

АНОТАЦІЯ

Кожушко Ю.В. Перетворювачі електроенергії гібридних ємнісних накопичувачів для систем з імпульсним навантаженням. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 171 - Електроніка. - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена розвитку принципів побудови гібридних ємнісних накопичувачів енергії з поліпшеними характеристиками на основі перетворювачів електричної енергії в системах з імпульсним навантаженням.

Переважна більшість портативних пристроїв та систем має складний нелінійний характер енергоспоживання. Джерела живлення таких пристроїв, а також системи накопичення енергії в Microgrid та вітровій і сонячній генерації електроенергії повинні забезпечувати середню та пікову потужність навантаження, а також, задані масо-габаритні показники та високі показники енергоефективності. Поширеним є використання різних типів акумуляторних батарей в якості накопичувачів енергії для таких джерел живлення, оскільки вони характеризуються високою питомою щільністю енергії. Проте значний піковий струм навантаження, який перевищує номінальний струм АБ, може спричинити скорочення їхнього терміну експлуатації та погіршення їх енергетичних характеристик. Використання комбінацій накопичувача з високою щільністю потужності та накопичувача, що характеризується високою щільністю енергії може бути ефективним вирішенням проблеми портативного енергоживлення та зберігання енергії в системах Microgrid, сонячної та вітрової енергетики.

Таким чином, застосування гібридних ємнісних накопичувачів енергії на основі акумуляторних батарей (АБ) та суперконденсаторів (СК) для систем автономного енергоживлення та портативних пристроїв, в останні роки, стає перспективним напрямом досліджень. Ще однією перспективною галуззю застосування накопичувачів типу АБ та СК є джерела живлення обладнання для контактного мікрозварювання, які також характеризується імпульсним

споживанням струму високої амплітуди. Джерела живлення побудовані на основі топології з проміжним накопиченням енергії потребують накопичувачів, що одночасно характеризуються високою щільністю потужності та енергії. Для розподілу енергії між такими накопичувачами застосовуються додаткові кола перетворення електроенергії. В роботі розглянуто перетворювачі електроенергії гібридних ємнісних накопичувачів, що застосовуються в системах з імпульсним енергоспоживанням, на прикладі енергоспоживання для реалізації процесу контактного мікрозварювання.

У першому розділі проведено аналіз особливостей характеристик імпульсного струму навантаження під час процесу контактного мікрозварювання. Наведено аналіз енергетичних характеристик різних типів ємнісних накопичувачів енергії, який показав, що з поміж інших накопичувачів АБ характеризуються високою щільністю енергії, в той час, як для СК типовою є висока щільність потужності. Виконано огляд еквівалентних схем заміщення АБ та СК, що використовуються для моделювання роботи накопичувачів в колах силової електроніки, який показав, що еквівалентна схема заміщення першого порядку АБ та СК дозволяє змоделювати роботу накопичувачів для їх аналізу в системах енергоживлення. Проведено порівняльний аналіз пасивної, напівактивної та активної топологій гібридних ємнісних накопичувачів та особливостей їх застосування.

Результати аналітичного огляду наукової літератури, що присвячена проблемі розробки систем на основі гібридних ємнісних накопичувачів енергії, показали, що актуальною є задача розробки перетворювачів електроенергії для гібридних ємнісних накопичувачів. В кінці першого розділу сформовано основні задачі дослідження.

В другому розділі наведено аналіз характеристик імпульсного енергоспоживання. Для забезпечення ефективної роботи систем енергоживлення, пікову потужність навантаження повинен забезпечувати накопичувач з високою щільністю потужності, в той час як середню потужність – накопичувач, що характеризується високою щільністю енергії. На основі методу усереднення у просторі змінних стану отримано математичну модель перетворювача в режимі

безперервних та переривчастих струмів. Отримано спрощену математичну модель перетворювача, яка за рахунок представлення СК в усталеному режимі, як еквівалентного джерела напруги дозволяє знизити порядок системи диференційних рівнянь, що описують перетворювач, і тим самим спростити аналіз отриманої системи. Математичні моделі використано для розробки алгоритму керування перетворювачем гібридного ємнісного накопичувача енергії. На основі математичних моделей, в третьому розділі запропоновано двоконтурну систему керування, яка забезпечує одночасне регулювання розрядного струму АБ та напруги СК. На основі методу Харитонова проведено аналіз стійкості системи керування, який показав, що система є стійкою при зміні параметрів в допустимому діапазоні значень, що визначається допуском параметрів компонентів схеми.

