

ФОРМУВАЧ ЗВАРЮВАЛЬНОГО СТРУМУ НА БАЗІ ОДНОФАЗНОГО ІНДУКОНА

О.Є. Коротинський, А.М. Жерносков, І.В. Вертецька

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: epis@ukr.net

Наведено огляд різних типів формувачів, які застосовуються в імпульсно-дуговому зварюванні. Показано, що основні тренди дослідження в цій галузі спрямовані на підвищення енергоефективності зварювальних перетворювачів, що відрізняються високим коефіцієнтом корисної дії. Істотну увагу приділено формувачам на основі штучних довгих ліній, що працюють у широкому діапазоні струму та напруги на дузі. Щодо частотно-часових параметрів електричних сигналів таких формувачів, усі вони можуть працювати в діапазоні частот від одиниць герц до сотень мегагерц. Унаслідок цього їхня енергоефективність змінюється несуттєво. Подальший розвиток ідей побудови генераторів з використанням штучних довгих ліній призвів до створення перетворювачів на основі індуконів, а також квазііндуконів. Бібліогр. 8, рис. 5.

Ключові слова: формувачі зварювального струму, індуктивно-ємнісні перетворювачі, штучна довга лінія, індукон, квазііндукон

Вступ. Істотний інтерес у разі створення пристроїв для імпульсно-дугового зварювання становлять джерела на основі тригерного ефекту [1], а також пристрої на основі штучних довгих ліній [2]. Особливе місце тут займають імпульсні формувачі на основі індуконів. Індуконем називають електричний пристрій [3, 4], виконаний на магнітопроводі із електротехнічної сталі, та який складається з двох обмоток, розділених діелектриком. Одна з обмоток і кінець іншої під'єднується до джерела змінної напруги, а кінець першої і початок другої з'єднуються з навантаженням. Такі індуктивно-ємнісні перетворювачі з розподіленими параметрами є перспективними для використання у зварювальному устаткуванні, що працює не тільки на високій, а й на промисловій частоті (50/60 Гц). Для узгодження навантаження з індуконем зазвичай використовують додатковий трансформатор. В іноземній літературі [5, 6] цим формувачам також приділяється серйозна увага завдяки їх високим техніко-економічним показникам.

Метою даної роботи є створення дослідного зразка зварювального пристрою на основі індукона. Для цього, насамперед, необхідно провести теоретичний аналіз роботи даного пристрою.

Теоретичне обґрунтування та аналіз роботи перетворювача на основі індукона. Один із можливих варіантів зварювального пристрою, призначеного для зварювання штучними електродами, наведено на рис. 1. Необхідний рівень стабілізації зварювального струму досягається в цій схемі за рахунок застосування на вході зварювального трансформатора (ТЗ) індукона, параметри якого вибираються відповідно до рекомендацій, наведених у [4]. ТЗ у цьому випадку виконує роль узгоджувального пристрою, який забезпечує необхідний рівень вторинної напруги. Докладніше методику розрахунку перетворювачів з індуконем наведено в [4], де отримано систему рівнянь, що визначає основні параметри індукона. Скористаємося цими результатами та адаптуємо їх до зварювального пристрою.

Потужність на виході індукона (P_i):

$$P_i = I_i \cdot U_1 = v \cdot U_c^2 / (2 \cdot \omega \cdot L_i),$$

де I_i – струм в індуконі; U_1 – вхідна напруга зварювального трансформатора; v – коефіцієнт, що характеризує конструктивні особливості індукона (його значення зазвичай знаходиться в межах 0,5...2,5); U_c – напруга мережі живлення; ω – частота мережі живлення; L_i – індуктивність обмотки індукона.

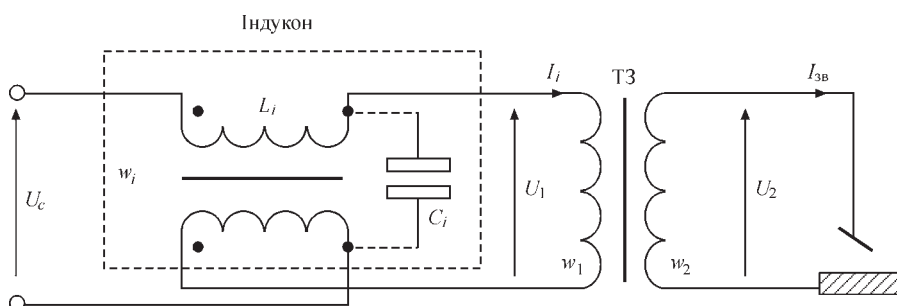


Рис. 1. Зварювальний пристрій з індуконем

Коротинський О.Є. – <https://orcid.org/0000-0002-6461-8980>, Жерносков А.М. – <https://orcid.org/0000-0002-6404-2221>, Вертецька І.В. – <https://orcid.org/0000-0003-4971-7929>

