

КОМБІНОВАНА ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧОВА ВИКОНАВЧА СТРУКТУРА ДВОФУНКЦІЙНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ДИСКРЕТНО-РАЗОВИМ КЕРУВАННЯМ

К.О. Липківський^{*}, докт. техн. наук, А.Г. Можаровський^{**}, канд. техн. наук.

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: lypkivskyk@ukr.net; AnatMozhrvsk@ukr.net

У системах живлення електротехнічного та електротехнологічного обладнання чільне місце посідають засоби силової перетворювальної техніки з трансформаторно-ключовими виконавчими структурами. Перетворювачі напруги на їх основі за дискретно-разового керування напівпровідниковими ключами відрізняються високими енергетичними показниками та відсутністю у робочих станах спотворень вихідної напруги і вхідного струму. Постійне збільшення номенклатури та кількості споживачів електроенергії, які для своєї унормованої роботи вимагають застосування таких перетворювачів, спонукають до відповідного їх вдосконалення, зокрема до розширення функціональних можливостей. У роботі досліджено особливості формування комбінованої трансформаторно-ключової виконавчої структури двофункційного перетворювача для системи живлення випрямленим струмом, що відзначається підвищеною ефективністю використання напівпровідникових приладів та меншими втратами в них. Визначено можливі і доцільні діапазони регулювання вихідної напруги таких перетворювачів. Бібл. 12, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: комбінована трансформаторно-ключова виконавча структура, випрямляч, тиристорний комутатор, стабілізатор напруги, Smart transformer, discrete-time control.

Ефективна робота значної частини електротехнічного й електротехнологічного обладнання, навіть за умови забезпечення системними заходами унормованої якості електроенергії (ЕЕ) загальних мереж [1, 2], вимагає для свого живлення застосування різноманітних пристроїв силової перетворювальної техніки [3, 4, 5]. Постійне зростання номенклатури та кількості таких споживачів ЕЕ потребує відповідного вдосконалення перетворювальних засобів щодо розширення їхніх функціональних можливостей, підвищення керованості та ефективності використання напівпровідникових приладів, тощо [6]. Зазначене вдосконалення є можливим і відбувається на ґрунті розвитку елементної (переважно напівпровідникової) бази, інтенсифікації відповідних теоретичних досліджень, пошуку та синтезу нових схемотехнічних рішень.

Серед пристроїв перетворювальної техніки чільне місце посідають перетворювачі різного функціонального призначення з трансформаторно-ключовими виконавчими структурами – ТКВС [7], або з tap-changing transformers [8, 9] (які ще називають Smart transformers [10]), що відзначаються високими енергетичними показниками. Зокрема, це засоби цілеспрямованої зміни напруги – стабілізатори, які забезпечують живлення споживача стабільною напругою під час дії комплексу дестабілізуючих факторів, регулятори з глибоким або обмеженим діапазоном регулювання напруги/струму, тощо. За умови використання в них дискретно-разового керування (discrete-time control [11]) напівпровідниковими ключами, вони функціонують в будь-якому j -ому з J можливих станів структури (кількість яких визначається діапазоном і кроком зміни напруги), в якому ТКВС працює як звичайний двообвитковий трансформатор з відповідно необхідним коефіцієнтом передачі по напрузі, не вносячи при цьому жодних спотворень у вхідний струм та вихідну напругу.

Такі перетворювачі напруги використовуються переважно у системах живлення змінного струму, але наявність також систем постійного і випрямленого струму спонукає до пошуку доцільних шляхів їхнього впровадження й у ці системи. Основними з них є компонування/комплексування з іншими перетворювачами (зокрема випрямлячами) та/або розширення кола функцій, які вони виконують, що можна вважати елементом універсалізації перетворювача. При цьому необхідно забезпечити повноцінне виконання новоствореним пристроєм кожної з функцій без будь-яких обмежень.

Накопичений досвід роботи з пошуку нових рішень у перетворювальній техніці, який вимагає нестандартного підходу, відсторонення від відомих положень та схемотехніки, свідчить, що корисним є не тільки кінцевий результат пошуку (за умови багаторічних численних досліджень у цій царі-

ні можливе покращення певних показників якості нових перетворювачів обчислюється одиницями, інколи – десятком відсотків), а й інформація щодо самого процесу створення чогось нового, яка стимулює подальшу творчу діяльність.

