

Зарядний пристрій акумулятора з двостороннім передаванням енергії

Гарницький^f А. В., ORCID [0000-0003-0978-1694](https://orcid.org/0000-0003-0978-1694)

Вербицький^s Є. В., к.т.н. доц., ORCID [0000-0001-7275-5152](https://orcid.org/0000-0001-7275-5152)

Кафедра електронних пристроїв та систем eds.kpi.ua

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)

Київ, Україна

Анотація—У статті проаналізовано умови збільшення ефективності використання акумуляторів електромобілів, зокрема в рамках концепції V2G (Vehicle to Grid) як накопичувача для організації автономних систем електроживлення. Показано, що це можливо лише за умови простої інтеграції акумуляторів у систему, гнучкості роботи та широкого діапазону режимів, що повинні забезпечуватись уніфікованими пристроями заряду-розряду. Зроблено огляд можливих топологій для зарядного пристрою з двонаправленим передаванням енергії та обрано мостовий перетворювач з м'якою комутацією транзисторів при нульовій напрузі, що має високий ККД, гальванічну розв'язку та можливість корекції форми струму. Проаналізовано режими роботи перетворювача та порівняно його коефіцієнт корисної дії з аналогічним перетворювачем з жорсткою комутацією транзисторів і показано, що коефіцієнт корисної дії запропонованої топології перетворювача на 10-15 % вищий в діапазоні потужності 20-200 Вт, що разом з можливістю формування синусоїдальної форми струму з THD ≈ 20 % та двостороннім передаванням енергії свідчить про доцільність його використання як модульного зарядного пристрою із чергуванням фаз в рамках концепції V2G.

Ключові слова — зарядний пристрій електромобіля; концепція Vehicle to Grid; мостовий перетворювач з м'якою комутацією транзисторів.

I. ВСТУП

Поступове здешевлення електричних акумуляторів сприяє їхньому ширшому використанню у автономних та централізованих системах електроживлення в якості резервного джерела електроенергії та збільшенню частки електромобілів [1]. Для збільшення ефективності використання акумуляторів рядом компаній [2,3] розроблено принцип інтеграції автомобільних акумуляторів до централізованих або автономних систем електроживлення під час стоянки електромобіля, що описаний у концепціях V2G (Vehicle to Grid) і G2V (Grid to Vehicle) [4,5].

Широке використання автомобільних акумуляторів у системах електроживлення можливе лише за умови їхньої простої інтеграції, гнучкості роботи, та широкого діапазону режимів, що повинні забезпечуватись уніфікованими пристроями заряду-розряду з такими особливостями:

- широкий діапазон параметрів вхідної і вихідної напруги;
- корекція коефіцієнта потужності вхідного струму;
- можливість відбирання максимальної потужності від відновлювальних джерел енергії;
- висока енергетична ефективність.

У роботі проведено аналіз проблеми інтеграції автомобільних акумуляторів до централізованих або автономних систем електроживлення. Зроблено огляд топологій зарядного пристрою та запропоновано використовувати перетворювач модульного типу з м'якою комутацією транзисторів з функцією двостороннього передавання енергії та корекції коефіцієнта потужності. Порівняно ККД запропонованого перетворювача з аналогічним перетворювачем з жорсткою комутацією.

II. ОПИС ТОПОЛОГІЇ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЗАРЯДНОГО ПРИСТРОЮ

Для двонаправленого передавання енергії часто використовується неізований напівмостовий перетворювач, принципова схема, якого зображена на Рис. 1 [6]. Перевагою перетворювача є те, що конденсатори C_2 і C_3 переходу стік-витік транзисторів VT_1 і VT_2 та дросель L_1 утворюють резонансний контур, що дозволяє м'яко комутувати транзистори, тим самим мінімізувавши динамічні втрати.

