

## ПІДВИЩЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ГІБРИДНИХ НАСОСНИХ СИСТЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ АЛГОРИТМІВ MPPT

У представленому дослідженні проаналізовано динамічну поведінку гібридної енергетичної системи (PV-BESS-Grid), розробленої для забезпечення надійного живлення критичних навантажень, зокрема насосних агрегатів. Система інтегрує фотоелектричний масив, акумуляторний накопичувач енергії та підключення до централізованої електромережі, що є ключовим для підвищення енергетичної стійкості в умовах нестабільного централізованого постачання. Центральним аспектом даної роботи є порівняльний аналіз та кількісна оцінка ефективності двох фундаментальних алгоритмів відстеження точки максимальної потужності (MPPT): класичного Perturb & Observe (P&O) та вдосконаленого Incremental Conductance (INC). Методологія базується на комплексному динамічному моделюванні в середовищі MATLAB/Simulink, що відтворює роботу системи за трьома характерними сценаріями: автономна денна генерація, нічний режим роботи від батареї та гібридний режим з підтримкою від мережі. Результати підтверджують здатність гібридної топології підтримувати виняткову стабільність напруги на шині постійного струму (в межах 620–640 В) та забезпечувати безшовний перехід між джерелами енергії. Дослідження кількісно доводить, що вибір MPPT-алгоритму має вирішальний вплив не лише на енергетичну ефективність системи (яка для INC оцінюється на 1–3% вищою), але й на її загальну стабільність, надійність та довговічність компонентів. Робота обґрунтовує доцільність застосування алгоритму Incremental Conductance як критично важливого елемента при проектуванні робастних гібридних систем для застосувань, що вимагають гарантованого та якісного електропостачання.

**Ключові слова:** гібридна система, насосна установка, алгоритми MPPT, динамічне моделювання, управління енергією.

### Вступ.

Агресивні дії росії спрямовані на знищення та дезорганізацію енергетичних об'єктів та систем України, чинять негативний вплив на економіку, безпеку та побут її громадян. Руїнування енергетичних підприємств, електромереж та енергоблоків веде до перебоїв у енергопостачанні, зниженню рівня комфорту життя населення та загрози для національної безпеки.

Використання сонячних фотоелектричних систем для живлення насосів гарячого водопостачання та теплових житлових будинків має низку значущих переваг, які роблять цей підхід актуальним і стратегічно важливим [1]. Це особливо важливо в умовах нестабільного або відсутнього постачання електроенергії через пошкодження інфраструктури. Використання сонячної енергії знижує залежність від викопного палива та електромереж, що дозволяє суттєво скоротити витрати на експлуатацію систем опалення і гарячого водопостачання. Однак головною перешкодою використання цих систем є нестабільний характер генерації енергії, спричинений добовими та погодними змінами сонячної інсоляції, що обмежує їх застосування для живлення критичних навантажень [2]. Для вирішення цієї проблеми все частіше впроваджуються гібридні системи, які поєднують фотоелектричне генерування (PV) з акумуляторними системами зберігання енергії (BESS). Такі системи здатні забезпечити автономність та підвищити надійність електропостачання. Інтеграція третього компонента - підключення до централізованої електромережі (grid-tied) - створює ще більшу гнучку та надійну конфігурацію, здатну працювати як в автономному, так і в мережевому режимі. Для максимально ефективного використання потенціалу фотоелектричних модулів у складі гібридних систем критично важливе впровадження алгоритмів відстеження точки максимальної потужності (MPPT) [3-5]. Ці алгоритми дозволяють системі автоматично знаходити оптимальну точку роботи сонячної панелі незалежно від умов освітлення та навантаження, мінімізуючи втрати енергії через неефективну роботу.

### Мета та завдання.

Мета дослідження полягає у порівняльному аналізі динамічної поведінки та ефективності керування гібридної фотоелектричної системи (PV-BESS-Grid), що живить критичне навантаження. Дослідження сфокусоване на кількісній оцінці переваг алгоритму відстеження точки максимальної потужності (MPPT) Incremental Conductance (INC) над класичним Perturb & Observe (P&O) за умов різких змін сонячної

інсоляції з метою визначення оптимальної стратегії для забезпечення максимальної надійності та енергетичної ефективності системи.

