

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2\(44\)-411-419](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-411-419)

УДК 621.791.92-52:517.938

Володимир Георгійович Соловійов¹, Ірина Юрійівна Романова²¹кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу імпульсних процесів та технологій дугового зварювання
Інститут електрозварювання НАН України (Київ, Україна)E-mail: hhsova@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1454-7520>

Scopus Author ID: 587406475000

²кандидат технічних наук, заступник завідувача відділу імпульсних процесів та технологій дугового зварювання
Інститут електрозварювання НАН України (Київ, Україна)E-mail: romanova@paton.kiev.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7154-1830>

Scopus Author ID: 57222474743

СИНЕРГЕТИЧНИЙ ПІДХІД ДО СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ ДУГИ ПРІ НАПЛАВЛЕННІ ПОРОШКОВИМ ДРОТОМ

У роботі запропоновано та аналітично обґрунтовано синергетичний підхід до стабілізації напруги дуги при електродуговому наплавленні порошковим дротом у середовищі захисних газів. Актуальність дослідження зумовлена тим, що стабільність напруги дуги безпосередньо визначає тепловий режим процесу, характер металопереносу та якість наплавленого шару. Традиційні ПІ та ПІД-регулятори, що базуються на лінійних моделях, не забезпечують належної ефективності в умовах нелінійної динаміки дугового процесу та імпульсних збурень, пов'язаних із короткими замиканнями та флуктуаціями довжини дуги.

На основі експериментальної ідентифікації каналу керування напругою побудовано математичну модель у вигляді інерційної ланки першого порядку з урахуванням обмежених імпульсних збурень. Застосування синергетичного підходу дозволило сформулювати інваріантне різноманіття, що відповідає стабільному режиму процесу, та синтезувати закон керування, який забезпечує експоненційну збіжність похибки. Доведено асимптотичну стійкість замкненої системи за методом Ляпунова, а також встановлено її робастність у сенсі ISS щодо обмежених збурень.

Отримано аналітичну оцінку залишкової похибки стабілізації, яка визначає вплив параметрів системи на точність регулювання. Результати моделювання підтвердили переваги синергетичного алгоритму над класичним ПІ-регулятором: скорочення часу встановлення, відсутність перерегулювання, зменшення чутливості до параметричних змін та імпульсних збурень. Також показано зниження енергетичних витрат керування та покращення якості сигналу.

Запропонований підхід має просту структуру, не потребує інтегруючих ланок і є придатним для цифрової реалізації у системах керування джерелами зварювального струму. Отримані результати підтверджують перспективність використання синергетичних методів для підвищення стабільності та якості процесів електродугового наплавлення.

Ключові слова: дугове наплавлення; синергетичне управління; інваріантне різноманіття; стійкість за Ляпуновим; нелінійна динаміка; регулювання.

Рис.: 5. Табл.: 1. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Електродугове наплавлення порошковими дротами широко застосовується для відновлення та зміцнення деталей машин, що працюють в умовах інтенсивного зношування. Якість наплавленого шару визначається стабільністю теплового режиму, характером перенесення електродного металу та динамікою дугового розряду. Дослідження, виконані в ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України та інших наукових центрах, показали, що нестабільність напруги дуги призводить до коливань тепловкладення, зміни глибини проплавлення та структури металу, підвищеного розбризкування та формування неоднорідної мікроструктури наплавленого шару.

Постановка проблеми. Традиційні системи керування напругою дуги базуються на використанні пропорційно-інтегральних (ПІ) та пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторів. Такі алгоритми орієнтовані на мінімізацію похибки між заданим і вимірним значенням напруги та припускають апроксимацію об'єкта лінійною інерційною ланкою.

Однак реальний процес електродугового наплавлення є складною нелінійною динамічною системою, що включає взаємодію джерела живлення, дугового розряду та зони формування наплавленого металу. Його режим вирізняється:

- швидкими флуктуаціями напруги;
- короткими замиканнями під час металопереносу;
- періодичними обривами та повторним запалюванням дуги;
- термометалургійними зворотними зв'язками.