Виходячи з цього **метою роботи** є висвітлення процесу формування виконавчої структури двофункційного трансформаторно-тиристорного перетворювача з підвищеною ефективністю використання напівпровідникових компонентів та зменшення загальних втрат у них.

За вихідний об'єкт для формування нової структури (по-суті – структурного синтезу) було обрано перетворювальний комплекс, що складається з перетворювача напруги змінного струму на основі ТКВС з двома тиристорними комутаторами – у вхідному і вихідному колах трансформатора Тр, та некерованого діодного випрямляча В (рис. 1). Таке поєднання цих компонентів за необхідності реалізації цілеспрямованої зміни напруги випрямленого струму є найбільш доцільним. Саме воно використано, наприклад, при організації вольтододавчого каналу в складній системі живлення постійним струмом з первинним джерелом відновлюваної енергії [12].

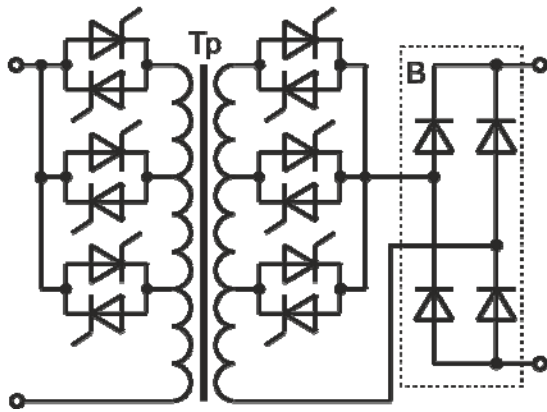


Рис. 1

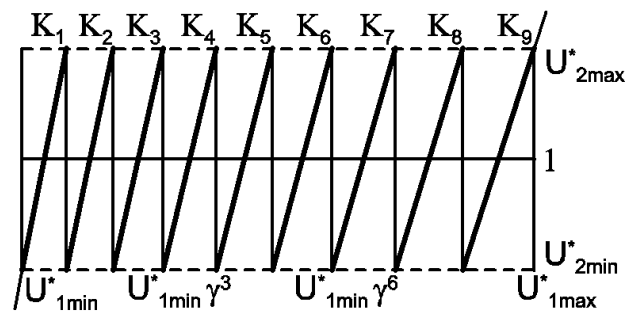


Рис. 2

Задля конкретності та компактності подальшого розгляду автори обмежилися варіантом з 6-ма ключовими елементами (увімкненими паралельно-зустрічно парами тиристорів), але за необхідності їх може бути більше. Кількість ключів S між комутаторами доцільно розподіляти наступним чином – $S_1(S_2)=0,5 [S \pm 0,5(1-(-1)^S)]$ (індекс показує номер комутатора), що забезпечує можливість роботи структури у $J=S_1 \times S_2=0,25[S^2-0,5(1-(-1)^S)]$ станах. Саме такому розподілу ключів відповідає досягнення максимально можливого коефіцієнту ефективності їхнього використання $K_e=J/S$. У нашому випадку кількість станів $J=3 \times 3=9$. На рис. 2 наведено пілкоподібну характеристику $U_2^*=f(U_1^*)$, де U_2^* та U_1^* – вихідна та вхідна напруги, нормовані по номінальному значенню U_n . Вона відображає зміну станів ТКВС та, відповідно, коефіцієнтів передачі по напрузі за обраним оптимальним згідно [7] законом $K_{(j+1)}=K_{max}\gamma^{(j-1)}$, де γ – відношення максимального та мінімального значень вихідної напруги; K_{max} – максимальне значення коефіцієнта передачі, що відповідає нижній межі діапазону зміни вхідної напруги і перевищує мінімальний коефіцієнт передачі K_{min} у $\gamma^{(j-1)}$ разів. При цьому вихідна напруга підтримується на рівні номінального значення ($U_n^*=1$) з похибкою $\delta=\pm(\gamma-1)/(\gamma+1)$. З рис. 2 впливає залежність $U_{1min}^*=(1-\delta)/K_{max}$; $U_{1max}^*=(1+\delta)/K_{min}$; $U_{1max}^*/U_{1min}^*=\gamma^J$ та $G=U_{1max}^*/U_{1min}^*=\gamma^J$. Використання параметра G – глибини діапазону зміни вхідної напруги – є більш зручним, ніж його ширини, бо ця відносна величина не залежить від напрямку зсуву меж діапазону від номінального значення напруги. Збільшення, в разі вимоги, діапазону можна реалізувати або деяким збільшенням параметру γ та, як наслідок, похибки стабілізації δ , або додаванням до будь-якого комутатора пари тиристорів, що позначиться на загальній кількості робочих станів ТКВС, але вплив на його складність буде незначним.

