

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ПІД-РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ ДУГИ ПІД ЧАС НАПЛАВЛЕННЯ

В.Г. Соловійов*, канд.техн.наук, І.О. Рябцев**, докт.техн.наук, Ю.М. Ланкін***, докт.техн.наук, І.Ю. Романова****, канд.техн.наук

Інститут електростварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11, Київ, 03150, Україна.

E-mail: hhsova@gmail.com; ryabtsev39@gmail.com; lankin.y.n@gmail.com; romanova@paton.kiev.ua

У статті розглянуто розробку та тестування моделі ПІД-регулятора, якій здатен автоматично підлаштовувати та підтримувати задану напругу дуги під час електродугового наплавлення. Проаналізовано деякі особливості процесів дугового наплавлення, зокрема, вибір режимів наплавлення, а також основні пристрої – потенціометри, які використовуються в схемах установок для наплавлення задля регулювання основних параметрів режимів наплавлення – напруги та струму. Наводяться докази необхідності використання для регулювання процесу наплавлення напруги безпосередньо на дузі, а не на джерелі живлення. На основі цього аналізу з використанням програми Simulink MATLAB створено модель ПІД-регулятора напруги дуги у разі дугового наплавлення. Результати тестування ПІД-регулятора показують, що пристрій забезпечує точніше та стабільніше налаштування режиму наплавлення, ніж традиційні методи регулювання. ПІД-регулятор дасть змогу суттєво знизити можливі помилки під час розробки та використання технологій автоматичного дугового наплавлення різних деталей і виробів. Бібл. 10, рис. 6, табл. 1.

Ключові слова: електродугове наплавлення, напруга дуги, напруга наплавлення, струм наплавлення, фільтр напруги, ПІД-регулятор, Simulink MATLAB.

Постановка задачі. Електродугове наплавлення – це ефективний спосіб створення або відновлення робочих шарів з особливими властивостями деталей і виробів, який широко застосовується в різних галузях промисловості [1–4]. Слід зазначити, що досі задля забезпечення якості та стабільності управління та контролю електричних параметрів наплавлення на практиці технолог-наплавник, який повинен мати великий виробничий досвід, експериментально вибирає найвідповідніший режим наплавлення для конкретної деталі. Проте такий підхід не завжди дає оптимальний результат. Щоб мінімізувати можливі помилки під час розробки технологій наплавлення, потрібен вищий рівень автоматизації та комп'ютеризації розробки та управління процесами наплавлення.

У даній час більшість досліджень спрямовані на вдосконалення способів контролю та регулювання напруги не на дузі, а на джерелі живлення [5, 6]. Зокрема, у [6] досліджується оптимізація кута нахилу вольт-амперної характеристики (ВАХ) джерела живлення для підвищення якості наплавлення. Визначено критерії, які дають змогу кількісно оцінити якість широкошарового наплавлення та здатність дуги досягти регламентованого проплавлення основного металу. Проте кут нахилу ВАХ джерела живлення визначає величину напруги на ньому, а не на дузі.

Напруга на джерелі живлення та напруга дуги пов'язані між собою, але мають значення, що відрізняються. Керівні документи (КД), що регламентують вимоги до параметрів режиму наплавлення, оперують значеннями напруги на дузі, а не на джерелі живлення. При цьому допускають розкид напруги до $\pm 10\%$, але технолог не має можливості проконтролювати напругу на дузі.

Існуючі установки для наплавлення типу УМН-4, УМН-10, У-653 та ін., а також наплавні автомати типу АД-231, А-1406, А-1412 зазвичай комплектуються джерелами живлення типу ВДУ-506, ВДУ-1201 або ВДУ-1202, які розраховані на струми наплавлення до 500 А (ВДУ-506) та 1200 А (ВДУ-1201, ВДУ-1202). На пультах управління цих установок відображається напруга, вимірювана на струмознімачі подаючого механізму електродного дроту за допомогою аналогових або цифрових пристроїв. Ця напруга майже відповідає напрузі на виході джерела живлення, за винятком втрат на контактах і кабельних з'єднаннях. На цьому обладнанні режим наплавлення по напрузі U_n

© Соловійов В.Г., Рябцев І.О., Ланкін Ю.М., Романова І.Ю., 2023

ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0002-1454-7520>; ** <https://orcid.org/0000-0001-7180-7782>;

*** <https://orcid.org/0000-0001-6306-8086>; **** <https://orcid.org/0000-0001-7154-1830>

налаштовується потенціометрами в схемах управління джерела живлення та установки, а по струму \bar{I}_H – потенціометром, що регулює швидкість подачі електродного дроту. Для цього під час наплавлення контрольних зразків змінюють положення потенціометра P_u , який керує ВАХ джерела живлення, та положення потенціометра P_{vp} , який регулює швидкість подачі дроту V_p [7].

Параметр \bar{U}_H являє собою середнє значення напруги наплавлення, яке складається з \bar{U}_d (напруги дуги), $\bar{U}_{кз}$ (напруги коротких замикань) і $\bar{U}_{обр}$ (напруги обривів дуги). Аналогічно, параметр \bar{I}_H – це середнє значення струму наплавлення, яке складається з \bar{I}_d (струму дуги), $\bar{I}_{кз}$ (струму коротких замикань) і $\bar{I}_{обр}$ (струму обривів дуги) [8].

