

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2023.78>

УДК 004.94:620.91

Модель трифазного автономного джерела живлення із сонячними батареями, суперконденсатором, ступеневим інвертором та трансформатором

Сьомочкин Альберт Борисович¹⁾

Канд. техніч. наук, доцент кафедри Електричної інженерії

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3592-7899>; somochkyn@gmail.com. Scopus Author ID: 57194694864

Федотов Владислав Олександрович¹⁾

Канд. техніч. наук, доцент кафедри Електричної інженерії

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6536-5591>; fedotov@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 57194700789

Сьомочкина Світлана Володимирівна¹⁾

Канд. техніч. наук, доцент кафедри Комп'ютерних систем та мереж

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9809-0048>; throne2015sv@gmail.com

¹⁾ Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11. Кривий Ріг, 50000, Україна

АНОТАЦІЯ

Нині у світі розширюється масштаб застосування поновлюваних джерел енергії. Це пов'язано з обмеженими запасами викопних видів енергії на планеті, також з екологічними проблемами, тобто з необхідністю зниження шкідливих викидів під час використання викопного палива. Серед ряду відновлюваних джерел енергії у цій статті акцент зроблений на сонячній електронній генерації, тому що її зручно використовувати для електропостачання житлових будинків.

Огляд стану досліджень за літературними джерелами показує, що від початку розвитку сонячної енергетики найпоширенішим накопичувачем енергії для сонячних панелей були електрохімічні батареї. Тільки в останні роки почали розглядати застосування суперконденсаторів, але як допоміжних до електрохімічних накопичувачів енергії. Дослідження сумісної роботи сонячних батарей та саме суперконденсаторів майже відсутні. Також в більшості досліджень використовуються інвертори з широтно-імпульсною модуляцією, з фільтрами на виході, для покращення якості вихідної напруги. У результаті аналізу виникає питання, як буде працювати джерело на сонячних батареях разом з суперконденсаторами, а також, чи здатний простий ступеневий інвертор з трансформатором на виході забезпечити прийнятну якість електричної енергії на виході.

Для вирішення поставлених наукових задач із стандартних блоків Матлаб була розроблена детальна структура моделі автономного джерела живлення. Вказане джерело сформоване з сонячної батареї, батареї суперконденсаторів, підвищуючого напівпровідникового перетворювача постійного струму (Boost Converter), ступеневого трьохфазного інвертору та вихідного трансформатора напруги. У ході досліджень на моделі виявилось, що сонячна батарея добре працює, одночасно забезпечує живлення як суперконденсатору, так й перетворювача постійного струму, у будь-яких режимах. При глибокому розряді батареї суперконденсаторів з одночасним значним зниженням напруги сонячна батарея автоматично обмежує вихідний струм на максимальному рівні, величина якого безпечна для сонячної батареї. При потребі суперконденсатор здатний забезпечити пікову віддачу потужності, не порушуючи нормальної роботи системи. Через те, що амплітуда вихідної напруги значно залежить від величини корисного навантаження, була розроблена система автоматичної стабілізації напруги, на базі ПІ-регулятора для керування Boost Converter. Дослідження форми вихідної напруги та струму при роботі системи стабілізації напруги показали досить високу якість електроенергії, яка відповідає вимогам європейського стандарту IEEE 519-2022. Більш того, якість вихідної напруги утримується на прийнятному рівні впритул до того моменту, як батарея суперконденсаторів розрядиться до 40 % (або напруга знизиться від ≈ 30 В до ≈ 10 В).

Ключові слова: моделювання процесів; автономне джерело живлення; суперконденсатор; сонячна батарея; ступеневий інвертор; якість напруги

Вступ. Нині у світі розширюється масштаб застосування поновлюваних джерел енергії [1]. Пов'язано це з обмеженими запасами викопних видів енергії на планеті, і з екологічними проблемами, передусім з необхідністю зниження шкідливих викидів під час використання викопного палива [2]. Серед ряду відновлюваних джерел енергії у цій статті акцент зроблений на сонячній електронній генерації. Причиною вибору саме цього джерела енергії була передбачувана сфера застосування – живлення житлових будинків. Вітрову енергетику, а також теплову енергію надр складно використовувати через обмеженість вільного простору та зайнятість прибудинкової території готової забудови під інші функції. Сонячні панелі простіше розмістити на даху, стінах та вікнах.

Огляд стану досліджень. Огляд літератури показує [2, 3], що від початку найпоширенішим накопичувачем енергії для сонячних панелей були електрохімічні батареї.

