

Б. І. ПРИЙМАК

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0001-7680-8565

М. М. ЖЕЛІНСЬКИЙ

кандидат технічних наук,
старший викладач кафедри автоматизації електромеханічних систем
та електроприводу
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0003-4862-1802

М. Я. ОСТРОВЕРХОВ

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри теоретичної електротехніки
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-7322-8052

О. М. ХАЛІМОВСЬКИЙ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри теоретичної електротехніки
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0003-3672-8530

ПАРАМЕТРИЧНО РОБАСТНИЙ НЕЙРОМЕРЕЖНИЙ ОЦІНЮВАЧ ПОЛОЖЕННЯ ЕЛЕКТРОДА В АВТОМАТИЧНОМУ ТА РОБОТИЗОВАНОМУ ЗВАРЮВАННІ З КОЛИВАННЯМИ ДУГИ

Розвиток автоматичних та роботизованих зварювальних систем значною мірою ґрунтується на використанні засобів адаптації траєкторії руху зварювального пальника. Основне місце серед таких засобів на сьогодні займають візуальні сенсори. Разом з тим при зварюванні з коливаннями дуги для адаптації траєкторії руху зварювального пальника до реального місця з'єднання деталей перспективним є оцінювання положення електрода відносно лінії зварювання на основі струму зварювальної дуги. Істотні переваги оцінювачів полягають у відсутності додаткового обладнання на зварювальному пальнику, а також у суміщенні точок зварювання та вимірювання.

Для виявлення екстремуму в адаптивних зварювальних системах з пошуковими коливаннями знаходить застосування метод синхронного детектування. Проте точність отриманої за допомогою синхронного детектора оцінки положення електрода відносно зварювального шва є невисокою через вплив нестабільності параметрів зварювального контуру. Тому на сьогодні є актуальною задача побудови оцінювача положення електрода при зварюванні з коливаннями дуги, що матиме високу точність та буде малочутливим до параметричних змін.

Метою роботи є розгляд нового підходу, заснованого на використанні штучної нейронної мережі, до розв'язання задачі оцінювання положення електрода відносно лінії з'єднання деталей при зварюванні з коливаннями дуги із забезпеченням робастності до змін параметрів зварювального контуру.

Для побудови оцінювача відхилення електрода від лінії стику у роботизованому зварюванні з коливаннями дуги застосована двошарова нейронна мережа прямого передавання сигналу з архітектурою типу 20-13-2. Нейромережний оцінювач, виходячи із сигналу зварювального струму, двічі за період коливань дуги визначає оцінку відносного положення електрода. За допомогою математичного моделювання показано, що процеси оцінювання відхилення електрода від лінії стику характеризуються достатньо високою точністю та робастністю до змін параметрів зварювального контуру.

Ключові слова: нейронна мережа, оцінювач, параметрична робастність, екстремум, положення електрода, коливання дуги, зварювальний робот.

B. I. PRYYMAK

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation of Electromechanical Systems and the Electric Drive
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0001-7680-8565

M. M. ZHELINSKYI

Candidate of Technical Sciences,
Senior Lecturer at the Department of Automation of Electromechanical Systems and the Electric Drive
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0003-4862-1802

M. YA. OSTROVERKHOV

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Theoretical Electrical Engineering Department
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-7322-8052

O. M. KHALIMOVSKYY

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Theoretical Electrical Engineering
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0003-3672-8530

PARAMETRICALLY ROBUST NEURAL NETWORK ESTIMATOR OF ELECTRODE POSITION IN AUTOMATIC AND ROBOTIC WELDING WITH ARC OSCILLATIONS

The development of automatic and robotic welding systems is largely based on the use of tools to adapt the path of the welding torch. Visual sensors are currently the most commonly used means of such adaptation. However, when welding with arc oscillations, to adapt the welding torch path to the actual place of joining parts, it is promising to estimate the position of the electrode relative to the welding line based on the welding arc current. Significant advantages of the estimators are the absence of additional equipment on the welding torch, as well as the combination of welding and measurement points.