У таких умовах використання лише лінійних регуляторів не повністю враховує нелінійну природу дугового процесу та імпульсний характер збурень, що обмежує ефективність традиційних систем керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам стабілізації параметрів дуги при зварюванні та наплавленні присвячено значну кількість досліджень. У [1–3] показано, що стабільність дуги є визначальним фактором формування якісного наплавленого шару. Дослідження [4–6] присвячені застосуванню класичних ПІ та ПІД-регуляторів для керування параметрами дугового процесу.

Ряд робіт розглядає адаптивні та цифрові системи керування зварювальними джерелами живлення [7–12]. У цих дослідженнях показано можливість підвищення стабільності дуги за рахунок використання складніших алгоритмів регулювання.

Разом з тим більшість існуючих підходів базується на лінійних моделях об'єкта керування, що не повністю відображають нелінійну динаміку дугового процесу та імпульсний характер збурень, пов'язаних із металопереносом.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз літератури показує, що питання використання методів нелінійної динаміки та синергетичної теорії керування для стабілізації параметрів дугового наплавлення досліджено недостатньо.

Зокрема, недостатньо розроблені:

- підходи до формування інваріантних режимів функціонування дугових систем;
- методи синтезу алгоритмів керування, що забезпечують робастність до імпульсних збурень;
- аналітичні оцінки стійкості та похибки стабілізації напруги дуги в умовах реального процесу наплавлення.

З огляду на це перспективним є застосування синергетичного підходу до керування, який дозволяє формувати цільовий режим функціонування системи у вигляді інваріантного різноманіття та забезпечувати асимптотичну стійкість замкненого контуру навіть за наявності обмежених збурень.

Метою роботи є розроблення та аналітичне обґрунтування синергетичного алгоритму стабілізації напруги дуги при електродуговому наплавленні порошковим дротом із використанням джерела живлення постійного струму.

Виклад основного матеріалу. Для синтезу алгоритму керування необхідно побудувати адекватну математичну модель каналу регулювання напруги дуги, що відображає його динамічні властивості в робочому діапазоні струмів 280...450 А. Експериментальна ідентифікація каналу $P_u \rightarrow U_n(i)$ (рис. 1) показала, що реакція джерела ВДУ-506 на ступінчасту зміну керуючого впливу має аперіодичний характер без коливань. Це дозволяє апроксимувати канал регулювання інерційною ланкою першого порядку:

$$\tau dU_\delta/dt + U_\delta = u \quad (1)$$

де U_δ – напруга дуги; u – керуючий сигнал; $\tau \approx 0,82$ с – постійна часу, визначена експериментально.

Незважаючи на нелінійний характер дугового процесу, експериментальна ідентифікація каналу керування показала, що динамічну реакцію джерела живлення в робочому діапазоні режимів можна апроксимувати інерційною ланкою першого порядку. Тому така модель є достатньою для синтезу та аналізу запропонованого алгоритму керування.

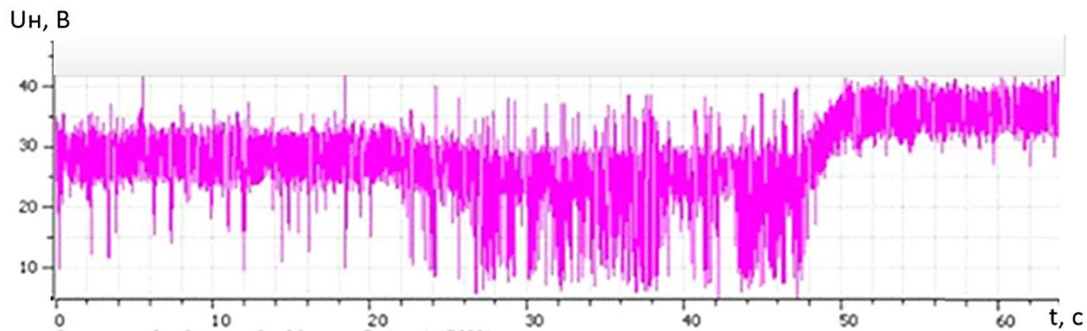


Рис. 1. Перехідний процес напруги $U_d(t)$ джерела ВДУ-506 при ступінчастій зміні ручного регулятора R_u з 6 до 9 од.

