков, І.В. Крикуненко, 2022

(рис. 1). Робоча частина струмів обмежується низу значенням 15 %. Реальні значення $\cos \varphi$ знаходяться в інтервалі 0,2...0,8 ($\varphi = 0,21\pi \dots 0,44\pi$). Відмінності струмів в інтервалі значень 15...25 % для характеристик з різними φ знаходяться в межах 1,5 % і можуть бути представлені однією залежністю для всіх реальних значень φ . В інтервалі струмів 26...90 % дискретизація по φ близько $\pi/100$ рад призводить до відмінності характеристик, що знаходяться поряд, не більше ніж 1,0 %. Для струмів більше 90 % відмінність сусідніх характеристик в 1,0 % досягається при кроці дискретизації по φ менше $\pi/100$. Таким чином, з метою зменшення зайнятого об'єму програмної пам'яті мікроконтролера первинна матриця $\alpha[I_3, \varphi]$ може бути замінена декількома матрицями з різною дискретизацією по φ на різних інтервалах значень I_3 . Для ілюстрації такого подання нижче наведено фрагменти таблиці залежності кута відкриття тиристорів α від заданого струму I_3 для різних значень φ (табл. 1, 2), де $\alpha = n \cdot \pi/200$, $\varphi = i \cdot \pi/100$, в клітинках таблиці наведено значення n .

У більшості мікроконтролерних регуляторів відбувається автоматичне налаштування на $\cos \varphi$ зварювальної машини. Для цього проводять вимірювання кута відкриття α і тривалості λ ввімкненого стану тиристорів, на підставі яких розраховують коефіцієнт потужності $\cos \varphi$ (або φ). φ визначається чисельним рішенням рівняння,

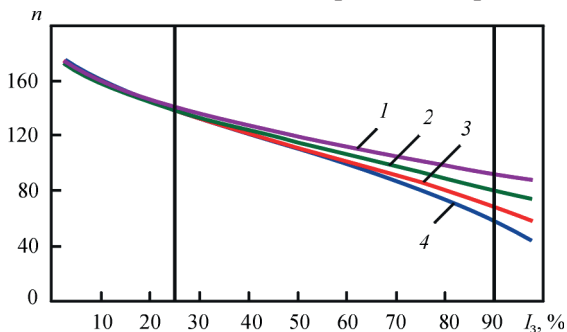


Рис. 1. Залежність кута відкриття тиристорів $\alpha = n \cdot \pi/200$ від заданого струму I_3 для різних значень φ : 1 - $\varphi = 0,44\pi$; 2 - $0,37\pi$; 3 - $0,29\pi$; 4 - $0,21\pi$

Таблиця 1. Фрагмент таблиці залежності кута відкриття тиристорів $\alpha = n \cdot \pi/200$ від заданого струму I_3 (15...25 %) для різних $\varphi = i \cdot \pi/100$

$I_3, \%$	i													Середнє по $\varphi = 0,21\pi \dots 0,44\pi$	
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	...		44
15	156	155	155	155	155	155	154	154	154	154	154	154	...	155	154
16	154	154	154	154	153	153	153	153	153	153	153	153	...	154	153
17	153	153	152	152	152	152	152	152	151	151	151	151	...	153	152
18	151	151	151	150	150	150	150	150	150	150	150	150	...	151	150
19	150	150	149	149	149	149	149	149	149	149	149	149	...	150	149
20	148	148	148	148	148	148	147	147	147	147	147	147	...	149	148
21	147	147	147	146	146	146	146	146	146	146	146	146	...	148	147
22	146	146	146	145	145	145	145	145	145	145	145	145	...	147	145
23	145	144	144	144	144	144	144	144	144	144	143	143	...	146	144
24	143	143	143	143	143	142	143	142	142	142	142	142	...	145	143
25	142	142	142	141	141	141	141	141	141	141	141	141	...	144	142

