

УДК 624.314

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.121>

ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОНАПРЯМНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В СИСТЕМАХ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

О.М. Юрченко*, докт. техн. наук, **Д.В. Мартинов****, **В.В. Мартинов*****, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: d.martynov@electrotechimpulse.com

Розглянуто електромагнітні процеси у двонапрявному перетворювачі постійного струму з можливістю підвищення та зниження рівнів вихідної напруги з використанням асиметричного інвертора для акумуляторної системи енергонакопичення під час роботи в складних умовах, з коротким періодом перетворення та визначення його параметрів. Двонаправлений перетворювач постійного струму широко використовуються в гібридних системах накопичення енергії та в енергосистемах розподілу постійного струму. Такий неізолюваний двонаправлений підвищувально-знижувальний перетворювач призначено для управління потоком енергії між джерелами з різним рівнем напруги у зв'язку з використанням у цих системах низьковольтних акумуляторів. Завдяки здатності таких перетворювачів досить швидко перенаправляти електричну енергію як в одну, так і в іншу сторону, стала можлива не тільки зарядка батареї від стаціонарних джерел електронергії, а й зарядка акумулятора в процесі роботи генератора від двигуна внутрішнього згоряння та рекуперативного гальмування. Наведено результати розрахунків роботи прототипа двонапрявного перетворювача постійного струму з батареєю 14 В, шиною постійного струму 200 В і вихідною потужністю 3500 Вт. Виготовлено дослідний зразок для підтвердження можливості швидкого перетворення енергії. Бібл. 9, рис. 5.

Ключові слова: системи накопичення електроенергії, двонаправний перетворювач постійної напруги, швидке перетворення енергії, гібридний електромобіль.

Збільшення кількості електроенергії, що виробляється відновлюваними джерелами, ставить нові виклики для електричних мереж, які вже працюють в умовах підвищених навантажень. Сучасні системи електропостачання повинні вміти балансувати попит і пропозицію енергії в будь-який момент, володіти більш гнучким управлінням і забезпечувати максимальну ефективність використання електроенергії [1]. Складність полягає в тому, що пропозиція електроенергії в будь-який момент часу має бути рівна попиту, а в нових поновлюваних джерел електроенергії, як-от енергія вітру та сонячного випромінювання, дуже великі коливання в генерації. Некерована генерація знижує гнучкість енергосистеми, створюючи проблеми для балансування системи в реальному часі. Зберігання енергії є ключовим джерелом гнучкості, яке може допомогти вирішити деякі проблеми, пов'язані з розширеним використанням низьковуглецевих генерацій в електроенергетиці.

Технологічним способом вирішення цієї складної проблеми є масове застосування накопичувачів електроенергії, що дає змогу будувати енергосистеми за принципом одночасного та синхронного виробництва та споживання електроенергії. Розвиток систем накопичення призведе до збільшення двонаправлених потоків електроенергії, тоді як нині потоки розподіляються переважно однонаправлено ієрархічною гілкою «магістральні мережі — розподільні мережі — споживач». Загалом накопичувачі електроенергії — це одні із ключових елементів нової моделі «розумної» енергетики [2].

Потенційні галузі застосування накопичувачів включають: згладжування нерівномірності виробництва та споживання електроенергії, регулювання напруги та частоти, надання гарячого резерву потужності, аварійне електроживлення для запобігання розвитку системних надзвичайних ситуацій (при секціонуванні енергосистеми) та для відновлення енергосистеми після них. Особлива цінність накопичувачів полягає в тому, що вони можуть здійснювати перелічені функції одночасно. Слід відзначити, що завдяки застосуванню систем енергонакопичення, які забезпечують компенсацію пульсацій миттєвої активної потужності, можна очікувати підвищення ККД системи енергопостачання.



Двонапрямні перетворювачі постійної напруги (dc-dc) є одними із ключових елементів у системах збереження електроенергії. Вони забезпечують гнучкість керування потоком енергії між пристроєм збереження енергії – акумуляторною батареєю – та іншими вузлами системи. Головними двома сімействами двонапрямних перетворювачів постійної напруги є неізолюючі та ізолюючі структури. У роботі показано застосування двонапрямного перетворювача постійної напруги як інтерфейсу між мережею постійного струму й накопичувачем енергії в мережі гібридного автомобіля для керування двонаправленим потоком енергії.