Для забезпечення електричної ізоляції акумуляторної батареї доцільно використовувати мостову схему, зображену на Рис. 2. Принцип її роботи є подібним до напівмостової схеми, зображеної на Рис. 1. За потреби передавання енергії від акумуляторної батареї V_{bat} до джерела V_s комутуються транзистори



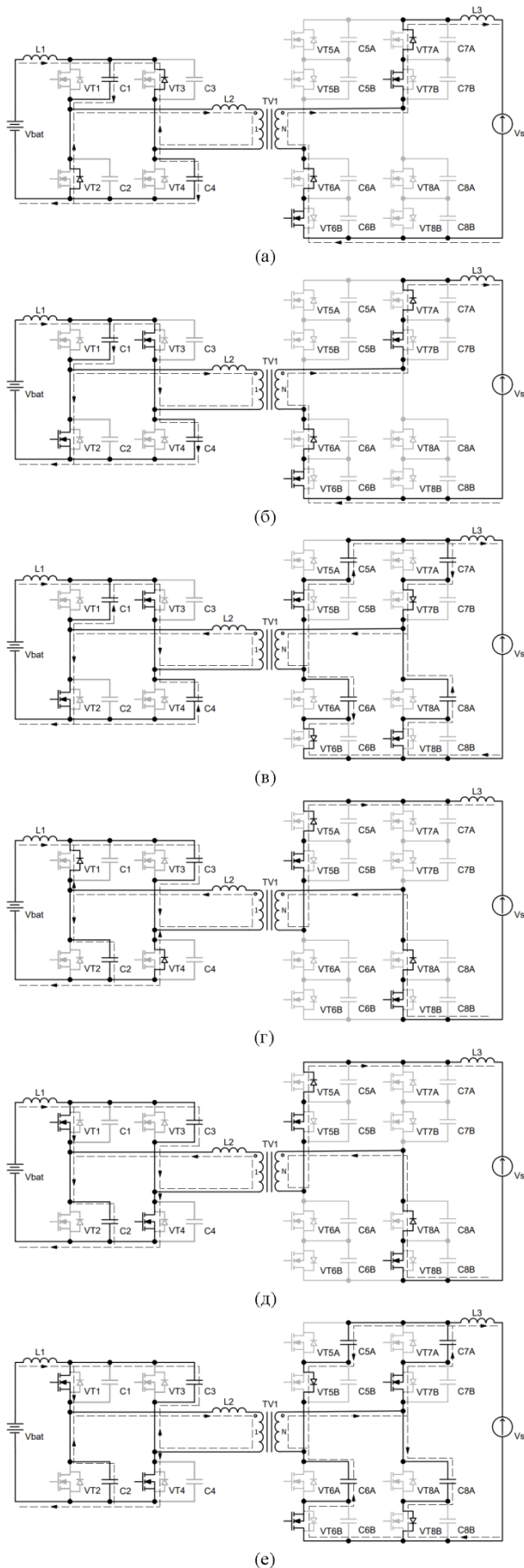


Рис. 4 Еквівалентні схеми перетворювача на інтервалах роботи

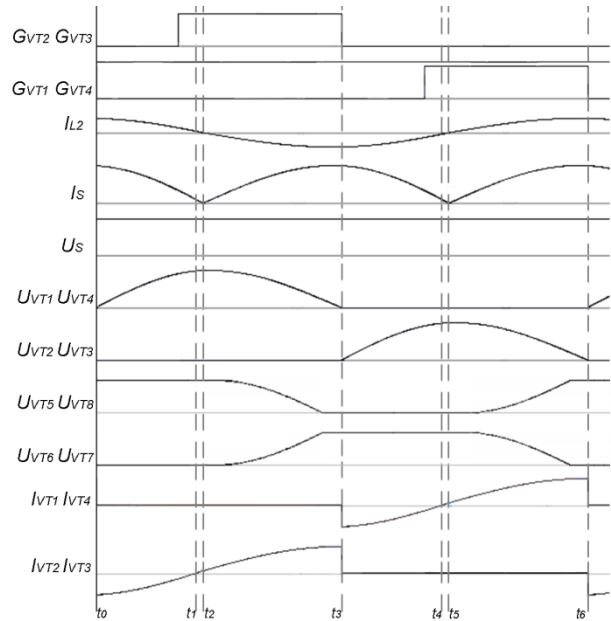


Рис. 5 Часові діаграми струмів і напруг на інтервалах роботи перетворювача

М'яка комутація транзисторів забезпечується лише за умови, що енергії, накопиченої в індуктивності резонансного контуру, вистачає, щоб перезарядити конденсатор резонансного контуру:

$$\frac{Li_{Lmax}^2}{2} \geq \frac{CV_{bat}^2}{2}, \tag{2}$$

де i_{Lmax} – амплітудне значення струму дроселя, V_{bat} – вихідна напруга батареї.