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

Тільки останніми роками почали розглядати застосування суперконденсаторів як допоміжних до електрохімічних накопичувачів елементів [4] (вони разом утворюють звані гібридні накопичувачі енергії), підвищення техніко-економічних показників використання електрохімічних акумуляторів енергії. Практично ніде в літературі не йдеться про повну заміну електрохімічних накопичувачів енергії на суперконденсатори, в окремих публікаціях [5], де це розглядається, йдеться про інтеграцію сонячних елементів із суперконденсаторами (SCSD), і що досі існують проблеми з узгодженням характеристик у таких системах. Отже, дослідження недорогих і ефективних методів виготовлення інтегрованих SCSD має велике наукове значення. Далі в [6] показано, що сонячна батарея працює прямо на перетворювач постійного струму (правда, різного типу), до виходу якого підключений інвертор. Тобто немає жодного накопичувача енергії, включеного паралельно із сонячною панеллю. Далі, у багатьох публікаціях [7, 8] інвертори із широтно-імпульсною модуляцією найчастіше підключені до виходу через фільтри. Тільки в окремих дослідженнях [9] після інвертора з широтно-імпульсною модуляцією використовується трансформатор, що підвищує. В [10] досліджується ступінчастий інвертор, навантажений на трансформатор, який, у свою чергу, з'єднаний з мережею через фільтри. Однак, незважаючи на візуально хорошу форму вихідної напруги, відсутні кількісні дослідження THD та ККД.

Мета роботи. В результаті аналізу публікацій у цій статті поставлено такі наукові завдання: 1) дослідження спільної роботи сонячної батареї із суперконденсатором, без електрохімічної батареї; 2) дослідження впливу ступінчастого інвертора напруги, навантаженого на трансформатор без вихідних фільтрів, на показники енергії, що генерується. У наведених літературних джерелах поставлені в такий спосіб наукові завдання не досліджувалися. Щоб вирішити зазначені завдання, за допомогою стандартних блоків Матлаб було реалізовано модель, показану на рис. 1:

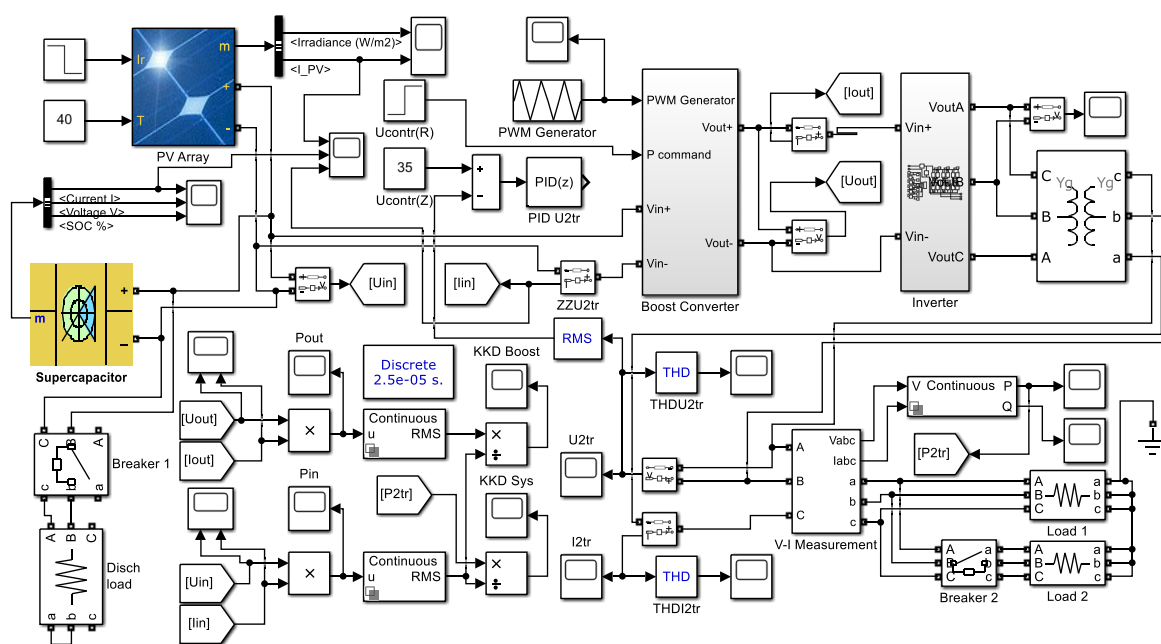


Рис. 1. Структура моделі для дослідження автономного джерела енергії на основі сонячних панелей з суперконденсатором