To detect extremum in adaptive welding systems with search oscillations, the synchronous detection method is used. However, the accuracy of the electrode position relative to the weld seam obtained by a synchronous detector is low due to the influence of instability of the welding circuit parameters. Therefore, the task of constructing an electrode position estimator for welding with arc oscillations that will have high accuracy and be insensitive to parametric changes is currently relevant.

The aim of this work is to consider a new approach based on the use of an artificial neural network to solving the problem of estimating the electrode position relative to the joint line of parts in welding with arc oscillations, while ensuring robustness to changes in the parameters of the welding circuit.

To construct an estimator of the electrode deviation from the joint line in robotic welding with arc oscillations, a two-layer neural network with a direct signal transmission architecture of the 20-13-2 type was used. The neural network estimator, based on the welding current signal, determines the relative position of the electrode twice during the arc oscillation period. Using mathematical modelling, it is shown that the processes of estimating the electrode deviation from the weld line are characterized by a sufficiently high accuracy and robustness to changes in the parameters of the welding circuit.

Key words: *neural network, estimator, parametric robustness, extremum, electrode position, arc oscillations, welding robot.*

Постановка проблеми

Одним з основних шляхів розвитку автоматичних та роботизованих зварювальних систем є використання засобів адаптації траєкторії руху зварювального пальника [1]. Головне місце серед таких засобів на сьогодні займають візуальні сенсори. Втім зварюванні з коливаннями дуги для адаптації траєкторії руху зварювального пальника до реального місця з'єднання деталей перспективним є оцінювання положення електрода відносно лінії зварювання на основі струму зварювальної дуги. Суттєвими перевагами використання оцінювачів є відсутність додаткового обладнання на зварювальному пальнику, а також суміщення зварювальної та вимірювальної точок.

Для визначення екстремуму в адаптивних системах з пошуковими коливаннями застосовується синхронне детектування. Роль пошукових коливань в разі дугового зварювання відіграють поперечні коливання зварювального пальника. Проте точність отриманої за допомогою синхронного детектора оцінки положення електрода відносно зварювального шва невисока через вплив нестабільності параметрів зварювального контуру.

Тому на сьогодні важливою та актуальною є задача побудови оцінювача положення електрода відносно лінії з'єднання деталей при зварюванні з коливаннями, що матиме досить високу точність та буде малочутливим до параметричних змін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз літературних джерел показує, що сьогодні в роботизованому зварюванні часто застосовуються візуальні сенсори (ВС) [2-6]. За сигналом ВС відбувається адаптація траєкторії руху зварювального пальника до реального розташування місця з'єднання деталей [2, 3]. В роботі [5] розглядається можливість використання машинного зору на основі лазера для оцінювання якості зварних швів. Перспективи використання методів штучного інтелекту в зварювальних операціях з ВС висвітлено в [6].

Альтернативою ВС є так звані дугові давачі (ДД) положення електрода відносно лінії з'єднання зварюваних деталей [7]. Ці давачі придатні для технологій зварювання з поперечними коливаннями дуги. Відомо, що в результаті поперечних коливань дуги спостерігаються такі позитивні ефекти, як збільшення ширини шва, зменшення глибини проплавлення, зменшення перегріву металу [8, 9].

ДД дозволяють отримати оцінку $\hat{\varepsilon}$ поперечного відхилення ε кінця електрода від лінії шва не на основі прямих вимірювань, а опосередковано, на основі вимірювання струму зварювальної дуги. Функціональна залежність зварювального струму від ε при зварюванні внапуск або встик з підготовкою канавок має чітко виражений екстремальний (унімодальний) характер, що зумовлено V-подібним профілем поверхонь з'єднуваних деталей. Мінімум цієї функціональної залежності завжди припадає на лінію зварного шва між деталями, що з'єднуються. Один з найпоширеніших підходів до пошуку екстремуму базується на застосуванні пошукових коливань та методу синхронного детектування [10]. У випадку дугового зварювання як пошукові можуть бути використані поперечні коливання зварювального пальника. За таких коливань синхронний детектор формує сигнал, пропорційний амплітуді 1-ї гармоніки зварювального струму, який використовується для отримання оцінки $\hat{\varepsilon}$.