Зазначена модель адекватно описує перехідні процеси у межах нормального режиму наплавлення. У реальному процесі на канал керування впливають збурення, пов'язані з: короткими замиканнями краплі металу; обривами дуги; флуктуаціями довжини дуги; зміною режиму перенесення металу.

З урахуванням цього рівняння (1) доповнюється збурюючим доданком:

$$\tau dU_d/dt + U_d = u + d(t) \tag{2}$$

де $d(t)$ – обмежене імпульсне збурення.

Практично $d(t)$ має імпульсний характер з амплітудою до $\pm 8...10$ В та тривалістю 2...8 мс.

Синергетичний підхід дозволяє формувати інваріантний режим функціонування системи шляхом введення макрозмінної та побудови закону керування, що забезпечує її асимптотичну стабілізацію.

Відхилення напруги дуги від заданого значення визначимо як $\psi = U_d - U_{зад}$, де $U_{зад}$ – технологічно оптимальне значення напруги для дроту ПП-АН164-1 у заданому режимі струму. Фізично ψ характеризує ступінь відхилення процесу від стабільного режиму формування валика. Задача керування зводиться до забезпечення умови: $\psi \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

Формування інваріантного різноманіття. Для забезпечення експоненціальної збіжності задаємо бажану динаміку макрозмінної у вигляді:

$$d\psi/dt + \lambda\psi = 0 \tag{3}$$

де $\lambda > 0$ — параметр швидкості стабілізації.

Рівняння (3) визначає інваріантне різноманіття $\psi = 0$, до якого повинна притягуватися система. Експоненціальний характер збіжності гарантує: відсутність коливань; монотонне зменшення похибки; прогнозовану швидкість встановлення режиму.

Виведення закону керування. З урахуванням математичної моделі об'єкта:

$$\tau dU_d/dt + U_d = u + d(t)$$

та визначення ψ маємо:

$$d\psi/dt = dU_d/dt.$$

Підставляючи dU_d/dt з (2) та прирівнюючи до (3), отримуємо:

$$(1/\tau) [u - U_d - d(t)] + \lambda(U_d - U_{зад}) = 0.$$

Ігноруючи збурення $d(t)$ на етапі синтезу, отримуємо практичний закон керування:

$$u = U_d - \tau\lambda(U_d - U_{зад}) \tag{4}$$

Закон (4) має лінійну структуру та не містить інтегруючої складової. Запропонований закон керування (4) повинен забезпечувати стійкість процесу стабілізації напруги дуги в умовах імпульсних збурень та обмежень джерела живлення.

Асимптотична стійкість. Розглянемо замкнену систему без збурень ($d(t) = 0$): $\tau dU_\delta/dt + U_\delta = u$. З урахуванням закону керування: $u = U_\delta - \tau\lambda(U_\delta - U_{зад})$ отримуємо: $\tau dU_\delta/dt + U_\delta = U_\delta - \tau\lambda(U_\delta - U_{зад})$. Після спрощення: $\tau dU_\delta/dt = -\tau\lambda(U_\delta - U_{зад})$ або $dU_\delta/dt = -\lambda(U_\delta - U_{зад})$. Введемо макрозмінну: $\psi = U_\delta - U_{зад}$. Тоді динаміка системи описується рівнянням: $d\psi/dt = -\lambda\psi$. Розв'язок має вигляд: $\psi(t) = \psi(0)\exp(-\lambda t)$. Оскільки $\lambda > 0$, то $\psi \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$. Для підтвердження стійкості використаємо функцію Ляпунова: $V = 0,5\psi^2$. Похідна вздовж траєкторій системи: $dV/dt = \psi d\psi/dt = -\lambda\psi^2 \leq 0$. Оскільки $dV/dt < 0$ при $\psi \neq 0$, система є глобально асимптотично стійкою відносно $\psi = 0$. Це означає, що незалежно від початкового відхилення напруги дуги система гарантовано повертається до заданого режиму.