В моделі батарея сонячних елементів PV Array з'єднана паралельно з батареєю суперконденсаторів Supercapacitor. Остання в системі служить первинним накопичувачем сонячної енергії. Обидва обладнані системами візуалізації їх внутрішніх параметрів, для сонячної батареї – струм та сонячна іррадіація, для суперконденсатору – напруга, струм, та стан заряду суперконденсатору. Первинним силовим напівпровідниковим перетворювачем є Boost Converter, який підвищує постійну напругу з 30 до 90-200 В (при регулюванні коефіцієнту передачі), який, у свою чергу, передає далі енергію на трьохфазний автономний

інвертор з вихідною частотою 50 Гц. Перед Boost Converter розташовані датчики вхідних струму та напруги I_{in} та U_{in} . Аналогічно на виході Boost Converter розташовані датчики вихідних струму та напруги I_{out} та U_{out} . В якості фільтру до виходу Inverter підключений трьохфазний трансформатор з одиничним коефіцієнтом трансформації, який, в свою чергу, навантажений на дві паралельно з'єднані Three-Phase Series RLC Branch, один з яких може підключатися окремо. Поміж трансформатором та навантаженням знаходиться Three-Phase V-I Measurement, який використовується для вимірювання активної та реактивної вихідних потужностей, а також ККД усієї перетворювальної системи (треба мати на увазі, що при цьому втрати в сонячних елементах та в суперконденсаторі не враховуються). В лівому нижньому куту схеми розташована розрядна структура з Breaker 1 та Disch Load (скорочено Discharging Load), трохи правіше розташовані розрахункові структури для вимірювання вхідної P_{in} та вихідної P_{out} потужності Boost Converter, а також коефіцієнтів корисної дії KKD_{Boost} (підвищуючого перетворювача) та KKD_{Sys} (системи). Далі, біля V-I Measurement сформовані вимірювальні ланцюги для отримання значень вторинних напруги та струму трансформатору I_{2tr} та U_{2tr} , коефіцієнтів нелінійних спотворень (THD) вихідних напруги та струму системи, а також діючого значення зворотного зв'язку за вихідною напругою трансформатору ZZU_{2tr} . Сигнал зворотного зв'язку разом з сигналом завдання $U_{contr}(Z)$ йде на ПД-регулятор PID U_{2tr} , вихідний сигнал з якого безпосередньо керує блоком Boost Converter. Структура моделі Boost Converter наведена на рис. 2, а структура моделі інвертору напруги – на рис. 3.

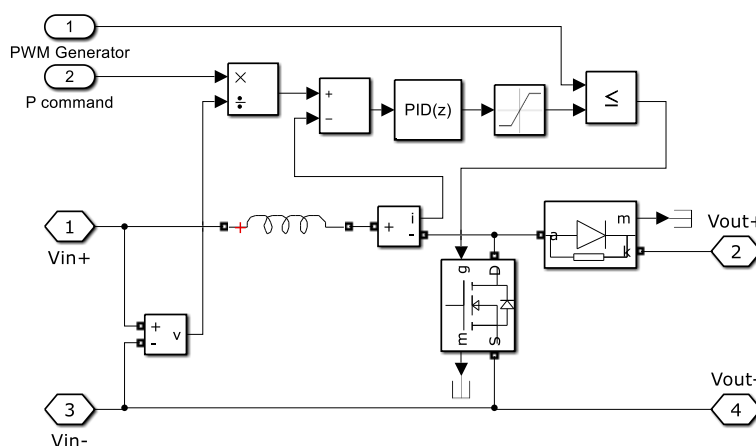


Рис. 2. Структура моделі Boost Converter

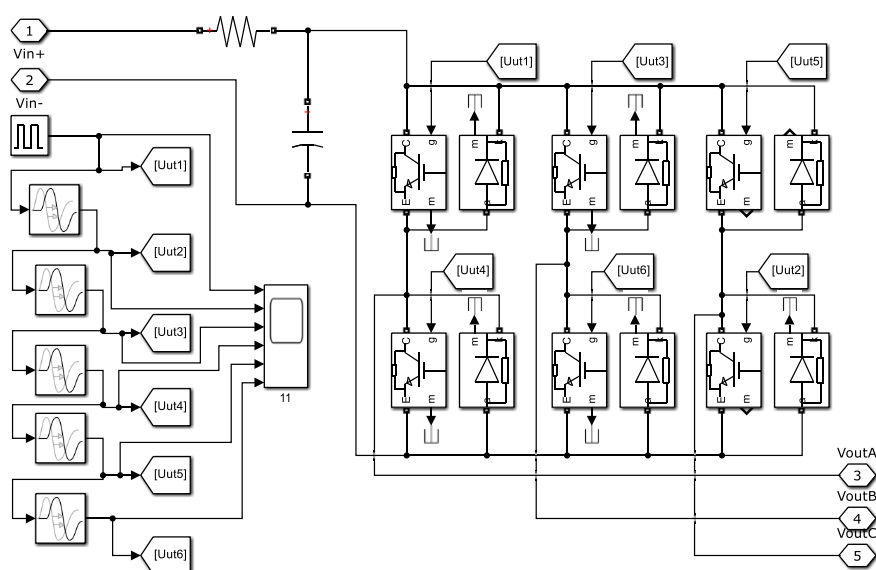


Рис.3. Структура моделі трьохфазного інвертора напруги

Як можна побачити з рис. 3, підвищуючий перетворювач поєднується з інвертором за допомогою L-C фільтру.