Однак метод синхронного детектування має недоліки. Зокрема, визначення амплітуди лише 1-ї гармоніки зварювального струму не дає можливості отримати оцінку $\hat{\varepsilon}$, що нечутлива до варіацій параметрів процесу зварювання. Для цього слід визначити також амплітуду 2-ї гармоніки сигналу [7].

В роботі [11] запропоновано новий підхід для побудови оцінювача положення електрода відносно лінії шва, що базується на використанні штучної нейронної мережі (НМ). Продовження виконаних в [11] досліджень нейромережного оцінювача щодо його точності функціонування та параметричної робастності висвітлюються в даній статті.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є розгляд нового підходу, заснованого на використанні штучної нейронної мережі, до розв'язання задачі оцінювання положення електрода відносно лінії з'єднання деталей при зварюванні з коливаннями дуги із забезпеченням робастності до змін параметрів зварювального кола.

Викладення основного матеріалу дослідження

Система зварювання з коливаннями дуги схематично показана на рис. 1. Джерело зварювального струму ДЗС підключено до зварюваних деталей і зварювального пальника. Напруга у зварювальному пальнику подається через ковзний контакт на зварювальний дріт, який служить витратним електродом.

У процесі зварювання пальник приводиться в коливання у напрямку, що перетинає лінію зварювання. Тобто, в системі координат X-Y з центром на лінії шва, де вісь Y паралельна поздовжній осі подовження електрода, а вісь X нормальна до лінії шва, поточне положення кінця електрода визначається за виразом

$$x(t) = \varepsilon(t) + A \sin \omega t; \quad \omega = 2\pi f, \quad (1)$$

де A і f – амплітуда і частота коливань пальника відповідно, ε – відхилення середнього положення електрода від лінії стику.

Сигнал зварювального струму $i(t)$ з давача струму ДС подається на смуговий фільтр СФ, який пропускає частоти в діапазоні від f до $2f$. У цьому випадку сигнал коливань зварювального струму $\delta(t)$ на виході СФ буде визначатися як [7]

$$\delta(t) = A_1 \cos(\omega t - \beta - \phi_1) + A_2 \sin(2\omega t - \gamma - \phi_2), \quad (2)$$

де A_1 і A_2 – амплітуди 1-ї та 2-ї гармонік сигналу $\delta(t)$ відповідно; β і γ – фазові зсуви цих гармонік, зумовлені динамікою зварювального контуру; ϕ_1 і ϕ_2 – фазові затримки вказаних гармонік у фільтрі. Значення в (2) знаходяться із формул (3), (4):