© О.Є. Коротинський, А.М. Жерносков, І.В. Вертецька, 2025

З урахуванням того, що $U_1 = k_{TP} U_2$ (де $k_{TP} = w_1/w_2$ – коефіцієнт трансформації ТЗ), отримаємо для вихідної напруги:

$$U_2 = v \cdot U_c^2 / (2 \cdot \omega \cdot L_i \cdot I_i \cdot k_{TP}).$$

Отже, для промислової частоти ($f = 50$ Гц) останній вираз можна подати у вигляді:

$$U_2 = 1,59 \cdot 10^{-3} \cdot v \cdot U_c^2 / (L_i \cdot I_i \cdot k_{TP}).$$

Отриманий вираз, що пов'язує між собою всі основні параметри пристрою, може бути використаний для його розрахунку. Істотну складність тут становить процедура визначення параметра v , який відповідно до [4] отримуємо в результаті кількох ітерацій, виконуючи графо-аналітичний розрахунок.

Розрахункові залежності для U_2 , отримані для випадку, коли $U_c = 220$ В, $I_i = 15$ А і $k_{TP} = 5,5$, наведені на рис. 2. Представлені криві показують, що характеристика зварювального пристрою більшою мірою залежить від величини та стабільності параметра v . Також суттєво впливає на параметри інду-

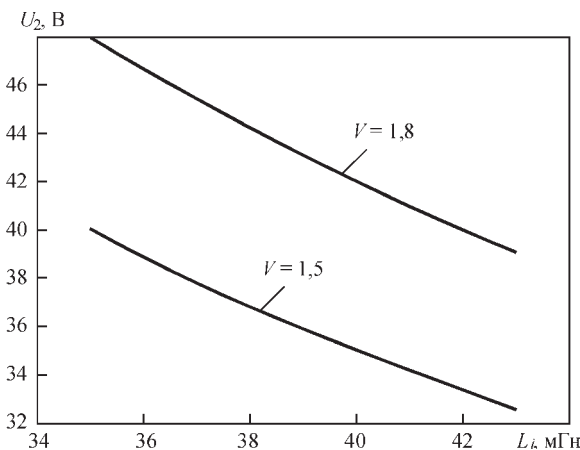


Рис. 2. Залежність вихідної напруги від індуктивності обмотки індукона при різних значеннях коефіцієнта v

кона стабільність його ємності C_i . Під час створення індукона за допомогою намотування фольгою в разі протікання струму та виникненні механічних сил відбувається паразитна модуляція струму, яка погіршує зварювально-технологічні властивості виготовленого пристрою.

Слід детальніше зупинитися на причинах виникнення паразитної модуляції зварювального струму, що виникає через механічну дію на обмотці індукона, що призводить до зміни геометричних характеристик його обмоток. А через це змінюється їхня індуктивність. Для усунення цього впливу доцільно зменшити кількість витків, які простіше закріпити на стрижні. Компенсувати це можна збільшенням додаткової ємності. Саме це призвело до створення квазііндуконів.

З метою виключення зазначеного недоліку нами запропоновано та випробувано пристрій на основі квазііндукона, який виконується дводротовим намотуванням з виведенням середнього витка, до якого під'єднується додаткова ємність C_d . Її величину можна знайти з виразу:

$$C_d = 1 / L_i \cdot \omega^2 - C_{2П}, \quad (1)$$

де $C_{2П}$ – ємність дводрової лінії, експериментально виміряна за допомогою відповідного приладу.

Схему комбінованого зварювального пристрою на основі квазііндукона та резонансного перетворювача наведено на рис. 3, а, а конструкцію квазііндукона показано на рис. 3, б.