Четвертий розділ присвячено аналізу енергоефективності перетворювача гібридного ємнісного накопичувача енергії, отримано залежності коефіцієнту корисної дії перетворювача від середнього струму навантаження, а також залежності потужності втрат в компонентах схеми від частоти перемикання ключів. Представлено систему вирівнювання напруги комірок послідовно з'єднаних СК, яка дозволяє з заданою точністю забезпечити регулювання напруги на СК незалежно від стану заряду інших комірок модулю.

В п'ятому розділі проведена верифікація аналітичних розрахунків шляхом моделювання та розробки прототипу, що дозволяє експериментально дослідити роботу перетворювача електричної енергії та процеси розподілу енергії між ємнісними накопичувачами протягом споживання імпульсної потужності під час процесу контактного мікрозварювання.

Таким чином, в роботі вирішено актуальну задачу розвитку теорії розробки перетворювачів гібридних ємнісних накопичувачів енергії, що працюють в системах з імпульсним навантаженням. Отримані нові науково обґрунтовані результати в сукупності є суттєвими для розвитку систем енергоживлення з імпульсним споживанням струму навантаженням, в яких в якості накопичувачів використовуються АБ та СК.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вдосконалено топологію гібридного ємнісного накопичувача енергії за рахунок використання перетворювача постійного струму, регулювальні характеристики якого дозволяють розширити функціональні можливості таких накопичувачів в системах з імпульсним споживання струму навантаження.

2. Вперше запропоновано математичну модель гібридного ємнісного накопичувача енергії з перетворювачем, який забезпечує розподіл енергії між ємнісними елементами, яка враховує паразитні параметрів компонентів схеми перетворювача та дозволяє проаналізувати стійкість системи в визначеному діапазоні допустимих значень параметрів моделі.

3. Вперше запропоновано спрощену математичну модель гібридного ємнісного накопичувача, яка за рахунок зменшення кількості реактивних компонентів топології дозволяє знизити порядок системи диференційних рівнянь і відповідно спростити аналіз системи.

4. Вдосконалено методику синтезу регулятора, яка базується на методі Харитонова, що враховує розкид параметрів компонентів схеми перетворювача та дозволяє проаналізувати стійкість системи в визначеному діапазоні допустимих значень параметрів моделі.

5. Запропоновано систему вирівнювання напруги комірок суперконденсаторного модулю гібридного ємнісного накопичувача, яка за допомогою перетворювача постійного струму дозволяє забезпечити необхідні значення точності вирівнювання напруги на комірках такого модулю за умов імпульсного споживання струму навантаження.

Практичне значення. Теоретичні результати доведено до рівня практичного застосування. Розроблено та випробувано прототип перетворювача гібридного ємнісного накопичувача енергії. В результаті досліджень запропоновано схеми перетворювачів для розподілу енергії між ємнісними накопичувачами енергії, що дозволяє розширити функціональні можливості таких накопичувачів при імпульсному енергоспоживанні високої потужності. Розроблено мікропроцесорну систему керування перетворювачем гібридного ємнісного накопичувача, яка дозволяє забезпечити похибку регулювання напруги

СК не гірше 5% та струму АБ на номінальному рівні з похибкою не гірше 15% під час процесу заряду СК та імпульсному споживанні струму навантаження. Розроблено програмний код, який реалізує запропонований алгоритм керування перетворювачем гібридного ємнісного накопичувача.

Ключові слова: перетворювач електроенергії, SEPIC, гібридний ємнісний накопичувач, акумуляторна батарея, суперконденсатор, імпульсне навантаження, контактне мікрозварювання.

SUMMARY

Yu. Kozhushko. Power Converters of Hybrid Energy Storage Systems for Pulsed Load Applications. – Qualifying scientific work, the manuscript.