Під час створення перетворювачів електроенергії висуваються вимоги щодо зменшення їхніх габаритів і збільшення ККД. Однак, коли справа стосується потужних перетворювачів, то з'являються складності з елементною базою, яка завжди відстає від сучасних потреб силової електроніки. Через застосування потужних перетворювачів у гібридних автомобілях із використанням водяного охолодження маємо суттєве зменшення діапазону робочих температур кристалів напівпровідникових елементів, що позитивно відображається на загальному ККД пристрою. Зокрема, для досягнення малих габаритів потрібно збільшувати робочу частоту перетворювача, що одночасно веде до збільшення температури. А необхідність комутації великих струмів за відносно невеликої напруги на акумуляторній батареї робить перетворення досить складною задачею.

У гібридних електромобілях системи розподілу електричної потужності працюють на різних рівнях напруги через наявність акумулятора. Необхідність не тільки розрядки, але і зарядки акумулятора в процесі роботи генератора від двигуна внутрішнього згорання або під час рекуперативного гальмування потребує двонаправленого перетворення енергії [3,4]. Двонаправлені перетворювачі постійного струму з широким діапазоном перетворення напруги необхідні для узгодження напруги та розв'язки потужності між батареєю і шиною постійного струму, до якої підключений електропривод автомобіля.

Динаміка руху автомобіля включає швидкі прискорення, які споживають великі потужності від енергосистеми автомобіля [3]. Аналогічною проблемою є ситуація з уповільненням (гальмуванням) і необхідністю, для збільшення дальності руху автомобіля, видобувати енергію через рекуперативне гальмування.

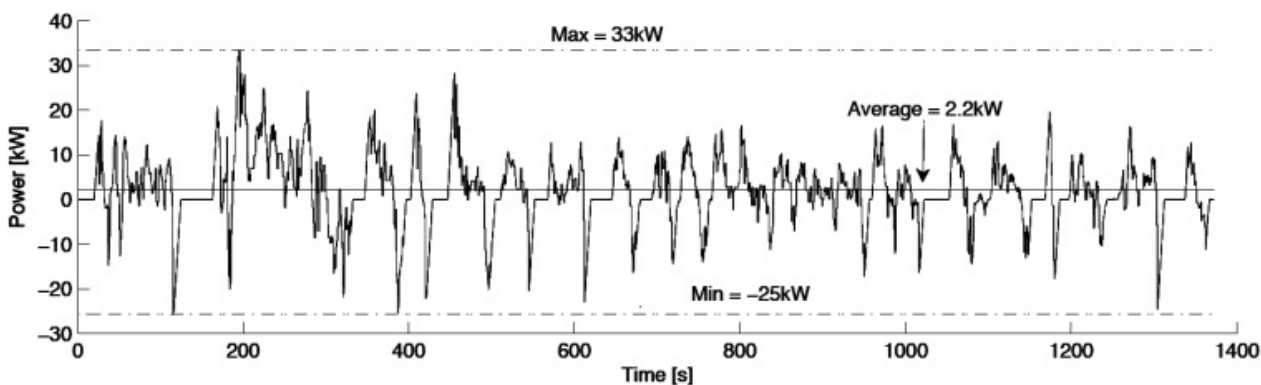


Рис. 1

Проведені дослідження [3] показують, що середнє енергоспоживання є набагато нижчим, ніж піки потужності, що виникають у разі прискорення або уповільнення. На рис. 1 показано енергоспоживання міського їздового циклу в США, де відзначено максимальне, мінімальне та середнє енергоспоживання. Середня споживана потужність більш ніж на порядок менша від пікової, як видно з рис. 1 (приблизно 2,2 кВт).

Останнім часом топології двонапрямних перетворювачів були широко досліджені та оптимізовані з метою отримання перетворювачів постійного струму з широким діапазоном перетворення напруги, придатних для гібридної системи зберігання енергії. [4]. Тому двонапрямний перетворювач DC-DC є ключовим компонентом гібридної енергосистеми й визначає її ефективність.

Метою роботи є дослідження двонапрямого DC/DC перетворювача з використанням асиметричного інвертора для акумуляторної системи енергонакопичення за роботи у складних умовах із коротким періодом перетворення для використання в гібридних енергосистемах та визначення його параметрів для побудови модуля потужністю 3,5 кВт.