Положенням потенціометра P_u важко задати необхідне значення параметра \bar{U}_d з достатньою точністю, оскільки \bar{U}_d залежить від безлічі додаткових факторів, таких як швидкість подачі, матеріал і діаметр електродного дроту, наявність присадних матеріалів тощо. Необхідно також враховувати те, що напруга, яка присутня безпосередньо на виході джерела живлення, відрізняється від напруги, прикладеної до дуги, через статичні та динамічні втрати напруги на контактах і кабелях живлення. Тому технологу необхідно провести ряд контрольних наплавлень і визначити оптимальне положення потенціометра P_u перед виконанням поточного завдання.

На відміну від P_u , за допомогою потенціометра P_{vp} задати необхідну швидкість подачі дроту V_p легко, оскільки залежність швидкості подачі від напруги на потенціометрі $V_p[P_{vp}]$, яка отримана експериментально, у робочому діапазоні використання має практично лінійний характер.

Виходячи з вищевикладеного, виникає необхідність розробити пристрій, що регулює параметр P_u задля забезпечення оптимального значення $U_H(t)$, за якого буде підтримуватися заданий рівень напруги дуги $\bar{U}_d(t)$. Такий пристрій дасть змогу істотно знизити невизначеність під час розробки технології наплавлення конкретних деталей.

Мета роботи – створення за допомогою програми Simulink MATLAB моделі регулятора напруги дуги, який здатен автоматично підлаштовувати та підтримувати задану напругу дуги під час електродугового наплавлення.

Методи дослідження. Пакет програм дає можливість проводити математичне та комп'ютерне моделювання, а також аналіз та оптимізацію системи регулювання. Використання Simulink MATLAB може включати роботу з блок-схемами, скриптами, функціями та іншими інструментами, які дають змогу створювати й аналізувати моделі регуляторів напруги дуги під час наплавлення [9].

Для функціонування такого регулятора напруги дуги під час наплавлення (регулятор RP_u) необхідно обчислити значення регульованої величини \bar{U}_d задля порівняння із уставкою. Уставка є заданим значенням регульованої величини, яке має бути підтримуваним регулятором. Для цього використовувалися результати [8, 10], де розроблено алгоритм кластеризації загального сигналу напруги \bar{U}_H на кластери: \bar{U}_d , $\bar{U}_{кз}$ і $\bar{U}_{обр}$. Для виділення сигналу \bar{U}_d із загального \bar{U}_H скористаємося фільтром зі змінною структурою (ФЗС), який практично повністю повторює вхідний сигнал без затримки, якщо швидкість його зміни не перевищує певної заданої величини ε , що визначається експериментально. У роботі прийнято $\varepsilon = 1$ В/с. Запис сигналу $U_H(t)$ здійснювався за допомогою аналого-цифрового перетворювача, тобто сигнал $U_H(t)$ дискретизувався. Записаний сигнал $U_H(t)$ в дискретному виді представляється як $U_H(i)$, де i – дискретний момент часу. Таким чином, отримуємо наступну залежність (1) для обчислення $U_d(i)$, яка є рівнянням ФЗС

$$U_d(i) = \{U_H(i-1) + \frac{\Delta U_H(i)}{|\Delta U_H(i)|} \varepsilon, \in |\Delta U_H(i)| > \varepsilon; U_H(i), \in |\Delta U_H(i)| \leq \varepsilon\}. \quad (1)$$

У проміжках часу, коли діють кластери $U_{кз}(i)$ і $U_{обр}(i)$, значення $U_d(i)$ змінюється незначно на величину ε/f за крок дискретизації, де f – частота дискретизації, Гц.

На практиці оператор оцінює середні значення \bar{U}_H і \bar{I}_H за стрілочними або електронними приладами, які реалізують функцію згладжування реальних сигналів за типом інерційної інтегруючої RC-ланки з малою постійною часу. Тому реальні сигнали примушують стрілку приладу швидко та сильно коливатися, особливо якщо спостерігається процес з короткими замиканнями та обривами дуги. Таким чином, оператор, задаючи технологічно необхідні параметри напруги \bar{U}_H і струму \bar{I}_H , приблизно оцінює їхні середні амплітуди за стрілочними приладами. Проте він не може визначити усереднені значення цих параметрів за час контрольного наплавлення і, зазвичай, приймає за результат вимірювань останні показання приладів.

Задля порівняння ефективності різних методів фільтрації сигналів процесу наплавлення було використано ФЗС і фільтр експоненційного згладжування (ФЕЗ), який є резисторно-конденсаторною

ланкою (RC -ланкою). На рис. 1 наведено приклади вихідних сигналів \bar{U}_d , отриманих під час використання обох фільтрів (ФЗС і ФЕЗ) для напруги в процесі наплавлення електродним порошковим дротом марки ПП-АН164 діаметром 2,8 мм у середовищі газової суміші захисних газів CO_2 і аргону (у співвідношенні 50 % на 50 %). Як бачимо, фільтр зі змінною структурою має значні переваги щодо точності розрахунку \bar{U}_d перед ФЕЗ.