Thesis for the degree of Philosophy Doctor, in specialty 171 - Electronics. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The vast majority of portable devices and systems have complicated and nonlinear power consumption characteristics. The power supplies of these devices and systems, as well as the energy storage of the Microgrid and wind or solar power generation, have to provide average and peak load power, required weight and size, high energy efficiency. Various battery types are typically utilized in these power supply systems due to the high energy density of the cell. However, the high peak load current that is significantly greater than the nominal battery discharge current could lead to battery life cycle reducing and deteriorating cell characteristics. The hybridization of high power density storage and high energy density storage could be an effective solution to the problem of power supply portable devices and energy storage in Microgrid, solar and wind energy systems.

Thus, the implementation of hybrid energy storage systems based on batteries and supercapacitors for self-contained power supplies and portable systems is becoming a new promising research field in recent years. Another perspective area of battery supercapacitor energy storage application could be power supplies of a micro resistance welding equipment, that also have pulsed power consumption. Energy storage that is simultaneously characterized by high power and energy density is required for micro resistance welding power supplies based on capacitive discharge topology. Auxiliary DC-DC power converters are used for energy distribution between battery and supercapacitor. This work focuses on the DC-DC converter of hybrid energy storage that is used in a system with pulsed current consumption on the example of welding current for micro resistance welding technology.

The first section presents the analysis of pulse current characteristics during the welding process. Also, this section briefly reviews the energy characteristics of different types of energy storage cells, which demonstrates that the batteries are characterized by

high energy density, while high power density is typical for supercapacitors. The overview of equivalent models of the battery and supercapacitor, that are used for operation simulation of energy cells in power electronics circuits is presented. The first order equivalent model of battery and supercapacitor allows simulating cells behavior for analysis in energy storage systems. The comparative analysis of passive, semi-active and active topologies of hybrid energy storage systems and application features is presented in the first section.

The results of the literature review that focused on energy storage systems based on battery and supercapacitor have shown that the designing of a DC-DC converter for hybrid energy storage is an essential and relevant task nowadays. The first section is concluded with the list of main objectives of the present research.

The second section presents the characteristics of the systems with pulsed current consumption. To ensure efficient operation of the power supply of such systems, the peak power should be provided by storage with a high-power density, while the average power should be provided by storage that characterized a high energy density. The mathematical model of the battery supercapacitor hybrid energy storage with DC-DC converter is obtained, which operates in the continuous and discontinuous current mode based on state space averaging method. A simplified mathematical model of the converter is obtained. This model allows reducing differential equations system order due to the replacing supercapacitor in steady-state mode to an equivalent voltage source. The obtained mathematical models are used to design the required control system of the DC-DC converter for the hybrid energy storage. Hence, the third section presents a cascade control system that provides simultaneous regulation of the battery discharge current and the supercapacitor terminal voltage. The stability analysis of the proposed control system is carried out based on Kharitonov's method. The analysis results show that the presented battery-supercapacitor hybrid energy storage system is stable despite the variations of the components parameters within the tolerance region and for a wide range of anticipated loads.

The fourth section is focused on the energy efficiency analysis of the DC-DC converter for hybrid energy storage. The efficiency plot as a function of the load current and plot of the entire power loss as a function of the switching frequency are obtained.

Also, the fourth section presents a voltage equalization system of the supercapacitor module cells, that allows providing voltage cell regulation with a given accuracy regardless of the state of charge of other module cells.

In the fifth section, the proposed hybrid energy storage system with a DC-DC converter is verified by means of simulations and an experimental sample. The designed prototype allows to experimentally test the operation of the DC-DC converter and control system during the consumption of pulsed power while the micro resistance welding process.

Thus, this work focused on the solving actual task of the developing the design theory of DC-DC converters of the hybrid energy storage, that are used in systems with pulse current consumption. The obtained scientifically substantiated results are important for the design of the power supplies based on battery supercapacitor hybrid energy storage for the systems with pulsed load current.

Novelty of the obtained results:

1. The topology of a battery supercapacitor energy storage has been improved by means of a DC-DC converter, which allows extending the functionality of such energy storage in systems with pulsed load current consumption.

2. The mathematical model of a battery supercapacitor hybrid energy storage with a DC-DC converter that considers the components parasitic parameters and variations of the component parameters within the tolerance region has been proposed.