#### Матеріал і результати досліджень.

У дослідженні розглядається гібридна фотоелектрична система для забезпечення автономного і надійного електропостачання багатоповерхового житлового будинку в м. Київ, обладнаного двома індивідуальними тепловими пунктами (ТП), кожен з яких оснащений сучасними насосними агрегатами Grundfos для опалення та гарячого водопостачання [6]. Основні техніко-економічні показники будівлі включають 16 поверхів, 260 квартир і понад 29 тисяч м<sup>2</sup> загальної площі.

Досліджувана система (рис. 1) складається з двох ідентичних фотоелектричних масивів (по 330 модулів SunPower SPR-305 кожен, з'єднаних за послідовно-паралельною схемою), що підключені до шини постійного струму через підвищувальні DC/DC-перетворювачі з MPPT-контролерами; до тієї ж шини підключена акумуляторна батарея, яка виконує функцію енергетичного буфера. Трифазний інвертор перетворює напругу з DC Bus на змінну для живлення трифазного відцентрового насоса (Grundfos TP65-190/2 N), а система може бути підключена до зовнішньої мережі через трансформатор і вимикач для забезпечення резервного живлення та зарядки батареї.

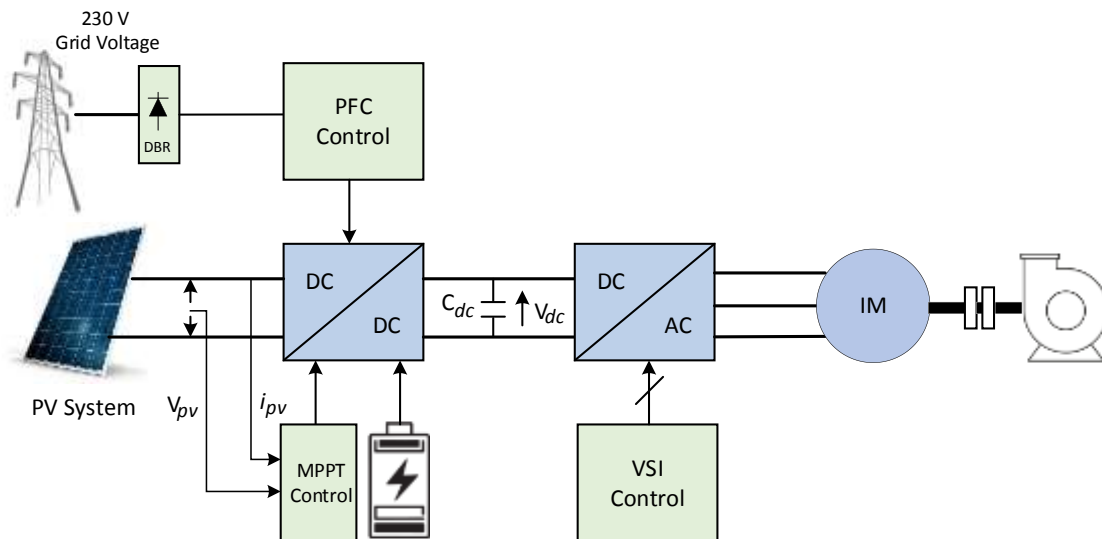


Рисунок 1 - Функціональна схема живлення насоса від фотоелектричних модулів

Для відстеження точки максимальної потужності сонячної панелі було використано два методи.

Алгоритм INC базується на фундаментальній математичній властивості вольт-амперної характеристики фотоелектричної панелі, згідно з якою в точці максимальної потужності (MPPT) похідна потужності по напрузі дорівнює нулю ( $dP/dV = 0$ ) [7-9]. Алгоритм INC порівнює миттєву провідність ( $I/V$ ) зі зміною провідності ( $dI/dV$ ), визначаючи положення робочої точки відносно ТМП. Це дозволяє йому точно ідентифікувати досягнення максимуму і припинити збурення, що теоретично усуває проблему усталених коливань. Однак цей метод є більш вимогливим до обчислювальних ресурсів та чутливим до точності вимірювань сенсорів.