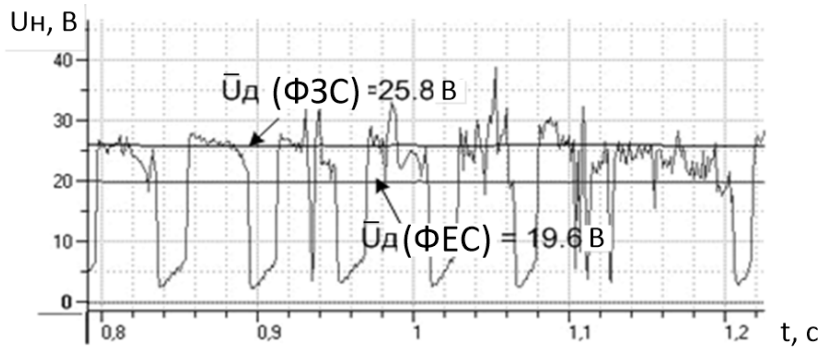


Рис. 1

вустється та які критерії якості регулювання до нього висуваються. У загальному випадку оптимальне положення регулятора RP_u визначається таким чином, щоб забезпечити мінімальну похибку регулювання, максимальну швидкість регулювання та необхідний запас стійкості системи. Для цього можуть використовуватися різні методи параметричної оптимізації, які ґрунтуються на аналізі ВАХ джерела живлення, перехідних процесів у системі та частотних характеристик регулятора й об'єкта управління.

Проведено дослідження динамічної характеристики каналу $P_u \rightarrow U_n(i)$ регулювання напруги наплавлення. На даному етапі керуючі дії імітувалися вручну з комп'ютерним записом напруги джерела ВДУ-506 $U_n(i)$. На рис. 2 показано реакцію напруги $U_n(t)$ на ступінчастий стрибок положення потенціометра P_u у часі. Бачимо, що стрибкоподібна зміна положення потенціометра P_u на 47 с з 6 до 9 (за десятибальною шкалою) призвела до зростання $U_n(i)$ з 25 до 37 В приблизно за 3 с. Результати цього випробування використано задля оптимізації моделі регулятора RP_u .

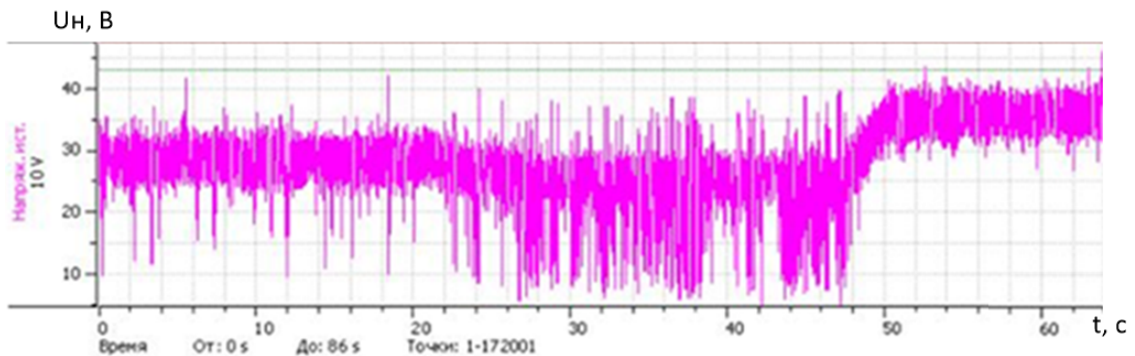


Рис. 2

Реалізація моделі. Програма Simulink є програмою у складі пакету MATLAB. Під час моделювання з використанням Simulink реалізується принцип візуального програмування, відповідно до якого користувач на екрані з бібліотеки стандартних блоків створює модель пристрою та здійснює розрахунки.

Нами створено спрощену модель формувача напруги джерела живлення ВДУ-506 під час наплавлення відкритою дугою порошковим дротом у режимі з короткими замиканнями та короткочасними обривами дуги (рис. 3). У моделі формувача передбачений вхід для зворотного зв'язку від регулятора напруги для зміни вихідної напруги ВДУ-506 відповідно до напруги уставки U_d . Зворотний зв'язок впливає на вихідну напругу джерела живлення так само, як і в реальній схемі ВДУ-506, тобто до змінної складової напруги джерела живлення додається складова від потенціометра P_u , яка коригує вихідну напругу. Частота та шпаруватість імпульсів коротких

замикань і обривів дуги змінюються в межах, що відповідають параметрам реального процесу. Оскільки в статті не передбачалося розглядати реалізацію моделі на мікроконтролері, де потрібно враховувати частоту дискретизації та обчислювальне завантаження контролера, було розглянуто питання створення та випробування не дискретної, а аналогової версії моделі.

Блок-схему моделі регулятора RP_u наведено на рис. 3, а. Регулятор працює в наступний спосіб. Модель запускається до роботи у псевдо-реальному часі заданого інтервалу. Після запуску моделі блок «ВДУ-506» (рис. 3, в) формує сигнал напруги дуги, який надходить на вхід блоку «Модель процесу наплавлення», у якому формується сумарний сигнал напруги $U_n(t)$, що включає сигнали $U_d(t)$, $U_{кз}(t)$ і $U_{обр}(t)$ (рис. 3, з). Сигнал напруги $U_n(t)$ надходить на перший вхід блоку «Індикатор», який відображає зміну сигналу $U_n(t)$ у часі.

З другого виходу блоку «ВДУ-506» на вхід блоку «Фільтр із змінною структурою» надходить сигнал напруги дуги, підготовлений для обробки в блоці «Датчик змін» (рис. 3, д) для формування коректного сигналу напруги дуги $U_d(t)$. Цей сигнал надходить на мінусовий вхід блоку «Суматор» для порівняння з сигналом уставки $U_{зад}$, який надходить з блоку «Задатчик» на плюсовий вхід блоку «Суматор».