Напівмостова неізольована топологія типового двонапрямого перетворювача постійного струму показана на рис. 2. Вона складається з перетворювачів понижувального та підвищувального типу [5, 6]. З рис. 2 очевидно, що понижувальний перетворювач з перемикачем VT1 може працювати як підвищувальний у зворотному напрямку. А підвищувальний перетворювач через перемикач VT2 також може працювати як понижувальний так само у зворотному напрямку. Коли двонапряний перетворювач постійного струму працює в режимі безперервної провідності, потрібен індуктор фільтра з більшим значенням. Збільшення розміру індуктора призводить до повільної перехідної реакції та повільного перехідного процесу. Величина індуктивності може бути значно зменшена, коли схема працює в режимі переривчастої провідності, і це призводить до швидшого відгуку, а також забезпечує зменшення втрати при комутації перемикачів завдяки зворотному відновленню в діоді. Оскільки діоди вимикаються за нульової напруги, втрати зворотного відновлення зменшуються.

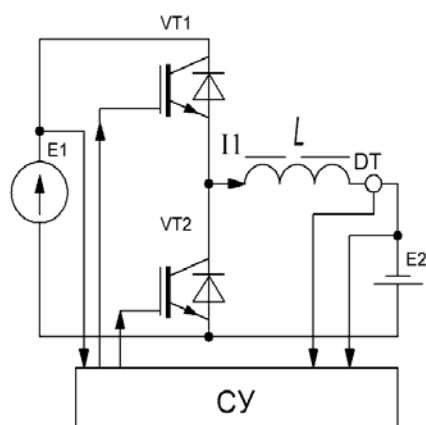


Рис. 2

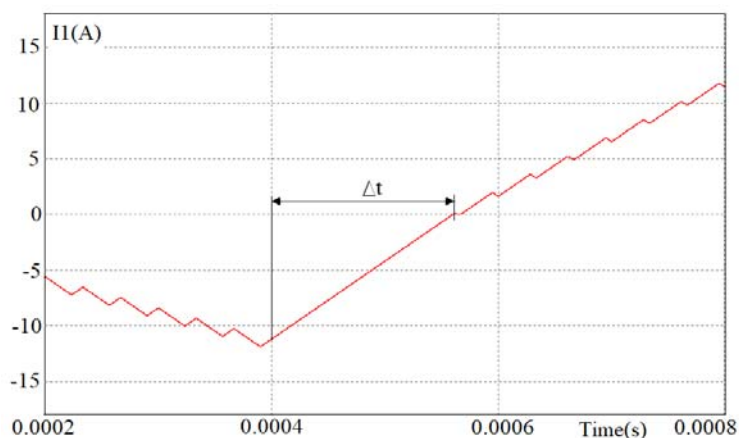


Рис. 3

Якщо транзистор VT2 напівмоста закритий, а перемикач VT1 працює – це режим понижувального перетворювача, а якщо навпаки – транзистор VT1 виключений, а перемикач VT2 працює, то відтворюється підвищувальний перетворювач. Вхідною напругою понижувального перетворювача є напруга E1, а вихідною напругою E2 – напруга батареї.

Як приклад, на рис. 3 наведено результати одного із варіантів розрахунків струму індуктора $I_1(t)$ під час роботи двонапрямого перетворювача для інтервалу часу від включення понижуювального перетворювача до моменту часу 0.0004 с, коли перетворювач перейшов у режим передачі енергії від батареї E2 до джерела E1 за значень індуктивності дроселя L 200 мкГн та частоти ШІМ 30 кГц. Як впливає з рис. 3, струм $I_1(t)$ спочатку повинен впасти до нуля, а потім тільки почнеться передача енергії до джерела високої напруги E1. Час Δt зменшення струму до нуля залежить тільки від значень індуктивності дроселя та напруги батареї. Водночас цей час визначається лише зазначеними вище параметрами згідно з наведеною на рис. 2 схемою та ідентичний для переходу від режиму підвищувального перетворювача в режим понижувального і навпаки.

Наявність індуктивності призводить до більш низьких пульсацій струму, що можна вважати перевагою в деяких застосуваннях, але й суттєво погіршує динаміку перехідних процесів, що є значним недоліком для гібридної енергосистеми автомобіля.

Один із способів вирішення названих проблем – використання схеми асиметричного інвертора з магнітозв'язаним дроселем [7]. Перетворювач за схемою асиметричного інверто-

ра (рис. 4) може лежати в основі побудови двонапрявленого перетворювача DC-DC для гібридної енергосистеми автомобіля. Пристрій є однофазним інвертором, що містить чотири вентиля, крім того вентиля VT1 і VT2 – керовані.