На відміну від нього, класичний метод P&O базується на ітераційному підході: система вносить невелике збурення (зміну робочої напруги) і спостерігає за зміною вихідної потужності [10, 11]. Якщо потужність зростає, збурення в тому ж напрямку продовжується; якщо впала - напрямок змінюється на протилежний. Ця простота є перевагою, однак вона обумовлює і головний недолік: для того, щоб переконатися, що система знаходиться в точці максимальної потужності, алгоритм змушений постійно "коливатися" навколо неї, що неминуче призводить до втрат енергії в усталеному режимі.

З метою об'єктивної оцінки ефективності алгоритмів максимального відстеження потужності (MPPT) доцільно зосередити увагу на динамічних характеристиках акумуляторної системи накопичення енергії (BESS), а не лише на показниках насосного агрегату [12]. Такий підхід обґрунтований тим, що BESS виступає чутливим індикатором енергетичного балансу в гібридній системі: усі небаланси потужності, спричинені коливаннями генерації фотоелектричного масиву внаслідок недосконалості роботи MPPT-контролерів, оперативно компенсуються або акумулюються акумулятором. Тому аналіз струму та напруги BESS дає змогу отримати високочастотну спектральну характеристику роботи системи та з високою точністю відстежувати відгук алгоритму на зміни вхідних параметрів.

Для проведення порівняльного аналізу ефективності двох алгоритмів відстеження точки максимальної потужності (MPPT) було застосовано ідентичний 10-секундний сценарій динамічного моделювання в середовищі Matlab Simulink (рис. 2).

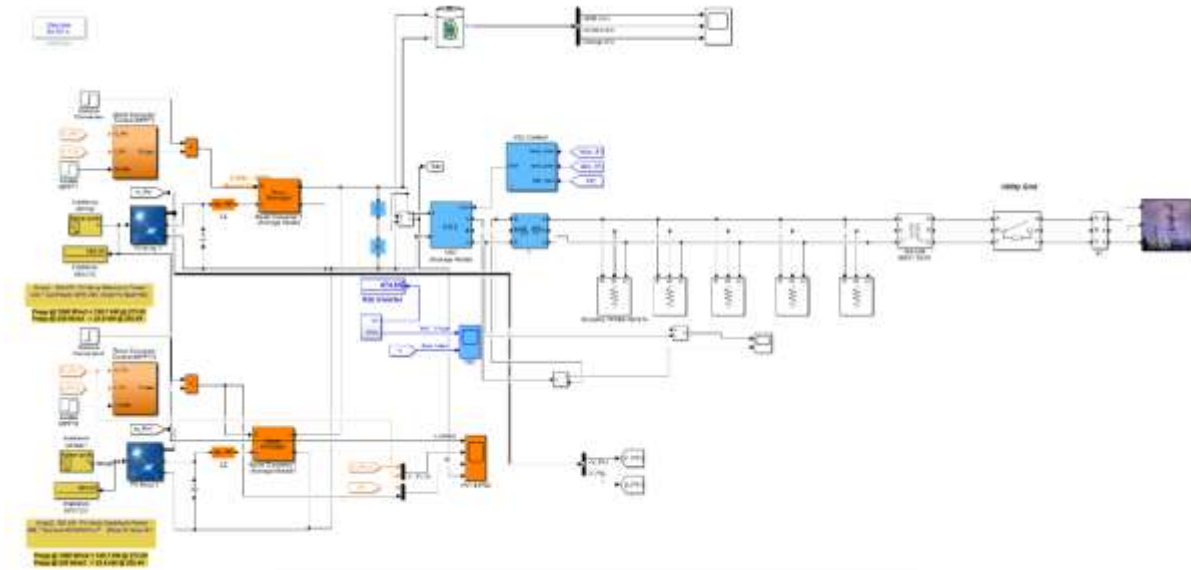


Рисунок 2 - Структурна схема гібридної системи в середовищі Matlab Simulink

Цей сценарій, що складається з трьох характерних режимів роботи, дозволяє оцінити як усталену, так і динамічну поведінку системи за умов різких змін інсоляції:

Режим 1. Автономна робота від PV з зарядкою BESS ( $t = 0-3$  с). Рівень інсоляції становить  $\sim 990$  Вт/м<sup>2</sup>. Система відключена від мережі. Надлишок енергії від PV-масиву використовується для зарядки BESS.