Зважаючи на (2), існує мінімальне середнє значення струму навантаження I_{dmin} , за якого забезпечується м'яка комутація транзисторів:

$$I_{dmin} = \sqrt{\frac{C}{L} \frac{V_{bat}}{n}}, \tag{3}$$

де n – коефіцієнт трансформації трансформатора.

Слід зазначити, що статичні втрати енергії на внутрішньому опорі транзисторів у режимі з м'якою комутацією транзисторів $W_{cm_м}$ дещо більші, ніж при жорсткій комутації транзисторів $W_{cm_ж}$ та прямокутній формі струму через елементи [7]:

$$W_{cm_ж} = 4 \frac{nI_d^2}{\gamma} R_{on}; \tag{4}$$

$$W_{cm_мVT} = \frac{\pi^2 nI_d^2}{2 \gamma} R_{on}, \tag{5}$$

де γ – коефіцієнт заповнення роботи транзисторів, R_{on} – опір каналу транзистора у відкритому стані.

Динамічні втрати W_{din} у режимі з жорсткою комутацією залежать від ємності переходу стік-витік транзистора C і визначаються за формулою [7]:



$$W_{дин} = W_{дин_on} + W_{дин_off} = 4 \left(\int_0^{T_{kon}} i_{VT}(t)u_{VT}(t)dt + \int_0^{T_{koff}} i_{VT}(t)u_{VT}(t)dt \right), \quad (6)$$

де $W_{дин_on}$, $W_{дин_off}$ – динамічні втрати при вмиканні та вимиканні транзистора відповідно, i_{VT} , u_{VT} – струм і напруга транзистора протягом перехідного процесу, викликаного комутацією, T_{kon} , T_{koff} – тривалість перехідного процесу під час вмикання та вимикання транзистора відповідно.

З аналізу (4) - (5) можна зробити висновок, що запропонований перетворювач доцільно використовувати, якщо збільшення статичних втрат компенсується відсутністю динамічних:

$$W_{ст_м} - W_{ст_ж} < W_{дин}. \quad (7)$$

Регулювання вихідної напруги перетворювача з м'якою комутацією здійснюється за законом частотно-імпульсної модуляції (ЧІМ) [8] з постійною тривалістю паузи $t_{II} = const$, де тривалість паузи визначають періодом резонансних процесів перетворювача:

$$t_{II} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (8)$$

Зважаючи на це, процес регулювання вихідної напруги пов'язаний з одночасною зміною коефіцієнта заповнення імпульсів γ і періоду роботи перетворювача T . При цьому регульовальна характеристика перетворювача визначається за формулою:

$$U_{вих} = n\gamma U_{вх} \frac{t_{II}}{T}. \quad (9)$$

Проаналізуємо переваги використання перетворювачів з м'якою комутацією транзисторів над використанням з перетворювачів з жорсткою комутацією, порівнявши їх технічні показники у програмному середовищі Simulink.

IV. АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧА З М'ЯКОЮ КОМУТАЦІЄЮ ТРАНЗИСТОРІВ НА ОСНОВІ МОДЕЛЮВАННЯ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB® SIMULINK

Для оцінки технічних показників перетворювача, а саме:

- високого коефіцієнта корисної дії;
- низького значення коефіцієнта спотворення струму THD,

у середовищі Matlab® Simulink створено модель перетворювача, зображену на Рис. 6, та порівняно ККД перетворювачів з м'якою та жорсткою комутацією. Параметри перетворювача $E1 = 220$ В, $E2 = 220$ В. Модель транзистора складається з двох паралельно з'єднаних транзисторів C3M0065090D [9] з параметрами: напруга стік-витік $U_{DS} = 900$ В, опір відкритого каналу транзистора $R_{on} = 65$ мОм, ємність переходу стік-витік $C_{DS} = 660$ пФ, тобто опір каналу складеного транзистора складає $R_{on_c} = 32.5$ мОм, ємність $C_{DS_c} = 1.32$ нФ.