Слід зауважити, що у перших трьох станах ТКВС зміна коефіцієнта передачі по напрузі відбувається шляхом переключення напівпровідникових ключів вихідного комутатора, а у первинній обвитці трансформатора залишається задіяною лише та її частина, яка відповідає нижній межі діапазону зміни вхідної напруги, проте кількість її витків повинна розраховуватися, виходячи з того, що до неї наприкінці третього стану прикладається напруга, яка у γ^3 разів перевищує значення U_{min} (рис. 2).

Передумовою задекларованого формування нової перетворювальної структури є зміна зображення вихідного комутатора ТКВС. Пропонується представити його у вигляді групи паралельно з'єднаних пар послідовно з'єднаних тиристорів (назвемо їх стійками), спільні точки яких приєднані до відповідних відводів вторинної обвитки трансформатора (рис. 3). Попри візуальну несхожість комутатора на рис. 3 та рис. 1 всі зв'язки між елементами і, взагалі, схема електрична залишилися незмінними. Власне процес формування полягає у виконанні трьох операцій. Перша – вилучення лінії зв'язку точок А (точка з'єднання катодів тиристорів) та Б (точка з'єднання анодів тиристорів), своєрідне "розкорочення" групи тиристорних стійок вихідного комутатора. Друга – вилучення діодної стійки Д1, Д2. Третя – підключення діодної стійки Д3, Д4 (разом з вихідними клеммами) паралельно тиристорним стійкам вихідного комутатора (до точок А та Б). Сформовану нову комбіновану виконавчу структуру стабілізатора напруги випрямленого струму зображено на рис. 4. Проте, це ще не все. Перша секція вторинної обвитки, розрахована на номінальну напругу, задіяна за будь-якого стану кожного з двох тиристорних ключів, що під'єднують одну або дві регульовальні секції. Це дає змогу замінити тиристорну стійку, пов'язану з першим відводом, діодною стійкою – введення у дію інших тиристорних стійок приведе автоматично до її запирання. Тобто, у структурі замість шести керованих ключів залишається п'ять, що до того ж спрощує роботу системи управління.