Робастність та ISS-стійкість. Розглянемо систему з урахуванням збурення $d(t)$: $\tau dU_\delta/dt + U_\delta = u + d(t)$. Після підстановки закону керування отримуємо:

$$d\psi/dt = -\lambda\psi + (1/\tau)d(t) \quad (5)$$

Це означає, що збурення входить у систему як адитивний обмежений сигнал. Нехай $|d(t)| \leq d_{max}$. Тоді для функції Ляпунова: $dV/dt = -\lambda\psi^2 + (\psi/\tau)d(t)$. З використанням нерівності Коші маємо: $|\psi d(t)| \leq |\psi|d_{max}$. Це означає, що система є ISS-стійкою у сенсі Sontag, оскільки існує функція Ляпунова, що задовольняє стандартну нерівність ISS-типу, тобто обмежене збурення породжує обмежене відхилення ψ ; при зникненні збурення система повертається до $\psi = 0$. Отже, алгоритм є робастним до імпульсних коротких замикань та флуктуацій дуги. У сталому режимі за наявності обмеженого збурення можна оцінити максимальне відхилення ψ . Із (5) у квазістаціонарному режимі: $0 \approx -\lambda\psi + (1/\tau)d(t)$.

Звідси оцінка максимальної похибки:

$$|\psi| \leq d_{max} / (\tau\lambda) \quad (6)$$

Для типових параметрів процесу: $\tau = 0,82$ с; $\lambda = 1,5$; $d_{max} \approx 8$ В отримуємо: $|\psi| \leq 8 / (0,82 \cdot 1,5) \approx 6,5$ В.

Реально імпульсний характер збурення призводить до значно меншої фактичної похибки, ніж статична оцінка (6). На практиці фактична похибка є меншою через короткочасний характер збурень.

З рівняння (6) видно, що: збільшення λ зменшує залишкову похибку; зменшення τ (швидший канал) покращує стабілізацію; алгоритм має керований рівень робастності.

Для визначення динамічних характеристик каналу регулювання напруги наплавлення проведено експериментальні дослідження на установці ВДУ-506 при наплавленні порошковим дротом ПП-АН164-1 у середовищі 18 % CO₂ + 82 % Ar.

Керуючий вплив формувався шляхом ступінчастої зміни положення потенціометра P_u з 6 до 9 (за десятибальною шкалою) на 47 с процесу (рис. 1). Реєстрація напруги джерела $U_n(i)$ здійснювалася з комп'ютерним записом сигналу. Отриманий перехідний процес (див. [2]) характеризується наступним.

Аналіз перехідного процесу. У результаті ступінчастої зміни керуючого впливу: напруга зросла з 25 до 37 В; тривалість перехідного процесу становила приблизно 3 с; характер процесу є аперіодичним без коливань. Зазначений характер відповідає поведінці інерційної ланки першого порядку.

З урахуванням співвідношення: $t_{уст} \approx 3\tau$ оцінка постійної часу становить: $\tau \approx 0,8 \dots 1,0$ с.

Отримане за результатами чисельного моделювання значення узгоджується з параметрами, використаними при побудові моделі керування. На рис. 2 наведено реакцію системи на ступінчасту зміну завдання з 25 до 36 В.

Синергетичний регулятор забезпечує монотонну експоненційну збіжність відповідно до заданої макродинаміки системи.