що описує перехід струму через нульове значення: $\sin(\lambda + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot \exp(-\lambda \cdot \text{ctg} \varphi) = 0$. Для розрахунку φ в контролерах використовуються апроксимуючі залежності результатів рішення цього рівняння. Аналогічно роботі [7], використовуємо альтернативний підхід – подання залежності $\varphi(\alpha, \lambda)$ таблицею відповідності. Нижче наведено таблицю відповідності (табл. 3) для визначення φ в межах $0,21\pi \dots 0,44\pi$ з кроком дискретизації по α і $\lambda - \pi/50$ і по $\varphi - \pi/100$ ($\varphi = i \cdot \pi/100$, $\lambda = j \cdot \pi/50$, $\alpha = n \cdot \pi/50$). Як ми бачимо, таблиця має багато порожніх клітинок (порожні клітинки відповідають φ за межами $0,21\pi \dots 0,44\pi$). Для раціонального використання пам'яті мікроконтролера в алгоритмі роботи регулятора реалізується процедура визначення кута φ по α і λ з ряду одномірних таблиць, які отримано з повної таблиці відповідності та не містять порожніх клітинок.

Усі дані елементів матриць $\alpha[I_3, \varphi]$ і $\varphi[\alpha, \lambda]$ представлені цілими однобайтними числами, наприклад, 1...200 (максимально 1...255). Крок дискретизації контролюємих часових даних (кут відкриття тиристорів і тривалість ввімкненого стану тиристорів) при цьому буде складати $\pi/200$ рад, а період часу відліку при оцифруванні в контролері – 50 мкс. Такий період відліку часових даних і обчислень можуть реалізувати мікроконтролери широкого застосування лінії PIC16, PIC18 (Microchip) з прийнятною точністю навіть при використанні внутрішнього генератора (без зовнішніх кварцових резонаторів). У згаданому регуляторі контактного зварювання [8] застосовано мікроконтролер PIC16F886 (частота внутрішнього генератора – 8 МГц, внутрішня Flash пам'ять – 16 кбайт). При використанні описаних вище методів перетворення первинних матриць об'єм програмної Flash пам'яті мікроконтролера дозволяє зберігати всі необхідні дані. Поряд з керуючими функціями контролер також повинен виконувати функції людино-машинного інтерфейсу. Контролери лінії PIC16 (наприклад, PIC16F886) дозволяють виконувати відображення параметрів за допомогою алфавітно-цифрових дисплеїв (LCD). Враховуючи тенден-

Таблиця 2. Фрагменти таблиці залежності кута відкриття тиристорів $\alpha = n \cdot \pi / 200$ від заданого струму I_3 (26...90 %) для різних $\varphi = i \cdot \pi / 100$

$I_3, \%$	i															
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	...	43	44
26	141	141	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140		142	143
27	140	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139		141	142
28	138	138	138	138	138	138	137	137	137	137	138	138	138		140	141
...																
60	102	102	102	102	102	103	103	103	104	104	105	105	106		114	115
61	101	101	101	101	101	102	102	102	103	103	104	104	105		113	114
62	100	100	100	100	100	101	101	102	102	103	104	104	105		112	113
...																
88	65	66	67	68	69	70	72	73	74	75	77	78	79		95	96
89	64	65	66	67	68	69	70	71	73	74	76	77	78		94	95
90	63	64	65	66	67	68	69	70	71	73	74	76	77		93	94

ції розвитку вбудованих систем управління, можна реалізувати пульт оператора, використовуючи кольорові рідинно-кристалічні TFT-дисплеї з сенсорними екранами (Touch Screen) та недорогі восьмибітові мікроконтролери лінії PIC18 (PIC18F87J50, PIC18F67K40, PIC18F97J94).

Алгоритм коригування кута відкриття α тиристорів при зміні напруги в мережі. При відхиленні напруги в мережі від номінального значення $U_m \neq U_{ном}$ змінюється діюче значення струму. Запропоновано два варіанти визначення відкоригованого кута відкриття α тиристорів. Перший полягає в реалізації метода регулювання за моделлю. Діюче значення струму за моделлю визначається за виразом $I_{д.мод} = I_{ном}(\alpha, \varphi) \cdot U_m / U_{ном}$, де в якості $I_{ном}(\alpha, \varphi)$ береться відповідний елемент матриці $I[\alpha, \varphi]$ для даних значень α і φ . Алгоритм регулятора реалізує ітераційну процедуру вибору необхідного кута відкриття α , що задовольняє вимозі $I_{д.мод} = I_3$. Другий варіант ґрунтується на визначенні кута відкриття тиристорів з матриці $\alpha[I_3, \varphi]$, в якій в якості I_3 використовується відкориговане значення заданого струму, розраховане за виразом $I_{з.кор}(\alpha) = I_3(\alpha) \cdot U_{ном} / U_c$. В обох варіантах потрібні операції цілочисельного множення та ділення. Особливість алгоритму полягає в тому, що сигнал напруги мережі на вході аналого-цифрового пере-

творювача контролера масштабується таким чином, щоб при $U_m = U_{ном}$ цифровий код відповідав цифрі 2^n , наприклад 512. В цьому випадку операції множення та ділення на $U_{ном}$ можуть бути замінені операціями побітового зсуву, що дозволяє прискорити обчислення та скоротити витрати ресурсів мікроконтролера.