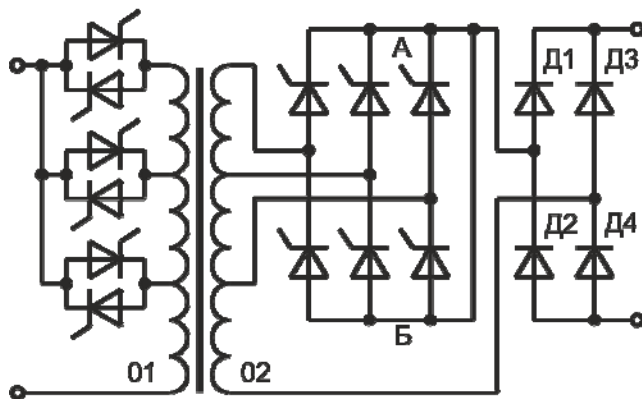


Рис. 3

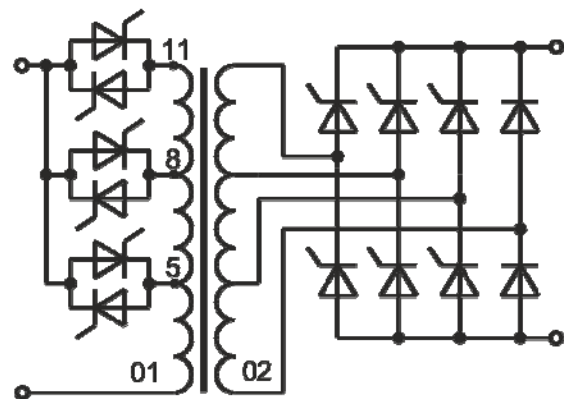


Рис. 4

Розміщення відводів у вторинній обвитці визначається рівнем напруги, що стабілізується. За стабілізації на номінальному рівні ($U_n=220$ В) потенціали цих відводів відносно початку обвитки (точка 02) дорівнюють 1, γ , γ^2 . Розташування відводів первинної обвитки визначається виключно нижньою межею діапазону зміни вхідної напруги U_{1min} . Як зазначалося раніше, потенціал першого відводу відносно початку первинної обвитки (точки 01) повинен перевищувати U_{1min} у γ^3 раза, другого – у γ^6 раза, а третього – у γ^9 раза. З метою передбачення можливого зсуву/варіювання меж діапазону зміни вхідної напруги доцільною є організація низки додаткових відводів з кроком зміни потенціалу – γ .

Розглянемо варіант стабілізації вихідної напруги на рівні $U_n=220$ В з похибкою $\delta=1,96$ % ($\gamma=1,04$) за умови $U_{1min}^*=0,75$ ($U_{1min}=165$ В). Розраховані при цьому за обраним законом потенціали низки відводів первинної обвитки зведено у табл. 1 (у першому рядку – абсолютні значення, (В); у другому – у відсотках від максимальної напруги всієї первинної обвитки $U_{вод(max)}$). Кількість відводів – а саме 11 – обрано такою, аби охопити реально можливі діапазони зміни вхідної напруги відносно номіналу в межах $\pm 25\%$, від 165 В до 275 В. Необхідно зазначити, що на практиці неможливо забезпечити точне відтворення отриманих теоретично значень потенціалів відводів внаслідок цілочисельності витків у секціях обвитки, тобто фактичний закон зміни коефіцієнтів передачі по напрузі буде дещо відрізнятися від наведеного раніше оптимального закону. Але цю відмінність можна нівелювати незначним – до $\pm 2,1 \div 2,2\%$ – збільшенням похибки вихідної напруги.

Таблиця 1

№ вдов.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$U_{вод}$ (В)	185,6	193,0	200,7	208,8	217,1	225,8	234,8	244,2	254,0	264,2	275,0
$U_{вод}/U_{вод(max)}$ (%)	68	70	73	76	79	82	86	89	93	96	100

У першому варіанті ключі першого комутатора приєднані до відводів 1, 4, 7 (інші відводи – 2, 3, 5 ... залишаються поки що незадіяними). При цьому перша найбільша секція первинної обвитки розраховується на напругу 185,6 В, для верхньої межі діапазону (відвід 7) маємо $U_{1min} = 165 \times \gamma^9 = 234,8$ В, тобто його ширина становить 69,8 В. Наведені значення меж зміни вхідної напруги є характерними для дуже "слабких" мереж та/або за значної віддаленості споживачів електроенергії. Зміною точок приєднання ключів первинного комутатора можна також реалізувати стабілізацію вихідної напруги у разі зміни вхідної й у інших, зсунутих кожний раз на γ , межах (табл. 2). П'ятий варіант (ключі під'єднано до відводів 5, 8, 11), якому відповідає значне завищення напруги живлення, є найменш вірогідним, проте, завдяки тому, що у ньому задіяна уся первинна обвитка, саме він ілюструється на рис.4 (інші відводи не показано).