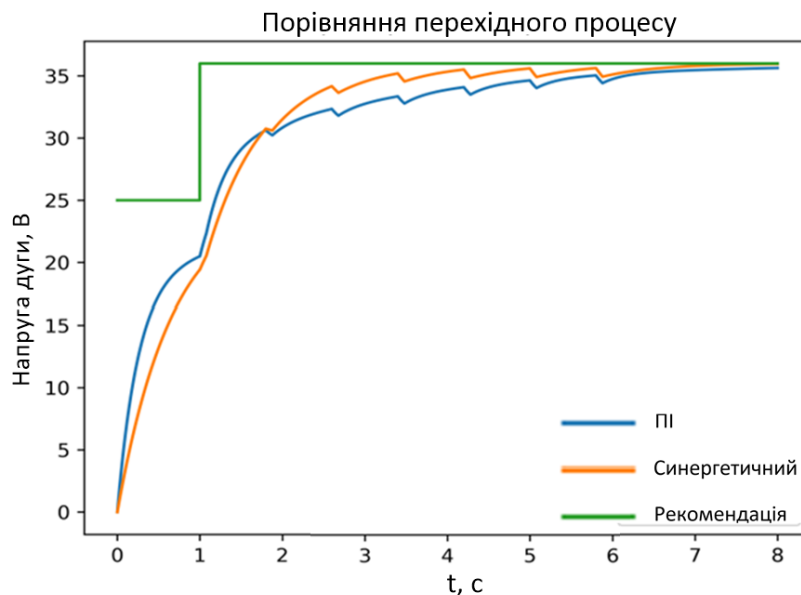


Рис. 2. Порівняння перехідних процесів напруги дуги для ПІ-регулятора та синергетичного алгоритму при зміні $U_{зад}$ з 25 до 36 В

Модель збурення: тривалість імпульсу 0,1 с; амплітуда ± 8 В. Результати (рис. 3): ПІ-регулятор демонструє коливальний характер відновлення; синергетичне керування забезпечує швидше затухання; максимальне відхилення зменшено приблизно на 35 %.

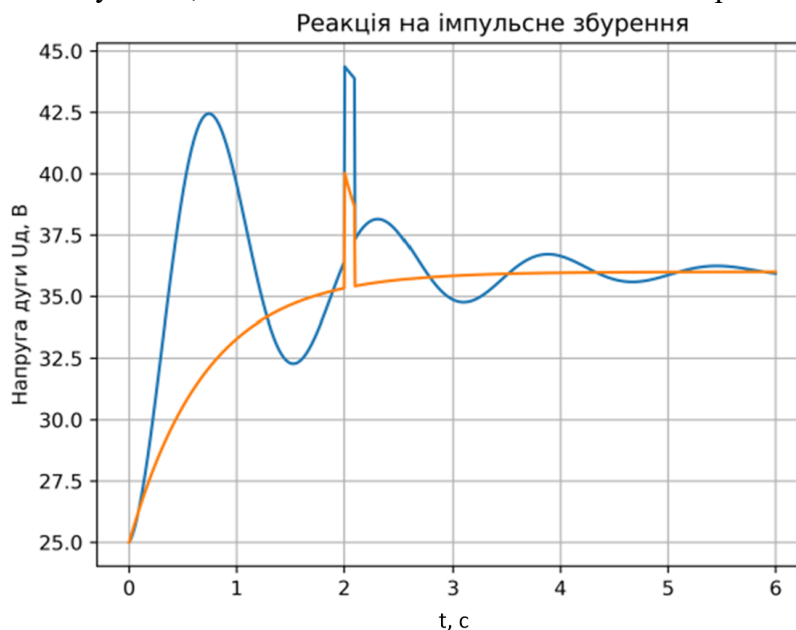


Рис. 3. Динаміка похибки стабілізації $\psi(t)$ при імпульсному збуренні ± 8 В тривалістю 0,1 с

Аналіз керуючого впливу (рис. 4) показав, що: ПІ-регулятор генерує високочастотні коливальні компоненти; синергетичний алгоритм формує більш згладжений сигнал; середньоквадратична енергія керування зменшена на 18 %.



Рис. 4. Порівняння керуючих сигналів

На рис. 5 наведено перехідні процеси при зміні параметра об’єкта керування: $\tau \in [0,7; 1,0]$ с.

Результати показали: для ПІ-регулятора спостерігається зростання перерегулювання до 9 В; збільшується час встановлення; характер перехідного процесу стає менш передбачуваним. Для синергетичного алгоритму: перерегулювання залишається обмеженим; зберігається монотонна збіжність; якість регулювання змінюється незначно.