Експериментальні результати. На рис. 2 наведено експериментальні статичні характеристики відпрацювання регулятором завдання струму для різних значень φ . З рисунку видно, що при I_3 більше за 80 % при деяких значеннях φ зростає похибка регулювання. Збільшення похибки регулювання обумовлене необхідністю зменшення кроку дискретизації по φ в матриці $\alpha[I_3, \varphi]$ на максимальних струмах (як було показано вище) і реальними можливостями зменшення кроку дискретизації з урахуванням точності непрямого способу вимірювання φ . Разом з тим необхідне виконання умови $\alpha_{min} \geq \varphi$.

Експериментальні статичні характеристики регулятора при зміні напруги в мережі від 320 до 420 В для різних значень заданого струму та коефіцієнтів потужності навантаження показали, що діюче значення струму змінюється не більше, ніж на $\pm 2\%$ від I_3 в межах 40...80 % [8].

Таблиця 3. Приклад таблиці відповідності для визначення $\varphi = i \cdot \pi / 100$ за кутом відкриття тиристорів $\alpha = n \cdot \pi / 50$ та тривалості увімкненого стану тиристорів $\lambda = j \cdot \pi / 50$

j	n																
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
24																	25
25																24	29
26															23	28	34
27														22	26	32	39
28													21	25	30	36	43
29													25	29	34	40	
30												24	28	32	38	44	
31													23	27	31	36	41
32											23	26	30	34	39		
33									22	25	29	33	38	42			
34								22	25	28	32	36	41				
35							22	25	28	31	35	39	43				
36						21	24	27	30	34	38	42					
37					21	24	27	30	33	36	40						
38					23	26	29	32	35	39	42						
39				23	26	29	32	35	38	41							
40			23	26	28	31	34	37	40	43							
41		23	25	28	30	33	36	39	42								
42	23	25	27	30	33	35	38	41	44								

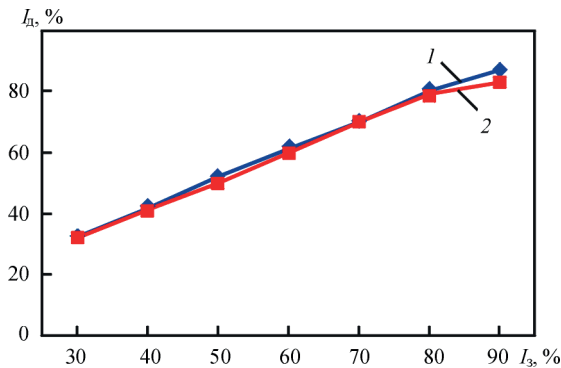


Рис. 2. Експериментальні дані відпрацювання завдань струму регулятором для різних значень φ : 1 – $\varphi = 0,25\pi$; 2 – $\varphi = 0,35\pi$

Висновки

Представлено мікроконтролерну реалізацію побудови цифрових регуляторів контактної зварювання, яка ґрунтується на табличному описі регулюючих характеристик. В даному регуляторі здійснюється задання струму (y % від повнофазного), відпрацювання регулятором необхідного зварювального струму, стабілізація струму при зміні напруги мережі, що дозволяє зварювальнику відтворювати напрацьовані режими зварювання і тим самим покращити якість зварних з’єднань.

Запропоновано методи перетворення та зменшення розмірів матриць регулюючих характеристик, які дозволяють створити регулятори контактної зварювання з застосуванням мікроконтролерів масового використання.

Обґрунтовано перетворення даних процесу зварювання в цілочисельний вид з прийнятним кроком для раціонального використання в програмі мікроконтролера.

Запропоновано алгоритми коригування кута відкриття тиристорів при зміні напруги в мережі з використанням регулюючих матриць, які дозволяють стабілізувати зварювальний струм. Алгоритми також скорочують витрати ресурсів мікроконтролера.