Результат порівняння $U_d(t)$ та $U_{зад}$ з виходу блоку «Суматор» поступає на вхід блоку «ПД-регулятор». Блок-схему ПД-регулятора наведено на рис. 3, б. Сигнал з виходу блоку «ПД-регулятор» надходить на один із входів блоку «Перемикач режиму», на другий вхід якого подається сигнал із блоку P_u . Цей блок призначений для ручного регулювання $U_n(t)$. Блок «Перемикач режиму» призначений для перемикачання роботи моделі з автоматичного регулювання режиму з ПД-регулятором на ручний режим регулювання з блоком P_u . З виходу блоку «Перемикач режиму» сигнал надходить на вхід блоку «ВДУ-506» для симуляції зміни ВАХ джерела живлення. На другий вхід блоку «Індикатор» надходить сигнал $U_d(t)$ з виходу блоку «Фільтр із змінною структурою», на третій вхід блоку «Індикатор» – регулюючий сигнал $U_{рег}(t)$ з виходу блоку «Перемикач режиму» та на четвертий вхід блоку «Індикатор» – сигнал $U_{зад}$ з виходу блоку «Задатчик». Блок «Індикатор» дає змогу одночасно візуалізувати всі чотири сигнали з контролем часу на місці встановлених міток, значення рівня сигналів, тимчасову відстань між мітками, частоту зміни сигналів тощо.

Структуру блоку ПД-регулятора наведено на рис. 3, б, де: K_p – коефіцієнт посилення пропорційної складової; K_i – коефіцієнт посилення інтегральної складової; K_d – коефіцієнт посилення диференціальної складової. Налаштування параметрів ПД-регулятора здійснюється у програмному середовищі Simulink за допомогою інструмента «PID Tuner». У вкладці Model Properties вказуються необхідні коефіцієнти посилення складових. Структуру блоку «Датчик змін» наведено на рис. 3, д. У цей блок включено інерційну ланку «Згладжувач», яка симулює динамічні властивості реального процесу наплавлення із сигналом напруги $U_n(t)$, який був експериментально зафіксований (рис. 2).

Для створення якісного регулятора потрібна якісна модель об'єкта регулювання, яка будується з урахуванням аналізу відгуку об'єкта на вхідний сигнал. Відгук динамічної системи – це вихідна реакція на вхідний сигнал. Отриманий відгук динамічної системи каналом $P_u \rightarrow U_n(t)$ на ступінчастий вхідний сигнал (рис. 2) дав змогу визначити значення основних параметрів об'єкта регулювання, а саме спільної роботи блоків «ВДУ-506» і «Модель процесу наплавлення» у моделі R_{pu} .

Задля спрощення об'єкт регулювання представлено нами як інерційну ланку першого порядку, тобто ланку, яка описується диференціальним рівнянням першого порядку з постійною точкою. Права частина такого рівняння залежить тільки від незалежної змінної, а ліва – від залежної змінної та її похідної.

Сигнал «ступінчаста функція», який використовувався під час експерименту для отримання відгуку інерційної ланки, описується наступним чином:

$$U_{вх}(t) = \{U_{поч}(t), \in 0c \leq t < 47c; U_k(t), \in 47c \leq t < 80c\},$$

де $U_{вх}(t)$ – напруга на вході блоку «ВДУ-506» В; $U_{поч} = 27$ В – початкова напруга; $U_k = 36$ В – кінцева напруга; t – час, с.

Виходячи з результатів експерименту, час усталеного перехідного процесу інерційної системи на вхідний ступінчастий сигнал становив 3 с.

Відгук об'єкта регулювання, тобто інерційної ланки першого порядку, який спостерігався під час експерименту, описується як: $U_{вих}(t) = U_{поч} + \Delta U(1 - e^{-t/\tau})$, де $U_{вих}(t)$ – напруга на виході блоку «ВДУ-506»; ΔU – різниця між напругами U_k і $U_{поч}$; τ – постійна часу інерційної ланки.