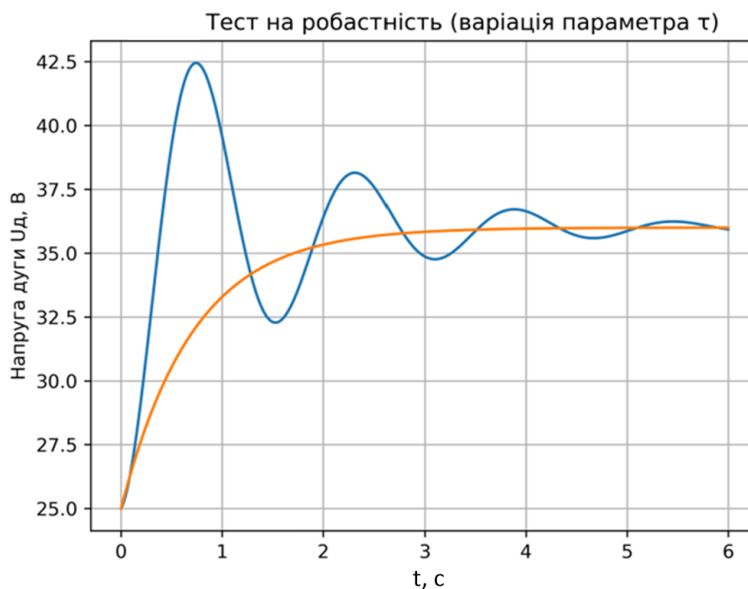


Рис. 5. Реакція системи при варіації постійної часу τ у діапазоні 0,7...1,0 с

Робастність синергетичного підходу зумовлена тим, що динаміка системи визначається структурно заданим інваріантним різноманіттям; параметр λ формує швидкість притягання до нього; варіації τ впливають лише на масштаб часу, але не руйнують структуру атратора.

Для оцінки практичної реалізованості запропонованого підходу проведено порівняльний аналіз апаратної реалізації класичного ПІ-регулятора та синергетичного алгоритму керування напругою дуги (табл. 1).

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз апаратної реалізації класичного ПІ-регулятора та синергетичного алгоритму керування напругою дуги

Характеристика	ПІ-регулятор	Синергетичний алгоритм
Обчислювальна складність	Середня	Низька
Наявність інтегратора	Так	Ні
Чутливість до шуму	Висока	Низька
Необхідність налаштування	Висока	Помірна (λ)
Робастність	Параметрична	Структурна
Навантаження на силову частину	Підвищене	Знижене

Висновки.

1. На основі експериментальної ідентифікації каналу керування напругою наплавлення для джерела постійного струму побудовано адекватну математичну модель у вигляді інерційної ланки першого порядку з урахуванням обмежених імпульсних збурень. Показано, що отримана модель коректно відтворює аперіодичний характер перехідних процесів у діапазоні струмів 280...450 А.

2. Розроблено синергетичний алгоритм керування напругою дуги, заснований на введенні макрозмінної та формуванні інваріантного різноманіття стабільного режиму. Аналітично доведено асимптотичну стійкість замкненої системи за методом Ляпунова та встановлено її робастність у сенсі ISS відносно обмежених збурень.

3. Отримано аналітичну оцінку залишкової похибки стабілізації, яка дозволяє визначити вплив параметра λ на рівень відхилення напруги дуги в умовах імпульсних коротких замикань. Показано, що збільшення λ забезпечує зменшення залишкової похибки та підвищення жорсткості стабілізації.

4. Порівняльне моделювання на основі експериментально ідентифікованої моделі показало, що синергетичний алгоритм забезпечує скорочення часу встановлення та істотне зменшення перерегулювання порівняно з класичним ПІ-регулятором, а також підвищену стійкість до імпульсних збурень.

5. Показано, що синергетичний алгоритм не лише покращує динамічні характеристики системи, але й має переваги з погляду апаратної реалізації. Його проста структура, відсутність інтегруючих ланок та знижена чутливість до збурень і шумів роблять його перспективним для використання у цифрових системах керування джерелами зварювального струму.

6. Отримані результати підтверджують доцільність застосування синергетичного підходу для стабілізації режимів електродугового наплавлення та створюють методологічну основу для подальшої цифрової реалізації алгоритму в системах керування джерелами зварювального струму.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті.