Список літератури

1. Ланкин Ю.Н. (1963) Автоматическое регулирование режима точечной сварки по электрическим параметрам. *Автоматическая сварка*, **5**, 16–19.

2. Gavrish, V.S., Rudenko, P.M., Podola, N.V. (2007) System of automatic control and monitoring of resistance spot welding. *The Paton Welding J.*, **9**, 45–48.

3. Анциборов А. Н. (2019) *Обеспечение качества контактной сварки при действии возмущений в условиях массового производства*: Дис. ... канд. техн. наук. Московский гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана, Тольяттинский гос. ун-т.

4. Патон Б.Е., Лебедев В.К. (1969) *Электрооборудование для контактной сварки*. Москва, Машиностроение.

5. Рыськова З.А., Федоров П.Д., Жимерова В.И. (1990) *Трансформаторы для электрической контактной сварки*. Ленинград, Энергоатомиздат.

6. Klimov, A.S., Antsiborov, A.N., Klimov, V.S., Kudinov, A.K. (2019) Current Regulation in Contact Welding. *Russian Engineering Research*, **39**(9), 766–771. <https://doi.org/10.3103/S1068798X19090119>

7. Никулин В.Н. (1967) *Разработка и исследование системы программного управления с автокоррекцией для автоматизации процесса точечной контактной электросварки*: Дис. ... канд. техн. наук. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона.

8. Lankin, Yu.N., Semikin, V.F., Bajshtruk, E.N. (2017) Stabilization of welding current of resistance spot welding machines at mains voltage fluctuations. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 31–33. <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.06.06>

9. Аксельрод Ф.А., Донской А.В. (1967) Определение угла зажигания вентилей при заданной программе изменения сварочного тока. *Автоматическая сварка*, **1**, 9–10.

References

1. Lankin, Yu.N. (1963) Automatic control of spot welding mode by electric parameters. *Avtomatich. Svarka*, **5**, 16–19 [in Russian].

2. Gavrish, V.S., Rudenko, P.M., Podola, N.V. (2007) System of automatic control and monitoring of resistance spot welding. *The Paton Welding J.*, **9**, 45–48.

3. Antsiborov, A.N. (2019) *Quality assurance of resistance welding under action of mass production disturbances*. In: Syn. of Thesis for Cand. Tech. Sci. Degree. Moscow GTU, Toliyatti GU [in Russian].

4. Paton, B.E., Lebedev, V.K. (1969) *Electric equipment for resistance welding*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

5. Ryskova, Z.A., Fedorov, P.D., Zhimerova, V.I. (1990) *Transformers for electric resistance welding*. Leningrad, Energoatomizdat [in Russian].

6. Klimov, A.S., Antsiborov, A.N., Klimov, V.S., Kudinov, A.K. (2019) Current regulation in contact welding. *Russian Engineering Research*, **39**(9), 766–771. <https://doi.org/10.3103/S1068798X19090119>

7. Nikulin, V.N. (1967) *Development and research of program control system for automation of process of electric resistance spot welding*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree. Kiev, PWI [in Russian].

8. Lankin, Yu.N., Semikin, V.F., Bajshtruk, E.N. (2017) Stabilization of welding current of resistance spot welding machines at mains voltage fluctuations. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 31–33. <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.06.06>

9. Akselrod, F.A., Donskoj, A.V. (1967) Determination of firing angle of valves by preset program of change of welding current. *Avtomatich. Svarka*, **1**, 9–10 [in Russian].

MICROCONTROLLER REGULATOR OF FLASH BUTT WELDING CURRENT

Yu.M. Lankin, W.F. Semikin, I.Yu. Romanova, E.M. Bayshtрук, P.P. Osechkov, I.V. Krykunenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Microcontroller regulator of flash butt welding with compensation of disturbances by the mains voltage on welding current is described. In the algorithm of the regulator operation, nonlinear control characteristics are presented in a tabular form. The algorithm for determining the required angle of thyristor opening during oscillations of mains voltage is described. The choice of parameters was substantiated, influencing the creation of the controller using widely used microcontrollers. 9 Ref., 3 Tabl., 2 Fig.

Keywords: flash butt welding, mains voltage, welding current, current regulator, algorithm, microcontroller

Надійшла до редакції 29.10.2021