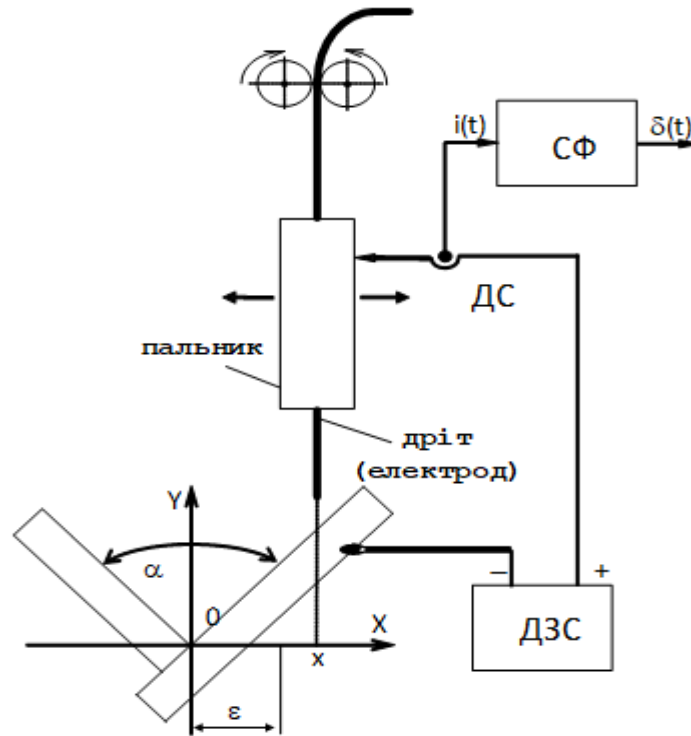


Рис. 1. Схема системи зварювання з коливаннями дуги

$$A_1 = \frac{AKE \operatorname{th}(\mu\epsilon)}{R_w \sqrt{1 + (\omega T_w)^2}}; A_2 = \frac{A^2 KE \mu}{4R_w ch^2(\mu\epsilon) \sqrt{1 + (2\omega T_w)^2}}; \quad (3)$$

$$\beta = \operatorname{arctg}(\omega T_w); \quad \gamma = \operatorname{arctg}(2\omega T_w), \quad (4)$$

де E – напруженість електричного поля в стовпі дуги; R_w – опір зварювального кола; $T_w = R_w/EM$ – стала часу зварювального кола; M – крутизна характеристики швидкості плавлення електрода за струмом зварювання; $K = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi - \alpha}{2}\right)$; $\mu = d_e^{-1} \sqrt{K \rho v_w / v_e}$, де d_e – діаметр електрода, v_w – швидкість зварювання і v_e – швидкість подачі електрода. Слід зазначити, що співвідношення (1) – (4) справедливі за умови підтвердження гіпотези про квазі-стаціонарність сигналу $\delta(t)$, тобто за досить малих його змін протягом періоду коливань пальника.

Як видно з виразу (3), визначивши амплітуду A_1 першої гармоніки сигналу $\delta(t)$, можна знайти оцінку $\hat{\epsilon}$ поперечного відхилення ϵ кінця електрода від лінії шва. Це традиційний підхід до визначення $\hat{\epsilon}$, оснований на використанні методу синхронного детектування для знаходження A_1 [10]. Синхронний детектор є пристроєм поточного усереднення за період пошукових коливань сигналу $\delta(t) \times \sin(\omega t + \phi_D)$, де ϕ_D – скоригована початкова фаза, що визначається як $\phi_D = \frac{\pi}{2} - \beta - \phi_1$.

Однак в процесі зварювання існує ймовірність зміни деяких параметрів зварювального кола, таких як M , E і R_w . Для отримання оцінки $\hat{\epsilon}$, яка була б нечутливою до варіацій цих параметрів, необхідно також визначити амплітуду 2-ї гармоніки $\delta(t)$ [7]. При виконанні умови $T < T_w$, де $T = 1/f$ – період коливань пальника, розділивши в (3) A_1 на A_2 , отримаємо вираз для визначення цієї оцінки

$$\hat{\epsilon} = \frac{1}{2\mu} \operatorname{ash}\left(\frac{\mu A}{2} \times \frac{A_1}{A_2}\right). \quad (5)$$

Тут відсутні параметри, що залежать від змін умов зварювального процесу. Тому вираз (5), який дозволяє визначити оцінку $\hat{\epsilon}$ відхилення електрода від лінії шва, стійку до варіацій параметрів зварювального контуру, візьмемо за основу для розробки пристрою оцінювання на основі НМ.

На рис. 2 наведено структурну схему оцінювача $\hat{\epsilon}$ на основі НМ. Пристрій для оцінювання бічного відхилення електрода дозволяє отримувати поточні значення оцінки через кожні півперіода коливань пальника, тобто визначати $\hat{\epsilon}$ з періодом $T_0 = T/2$.