Дослідимо перехідні процеси на отриманий моделі. Спочатку розглянемо процеси в розімкненої системи (для чого замість сигналу завдання замкненої системи $U_{\text{contr}}(Z)$ використаємо сигнал розімкненої системи $U_{\text{contr}}(R)$). Параметри майже всіх силових елементів моделі були прийнятими довільно, там, де можна – за замовчуванням, зі стандартних налаштувань елементів бібліотеки Матлаб. В якості умов експерименту приймаємо наступне: 1) в перший момент часу (1 с) навантаження трансформатору збільшується вдвоє (підключається Load 2), 2) в другий момент часу (1.5 с) рівень іррадіації на сонячній батареї падає з 1000 до 500 Вт/м², 3) в третій момент часу (2 с) сигнал керування **P command** Boost Converter зростає з 170 до 550 одиниць (що приводить до збільшення вихідної напруги Boost Converter зі 112 до 200 В). Нижче наведемо найбільш характерні отримані графіки системи:

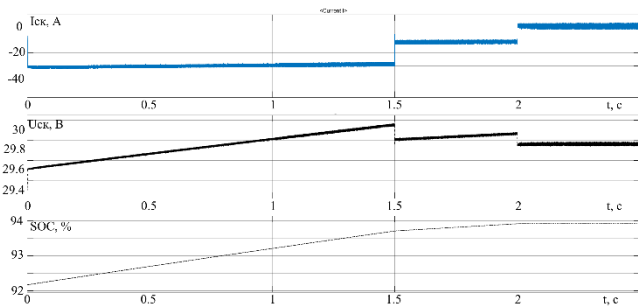


Рис. 4. Струм, напруга та стан заряду, суперконденсатору

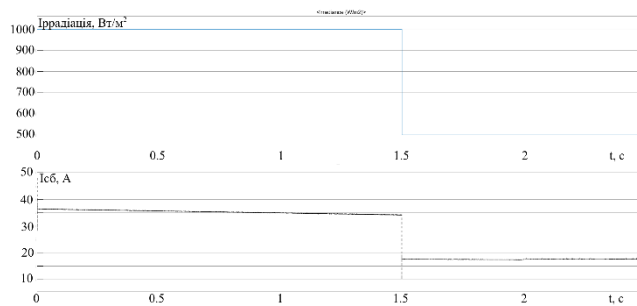


Рис. 5. Іррадіація та струм сонячної батареї

З рис. 4 та 5 видно, що струм заряду суперконденсатору послідовно зменшується з 30 до 0 А, відповідно напруга суперконденсатору (а також сонячної батареї) зростає усе з меншим та меншим темпом, остаточно стабілізувавшись на рівні 29.87 В. Графік стану заряду суперконденсатору (SOC %), підтверджує це. Струм сонячної батареї значно залежить тільки від іррадіації, а також на ділянці до 1.5 с трохи зменшується ($\approx$ на 1.5 А) зі зростанням рівня напруги ($\approx$ на 0.9 В). Далі на рис. 6 видно, що вхідний струм Boost Converter є різницею струмів між струмами сонячної батареї та суперконденсатору, й цей струм після 2-й секунди (разом зі зміною сигналу керування **P command**) стає струмом, який забезпечується тільки сонячною батареєю (відповідно, суперконденсатор тимчасово не заряджається та не розряджається)