Відомо [7], що пристрій з розподіленими параметрами, до яких відносяться й індуconi, є відрізками однорідних ліній, описуються характеристичним опором (2), коефіцієнтом поширення (3) і телеграфним рівнянням (4):

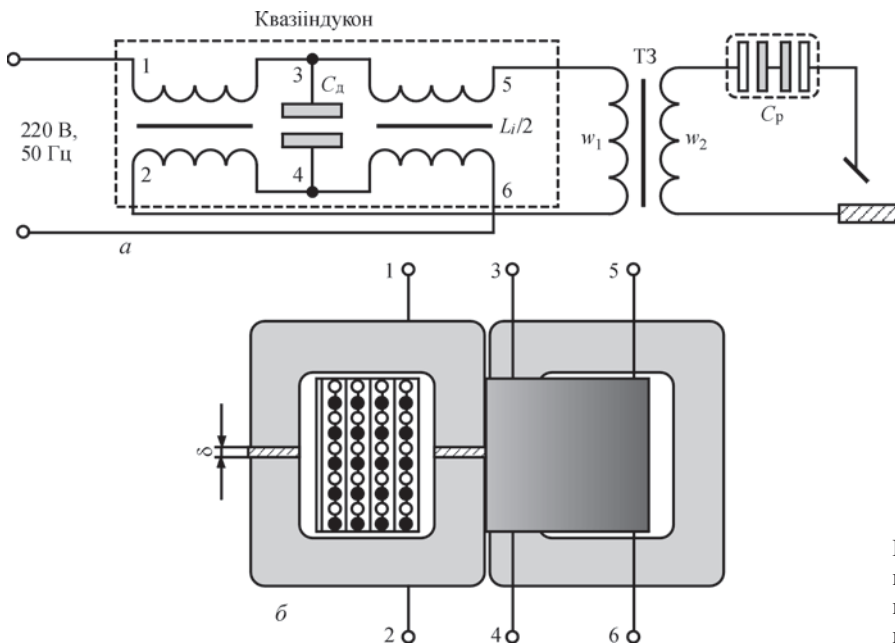


Рис. 3. Комбінований зварювальний пристрій з квазііндуконом і резонансним перетворювачем (а) та конструкція квазііндукона (б)

$$Z = [(r + j\omega L)(g + j\omega C)]^{0,5}, \quad (2)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = [(r + j\omega L)(g + j\omega C)]^{0,5} = [(rg - \omega^2 LC) + j\omega(gL + rC)]^{0,5}, \quad (3)$$

$$\begin{vmatrix} U_1 \\ I_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \text{ch } \gamma l & Z \text{ sh } \gamma l \\ \frac{1}{Z} \text{ sh } \gamma l & \text{ch } \gamma l \end{vmatrix} \begin{vmatrix} U_2 \\ I_2 \end{vmatrix}, \quad (4)$$

де r, g, L і C – погонні опір, провідність, індуктивність та ємність відрізка довгої лінії відповідно; U_1, I_1, U_2, I_2 – струми та напруги на початку та в кінці відрізка лінії відповідно; l – довжина лінії.

Як показано в [8], умовою роботи відрізка однорідної лінії в режимі перетворювача є виконання наступної рівності: $\text{ch } \gamma l = 0$. Якщо розглядати лінію без втрат (практично цю умову можна виконати за умови $\omega C \gg r$ і $\omega L \gg g$), то рівняння, що пов’язує основні параметри лінії, можна навести у вигляді:

$$l\omega(LC)^{0,5} = \pi(1 + 2k) / 2, \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (5)$$

Аналіз (5) показує, що у разі фіксації довжини лінії існує безліч дискретних частот (ω_k), де вона може працювати в режимі перетворювача. Їх значення визначається наступним виразом:

$$\omega_k = \pi(1 + 2k) / 2l(LC)^{0,5}, \quad (k = 0, 1, 2, \dots). \quad (6)$$

Якщо взяти фіксовану частоту (ω_0), використовуючи (6), можна визначити точки, в яких може бути під’єднане навантаження, де виконуються умови роботи в режимі перетворювача:

$$l_k = \pi(1 + 2k) / 2\omega_0(LC)^{0,5}, \quad (k = 0, 1, 2, \dots). \quad (7)$$

З (7) за умови $k = 0$ визначимо значення зосереджених параметрів L і C квазііндукона для частоти мережі $f_0 = 50$ Гц, працюючого в режимі лінії завдовжки $\lambda/4$:

$$LC = (\pi / 2\omega_0 l)^2 = (1 / f_0 \lambda)^2. \quad (8)$$

Зварювально-технологічні дослідження розробленого макета квазііндукона. Налаштування зварювального пристрою, виконаного за схемою рис. 3, а, проводиться наступним чином. Експериментально визначається значення індуктивності індукона L_i . За ним знаходиться погонна індуктивність L і за (8) обчислюється значення погонної ємності C . Помноживши це значення на $\lambda/4$, отримаємо C_i , а потім за (1) визначаємо необхідне значення C_d . Розроблений квазііндукон був виконаний на броньовому магнітопроводі з наступними параметрами: поперечний переріз центрального стрижня $S = 25 \times 50$ см = 1250 см², ширина і висота вікна 3×8 см, обмотковий дріт марки ПЕВ-2 діаметром $d = 2$ мм, кількість витків обмотки 280. Немігнітний зазор у магнітопроводі вибрано рівним

1 мм. Таким чином, параметри індукона наступні: $L_i = 38$ мГн, $C_d \approx 100$ мкФ.