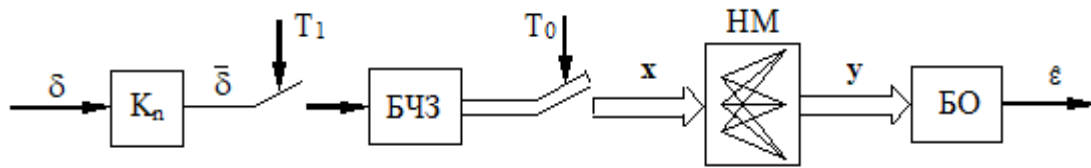


Рис. 2. Блок-схема неймережного оцінювача відхилення електрода від лінії стику зварюваних деталей

У схемі наявні два імпульсні елементи з періодами замикання T_0 і T_1 . Робота цих елементів синхронізована між собою і $T_1 = T_0/N$, де N – ціле число. Сигнал коливань зварювального струму $\delta(t)$ надходить на вхід оцінювача і після проходження ланки з нормуючим коефіцієнтом K_n стає таким, що $|\bar{\delta}(t)| \leq 1$. Нормований сигнал $\bar{\delta}(t)$ квантується за часом з періодом T_1 і надходить на блок часової затримки БЧЗ. У цьому блоці формується N -вимірний вектор x , компонентами якого є N останніх значень дискретного сигналу $\bar{\delta}(nT_1)$, $n = 0, 1, 2, \dots$. Вектор x з періодом дискретності T_0 надходить на вхід НМ. У неймережі визначається двовимірний вектор y оцінок амплітуд 1-ї та 2-ї гармонік сигналу $\bar{\delta}$. Після цього в блоці обчислення БО за (5) отримується оцінка ϵ відхилення електрода від лінії шва. Отже, згідно з викладеним вище, сигнал на виході оцінювача формується дискретно з періодом T_0 і деяким обчислювальним запізненням.

В оцінювачі відхилення електрода застосована нейронна мережа прямого передавання сигналу або багатопартий перцептрон (feedforward neural network or multilayer perceptron).

Навчання (тренування) НМ виконувалося методом зворотного поширення помилки із використанням алгоритму Левенберга-Марквардта. Для навчання мережі було сформовано масиви з 500 векторів

$$x(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_{20}(k)]^T; y(k) = [y_1(k), y_2(k)]^T; k = \overline{1, 500},$$

із отриманням їх елементів за виразом

$$x_i(k) = y_1(k) \cos\left(\frac{\pi(i-1)}{N} - \beta - \phi_1 + \Delta\beta(k)\right) + y_2(k) \sin\left(\frac{2\pi(i-1)}{N} - \gamma - \phi_2 + \Delta\gamma(k)\right), \quad i = \overline{1, 20}$$

де $y_1, y_2, \Delta\beta$ та $\Delta\gamma$ – випадкові, рівномірно розподілені величини в межах інтервалів своїх змін. У прихованому шарі НМ було обрано 13 нейронів і ця мережа навчалася протягом 1200 епох.

Визначення якісних показників процесів оцінювання положення електрода відносно лінії стику зроблено за допомогою обчислювальних експериментів з математичною моделлю системи. Для моделювання та тренування НМ були вибрані такі номінальні параметри зварювального процесу: $M=0.35$ мм/А·с; $E=2$ В/мм; $R_w=0.2$ Ом; $d_e=1.2$ мм; $v_e=45$ мм/с; $v_w=5$ мм/с; $K=1$; $A=2$ мм; $f=5$ Гц. Фазові зсуви сигналу коливань зварювального струму у СФ були прийняті $\phi_1=-0.8$ рад; $\phi_2=1.6$ рад.

У першому досліді імітувалася наступна практична ситуація. Пальник під час зварювання з коливаннями дуги рухається вздовж прямої лінії стику так, що траєкторія його середнього положення $\epsilon(t)$ є прямою лінією, але кут між $\epsilon(t)$ та лінією стику дорівнює 0.2 рад. У момент часу $t=0$, де $\epsilon(t)=-4$ мм, на вхід оцінювача подається сигнал $\delta(t)$. Процес оцінювання наведено на рис. 3, де показані сигнали $\epsilon(t)$ (крива 1) та $\hat{\epsilon}(t)$ (крива 2).