Режим 2. Автономна робота від BESS ( $t = 3-7$  с). Рівень інсоляції різко падає до 0 Вт/м<sup>2</sup> (імітація ночі/затіннення). Живлення насоса повністю забезпечується за рахунок розряду BESS.

Режим 3. Гібридна робота від PV та мережі з зарядкою BESS ( $t = 7-10$  с). Інсоляція відновлюється до 1000 Вт/м<sup>2</sup>, і система підключається до мережі. PV-масив та мережа спільно живлять навантаження та забезпечують інтенсивну зарядку BESS.

Симуляція проводилася послідовно для кожного з MPPT - алгоритмів за абсолютно однакових вхідних умов (рис. 3, 4). Оцінка ефективності кожного алгоритму проводилася шляхом аналізу ключових системних показників, де основним індикатором стабільності виступала напруга на шині постійного струму (Vdc).

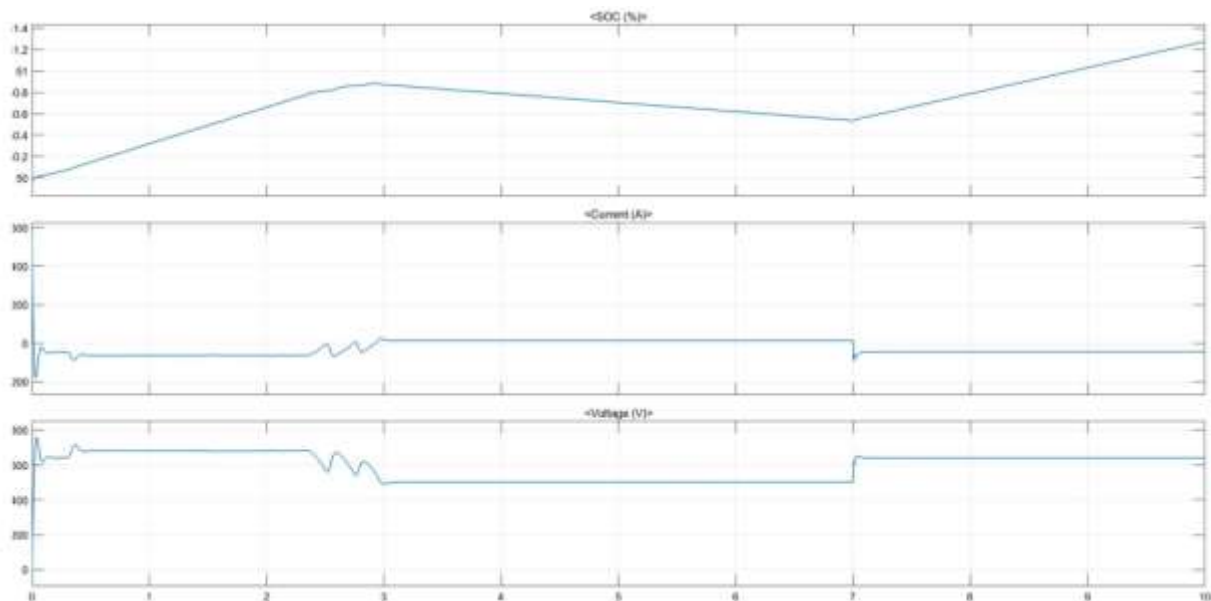


Рисунок 3 - Динамічні характеристики системи при роботі з MPPT-алгоритмом P&O

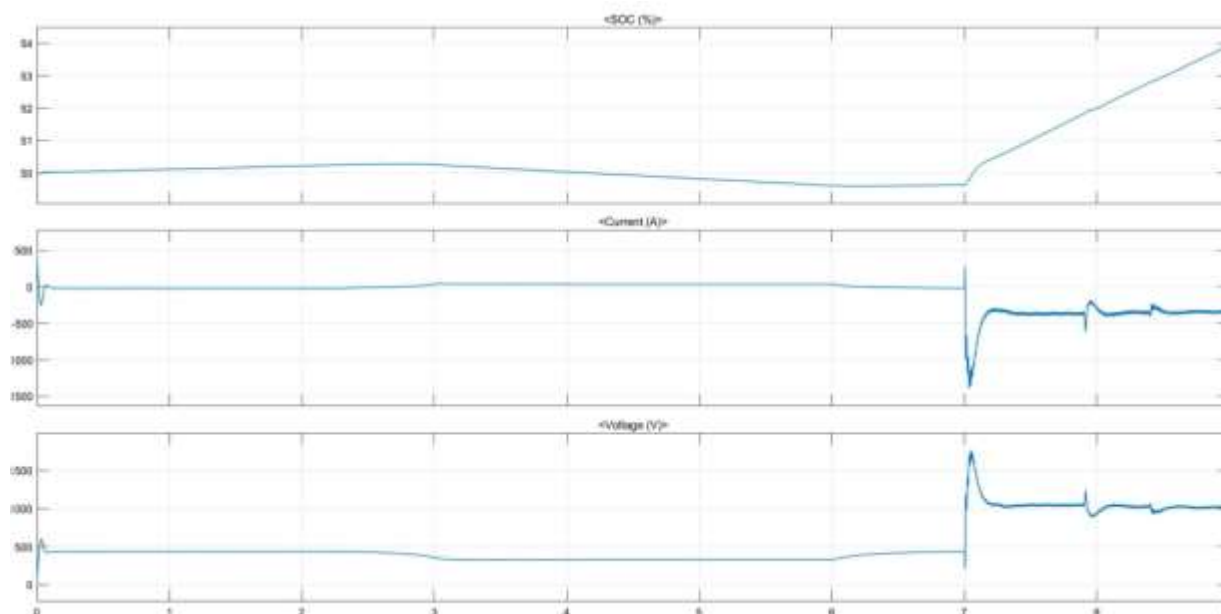


Рисунок 4 – Динамічні характеристики системи при роботі системи з MPPT-алгоритмом INC

Порівняння алгоритмів MPPT проводилося за трьома ключовими критеріями: стабільність у сталому режимі, динамічна реакція на зміну умов та інтегральна енергетична ефективність.

У сталому режимі за високої інсоляції класичний P&O демонструє помітні коливання струму та напруги, що створює додаткове навантаження на акумулятор і призводить до втрат енергії. На графіках видно, що амплітуда пульсацій струму батареї сягає 40 А, а напруги - 30 В. Натомість INC забезпечує значно вищу стабільність: пульсації струму не перевищують 10 А, а напруга на шині DC залишається практично незмінною.

Динамічна реакція системи оцінювалася під час різких змін інсоляції. P&O потребує до 0,5 секунди для стабілізації, причому спостерігаються значні просідання напруги. Алгоритм INC реагує швидше - менш ніж за 0,3 секунди - і забезпечує кращу стабільність напруги на шині DC, що особливо важливо при різких переходах між режимами роботи.

Загалом INC демонструє значно менші втрати як у сталому, так і у динамічному режимах порівняно з P&O. Це дозволяє системі довше працювати поблизу точки максимальної потужності, забезпечуючи вищу ефективність та надійність електропостачання навіть при нестабільних умовах освітлення.