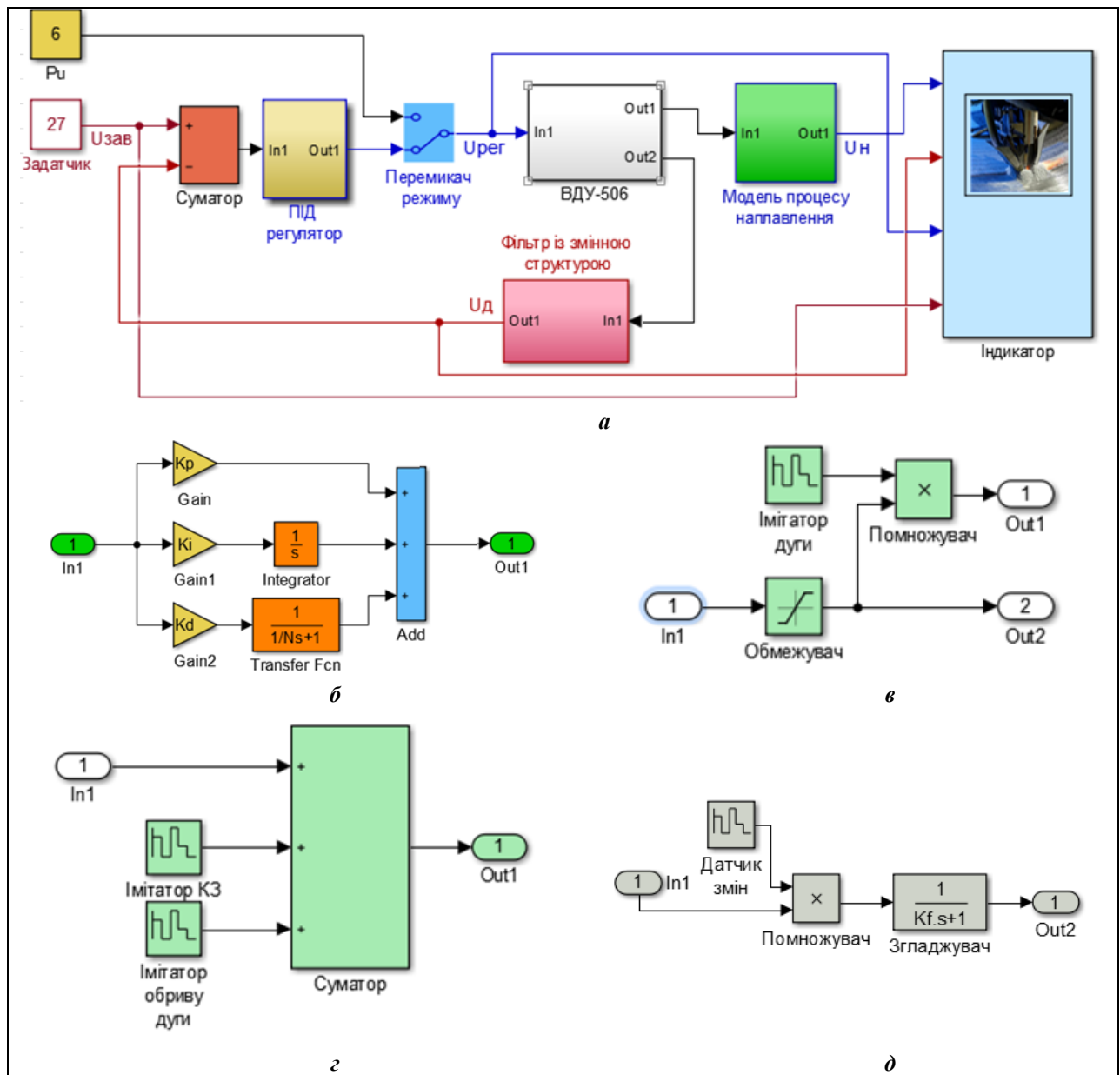


Рис. 3

За $t = \tau$ $U_{\text{вих}} = 32,6$ В. Аналізуючи графік функції відгуку, бачимо, що значення $U_{\text{вих}}(t)$ досягає значення 32,6 В за $t = 0,82$ с, тобто $\tau = 0,82$ с. У моделі та експерименті вхідні та вихідні напруги однакові, тому коефіцієнт посилення інерційної ланки дорівнює 1.

На рис. 4 представлено порівняльний графік зміни напруг у моделі та в експерименті під час наплавлення під впливом ступінчастого сигналу. Рис. 4 показує, що знайдені коефіцієнти інерційної ланки забезпечують досить точну симуляцію об'єкта регулювання.

Інерційність ланки моделі визначає блок «Згладжувач» з коефіцієнтом $K_f = \tau$, тобто 0,82. Можна констатувати, що модель об'єкта регулювання є практично адекватною фізичному об'єкту регулювання.

Симуляцію напруги $U_n(t)$ у моделі (рис. 5) виконано з урахуванням статистичних даних, отриманих під час наплавлення самозахисним порошковим дротом ПП-АН130-1 [5], а саме: $\bar{U}_n = 25,8$ В; $\bar{U}_{\text{кз}} = 6$ В; $\bar{U}_{\text{обр}} = 60$ В; $\bar{t}_{\text{кз}} = 0,1$ с; $t_{\text{обр}} = 0,5$ с; $\bar{F}_{\text{кз}} = 5$ Гц.