Випробування комбінованого зварювального пристрою з квазііндуконем проводилося у двох режимах. У першому випадку на активне навантаження знімалася його зовнішня вольт-амперна характеристика (ВАХ), яку наведено на рис. 4 (співвідношення $U_d = 20 + 0,04 I_{зв}$ регламентується ГОСТ 95-77 «Трансформатори однофазні однопостові для ручного дугового зварювання»). У порівнянні із зовнішньою характеристикою базової схеми резонансного зварювального джерела живлення (РЗД) вона більш крутопадаюча в області струмів короткого замикання. У разі збільшення робочого струму спостерігається істотне зменшення струму короткого замикання. У другому випадку порівняльні випробування пристрою проводилися в режимі стикового зварювання зразків зі сталі 45 завтовшки 4 мм електродом АНО-21 на струмі 110 А. У разі використання комбінованої вольт-амперної характеристики порівняно з базовою спостерігалася підвищення глибини проплавлення та зменшення розбризкування металу. Слід також зазначити більшу стабільність горіння дуги. Проведені випробування дозволяють зробити висновок про те, що у схемі з індуконем можна дещо зменшити напругу холостого ходу.

Цікавими є результати, пов’язані зі змінюванням зазору в індуконі. Збільшення його до 2,5 мм значно покращує повторне збудження дуги. Але оскільки зі зростанням зазору зменшується L_i , це необхідно компенсувати за рахунок збільшення ємності.

Використання індуконів в області промислової частоти призводить до погіршення масогабаритних характеристик зварювальних пристроїв. Тому їх доцільно застосовувати для відповідальних технологій (зварювання штучним електродом, плазмове різання тощо). Щодо області високих частот, де можна шляхом напилювання створюва-

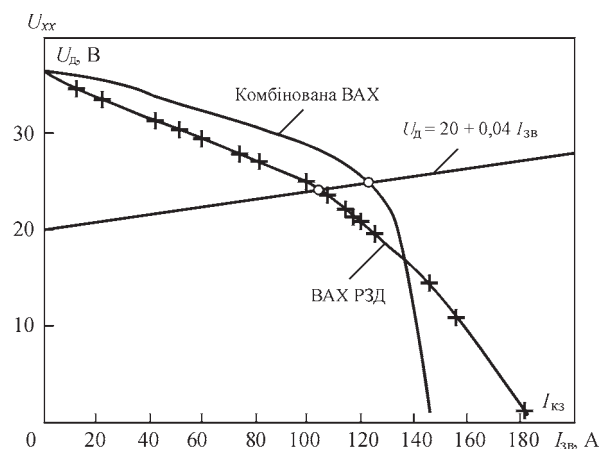


Рис. 4. Порівняння вольт-амперної характеристики комбінованої та базової схеми резонансного джерела живлення на фоні напруги на дузі



Рис. 5. Зовнішній вигляд металу шва при наплавленні з використанням квазііндукона

ти планарні індукони, їх переваги у зварювальних індуктивно-ємнісних перетворювачах безперечно.

Були проведені зварювально-технологічні випробування пристрою, виконаного на індуконі. Зовнішній вигляд отриманого зразка наплавленого металу шва на вказаному вище режимі показано на рис. 5. Під час випробування спостерігалось знижене розбрикування металу, що пояснюється підвищеною стабільністю горіння зварювальної дуги у схемі з квазііндуконом.

Висновки

1. Застосування індукона в схемах з комбінованою вольт-амперною характеристикою резонансного джерела живлення дуги дозволяє покращити зварювально-технологічні властивості останнього: підвищити стабільність горіння дуги, а також зменшити розбрикування металу.

2. Використання індуконів на низьких частотах призводить до погіршення масогабаритних характеристик зварювальних перетворювачів за рахунок збільшення кількості витків обмоткового дроту. Тому на низьких частотах їх застосування рекомендоване для забезпечення лише відповідальних технологій зварювання, наприклад електрошлакового переплаву.

3. Для побудови зварювальних перетворювачів на низьких частотах доцільно використовувати додаткову ємність, а саме структуру квазііндукона. Це призводить до зменшення його індуктивності, тобто масогабаритних показників.