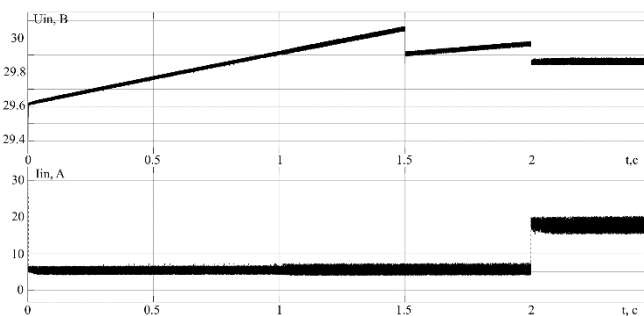


Рис. 6. Вхідна напруга та струм Boost Converter

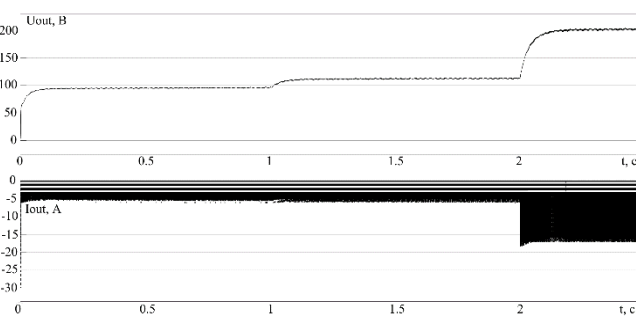


Рис. 7. Вихідна напруга та струм Boost Converter

Вихідна напруга Boost Converter трохи зростає зі збільшенням корисного навантаження, тобто, навантажувальна характеристика Boost Converter в даній схемі, очевидно, має негативний статизм, на відміну від більшості відомих джерел напруги. Також з рис. 6-7 можна зробити висновок, що коефіцієнт підсилення Boost Converter може змінюватися від $\approx$

3 до ≈ 7 (що задається сигналом керування **P command**). Остаточно оцінимо вихідні сигнали усієї системи, а також блоку Inverter, за рис. 8-9. З графіку вихідної напруги інвертору дійсно видно, що інвертор – ступеневий.

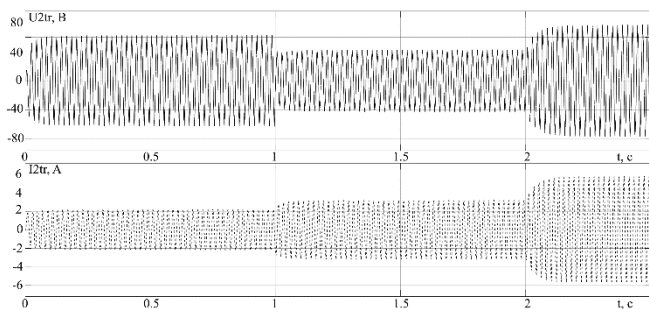


Рис. 8. Вихідні напруга та струм трансформатора

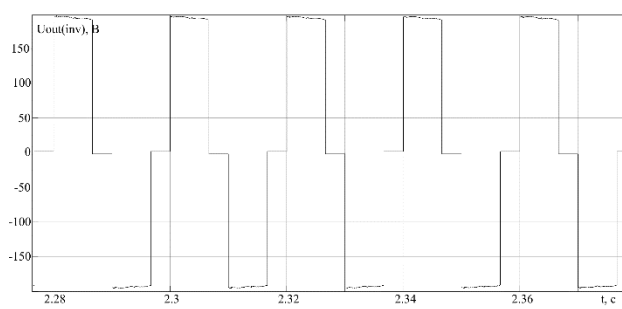


Рис. 9. Вихідна напруга інвертору

Видно також, що вихідні змінні трансформатору (U_{2tr} та I_{2tr}) значно залежать від зміни навантаження та вихідної напруги Boost Converter, практично не піддаючись змінам іррадіації. Звідси витікає очевидний висновок – вплив всіх розгляданих збурень можна компенсувати за допомогою керування Boost Converter, тобто його коефіцієнту підсилення. Перевіримо це припущення за допомогою простішої системи стабілізації напруги на ПІ – регуляторі, параметри якої, через складність системи, були визначені емпірично. Додатково також було досліджено вплив зниження напруги суперконденсатору на показники системи, для чого була введена додаткова умова експерименту: на 2 секунді вмикається Breaker 1, підключаючи розрядний ланцюг до суперконденсатору, й його розряд йде досі, поки вихідна напруга не знизиться до неприпустимих величин. Останні умови експерименту – накид додаткового навантаження (на 1 с), перемикання величини іррадіації з 1000 на 500 Вт/м² (на 1.5 с) залишаються без змін. Нижче наведені результати досліджень системи автоматичного керування при вище обумовлених умовах:

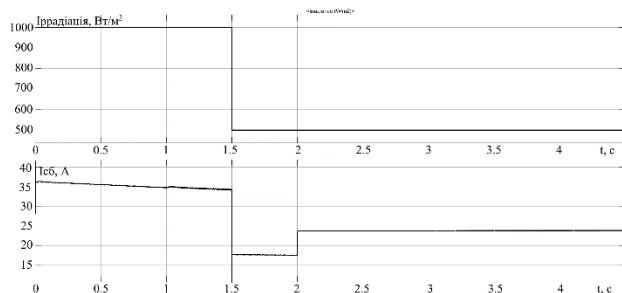


Рис. 10. Іррадіація та струм сонячної батареї при розряді суперконденсатору

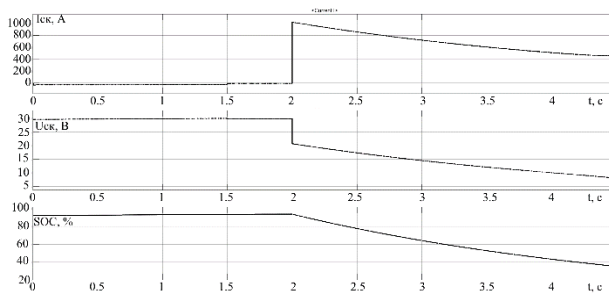


Рис. 11. Струм, напруга та стан заряду суперконденсатору при розряді останнього

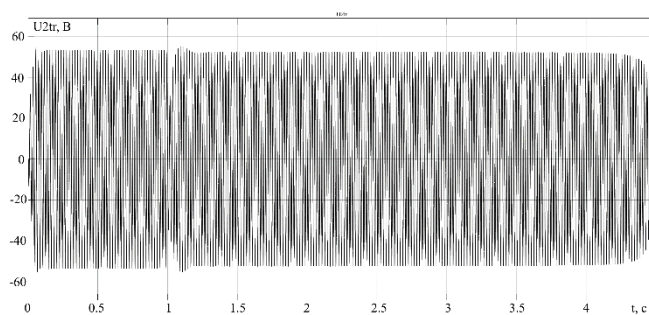


Рис.12. Вихідна напруга системи при роботі ПІД-регулятора

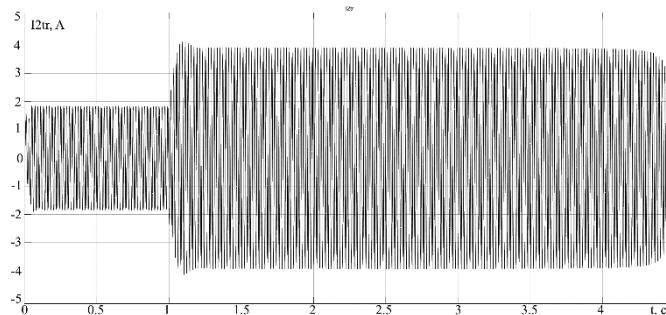


Рис.14. Вихідний струм системи при роботі ПІД-регулятора

Також були зафіксовані графіки THD вихідних напруги та струму, а також коефіцієнту корисної дії як системи у цілому (за виключенням сонячної батареї та суперконденсатору), так й Boost Converter окремо (см. рис. 15–18)