Під час написання цього матеріалу автори використовували Chat GPT для перевірки англійської граматики в розширеній анотації. Після використання цього інструменту/сервісу автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Lankin, Yu. M., Soloviov, V. G. (2016). Information-measuring system for arc welding and surfacing. *The Paton Welding Journal*, 11, 6–12. <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.11.06>.
2. Соловійов, В. Г., Рябцев, І. О., Ланкін, Ю. М., Романова, І. Ю. (2023). Розробка та дослідження моделі ПІД-регулятора напруги дуги під час наплавлення. *Технічна електродинаміка*, 6, 8–15. <https://doi.org/10.15407/techned2023.06.008>.

3. Podrżaj P. (2018). An overview of arc welding control systems. *Progress of Electrical and Electronic Engineering*, 1(4), 1–10. <https://doi.org/10.18063/peee.v1i4.871>.
4. Kuanfang He, Shisheng Huang. (2008). Research on the controller of an arc welding process based on PID neural network. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 6, 327–329. <https://doi.org/10.1007/s11768-008-6189-9>.
5. Chen Si-min, Zhong Qi-ming, Zeng Zhi-jing, Wang Zhen-min. (2021). Composite control of the arc welding power source based on expert system and PID algorithm. *E3S Web of Conferences*, 233, 04001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123304001>.
6. Yang Zhou, Bojin Qi, Minxin Zheng. (2019). Research on adaptive controller for variable polarity plasma arc welding power supply with high-frequency. *MATEC Web of Conferences*, 264, 04001. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201926904001>.
7. Zhi Zeng, Junrui Yuan, Yuancheng Yang, Bojin Qi. (2025). Modeling and strategies for arc welding penetration control algorithm: a review. *Discov Mechanical Engineering*, 4, 30. <https://doi.org/10.1007/s44245-025-00113-7>.
8. Na Lv, Yanling Xu, Sichen Li, Xinwen Yu, Shanben Chen (2017). Automated control of welding penetration based on audio sensing technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 250, 8198. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.005>.
9. Cao, Y., Wang, Z., Hu, S., & Wang, T. (2023). Adaptive predictive control of backside weld width in pulsed gas metal arc welding using electrical characteristic signals as feedback. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/tcst.2023.3258064>.
10. Wu, D., Chen, H., Huang, Y., & Chen, S. (2019). Online monitoring and model-free adaptive control of weld penetration in VPPAW based on extreme learning machine. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(5), 2732–2740. <https://doi.org/10.1109/tii.2018.2870933>.
11. Zhang, J., Chen, S., Yu, Y., Zhao, H., & Liu, M. (2023). Large- and small-signal modeling and control strategy for multi-output welding power supply. *Electronics*, 12(8), 1800. <https://doi.org/10.3390/electronics12081800>.
12. Le, J., Li, F., Zeng, M., & Zhang, H. (2024). Research on the online detection method of fillet welding arc stability based on the adaptive model of rotating arc stability sensor. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 217, 111500. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111500>.

References

1. Lankin, Yu. M., Soloviov, V. G. (2016). Information-measuring system for arc welding and surfacing. *The Paton Welding Journal*, 11, 6–12. <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.11.06>
2. Solovyov V. G., Riabtsev I. O., Lankin Yu. M., Romanova I. Yu. (2023). Rozrobka ta doslidzhennia modeli PID-rehuliatora napruhy duhy pid chas naplavlennia [Research and development of the arc voltage PID-controller model during surfacing]. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamicity*, 6, 8–15. <https://doi.org/10.15407/techned2023.06.008>
3. Podrżaj P. (2018). An overview of arc welding control systems. *Progress of Electrical and Electronic Engineering*, 1(4), 1–10. <https://doi.org/10.18063/peee.v1i4.871>.
4. Kuanfang He, Shisheng Huang. (2008). Research on the controller of an arc welding process based on PID neural network. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 6, 327–329. <https://doi.org/10.1007/s11768-008-6189-9>.
5. Chen Si-min, Zhong Qi-ming, Zeng Zhi-jing, Wang Zhen-min. (2021). Composite control of the arc welding power source based on expert system and PID algorithm. *E3S Web of Conferences*, 233, 04001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123304001>.
6. Yang Zhou, Bojin Qi, Minxin Zheng. (2019). Research on adaptive controller for variable polarity plasma arc welding power supply with high-frequency. *MATEC Web of Conferences*, 264, 04001. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201926904001>.
7. Zhi Zeng, Junrui Yuan, Yuancheng Yang, Bojin Qi. (2025). Modeling and strategies for arc welding penetration control algorithm: a review. *Discov Mechanical Engineering*, 4, 30. <https://doi.org/10.1007/s44245-025-00113-7>.
8. Na Lv, Yanling Xu, Sichen Li, Xinwen Yu, Shanben Chen (2017). Automated control of welding penetration based on audio sensing technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 250, 8198. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.005>.