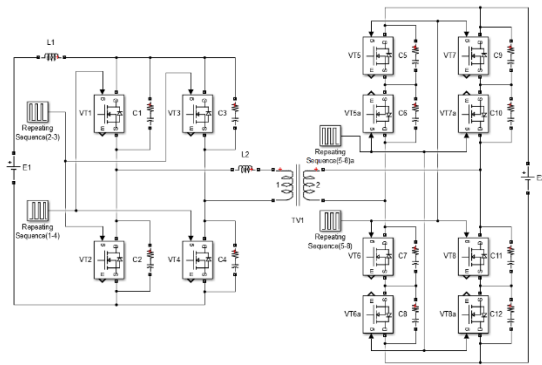


Рис. 6 Модель перетворювача у Matlab® Simulink

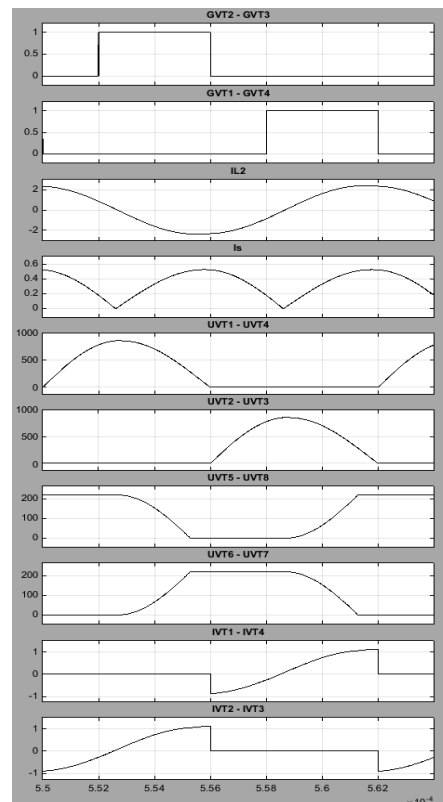


Рис. 7 Часові діаграми струмів і напруг перетворювача

Часові діаграми струмів і напруг перетворювача зображені на Рис. 7.

Чисельні значення ККД перетворювачів з м'якою η_1 та жорсткою η_2 комутацією при різній потужності P наведено у Таблиця 1.

З аналізу даних таблиці можна зробити висновок, що ККД перетворювача досягає 90 %, що на 10-15 % більше, ніж у перетворювача з жорсткою комутацією у діапазоні потужностей 100-1000 Вт. На більшій потужності різниця в ККД перетворювачів з м'якою і жорсткою комутацією стає несуттєвою.

ТАБЛИЦЯ 1 ЗАЛЕЖНІСТЬ ККД ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВІД ПОТУЖНОСТІ

P, Вт	200	400	600	800	1000
η_1 , %	93.18	91.98	90.05	89.45	86.59
η_2 , %	70.94	71.05	71.16	71.22	71.36

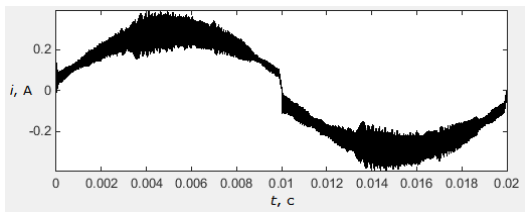


Рис. 8 Діаграма вхідного струму джерела синусоїдальної напруги

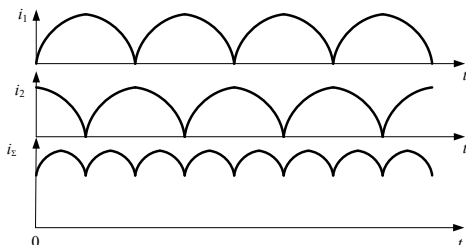


Рис. 9 Ілюстрація до принципу роботи модульного перетворювача

На Рис. 8, показано діаграму вхідного струму джерела синусоїдальної напруги, що встановлено замість джерела постійної напруги E_2 , показаного на Рис. 6. При цьому на вході джерела змінної напруги встановлено Т-подібний LCL фільтр, оскільки струм на виході перетворювача має переривчастий характер.

Коефіцієнт нелінійних спотворень наведеного струму складає $\text{THD} = 20.9\%$, що є допустимим значенням. Однак слід зазначити, що використання LCL фільтра створює зсув фаз між напругою і струмом та погіршує значення THD. Для поліпшення форми можна використовувати спеціалізовані закони модуляції [10] або використовувати перетворювачі з чергуванням фаз, що дозволяють отримати неперервну форму струму та зменшити габарити фільтра [11,12], принцип роботи яких на прикладі двох комірок проілюстровано на Рис. 9.