Як видно з рис. 4, схема цього перетворювача запозичує структуру інвертора з напівмостом [8]. Оскільки він складається із двох понижувальних перетворювачів, а також має функції звичайного напівмостового перетворювача, тому він названий в англійській термінології dual-buck half bridge inverter [9].

Перетворювач має дві переваги: по-перше, усуваються наскрізні струми, тому що ніякі активні силові ключі не підключені послідовно в кожному фазному плечі; по-друге, розсіювання енергії в процесі зворотного відновлення силового ключа значно скорочується, оскільки не існує контуру протікання струму через внутрішній діод силових ключів.

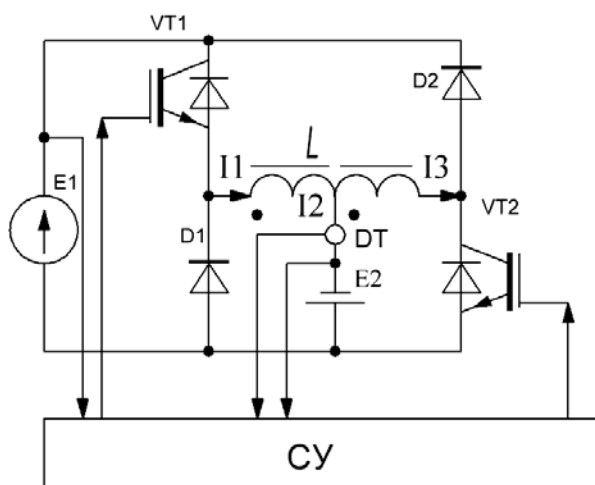


Рис. 4

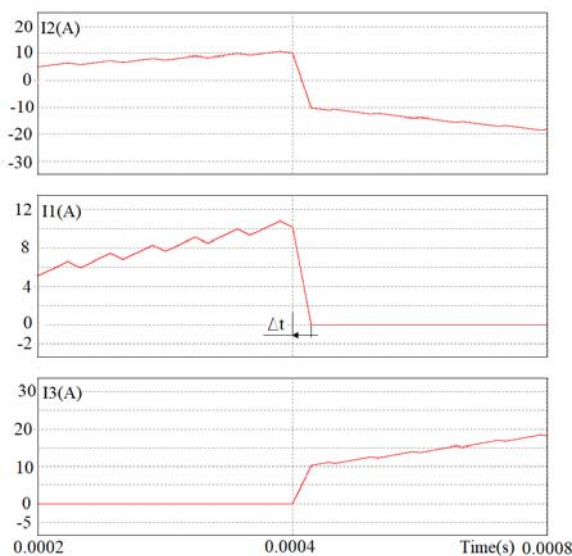


Рис. 5

Дослідження асиметричного інвертора з магнітозв'язаним дроселем проводились шляхом розрахунків робочих режимів перетворювача в пакеті схематехнічного моделювання Psim на розробленій імітаційній моделі. Використовувалась система управління силовими перемикачами VT1 та VT2, яка побудована на основі пропорційно-інтегрального регулятора та імпульсного модулятора з ШІМ. Результати розрахунків перехідних процесів за зміни напрямлення струму з батареї до високовольтного джерела приведені на рис. 5.

Розрахована вихідна потужність перетворювача становить 3.5 кВт. Компоненти та параметри схеми були обрані для режиму безперервної провідності. У зв'язку з тим, що індуктивність дроселя одночасно входить до складу понижувального та підвищувального регуляторів, вона розраховується за умовами забезпечення безперервного режиму для підвищувального регулятора в точці екстремуму функції:

$$L_{min} = \frac{D \cdot (1 - D^2) \cdot R_{max}}{2 \cdot f} = \frac{0,3849 \cdot R_{max}}{2 \cdot f}$$

де L_{min} – мінімальна індуктивність котушки індуктивності, яка необхідна для роботи в безперервному режимі, R_{max} – максимальне навантаження; D – відносна тривалість імпульсу; f – частота широтно-імпульсного модулятора.