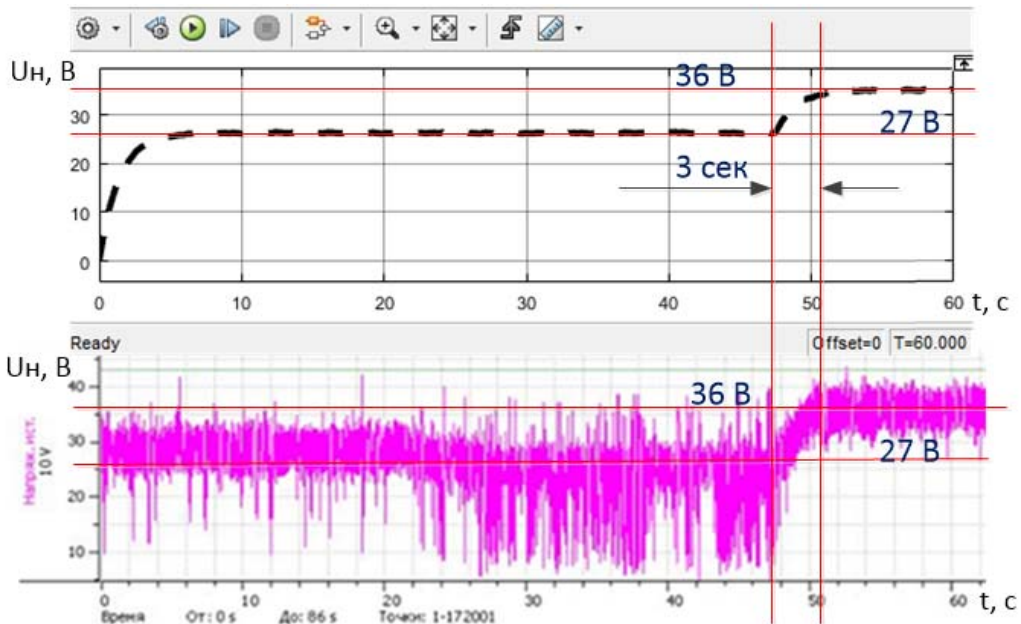


Рис. 4

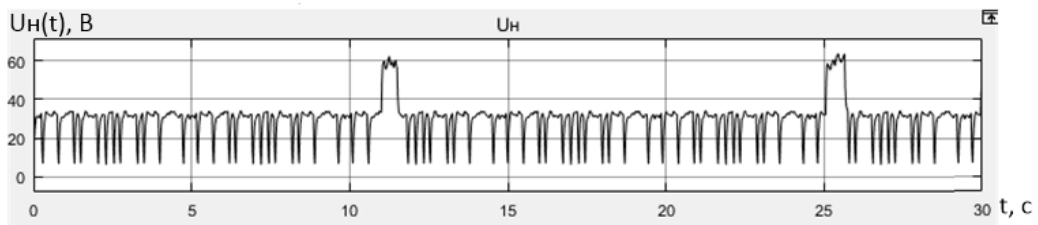


Рис. 5

Налагодження та випробування моделі регулятора. Головна мета під час розробки ПІД-регулятора – правильно визначити три коефіцієнти налаштування K_p , K_i і K_d . Ручне налаштування параметрів регулятора дає можливість вибрати оптимальні коефіцієнти посилення, але цей метод є дуже трудомістким і витратним за часом для підбору відповідних коефіцієнтів підсилення. При цьому надійність та якість регулювання будуть невисокими. Ефективнішим способом є використання програми «PID Tuner» задля оптимізації параметрів ПІД-регулятора.

Задля правильного підбору коефіцієнтів ПІД-регулятора необхідно визначити критерії підбору. Одним з таких критеріїв є робастність налаштування регулятора, тобто здатність регулятора якісно керувати об'єктом у разі невизначеності та збуреннях в параметрах і умовах роботи. Задля оцінки робастності налаштування регулятора можна використовувати:

- статичну похибку (δ), тобто різницю між заданим і фактичним значенням регульованого параметра в режимі, що встановився. З урахуванням того, що в даному випадку ми працюємо з моделлю, а не з реальним об'єктом, можна підвищити вимогу за цим параметром. Приймаємо значення статичної похибки $\delta < 0,3$;

- швидкість регулювання (t_{bc}). Це характеристика, яка показує час, протягом якого регульований параметр досягає заданого значення із заданою точністю. Цей час не повинен бути меншим за 3 с, щоб не перевищити значення K_d , інакше підвищиться чутливість до випадкових високочастотних шумів, що погіршить робастність. Але він і не повинен значно перевищувати цей час, оскільки буде знижено швидкодію регулятора. Приймаємо вимоги до швидкості регулювання (час встановлення) 3...5 с.

- перерегулювання (M_n), тобто максимальне відхилення регульованого параметра від заданого значення в процесі переходу до режиму, що встановився. Для обґрунтування значення цього параметра необхідно ухвалити рішення про його можливе максимальне значення. Як у моделі, так і в реальному джерелі ВДУ-506 існує обмеження за максимальною вихідною напругою. У ВДУ-506 це визначається ВАХ джерела живлення, а в моделі введено обмеження в 50 В. Крім того, у моделі прийнято обмеження за діапазоном значень уставок, що вводяться для U_d , а саме 10...40 В, що, в

принципі, не суперечить технологічним обмеженням. Таким чином, сформульовано вимогу, що напруга на виході об'єкта регулювання не повинна перевищувати 50 В з урахуванням перерегулювання. Звідси параметр перерегулювання має бути меншим за 10 В, тобто $M_p < 10$ В.

За допомогою програми «PID Tuner» здійснено оптимізацію коефіцієнтів ПІД-регулятора з урахуванням вимог щодо робастності налаштування. Унаслідок оптимізації ПІД-регулятора з його складу було виключено коефіцієнт диференціального посилення K_d , оскільки він набув нульового значення. Унаслідок цього в системі змінився закон регулювання з пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) на пропорційно-інтегральний (ПІ).

У таблиці наведено результати випробувань моделі регулятора RP_u на робастність для трьох значень уставок $U_{зав}$.

Параметри робастності	$U_{зав}, \text{В}$		
	10	25	40
$\delta, \text{В}$	0,297	0,271	0,295
$t_{вс}, \text{с}$	3,554	4,349	4,423
$M_p, \text{В}$	1,67	4,16	6,65

Випробування моделі показали відмінні результати за параметром «Статична похибка». Параметр «Швидкість регулювання» знаходиться в межах заданих обмежень, а параметр «Перерегулювання» – у межах заданих значень.

На рис. 6 наведено приклад записів чотирьох параметрів вимірювань напруги у моделі регулятора RP_u за $U_{зав} = 25$ В протягом 10-ти початкових секунд роботи регулятора. Це такі параметри: напруга наплавлення $U_H(t)$, напруга дуги $U_d(t)$, напруга на виході ПІД-регулятора $U_{пер}(t)$ і напруга уставки для регулятора $U_{зав}(t)$.