Відповідно до Рис. 9, для модульного перетворювача з m комірок, фазовий струм між струмами комірок складає T/m , при цьому сумарний струм має значно менший коефіцієнт пульсацій та в m разів більшу вихідну частоту. Тому вихідний струм перетворювача потребує мінімального згладження, завдяки чому значно зменшуються габарити встановленого фільтра та покращується значення THD. До того ж, зважаючи на те, що потужність систем електроживлення побутового призначення складає декілька кіловат, використання модульного перетворювача з чергуванням фаз дозволить використовувати комірки відносно невеликої потужності, орієнтовна залежність ККД яких наведена на Рис. 8, із забезпеченням високого ККД модульного перетворювача.

При проектуванні системи електроживлення на основі акумулятора слід враховувати обмеження за максимальними струмами і напругами, що залежать від його типу. Як правило, використання акумулятора передбачає дотримання таких обмежень:

- розрядний струм акумулятора не повинен перевищувати $1C-3C$, де C – ємність акумулятора;

- заряд акумулятора, як правило, проводиться двоетапно: спочатку постійним струмом, потім постійною напругою.

У запропонованому перетворювачі, завдяки можливості плавного регулювання вхідних і вихідних струмів та напруг, заряд-розряд акумулятора може здійснюватись з регулюванням як середніх так і пікових струмів та напруг. Встановлений на вході перетворювача індуктивний фільтр дозволяє забезпечити заряд акумулятора, як постійним струмом, так і напругою з невеликим коефіцієнтом пульсацій.

ВИСНОВКИ

У статті проаналізовано проблему інтеграції автомобільних акумуляторів до централізованих або автономних систем електроживлення та наголошено на необхідності розробки універсального зарядно-розрядного пристрою, що може працювати з джерелами постійного і змінного струму та має функції корекції коефіцієнта потужності, відбору максимальної потужності та має високий ККД. В якості топології зарядного пристрою запропоновано використовувати перетворювач з м'якою комутацією транзисторів при нульовій напрузі, що має функцію двостороннього передавання енергії та функцію корекції коефіцієнта потужності.

Порівняно ККД запропонованого перетворювача з аналогічним перетворювачем з жорсткою комутацією і показано, що запропонований перетворювач має на 10-15 % більший ККД на постійному струмі. Для корекції коефіцієнта потужності на змінному струмі на виході перетворювача встановлюється Т-подібний LCL фільтр, що дозволяє отримати значення коефіцієнта нелінійних спотворень на рівні 20.9 %.

ПОДЯКА

Наукові дослідження, висвітлені у статті, виконані в рамках науково-дослідної теми № 0120U102131, що фінансується міністерством освіти і науки України.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] S. Han and Sh. Han, "Economic feasibility of V2G frequency regulation in consideration of battery wear," *Energies*, no. 6, pp. 748-765, 2013, DOI: [10.3390/en6020748](https://doi.org/10.3390/en6020748)
- [2] P. B. Andersen, O. J. Olesen, G. Poilasne, B. Chri, "The Nikola project intelligent electric vehicle integration," in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe 2014*, 2014, DOI: [10.1109/ISGTEurope.2014.7028765](https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2014.7028765)
- [3] Nissan Motor Co. (2013) Nissan Leaf can now power the office. [Online]. URL: <http://blog.alliance-renaultnissan.com/blog/nissan-leafs-can-now-power-office-wellhome>
- [4] Y. Zhou and X. Li, "Vehicle to Grid Technology: A Review," in *34th Chinese Control Conference*, 2015, pp. 9031-9036, DOI: [10.1109/chicc.2015.7261068](https://doi.org/10.1109/chicc.2015.7261068)
- [5] S. Shariff, D. Iqbal, M. Alam, and F. Ahmad, "A State of the Art Review of Electric Vehicle to Grid (V2G) technology," in *JOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 561, 2019, DOI: [10.1088/1757-899X/561/1/012103](https://doi.org/10.1088/1757-899X/561/1/012103)
- [6] J. Zhang, J. S. Lai, R. Y. Kim, and W. Yu, "High-power density design of a soft-switching high-power bidirectional dc-dc converter," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 22, no. 4, pp. 1145-1153, 2007, DOI: [10.1109/TPEL.2007.900462](https://doi.org/10.1109/TPEL.2007.900462)