Таблиця 2

№ вдов.	1, 4, 7	2, 5, 8	3, 6, 9	4, 7, 10	5, 8, 11
U_{1min} (В)	165	171,6	178,5	185,6	193,0
$\gamma^3 \times U_{1min}$ (В)	185,6	193,0	200,7	208,8	217,1
U_{1max} (В)	234,8	244,2	254,0	264,2	274,7

Як видно, за наявності загалом 12 відводів у первинній обвитці, кількість можливих варіантів під'єднання ключів дорівнює п'яти. Але зауважимо, що внаслідок апріорної багатоваріантності ТКВС саме та група відводів дає змогу реалізувати стабілізацію й у разі збільшення (у разі завищення вимог) кількості ключових елементів. Так, у разі додавання лише однієї пари тиристорів кількість робочих станів системи зростає з 9 до 12, що дає змогу або підвищити точність стабілізації, або розширити припустимі діапазони зміни вхідної напруги. Якщо ключі додаються у первинний комутатор ($S_1=3+1=4$, $S_2=3$), то можливою є стабілізація у двох розширених діапазонах – або $165 \div 264$ В (задіяно відводи 1, 4, 7, 10), або $171,6 \div 274,7$ В (задіяно відводи 2, 5, 8, 11). У разі додавання пари ключів у вихідний комутатор ($S_1=3$, $S_2=3+1=4$) відводи вторинної обвитки будуть мати потенціали 1, γ , γ^2 , γ^3 , а потенціали відводів первинної обвитки повинні змінюватися за крок у γ^4 раза. При цьому отримуємо три можливі розширені діапазони: $165 \div 254$ В (відводи 1, 5, 9), $171,6 \div 264,2$ В (відводи 2, 6, 10) та $178,5 \div 274,7$ В (відводи 3, 7, 11). Тобто, така ТКВС відзначається певною варіативністю, що дає змогу використовувати її за різних умов живлення, виходячи з стану системи електропостачання, віддаленості споживача, тощо.

Таким чином, у роботі проаналізовано процес формування комбінованої трансформаторно-ключової виконавчої структури двофункційного перетворювача, яка відзначається не тільки скороченням кількості задіяних напівпровідникових приладів, тобто більшою ефективністю їхнього використання, але й зменшенням на чверть загальних втрат в них (бо в ній одночасно працює не чотири, а три прилади), що веде до відповідного спрощення засобів для розсіювання тепла, що на них виділяється. Ще раз підтверджено багатоваріантність побудови різноманітних ТКВС.

Роботу виконано за НДР "Бар'єр-2" (реєстраційний номер 0117U007714), КПКВК 6541030.

1. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. ДСТУ EN 50160:2014. Київ: ДП УкрДНЦ, 2014, 32 с.

2. Танкевич С.Є., Блінов І.В., Кириленко В.В. Україна та світ: нормативне забезпечення інтелектуальних електроенергетичних систем за концепцією Smart Grid. *Стандартизація. Сертифікація. Якість*. 2014. № 4. С. 38-44.

3. Гриб О.Г., Сокол Е.И., Жаркін А.Ф., Васильченко В.И., Тесік Ю.Ф. та ін. Качество электрической энергии. Харків: ПП Граф-Ікс, 2014. 244 с.

4. Канабас Д.С., Тимохін О.В. Якість електроенергії в електричних мережах України та світу. *Сучасні проблеми електроенергетичної та автоматики*. 2021. С. 24-27.

5. Hossain Eklas, Tur Mehmet Rida, Padmanaban Sanjeevikumar, Ay Selim, Khan Imtiaj. Analysis and mitigation of power quality issues in distributed generation systems using custom power devices. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. Pp. 16816-16833. DOI: <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2814981>

6. Липковский К.А., Михальский В.М. Силовая электроника – возможности, ожидания, реальность. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 3. С. 59-60.

7. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. К.: Наукова думка, 1983. 216 с.

8. Huang M., Dong L., Zhang J., Wang J., Hao Z. Research on the Differential Protection Algorithm of Multi-Tap Special Transformer. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2014. Vol. 2. No 09. Pp. 98-105. DOI: <http://doi.org/10.4236/jpee.2014.29014>

9. Electronic Tap Switching Voltage Regulator. URL: <http://www.ustpower.com/comparing-automatic-voltage-regulation-technologies/avr-guide-electronic-tap-switching-voltage-regulator/> (accessed 29.05.2022).
10. Willems W., Vandoorn T.L., De Kooning J.D., Vandeveld L. Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid. 4th International Conference *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe* (ISGT – Europe 2013). Lyngby, Denmark, October 6-9, 2013. Pp. 1-5. DOI: <http://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695300>
11. Bimal K. Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting. *IEEE Power Electronics Society Newsletter* Fourth Quarter. 2007. Vol. 19. No 4. Pp. 11-20.
12. Allan David Crane, Warren Mark Blewi. Power converters. US Patent 9800161B2. Oct. 27, 2017.