Праворуч на рисунку в таблиці наведено значення вимірювань часу та напруг $U_d(t)$ для 1-ї та 2-ї мітки.

U, В

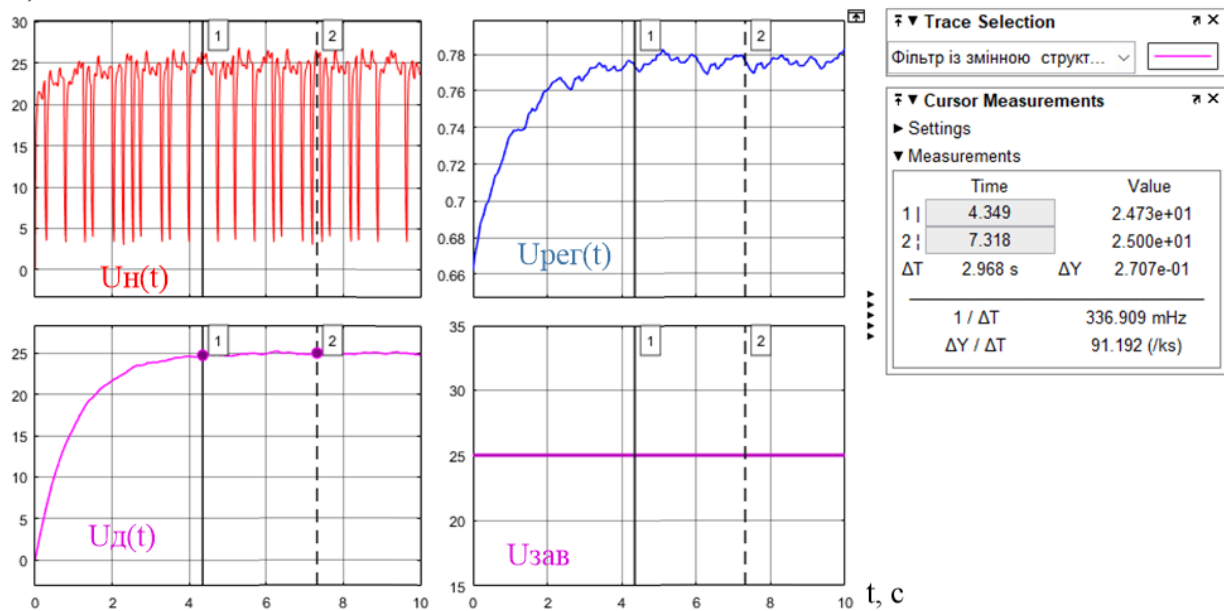


Рис. 6

Висновки. 1. Запропоновано модель ПІД-регулятора напруги дуги, яка підбирає параметр керування напругою джерела живлення так, щоб автоматично підлаштовувати та підтримувати задану напругу дуги під час електродугового наплавлення.

2. Модель ПІД-регулятора напруги дуги, яку розроблено та протестовано за допомогою програми Simulink MATLAB, надає користувачеві зручний інструмент для швидкого та точного налаштування параметрів керування наплавленням з метою досягнення найкращого результату. Запропонований ПІД-регулятор дасть змогу суттєво знизити невизначеність під час створення попередніх технологічних умов для наплавлення.

Роботу виконано за темою «Дослідити фізико-металургійні особливості утворення зварного з'єднання високолегованих інструментальних сталей і сплавів з вуглецевими конструкційними сталями і

розробити методи підвищення ефективності технологій їх наплавлення» відомчого цільового замовлення НАН України та фінансовано з коштів державного бюджету (КПКБК 6541030).

1. Egerland S., Zimmer J., Brunmaier R., Nussbaumer R., Posch G., Rutzinger B. Advanced gas tungsten arc welding (surfacing) current status and application. *The Paton Welding Journal*. 2016. No 3. Pp. 2–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.03.01>.
2. Ivanov V.P., Lavrova E.V. Improving the Efficiency of Strip Cladding by the Control of Electrode Metal Transfer. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 682. Pp. 266–269. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.682>.
3. Phuc Thinh Doan, Pandu Sandi Pratama, Suk Yoel Kim, Hak Kyeong Kim, Hwang Yeong Yeun, Gi Sig Byun, Sang Bong Kim. Development of Digital Gas Metal Arc Welding System and Welding Current Control Using Self-tuning Fuzzy PID. *Journal of Ocean Engineering and Technology*. 2011. Vol. 25(6). Pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.5574/KSOE.2011.25.6.001>.
4. Ting Lei, Chaoqun Wu, Huiwen Yu. Electric Arc Length Control of Circular Seam in Welding Robot Based on Arc Voltage Sensing. *IEEE Sensors Journal*. 2022. Vol. 22. Issue 4. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9681849> (дата доступу 15.07.2023).
5. Lebedev V.A., Dragan S.V., Goloborodko Zh.G., Simutenkov I.V., Yaros Yu.A. Technological characteristics of automatic submerged arc surfacing with high-frequency oscillations of electrode end. *The Paton Welding Journal*. 2014. No 8. Pp. 33–36. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.08.05>.
6. Гулаков С.В., Носовский М.Б., Матвиенко В.Н. Оптимизация угла наклона характеристики источника питания при широкослойной наплавке ленточным электродом. *Вісник приазовського державного технічного університету*. 2001. Вип. 11. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/72005963.pdf> (дата доступу 15.07.2023).
7. Ryabtsev I.A., Lankin Yu.N., Soloviov V.G., Osechkov P.P., Tishchenko V.A., Tikhomirov A.G. Computer information-and-measuring system for investigation of arc surfacing processes. *The Paton Welding Journal*. 2015. No 9. Pp. 32–35. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.09.05>.
8. Lankin Yu.N., Soloviov V.G. Information-measuring system for arc welding and surfacing. *The Paton Welding Journal*. 2016. No 11. Pp. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.11.06>.
9. Beale M.H., Hagan M.T., Demuth H.B. Neural network toolbox user's guide. Version 7. USA: The Math Works, Inc., 2010. http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/nnet/nnet.pdf (дата доступу 15.07.2023).
10. Lankin Yu.N., Ryabtsev I.A., Soloviov V.G., Chernyak Ya.P., Zhdanov V.A. Effect of electric parameters of arc surfacing using flux-cored wire on process stability and base metal penetration. *The Paton Welding Journal*. 2014. No 9. Pp. 25–29. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.09.03>.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE ARC VOLTAGE PID-CONTROLLER MODEL DURING SURFACING