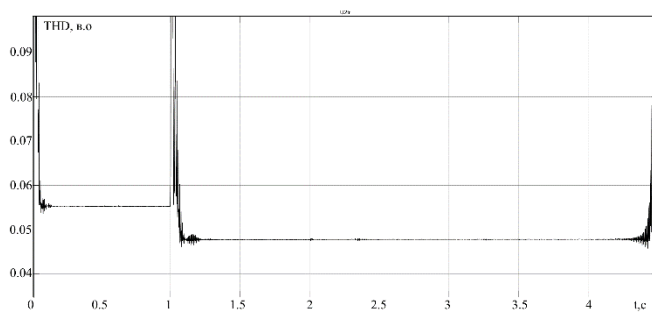


Рис. 15. Графік THD вихідної напруги системи

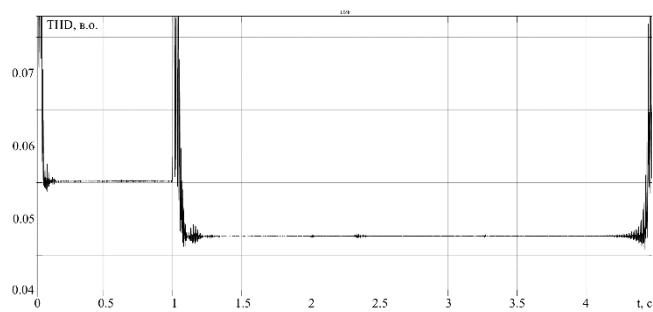


Рис. 16. Графік THD вихідного струму системи

Стандарт ЕС IEEE 519-2022 [11] вимагає від напруги менше 1000 В загальний THD не більше 8 %, при умові, щоб одинична гармоника була не більше 5 %. З рис 15 видно, що вимога загального THD задовільняється, та з залученням інструментарію FFT Analysis Tool було також знайдено, що максимальне значення гармоніки на частоті 250 Гц складає 4.27 %. Тобто розглядана нами система задовільняє вимогам ЕС щодо якості напруги. На рис. 17–18 видно, що величина ККД з загальноінженерної точки зору мають незадовільні значення. Але коли ми маємо справу з сонячною енергетикою, не варто нехтувати такими значеннями. Відомо, що ККД двигунів внутрішнього згоряння складає в ліпшому випадку 30-40 %, й їх експлуатація супроводжується чисельними екологічними проблемами. Отримана величина ККД має сенс тільки в співставленні з ККД інших систем автономного живлення, які використовують інші варіанти топології напівпровідникових перетворювачів, та наявність (відсутність) вихідного трансформатора та фільтрів, що виходить за рамки даної роботи.

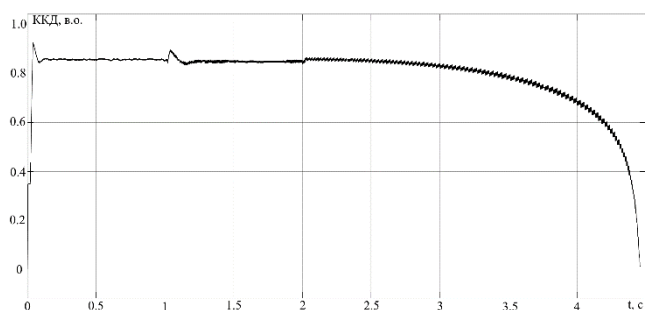


Рис. 17. Графік ККД Boost Converter

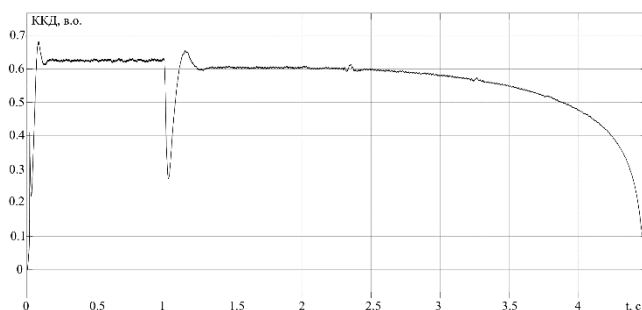


Рис. 18. Графік ККД системи

Висновки:

1. Розроблена детальна структура моделі автономного джерела енергії з суперконденсатором в якості буферного накопичувача енергії, а також з ступеневим трьохфазним інвертором напруги з вихідним трансформатором. Вона дозволяє за необхідності детально досліджувати будь-які процеси, які виходять за рамки статті.

2. Дослідження сумісної роботи суперконденсатору з сонячною батареєю не виявило ніяких аномалій, більш того, вони разом з Boost Converter в розімкненої схемі працюють збалансовано, перерозподілюючи за необхідністю струми поміж собою (при різкому збільшенні корисного навантаження на Boost Converter йде в основному струм з суперконденсатору, при зменшенні навантаження майже весь струм з сонячної батареї заряджає суперконденсатор, менша частина струму йде на Boost Converter, існує також такий режим, коли сонячна батарея працює тільки на BC)

3. Наявність суперконденсатору дає можливість забезпечити різку віддачу значної потужності зі значним зниженням напруги суперконденсатору при нормальній якості енергії, що віддається. Сонячна батарея працює як генератор видаючи максимум 23.5 А для заряду суперконденсатору та для роботи Boost Converter.

4. Запронована структура автономного джерела енергії (зі ступеневим інвертором напруги, трансформатором та без вихідних фільтрів) забезпечує прийнятну якість електричної енергії (THD < 8%), при використанні простішої системи автоматичного регулювання на ПІ-регуляторі для керування Boost Converter при будь-якому заряді суперконденсатору більше 40% й напрузі на ньому не нижче 10 В (при номінальній ≈ 29 В)