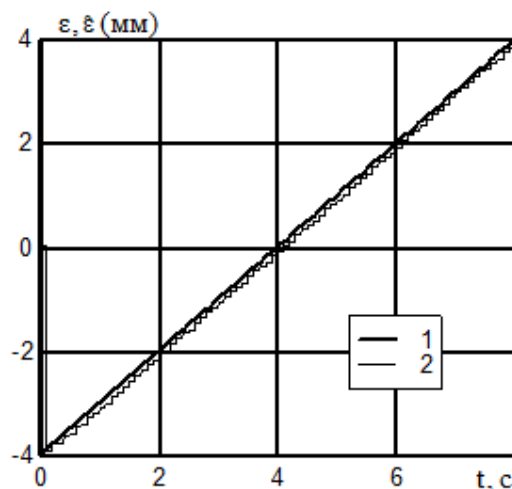


Рис. 3. Оцінювання лінійно-змінюваного відхилення електрода

Цей рисунок показує, що за винятком першого періоду T_0 , де ще тільки формувався вхідний вектор мережі x , сигнал $\hat{\varepsilon}(t)$ на виході оцінювача із невеликим запізненням практично повторює сигнал $\varepsilon(t)$ в інтервалі його змінювання.

Наступний дослід полягав у моделюванні процесу оцінювання при змінюванні ε за експоненційним законом. Приблизно такий характер змін ε існуватиме у замкненій за сигналом $\hat{\varepsilon}$ системі стеження за лінією стику, якщо регулятор забезпечуватиме добре демпфовані перехідні процеси. На рис. 4 показані експоненційно-змінюваний сигнал $\varepsilon(t)$ з амплітудою 2 мм (крива 1) та оцінка цього сигналу $\hat{\varepsilon}(t)$ (крива 2).

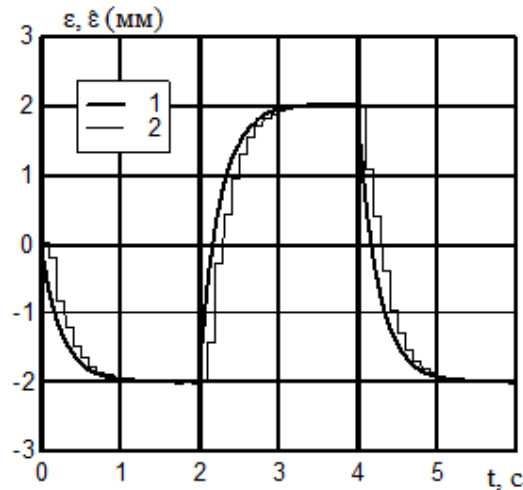


Рис. 4. Оцінювання експоненційно-змінюваного відхилення електрода

Далі було проведено дослідження параметричної чутливості нейромережного оцінювача відхилення електрода від лінії стику зварюваних деталей (рис. 5-6). Крутизна характеристики швидкості плавлення електрода за струмом зварювання – параметр M , на практиці може істотно змінюватися залежно від режиму зварювання. Відповідно, в обернено пропорційній залежності буде змінюватися стала часу зварювального кола T_w .