На рис. 5 наведено результати розрахунків струму індуктора $I_1(t)$ під час роботи двонапрявного перетворювача для інтервалу часу від включення понижувального перетворювача

ча до моменту часу 0.0004 с, коли він перейшов у режим передачі енергії від батареї E2 до джерела E1 за значень індуктивності дроселя L 200 мкГн та частоти ШІМ 30 кГц. Усі ці параметри аналогічні розглянутим раніше на рис.2 двонапрямному перетворювачу. Як слідує з рис. 5, струм $I_2(t)$ після припинення роботи понижувального регулятора падає до нуля, за цей же час струм $I_3(t)$ піднімається до значення, якого досяг струм $I_2(t)$. Таким чином, завдяки магнітному зв'язку між обмотками котушки індуктивності струм $I_1(t)$, за цей же час переходить із позитивного напрямлення до негативного. Як впливає з розгляду схеми рис. 4 і результатів моделювання рис. 5, тривалість перехідного процесу визначається лише індуктивністю розсіювання і не залежить від величини індуктивності котушки.

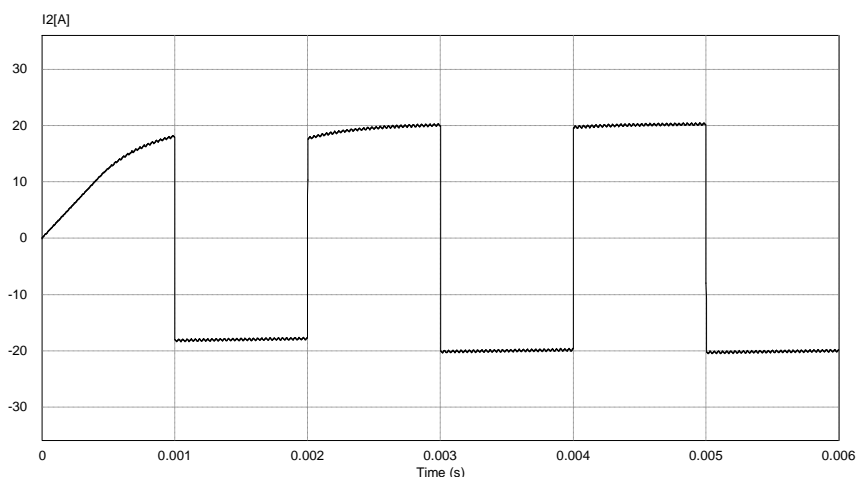


Рис. 6

На рис. 6 наведено результати розрахунків струму джерела живлення E2 (рис. 4) під час роботи двонапрямного перетворювача в динамічному режимі.

У результаті проведених досліджень розроблено методику та за допомогою метода усереднення в просторі станів визначено аналітичні вирази для розрахунку параметрів двонапрямного перетворювача постійного струму з використанням асиметричного інвертора для систем накопичення електроенергії. Було розглянуто й обґрунтовано побудову схеми силової частини потужного двонапрямного DC/DC перетворювача для досягнення динамічних перехідних процесів. Виявлено, що ця схема характеризується високим ККД (94 %). Запропонований двонапрямний перетворювач постійного струму зі швидким перетворенням енергії може покращити час, необхідний для передачі енергії, і забезпечити плавний потік потужності за однакових характеристик основних компонентів. Створено прототип перетворювача для батареї 14 і шини постійного струму 200 В із вихідною потужністю 3500 Вт для підтвердження здійсненності теоретичних аналізів. Експериментальні результати підтверджують ефективність запропонованої побудови потужного двонапрямного DC/DC перетворювача енергії.

Роботу виконано в рамках бюджетної програми за темою "Елінд П", державний реєстраційний номер 0122U000534.

1. Жаркін А.Ф., Пазєєв А.Г., Новський В.О. Дослідження двонапрямного перетворювача постійної напруги уніфікованого інверторного модуля для застосування в системах накопичення енергії. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 5. С. 31–34. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.05.031>
2. Zharkin A., Novskiy V., Martynov V. Powerful Unified Inverter Modules for Energy Storage Systems. *2019 IEEE 6th International Conference on ENERGY SMART SYSTEMS (IEEE ESS)*. 2019. Pp. 144–149.
3. Santiago J., Oliveira J.G., Lundin J., Abrahamsson J., Larsson A., and Bernhoff H.. Design parameters calculation of a novel driveline for electric vehicles. *World Electric Vehicle Journal*. 2009. Vol. 3.
4. Wu X., Liu Z., Du J., and Yu B. Research on Zero Voltage Switching Non-inductive Current Circulation Control of Bidirectional DC/DC Converter for Hybrid Energy Source System of Electric Vehicle. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2021. Vol. 16. No. 2. Pp. 873–887.
5. Mozos, A.B.; Mouli, G.R.C.; Bauer, P. Evaluation of topologies for a solar powered bidirectional electric vehicle charger. *IET Power Electron*. 2019. No 12. Pp. 3675–3687.