3. The simplified mathematical model of the battery supercapacitor energy storage with DC-DC converter, that due to reducing the number of passive components of the topology allows reducing differential equations system order and simplifies the analysis of the system accordingly.

4. The method of regulator synthesis based on Kharitonov's method, which considered the tolerance parameters of the components and allows to analyze the stability of the system in a certain range of allowable values of the model parameters has been improved.

5. The voltage equalization system of the supercapacitor module cell of hybrid energy storage, that due to utilizing a DC converter allows providing the

necessary values of the accuracy of cells voltage equalization of the module during pulse current consumption has been proposed.

The practical importance. The theoretical results could be practically applicable. The proposed prototype of the hybrid energy storage system with a DC-DC converter is experimentally verified. As a result of the work, a schematic of the DC-DC converter that is applied for energy distribution between battery and supercapacitor is proposed. The DC-DC converter allows extending the functionality of such hybrid energy storages, which is used in systems with high current pulse load. A microprocessor control system of the DC-DC converter for hybrid energy storage is designed. The proposed control system allows ensuring the uncertainty of the supercapacitor voltage regulation is not worse than 5% and the battery discharges current regulation at the nominal value with uncertainty not greater than 15% during the supercapacitor charging process and consumption the pulse load current.

Keywords: DC-DC converter, SEPIC (Single Ended Primary Inductance Converter), hybrid energy storage systems, battery, supercapacitor, pulse load, micro resistance welding.

Перелік публікацій здобувача

1. О. Ф. Бондаренко, Ю. В. Кожушко, Т. О. Карбівська, Є. О. Желязков, та П. С. Сафронов, “Стійкість комбінованої системи накопичення енергії на основі суперконденсатора та акумуляторної батареї,” Електротехніка і Електромеханіка, №. 5, с. 31–37, 2020, DOI: 10.20998/2074-272x.2020.5.05.
2. O. Bondarenko et al., “Modular Power Supply for Micro Resistance Welding,” *Electr. Control Commun. Eng.*, vol. 12, no. 1, pp. 20–26, Jul. 2017, DOI: 10.1515/ecce-2017-0003.
3. Т. О. Карбівська, Ю. В. Кожушко, та О. Ф. Бондаренко, “Аналіз потужності втрат джерела живлення для контактного мікрозварювання,” *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*, №. 25 (3), с. 41–47, 2020, DOI: 10.20535/2523-4455.me.208874.
4. Yu. Kozhushko, T. Karbivska, D. Zinchenko, D. Pavković, Eu. Rosolowski, O. Bondarenko, “Charging Device of Capacitive Energy Storage for Micro Resistance Welding”, *Present Problems of Power System Control*, no. 9, 2018, pp. 5-18.
5. О. Ф. Бондаренко, Т. О. Рижакова та Ю. В. Кожушко, “Вдосконалена методика оцінки втрат в імпульсних перетворювачах установок контактного мікрозварювання,” *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, №. 3, с. 38–42, 2018, DOI: 10.15222/tkea2018.3.38.
6. Ю. В. Кожушко, О. Ф. Бондаренко, Д. О. Зінченко та Т. О. Карбівська, “Ефективне використання гібридного ємнісного накопичувача енергії джерела живлення для контактного мікрозварювання,” *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*, №. 23 (2), с. 14–18, 2018, DOI: 10.20535/2523-4455.2018.23.2.130391.
7. Ю. В. Кожушко та О. Ф. Бондаренко, “Балансування напруги модульного накопичувача енергії джерела живлення для контактного мікрозварювання,” *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, №. 4–5, с. 15–23, 2017, DOI: 10.15222/tkea2017.4-5.15.
8. R. Baraniuk, T. Ryzhakova, Y. Kozhushko and O. Bondarenko, “Thermal and Surge Current Protection Means for Semiconductor Non-Isolated Power

Converters,” in IEEE Standards Education e-Magazine, March 2018, vol. 8(1) (5G & 802.11).

9. Y. Kozhushko, D. Pavkovic, T. Karbivska, P. Safronov, and O. Bondarenko, “Robust Control of Battery-Supercapacitor Energy Storage System Using Kharitonov Theorem,” in Proceedings - 2020 IEEE 14th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering, CPE-POWERENG 2020, Jul. 2020, pp. 550–555, doi: 10.1109/CPE-POWERENG48600.2020.9161569.