4. На високих частотах, де використовуються інвертори, краще рекомендувати планарні індукони, які усувають перешкоди щодо масогабаритних характеристик зварювального обладнання. Істотні переваги досягаються при використанні планарних індуконів у схемах індуктивно-ємнісних перетворювачів.

WELDING CURRENT GENERATOR BASED ON A SINGLE-PHASE INDUCON

O.Ye. Korotynskyi, A.M. Zhernosekov, I.V. Vertetska

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: epis@ukr.net

An overview of various types of formers used in pulsed arc welding is given. It is shown that the main research trends in this area are aimed at improving the energy efficiency of welding converters with a high efficiency. Significant attention is paid to formers based on artificial long lines operating in a wide range of arc current and voltage. As for the time-frequency parameters of electrical signals of such formers, all of them can operate in the frequency range from units of hertz to hundreds of megahertz. At the same time, their energy efficiency does not change significantly. Further development of the ideas of constructing generators using artificial long lines has led to the creation of inducon-based inductors and quasi-inducons. 8 Ref., 5 Fig.

Keywords: welding current generators, inductive-capacitive converters, artificial long line, inducon, quasi-inducon

Отримано 29.05.2025

Отримано у переглянутому вигляді 17.07.2025

Прийнято 04.08.2025

Список літератури

1. Шидловський А.К., Липківський К.О. (2007) Розвиток досліджень по перетворенню та стабілізації параметрів електромагнітної енергії в Інституті електродинаміки НАН України. *Технічна електродинаміка*, **3**, 11–26.
2. Korotynskyi, O.Ye., Drachenko, M.P., Zhernosekov, A.M., Vertetska, I.V. (2024) Welding current formers using artificial long lines. *The Paton Welding J.*, **1**, 27–31. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.01.04>
3. Волков И.В., Закревский С.И. (1984) Преобразователь с распределенными параметрами для стабилизации тока в переменной нагрузке. *Электричество*, **10**, 40–43.
4. Волков И.В., Соколянский В.Н. (1984) К расчету однофазного индукона на броневом ленточном магнитопроводе. *Техническая электродинамика*, **6**, 20–25.
5. Dam, S., Mandal, P. (2021) A hybrid, fully-integrated, dual-output DC–DC converter for portable electronics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **36**(4), 4360–4370. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3019273>
6. Juan C. Castellanos (2022) Integrated hybrid switched converters: A Review. *J. of Integrated Circuits and Systems*, **17**(1), 1–12. DOI: <https://doi.org/10.29292/jics.v17i1.570>
7. Hussain, M.G.M. (2002) Principles of space-time array processing for ultrawideband impulse radar and radio communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **51**(3), 393–403. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2002.1002490>
8. Милих А.Н., Волков И.В. (1974) *Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей*. Київ, Наукова думка.

References

1. Shydlovsky, A.K., Lipkivsky, K.O. (2007) Development of research on the conversion and stabilisation of electromagnetic energy parameters at the Institute of electrodynamic of the NASU. *Tekhnichna Elektrodynamika*, **3**, 11–26 [in Ukrainian].
2. Korotynskyi, O.Ye., Drachenko, M.P., Zhernosekov, A.M., Vertetska, I.V. (2024) Welding current formers using artificial long lines. *The Paton Welding J.*, **1**, 27–31. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.01.04>
3. Volkov, I.V., Zakrevsky, S.I. (1984) Converter with distributed parameters for current stabilization in alternating load. *Elektrichestvo*, **10**, 40–43 [in Russian].
4. Volkov, I.V., Sokoliansky, V.N. (1984) To calculation of a single-phase inductor on an armoured tape magnetic circuit. *Tekhnicheskaja Elektrodinamika*, **6**, 20–25 [in Russian].
5. Dam, S., Mandal, P. (2021) A hybrid, fully integrated, dual-output DC–DC converter for portable electronics. *IEEE Transact. on Power Electronics*, **36**(4), 4360–4370. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3019273>
6. Juan C. Castellanos (2022) Integrated hybrid switched converters: A Review. *J. of Integrated Circuits and Systems*, **17**(1), 1–12. DOI: <https://doi.org/10.29292/jics.v17i1.570>
7. Hussain, M.G.M. (2002) Principles of space-time array processing for ultrawide band impulse radar and radio communications. *IEEE Transact. on Vehicular Technology*, **51**(3), 393–403. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2002.1002490>
8. Milyakh, A.N., Volkov, I.V. (1974) *Systems of constant current on the basis of inductive-capacitive converters*. Kyiv, Naukova dumka [in Russian].