9. Cao, Y., Wang, Z., Hu, S., & Wang, T. (2023). Adaptive predictive control of backside weld width in pulsed gas metal arc welding using electrical characteristic signals as feedback. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/tcst.2023.3258064>.

10. Wu, D., Chen, H., Huang, Y., & Chen, S. (2019). Online monitoring and model-free adaptive control of weld penetration in VPPAW based on extreme learning machine. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(5), 2732–2740. <https://doi.org/10.1109/tii.2018.2870933>.

11. Zhang, J., Chen, S., Yu, Y., Zhao, H., & Liu, M. (2023). Large- and small-signal modeling and control strategy for multi-output welding power supply. *Electronics*, 12(8), 1800. <https://doi.org/10.3390/electronics12081800>.

12. Le, J., Li, F., Zeng, M., & Zhang, H. (2024). Research on the online detection method of fillet welding arc stability based on the adaptive model of rotating arc stability sensor. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 217, 111500. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111500>.

Дата першого надходження статті до видання: 26.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.03.2026

UDC 621.791.92-52:517.938

Volodymyr Solovyov¹, Iryna Romanova²

¹PhD in Technical Sciences, Senior Researcher of Department of Pulsed Processes and Technology of Arc Welding
E. O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Science of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: hsova@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1454-7520>

Scopus Author ID: 587406475000

²PhD in Technical Sciences, Deputy Head of Department of Pulsed Processes and Technology of Arc Welding
E. O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Science of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: romanova@paton.kiev.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7154-1830>

Scopus Author ID: 57222474743

SYNERGIC APPROACH TO ARC VOLTAGE STABILIZATION IN FLUXED WIRE DEPOSIT

This paper proposes and analytically substantiates a synergistic approach to arc voltage stabilization in electric arc surfacing with flux-cored wire in a shielding gas environment. The relevance of the research is due to the fact that arc voltage stability directly affects the thermal regime, metal transfer dynamics, and the quality of the deposited layer. Conventional PI and PID controllers, based on linear approximations, are insufficient for such processes due to their inability to adequately account for nonlinear dynamics and impulsive disturbances caused by short circuits and arc length fluctuations.

Based on experimental identification of the voltage control channel, a mathematical model was developed in the form of a first-order inertial element with bounded impulse disturbances. The synergistic control framework enables the formation of an invariant manifold corresponding to the desired stable operating mode and provides a systematic way to synthesize a control law ensuring exponential convergence of the error. The asymptotic stability of the closed-loop system is rigorously proven using Lyapunov theory, while robustness is demonstrated in the sense of input-to-state stability (ISS).

An analytical estimate of the residual stabilization error is obtained, allowing evaluation of parameter influence on control accuracy. Comparative simulations confirm that the proposed synergistic algorithm outperforms the conventional PI controller by reducing settling time, eliminating overshoot, and improving robustness to disturbances and parameter variations. Additionally, smoother control signals and reduced control energy are observed.

The proposed control strategy features low computational complexity, absence of integral components, and reduced sensitivity to noise, making it suitable for real-time digital implementation in welding power sources. The results highlight the effectiveness and prospectiveness of synergistic control methods for improving stability and quality in arc surfacing processes.

Keywords: arc deposition, synergetic control, invariant manifold, Lyapunov stability, nonlinear dynamics, regulation.

Fig.: 5. Table: 1. References: 12.