Таблиця 1 – Порівняльна таблиця кількісних показників

| Метрика                                | Алгоритм P&O | Алгоритм INC | Перевага INC     |
|--|--------------|--------------|------------------|
| Пульсації струму (усталений режим)     | ~40 А        | < 10 А       | ~4 рази менше    |
| Колівання напруги DC (усталений режим) | ~30 В        | < 5 В        | ~6 разів менше   |
| Час встановлення (динаміка)            | ~0.5 с       | ~0.2 с       | ~2.5 рази швидше |
| Просідання напруги DC ( $t=3c$ )       | до ~550 В    | до ~570 В    | На 20 В менше    |
| Інтегральна ефективність (оцінка)      | Базова       | Вища на 1–3% | Суттєва          |

### **Висновки**

Отримані кількісні дані дозволяють зробити глибокі висновки щодо практичного значення вибору MPPT-алгоритму. Зменшення пульсацій струму в 4 рази при використанні INC не лише мінімізує втрати енергії, але й суттєво знижує циклічне навантаження на акумуляторну батарею, що безпосередньо впливає

на її деградацію та може подовжити термін служби. Аналогічно, у 6 разів стабільніша напруга на шині DC створює сприятливіші умови роботи для чутливої електроніки інвертора та зменшує рівень електромагнітних завад у системі. Особливо варто наголосити на перевазі INC в динамічних режимах: скорочення часу реакції на зміну інсоляції з 0,5 с до 0,2 с означає, що протягом 0,3 с, коли Р&О все ще "шукає" нову точку максимуму, INC вже працює з оптимальною ефективністю. В умовах українського клімату з частою мінливою хмарністю, сумарний виграш в енергії за день може стати вельми суттєвим, що напряму впливає на економічну доцільність проекту та рівень енергетичної автономності об'єкта. Таким чином, хоча алгоритм INC і є більш складним у реалізації, його переваги в надійності, ефективності та довговічності обладнання повністю виправдовують його застосування в критично важливих гібридних системах.

#### Список використаної літератури

1. Возняк, О. М., Штуць, А. А., & Булига, А. І. Дослідження роботи електромеханічної системи автономної фотоелектричної насосної станції. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 2 (121). С. 139-148. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-2-15.
2. Босак, А.В., Боднарук, О.Ю., Дубовик, В.Г., & Кулаковський, Л.Я. Гібридний підхід до відстеження точки максимальної потужності у фотоелектричних системах. *Відновлена енергетика*. 2025. №2 (81). С. 114-125. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\).114-125](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81).114-125).
3. Якушкін, Т., Єршов, Р., & Степенко, С. Порівняльний аналіз топологій та алгоритмів для відстежувачів точки максимальної потужності у фотоелектричних системах. *Технічні науки та технології*. 2023. №2 (32). С. 321–339. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-321-339](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-321-339).
4. Sadick, A. (2023). Maximum power point tracking simulation for photovoltaic systems using perturb and observe algorithm. <https://doi.org/10.5772/intechopen.111632>.
5. Jalal, D., & Niroomand, M. (2021). Optimization methods of MPPT parameters for PV systems: review, classification, and comparison. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 9(2), 225–236. <https://doi.org/10.35833/MPSE.2019.000379>.
6. Боднарук О. Ю., Босак А. В. Комплексна оцінка використання фотоелектричних станцій для живлення насосів у багатоповерхових будівлях. *Системні дослідження в енергетиці*. 2025. №2 (82). С. 77-90. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.02.077>.
7. Chellakhi, A., El Beid, S., Abouelmahjoub, Y. *et al.* An Enhanced Incremental Conductance MPPT Approach for PV Power Optimization: A Simulation and Experimental Study. *Arab J Sci Eng* 49, 16045–16064 (2024). <https://doi.org/10.1007/s13369-024-08804-1>.
8. Mustafa Sacid Endiz. Design and implementation of microcontroller-based solar charge controller using modified incremental conductance MPPT algorithm. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. Volume 17. Issue 2. 2024.100938.ISSN 1687-8507. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2024.100938>.
9. M. H. H. Yahaya, A. A. A. Samat, S. M. Muhamad, M. N. A. N. Azari, M. A. M. Idin and M. M. Jumidali, "Optimizing Photovoltaic Systems with an Incremental Conductance Algorithm," *2024 IEEE 14th International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)*, Penang, Malaysia, 2024, pp. 237-242. doi: 10.1109/ICCSCE61582.2024.10696783.
10. Çakmak, F., Aydoğmuş, Z., & Tür, M. R. (2023). Analysis of Open Circuit Voltage MPPT Method with Analytical Analysis with Perturb and Observe (P&O) MPPT Method in PV Systems. *Electric Power Components and Systems*, 52(9), 1528–1542. <https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2296958>.
11. Djilali, A.B., Bounadja, E., Yahdou, A. *et al.* Enhanced variable step sizes perturb and observe MPPT control to reduce energy loss in photovoltaic systems. *Sci Rep* 15, 11700 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95309-y>.
12. Benjia Li, Zhongbing Liu, Yaling Wu, Pengcheng Wang, Ruimiao Liu, Ling Zhang. Review on photovoltaic with battery energy storage system for power supply to buildings: *Challenges and opportunities*. *Journal of Energy Storage*. Volume 61. 2023. 106763. ISSN 2352-152X. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106763>.