COMBINED TRANSFORMER-AND-SWITCHES EXECUTIVE STRUCTURE STRUCTURE OF A TWO-FUNCTION CONVERTER WITH DISCRETE-TIME CONTROL

K.O. Lypkivskiy, A.G. Mozharovskiy
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.
E-mail: lypkivskyk@ukr.net ; AnatMozhrvsk@ukr.net

Power supply systems with transformer-and-switches executive structures have a prominent place in the power supply systems of electrical and electro technological equipment. Voltage converters based on them with discrete-time control of semiconductor switches are characterized by high energy performance and the absence of distortions in the operating states of the output voltage and input current. The constant increase in the range and number of electricity consumers that require the use of such converters for their standardized operation, encourages their appropriate improvement, in particular to expand functionality. The peculiarities of forming a combined transformer- and-switches executive structure of a two-function converter for a rectified current power supply system, which is characterized by increased efficiency of semiconductor devices and lower losses in them, are investigated. Possible and expedient ranges of regulation of output voltage of such converters are defined. References 12, tables 2, figures 4.

Key words: combined transformer-and-switches executive structure, випрямляч, thyristor switch, voltage stabilizer, smart transformer, discrete-time control.

1. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. State Standard of Ukraine EN 50160. Kyiv: DP UkrNDNTs, 2014, 32 p. (Ukr)
2. Tankevych S.Ye., Blinov I.V., Kyrlyenko V.V. Ukraine and the world: regulatory support of intelligent power systems according to the Smart Grid concept. *Standartysaziia. Sertyfikaziia. Yakist.* 2014. No 4. Pp. 38-44. (Ukr)
3. Gryb O.G., Sokol E.I., Zharkin A.F., Vasylichenk V.I., Tesyk Y.F. Quality of electrical energy. Kharkiv: PE Graf-X, 2014. 244 p. (Rus).
4. Kanabas D.C., Tymokhin J.V. Quality of electricity in electric networks of Ukraine and the world. International scientific and technical journal. *Suchasni problemy elektrotekhniki ta avtomatyky.* 2021. Pp. 24–27. (Ukr)
5. Hossain Eklas, Tur Mehmet Rida, Padmanaban Sanjeevikumar, Ay Selim, Khan Intiaj. Analysis and mitigation of power quality issues in distributed generation systems using custom power devices. *IEEE Access.* 2018. Vol. 6. Pp. 16816-16833. DOI: <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2814981>
6. Lypkivskiy K.O., Mykhaskiy V.M. Power electronics – opportunities, expectations, reality. *Tekhnichna Elektrodynamika.* 2012. No 3. Pp. 59-60. (Rus)
7. Lypkivskiy K.O. Transformer-and-Switches Executive Structures of Alternating Current Voltage Converters. Kiev: Naukova Dumka, 1983. 216 p. (Rus).
8. Huang M., Dong L., Zhang J., Wang J., Hao Z. Research on the Differential Protection Algorithm of Multi-Tap Special Transformer. *Journal of Power and Energy Engineering.* 2014. Vol. 2. No 09. Pp. 98-105. DOI: <http://doi.org/10.4236/jpee.2014.29014>
9. Electronic Tap Switching Voltage Regulator. URL: <http://www.ustpower.com/comparing-automatic-voltage-regulation-technologies/avr-guide-electronic-tap-switching-voltage-regulator/> (accessed 29.05.2022).
10. Willems W., Vandoorn T.L., De Kooning J.D., Vandeveld L. Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid. 4th International Conference *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe* (ISGT – Europe 2013). Lyngby, Denmark, October 6-9, 2013. Pp. 1-5. DOI: <http://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695300>
11. Bimal K. Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting. *IEEE Power Electronics Society Newsletter* Fourth Quarter. 2007. Vol. 19. No 4. Pp. 11-20.
12. Allan David Crane, Warren Mark Blewi. Power converters. US Patent 9800161B2. Oct. 27, 2017.

Надійшла: 11.06.2022
Остаточний варіант: 21.06.2022