V.G. Solovyov, I.O. Ryabtsev, Yu.M. Lankin, I.Yu. Romanova
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine,
11, Kazymyr Malevich Str., Kyiv, 03150, Ukraine.

E-mail: hsova@gmail.com; ryabtsev39@gmail.com; lankin.v.n@gmail.com; romanova@paton.kiev.ua.

The development and testing of a PID-controller model capable of automatically adjusting and maintaining the specified arc voltage during electric arc welding are presented. Some features of arc surfacing processes are analyzed. In particular, the choice of surfacing modes, as well as the main devices - potentiometers, which are used in the electrical circuits of surfacing installations to regulate the main parameters of surfacing modes - voltage and current. Evidence is presented for the need to control the voltage directly on the arc, rather than the voltage on the power source, to regulate the welding process. Based on this analysis, a model of the PID- controller of the arc voltage during arc welding was created using the Simulink MATLAB program. The test results of the PID-controller show that the device provides more accurate and stable setting of the deposition mode than traditional control methods. The PID-controller will make it possible to significantly reduce possible errors in the development and use of technologies of automatic arc welding of various parts and products. References 10, figures 6, table 1.

Keywords: electrical arc surfacing, arc voltage, arc surfacing, current surfacing, arc filter, PID-controller, Simulink MATLAB.

1. Egerland S., Zimmer J., Brunmaier R., Nussbaumer R., Posch G., Rutzinger B. Advanced gas tungsten arc welding (surfacing) current status and application. *The Paton Welding Journal*. 2016. No 3. Pp. 2–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.03.01>.
2. Ivanov V.P., Lavrova E.V. Improving the Efficiency of Strip Cladding by the Control of Electrode Metal Transfer. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 682. Pp. 266–269. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.682>.
3. Phuc Thinh Doan, Pandu Sandi Pratama, Suk Yoel Kim, Hak Kyeong Kim, Hwang Yeong Yeun, Gi Sig Byun, Sang Bong Kim. Development of Digital Gas Metal Arc Welding System and Welding Current Control Using Self-tuning Fuzzy PID. *Journal of Ocean Engineering and Technology*. 2011. Vol. 25(6). Pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.5574/KSOE.2011.25.6.001>.
4. Ting Lei, Chaoqun Wu, Huiwen Yu. Electric Arc Length Control of Circular Seam in Welding Robot Based on Arc Voltage Sensing. *IEEE Sensors Journal*. 2022. Vol. 22. Issue 4. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9681849> (accessed date 15.07.2023).
5. Lebedev V.A., Dragan S.V., Goloborodko Zh.G., Simutenkov I.V., Yaros Yu.A. Technological characteristics of automatic submerged arc surfacing with high-frequency oscillations of electrode end. *The Paton Welding Journal*. 2014. No 8. Pp. 33–36. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.08.05>
6. Gulakov S.V., Nosovsky M.B., Matvienko V.N. Optimization of the angle of inclination of the characteristic of the power source in wide-layer surfacing with a strip electrode. *Visnyk pryazovskogo derzhavnogo technithnogo univesytetu*. 2001. Vol. 11. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/72005963.pdf> (accessed date 15.07.2023). (Rus)
7. Ryabtsev I.A., Lankin Yu.N., Soloviov V.G., Osechkov P.P., Tishchenko V.A., Tikhomirov A.G. Computer information-and-measuring system for investigation of arc surfacing processes. *The Paton Welding Journal*. 2015. No 9. Pp. 32–35. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.09.05>.
8. Lankin Yu.N., Soloviov V.G. Information-measuring system for arc welding and surfacing. *The Paton Welding Journal*. 2016. No 11. Pp. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.11.06>.
9. Beale M.H., Hagan M.T., Demuth H.B. Neural network toolbox user's guide. Version 7. USA: The Math Works, Inc., 2010. http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/nnet/nnet.pdf (accessed date 15.07.2023).
10. Lankin Yu.N., Ryabtsev I.A., Soloviov V.G., Chernyak Ya.P., Zhdanov V.A. Effect of electric parameters of arc surfacing using flux-cored wire on process stability and base metal penetration. *The Paton Welding Journal*. 2014. No 9. Pp. 25–29. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.09.03>.

Надійшла 30.08.2023
Остаточний варіант 09.10.2023