6. Di W. and Williamson S.S. A novel design and feasibility analysis of a fuel cell plug-in hybrid electric vehicle. *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2008. Pp. 1–5.
7. Мартинов В.В., Руденко Ю.В. Нагрузочные характеристики асимметричного инвертора с магнитосвязанным дросселем. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2017. Вип. 27. С. 234–237.
8. Callegaro, L.; Ciobotaru, M.; Pagano, D.J.; Turano, E.; Fletcher, J.E. A simple smooth transition technique for the noninverting buck-boost converter. *IEEE Trans. Power Electron.* 2018. No 33. Pp. 4906–4915.
9. Liu J., Yan Y. A Novel Hysteresis Current Controlled Dual Buck Half Bridge Inverter. Proc. *IEEE PESC*, Acapulco, Mexico, Jun. 2003. Pp. 1615–1620.

RESEARCH OF A BIDIRECTIONAL VOLTAGE CONVERTER FOR APPLICATION IN ENERGY STORAGE SYSTEMS

O.M. Yurchenko, D.V. Martynov, V.V. Martynov

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteiskiyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine
e-mail: d.martynov@electrotechimpulse.com

Electromagnetic processes in a bidirectional DC converter with the possibility of increasing and decreasing output voltage levels using an asymmetric inverter for a battery energy storage system when operating in difficult conditions with a short conversion period and determining its parameters are considered. Bidirectional DC converters are widely used in hybrid energy storage systems and in DC distribution power systems. This non-isolated bidirectional boost-buck converter is designed to control the flow of energy between sources with different voltage levels due to the use of low-voltage batteries in these systems. Thanks to the ability of these converters to quickly redirect electrical energy both in one and the other direction, it became possible not only to charge the battery from stationary sources of electricity, but also to charge the battery during the operation of the generator from the internal combustion engine and regenerative braking. The results of calculations of the prototype of a bidirectional DC converter with a 14 V battery, a 200 V DC bus and an output power of 3500 W are given. A prototype was made to confirm the possibility of rapid energy conversion. Ref. 9, fig. 6.

Keywords: electric power storage systems, bidirectional DC voltage converter, fast energy conversion, hybrid electric vehicle.

1. Zharkin A.F., Pazyeyev A.H., Novs'kyy V.O. Research of a bidirectional constant voltage converter of a unified inverter module for use in energy storage systems. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 5. Pp. 31–34. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.05.031> (Ukr)
2. Zharkin A., Novskiy V., Martynov V. Powerful Unified Inverter Modules for Energy Storage Systems. *2019 IEEE 6th International Conference on ENERGY SMART SYSTEMS (IEEE ESS)*. 2019. Pp. 144–149.
3. Santiago J., Oliveira J.G., Lundin J., Abrahamsson J., Larsson A., and Bernhoff H.. Design parameters calculation of a novel driveline for electric vehicles. *World Electric Vehicle Journal*. 2009. Vol. 3.
4. Wu X., Liu Z., Du J., and Yu B. Research on Zero Voltage Switching Non-inductive Current Circulation Control of Bidirectional DC/DC Converter for Hybrid Energy Source System of Electric Vehicle. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2021. Vol. 16. No 2. Pp. 873–887.
5. Mozos, A.B.; Mouli, G.R.C.; Bauer, P. Evaluation of topologies for a solar powered bidirectional electric vehicle charger. *IET Power Electron.* 2019. No 12. Pp. 3675–3687.
6. Di W. and Williamson S.S. A novel design and feasibility analysis of a fuel cell plug-in hybrid electric vehicle. *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. 2008. Pp. 1–5.
7. Martynov V.V., Rudenko YU.V. Load characteristics of an asymmetric inverter with a magnetically coupled choke. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2017. No 27. Pp. 234–237. (Rus)
8. Callegaro L., Ciobotaru M., Pagano D.J., Turano E., Fletcher, J.E. A simple smooth transition technique for the noninverting buck-boost converter. *IEEE Trans. Power Electron.* 2018. No 33. Pp. 4906–4915.
9. Liu J., Yan Y. A Novel Hysteresis Current Controlled Dual Buck Half Bridge Inverter. Proc. *IEEE PESC*. Acapulco, Mexico, Jun. 2003. Pp. 1615–1620.

Надійшла: 31.05.2023

Прийнята: 15.06.2023

Submitted: 31.05.2023

Accepted: 15.06.2023