10. Yu. Kozhushko, T. Karbivska, D. Pavkovic, and O. Bondarenko, “Peak Current Control of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage,” 2020 IEEE KhPI Week Adv. Technol. KhPI Week 2020 - Conf. Proc., pp. 396–401, 2020, DOI: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250086.

11. M. Krznar, D. Pavkovic, Yu. Kozhushko, M. Cipek, D. Zorc, and M. Crnekovic, “Control System Design for Hybrid Power Supply of an Unmanned Aerial Vehicle Based on Linearized Averaged Process Models” in 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2020, Sep. 2020, pp. 582–587, DOI: 10.1109/ICUAS48674.2020.9214001.

12. Yu. Kozhushko, D. Pavkovic, D. Zinchenko, T. Karbivska, V. Sydorets, and O. Bondarenko, “Hybrid Energy Storage System of Power Supply for Micro Resistance Welding,” in 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2019 - Proceedings, Apr. 2019, pp. 584–589, DOI: 10.1109/ELNANO.2019.8783890.

13. Yu. Kozhushko, D. Pavković, T. Karbivska, and O. Bondarenko, “Stability analysis of battery-supercapacitor energy storage system for resistance welding,” in 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019 - Proceedings, Jul. 2019, pp. 349–354, DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879850.

14. T. Karbivska, Yu. Kozhushko, J. G. Nataraj Barath, and O. Bondarenko, “Split-Pi Converter for Resistance Welding Application,” 2020 IEEE KhPI Week Adv. Technol. KhPI Week 2020 - Conf. Proc., pp. 391–395, 2020, DOI: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250113.

15. D. Pavkovic, Yu. Kozhushko, M. Hrgetic, D. Zorc, and M. Cipek, “Damping Optimum Design of Single-Phase Inverter Synchronization and Current Control System,” in 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2019 - Proceedings, Apr. 2019, pp. 572–577, DOI: 10.1109/ELNANO.2019.8783726.

16. Yu. Kozhushko, T. Ryzhakova, O. Bondarenko, Z. Stević, Supercapacitor Battery Charger with Voltage Equilizing, in: Zb. Rad. Pisanih Za 5. Međunarodnu Konf. Obnovljivim Izvorima Električne Energ., SMEITS, 2017. DOI:10.24094/mkoiee.017.1.5.127.

17. O. Bondarenko, T. Ryzhakova, and Yu. Kozhushko, “Power Supply with Modular Structure for Micro Resistance Welding,” in 16th International Symposium «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering» and «Doctoral School of Energy and Geotechnology III», 2017, pp. 2–5.

18. M. Krznar, D. Pavković, Yu. Kozhushko, M. Cipek, D. Zorc, “Generator Set Control System Design for Unmanned Aerial Vehicle Hybrid Propulsion”, in Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems (SDEWES) conference, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 1–5 September 2020.

19. Т. О. Рижакова, Ю. В. Кожушко, “Енергоефективність формувача імпульсів струму для контактного мікрозварювання,” X міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2017», 2017, с. 55–58.

20. Є. О. Желязков, Ю. В. Кожушко, Т. О. Карбівська, та О. Ф. Бондаренко, “Покращення характеристик безпровідних зарядних пристроїв для медичних застосувань,” 22-га міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та електронні технології», 2020, с. 50–52.

21. Ю. В. Кожушко, “Дослідження антропотехногенного впливу електротранспорту в контексті сталого розвитку,” XXI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів та аспірантів «Дні Науки» «Industry 4.0: Людина і суспільство у вирі трансформацій», 2018, с. 9–10.

22. Т. О. Рижакова, Ю. В. Кожушко, О. Ф. Бондаренко, “Вдосконалена методика оцінки втрат в імпульсних перетворювачах установок контактного

мікрозварювання,” Контроль і управління в складних системах контроль і управління в складних системах, 2018, с. 67–68.

23. Ю. В. Кожушко, “Аналіз схем для заряду суперконденсаторів,” VIII міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2015», 2015, с. 198–201.

24. Ю. В. Кожушко, “Аналіз методів балансування напруги суперконденсаторних модулів,” IX міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2016», 2016, с. 335–338.