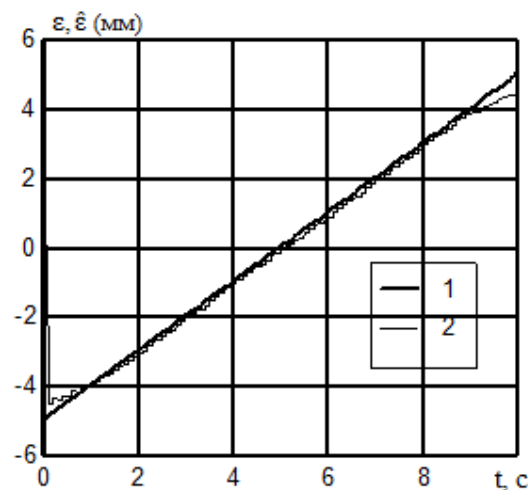


Рис. 5. Оцінювання лінійно-змінюваного відхилення електрода при $M^*=M \times 3$

На рис. 5 показано процес оцінювання при використанні у виразах (2)-(4) втричі більшого заданого значення M^* параметра M від його номінального значення, а на рис. 6 наведено процес оцінювання при застосуванні втричі меншого M^* ніж M , де крива 1 – це $\varepsilon(t)$, а крива 2 – $\hat{\varepsilon}(t)$.

Аналіз результатів моделювання, показаних на рис. 3-6, засвідчує наступне. По-перше, побудований нейромережний оцінювач забезпечує досить високу точність оцінювання відхилення електрода від лінії стику при зміні цього відхилення за різними функціональними залежностями та в різних межах. По-друге, нейромережний оцінювач відхилення електрода від лінії стику має цінну властивість параметричної робастності, що важливо для його практичного застосування.

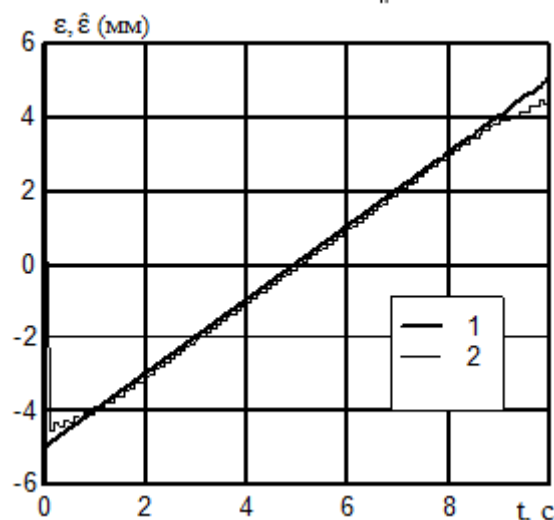


Рис. 6. Оцінювання лінійно-змінюваного відхилення електрода при $M^*=M/3$

Висновки

Для побудови оцінювача положення електрода відносно лінії з'єднання деталей в автоматичному та роботизованому зварюванні із коливаннями дуги застосована двошарова нейронна мережа прямого передавання сигналу з архітектурою типу 20-13-2. Нейромережний оцінювач, виходячи із сигналу зварювального струму, двічі за період коливань дуги формує оцінку відносного положення електрода. За допомогою математичного моделювання показано, що процеси оцінювання характеризуються достатньо високою точністю. Підтверджено, що отримувана оцінка положення електрода відносно лінії стику зварюваних деталей є робастною до змін параметрів зварювального контуру.