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Joddumahanthi V., Knypinski, Ł., Gopal, Y., Kasprzak, K. “Review of Power Electronics Technologies in the Integration of Renewable Energy Systems”. *Appl. Sci.* 2025; 15: 4523. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15084523>.
2. Tu R., Guo Z., Liu L., Wang S., Yang X. “Reviews of Photovoltaic and Energy Storage Systems in Buildings for Sustainable Power Generation and Utilization from Perspectives of System Integration and Optimization”. *Energies*. 2025, 18, 2683. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18112683>.
3. Akpan J. J., Udom P.O., Wansah J. F. “Typical Off Grid/Stand-Alone Photovoltaic System Design for Household Power Generation in Wukari Metropolis”. *Journal of Research in Engineering and Computer Sciences*. 2024; 2 (2): 34–47.
4. Shirinda K., Kanzumba K. “A review of hybrid energy storage systems in renewable energy applications”. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. 2022; 11 (2): 99–108. DOI: <https://doi.org/10.12720/sgce.11.2.99-108>.
5. Zhang Q., Li G., Qiao F. “Recent advances in integrated solar cell/supercapacitor devices: Fabrication, strategy and perspectives”. *Journal of Advanced Research*. 2025; 67: 197–215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2024.01.032>.
6. Sharma A. K., Das V.t, Mahtani K. “A Review on DC-DC Converter Topologies for Solar PV Power Generation”. *International Journal of Research Publication and Reviews*. 2025; 6 (1): 107–115.
7. Nkado F.; Nkado F. “Design of an off-Grid Residential Photovoltaic System”. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2021; 10 (09): 733–738.
8. Vairavasundaram I., Varadarajan V., Pavankumar P. J., Kanagavel R. K., Ravi L., Vairavasundaram S. “A Review on Small Power Rating PV Inverter Topologies and Smart PV Inverters”. *Electronics*. 2021; (10): 1296. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10111296>.
9. Alharbi Saif F., Iqbal M. T. “Dynamic Modeling and Simulation of a Photovoltaic System for a House in Qassim, Saudi Arabia”. *Journal of Clean Energy Technologies*. 2018; 6 (3): 213–218. DOI: <https://doi.org/10.18178/jocet.2018.6.3.462>.
10. Sharma H., Pal Nitai., Sadhu P. K. “Modeling and Simulation of Off-Grid Power Generation System Using Photovoltaic”. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*. 2015; 13 (3): 418–424. DOI: <https://doi.org/10.11591/telkomnika.v13i3.7061>.
11. “Power quality – IEEE 519-2022”. – URL: <https://comsys.se/our-adf-technology/power-quality-ieee-519-2022>.

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2023.78>

UDC 004.94:620.91

Model of a three-phase autonomous power generator using solar batteries, a supercapacitor, a step inverter and a transformer

Albert B. Somochkyn¹

PhD, Associate Professor of the Department Electrical Engineering

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3592-7899>; somochkyn@gmail.com. Scopus Author ID: 57194694864

Vladyslav O. Fedotov¹⁾

PhD, Associate Professor of the Department Electrical Engineering

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6536-5591>; fedotov@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 57194700789

Svitlana V. Somochkina¹⁾

PhD, Associate Professor of the Department of Computer Systems and Networks

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9809-0048>; throne2015sv@gmail.com

¹⁾ Kryvyi Rih National University, 11, Vitaly Matusevich. Kryvyi Rih, 5000, Ukraine

ABSTRACT

The global deployment of renewable energy technologies is accelerating due to finite fossil fuel reserves and the imperative to reduce harmful emissions from combustion. This study concentrates on photovoltaic (PV) solar generation as a practical option for residential power supply and examines the less-explored combination of PV arrays with supercapacitor energy storage. A comprehensive literature review shows that electrochemical batteries have been the dominant storage solution for solar systems since the inception of PV technology, while supercapacitors have only recently been investigated, typically as auxiliary units supporting batteries. Research specifically addressing the direct interaction between PV arrays and dedicated supercapacitor banks remains limited. Most existing works employ pulse width modulated (PWM) inverters with output filters to meet power quality requirements, which motivates the evaluation of whether a simple stepped inverter with an output transformer can still deliver acceptable grid-independent power quality when paired with supercapacitors.

A detailed MATLAB Simulink model of a standalone power source was developed from standard blocks to address these questions. The modeled system includes a PV array, a supercapacitor bank, a DC-DC boost converter, a stepped three-phase inverter, and an output voltage transformer. Time-domain simulations under varied operating conditions show that the PV array consistently supplies energy to both the boost converter and the supercapacitor bank. Under conditions of deep supercapacitor discharge accompanied by marked DC-link voltage sag, the PV array inherently limits its output current to a maximum safe level for the PV modules, preventing damage and preserving stability. When surge power is required, the supercapacitor bank supplies high peak current without disrupting normal system operation.

Because output voltage amplitude is strongly load-dependent, an automatic voltage stabilization loop based on a PI controller governing the boost converter was implemented. Analysis of voltage and current waveforms under the stabilization scheme demonstrates power quality that meets the criteria of IEEE 519-2022. Acceptable voltage quality is maintained until the supercapacitor state of charge falls to approximately 40 percent, corresponding to a voltage drop from roughly 30 V to roughly 10 V.

Keywords: Modeling; standalone power source; supercapacitor; solar panel; stepped inverter; voltage quality