- [7] G. S. Zinoviev, *Power Electronics. Textbook for undergraduate students. Fifth edition.* Moscow: Jurajt, 2012.
- [8] Y. O. Denisov, S. A. Stepenko, A. N. Gorodny, and A. O. Kravchenko, "Input current parameters analysis for PFC based on quasi-resonant and conventional boost converters," in *2014 IEEE 34th International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2014, pp. 393-397. DOI: [10.1109/ELNANO.2014.6873446](https://doi.org/10.1109/ELNANO.2014.6873446)
- [9] Cree Inc, "Silicon Carbide Power MOSFET" C3M0065090D datasheet, 2019,
URL: <https://www.wolfspeed.com/media/downloads/176/C3M0065090D.pdf>
- [10] F. Jauch and J Biela, "Combined Phase-Shift and Frequency Modulation of a Dual-Active-Bridge AC-DC Converter With PFC," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, issue 12, pp. 8387 - 8397, 2016, DOI: [10.1109/TPEL.2016.2515850](https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2515850)
- [11] A. Blinov, I. Verbytskyi, D. Zinchenko, D. Vinnikov, and I. Galkin, "Modular Battery Charger for Light Electric Vehicles," *Energies*, vol. 13, no. 4, p. 774, 2020, DOI: [10.3390/en13040774](https://doi.org/10.3390/en13040774)
- [12] I. Verbytskyi, O. Bondarenko, and D. Vinnikov, "Multicell-type current regulator based on Cuk converter for resistance welding," in *2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, 2017, pp. 1-6, DOI: [10.1109/RTUCON.2017.8124844](https://doi.org/10.1109/RTUCON.2017.8124844)

Надійшла до редакції 12 жовтня 2020 року

UDC 621.314

Battery Charger with Bidirectional Power Transmission

A. V. Harnytskyi^f, ORCID [0000-0003-0978-1694](https://orcid.org/0000-0003-0978-1694)

I. V. Verbytskyi^s, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0001-7275-5152](https://orcid.org/0000-0001-7275-5152)

Department of Electronic Devices and Systems eds.kpi.ua

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)
Kyiv, Ukraine

Abstract—The gradual reduction in price of electric batteries contributes to their wider use in autonomous and centralized power supply systems as a backup source of electricity and increase the share of electric vehicles. In the paper the conditions for increasing the efficiency of electric vehicle batteries, in particular in the framework of the concept of V2G (Vehicle to Grid) as a drive for the organization of autonomous power supply systems are analyzed. It is shown that this is possible only with the simple integration of batteries into the system, flexibility, and a wide range of modes that have to be provided by unified charge-discharge devices. Such charging devices have to have such features: a wide range of input and output voltage parameters; correction of the input power factor; the ability to take the maximum power from renewable energy sources; high energy efficiency. A review of possible topologies for a charger with bidirectional power transmission and a bridge converter with soft switching of transistors at zero voltage, which has a high efficiency, galvanic isolation and the ability to correct the shape of the current. The modes of operation of the converter are analyzed and conditions of soft switching is obtained. It is shown that soft switching is valid for current that is not less than minimal one. Efficiency of the converter with soft commutation is compared with a similar converter with rigid commutation of transistors. It is shown that static losses in converter with soft commutation it higher than in the rigid one. So, the proposed converter should be used if the increase in static losses is compensated by the lack of dynamic losses. Additional feature of the converter is that the regulation of the output voltage of the converter with soft switching is carried out according to the law of frequency-pulse modulation with a constant pause duration, where the pause duration is determined by the period of resonant processes of the converter. The model of the converter in Matlab[®] Simulink is built and it is shown that the efficiency of the proposed converter topology is 10-15% higher, which together with the possibility of sinusoidal current with THD \approx 20% and two-way transmission energy indicates the feasibility of its use as a charger for electric vehicles under the concept of V2G. However, it should be noted that the use of LCL filter creates a phase shift between voltage and current and degrades the THD value. To improve the shape, it is possible to use specialized laws of modulation [or to use modular converters, which allow to obtain a continuous current shape and reduce the volume of the filter.

Keywords — electric car charger; concept Vehicle to Grid; bridge converter with transistor soft commutation.