Список використаної літератури

1. Pires J. N., Loureiro A., Böllmsjö G. *Welding Robots*, Springer-Verlag, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/1-84628-191-1>.
2. Lin L., Bingqiang L., Yanbiao Z. Study on seam tracking system based on stripe type laser sensor and welding robot. *Chin J Lasers*, 42, 5, 2015, pp. 1-8.
3. Pryymak B., Korol S., Ostroverkhov M. Design of a digital following system of welding robot with a visual sensor. *Proc. of the IEEE 19th Intern. Conf. on Smart Technologies "EUROCON-2021"*, Lviv, Ukraine, July 6–8, 2021, pp. 66-70. DOI: 10.1109/eurocon52738.2021.9535643.
4. Приймак Б.І. Синтез та дослідження алгоритму керування ланкою зварювального робота з органом технічного зору. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, № 4 (83), 2022. С. 29-36. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.4.3>
5. W. Huang and R. Kovacevic, "Development of a real-time laser-based machine vision system to monitor and control welding processes", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 63, no. 1-4, 2012, pp. 235-248.
6. Yang L., Liu Y., Peng J. Advances techniques of the structured light sensing in intelligent welding robots: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 110. no. 3, 2020, pp.1027-1046. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05524-2>
7. Цибулькін Г.А. Дугові сенсорні системи для зварювальних роботів, Сталь, Київ, 2011, 145 с.
8. Singh, P. K., Patel, D., Prasad, S. B. *Development of vibratory welding technique and tensile properties investigation of shielded metal arc welded joints. Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 9(35), 2016, pp. 1–6. DOI: [doi: 10.17485/ijst/2016/v9i35/92846](https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i35/92846).
9. Luo, Y., Zhang, Z.L., Zhou, C.F. et al. Effect of oscillation parameters of narrow groove MAG welding on weld formation. *J. Hebei Univ. Sci. Technol.*, 38, 6. 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13095519>.
10. Цибулькін Г.А. Адаптивне керування у дуговому зварюванні, Сталь, Київ, 2014, 171 с.
11. Pryymak B., Zhelinskyi M., Ostroverkhov M., Khalimovskyy O. Neural network based estimator of the electrode deviation in robotic welding with arc oscillations. *CEUR Workshop Proceedings*, 2023, 3628, pp. 425-432. Режим доступу: <https://ceur-ws.org/Vol-3628/short16.pdf>

References

1. Pires, J. N., Loureiro, A. Bölmsjö, G. (2006) *Welding Robots*, Springer-Verlag. DOI: <https://doi.org/10.1007/1-84628-191-1>.
2. Lin, L., Bingqiang, L., Yanbiao, Z. (2015) Study on seam tracking system based on stripe type laser sensor and welding robot. *Chin J Lasers*, vol.42, no.5, pp.1-8.
3. Pryymak, B., Korol, S., Ostroverkhov, M. (2021) 'Design of a digital following system of welding robot with a visual sensor. In *19th Intern. Conf. on Smart Technologies "EUROCON"*, pp. 66-70. DOI: 10.1109/eurocon52738.2021.9535643.
4. Pryymak, B. (2022) Synthesis and research of the algorithm for controlling the link of a welding robot with a technical vision organ [Sintez ta doslidzhennya algoritmu keruvannya lankoyu zvaryuvalnogo robota z organom tehnlchnogo zoru]. *Visnik Hersonskogo natsionalnogo tehničnogo universitetu*, 4(83), pp. 29-36. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.4.3>
5. Huang, W., Kovacevic, R. (2012) Development of a real-time laser-based machine vision system to monitor and control welding processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 63, no. 1-4, pp. 235-248.
6. Yang, L., Liu, Y., Peng, J. (2020) Advances techniques of the structured light sensing in intelligent welding robots: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 110, no. 3. pp.1027-1046. DOI:10.1007/s00170-020-05524-2.
7. Tsybulkin, G.A. (2011) Arc sensing systems for welding robots [Dugovi sensorni sistemi dlya zvaryuvalnih robotiv]. Stal, Kiyiv, 145 p.
8. Singh, P. K., Patel, D., Prasad, S. B. (2016). *Development of vibratory welding technique and tensile properties investigation of shielded metal arc welded joints. Indian Journal of Science and Technology*, vol. 9(35), pp. 1-6, DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i35/92846.
9. Luo, Y., Zhang, Z.L., Zhou, C.F. et al. (2017) Effect of oscillation parameters of narrow groove MAG welding on weld formation. *J. Hebei Univ. Sci. Technol.*, 38, 6. DOI : <https://doi.org/10.3390/app13095519>.
10. Tsybulkin, G.A. (2014) Adaptive control in arc welding [Adaptivne keruvannya u dugovomu zvaryuvanni], Stal, Kyiv, 171 p.
11. Pryymak, B., Zhelinskyi, M., Ostroverkhov, M., Khalimovskyy, O. (2023) Neural network based estimator of the electrode deviation in robotic welding with arc oscillations. *CEUR Workshop Proceedings*, 3628, pp. 425-432. <https://ceur-ws.org/Vol-3628/short16.pdf>