**O. Bodnaruk**<sup>1</sup>, Student, ORCID 0009-0001-3031-3644

**A. Bosak**<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-0545-9980

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

## ENHANCING THE DYNAMIC STABILITY AND EFFICIENCY OF HYBRID PUMPING SYSTEMS THROUGH MPPT ALGORITHMS

*The presented study analyzes the dynamic behavior of a hybrid power system designed to power critical loads, including pumping units. The system integrates a photovoltaic (PV) array, a battery energy storage system*

(BESS), and a connection to a centralized power grid. The focus is on assessing the robustness and efficiency of the energy management system under conditions of sharp changes in the level of solar insolation, simulating key operational scenarios: daytime generation, night mode (full shading), and hybrid operation with grid support. The methodology is based on dynamic modeling that reproduces the operation of the main system components. The results demonstrate exceptional stability of the DC bus voltage (within 620–640 V) in all operating modes. The system provides a seamless transition between power from the PV array and the BESS, confirming the key role of the battery as an effective energy buffer. Connection to the grid significantly increases the reliability of the system and allows them to accelerate the BESS charging process. The study confirms the viability and high operational reliability of the proposed hybrid topology for applications requiring guaranteed uninterrupted power supply.

**Keywords:** hybrid system, pumping station, MPPT algorithms, dynamic modeling, energy management.

#### References

1. Voznyak, O. M., Shtuts, A. A., & Bulyga, A. I. Research on the operation of the electromechanical system of an autonomous photovoltaic pumping station. *Technika, Energetika, Transport APC*. 2023. No. 2 (121). P. 139-148. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-2-15.
2. Bosak, A. V., Bodnaruk, O. Yu., Dubovik, V. G., & Kulakovskiy, L. Ya. Hybrid approach to tracking the maximum power point in photovoltaic systems. *Vindovlena Energetika*. 2025. No. 2 (81). P. 114-125. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\).114-125](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81).114-125).
3. Yakushkin, T., Ershov, R. ., & Stepenko, S. Comparative analysis of topologies and algorithms for maximum power point trackers in photovoltaic systems. *Technical Sciences and Technologies*. 2023. No. 2 (32). P. 321–339. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-321-339](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-321-339)
4. Sadick, A. (2023). Maximum power point tracking simulation for photovoltaic systems using perturb and observe algorithm. <https://doi.org/10.5772/intechopen.111632>.
5. Jalal, D., & Niroomand, M. (2021). Optimization methods of MPPT parameters for PV systems: review, classification, and comparison. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 9(2), 225–236. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000379>.
6. Bodnaruk, O. Yu., Bosak A. V. Comprehensive assessment of the use of photovoltaic stations to power pumps in multi-story buildings. *System Research in Energy*. 2025. No. 2 (82). P. 77-90. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.02.077>.
7. Chellakhi, A., El Beid, S., Abouelmahjoub, Y. et al. An Enhanced Incremental Conductance MPPT Approach for PV Power Optimization: A Simulation and Experimental Study. *Arab J Sci Eng* 49, 16045–16064 (2024). <https://doi.org/10.1007/s13369-024-08804-1>.
8. Mustafa Sacid Endiz. Design and implementation of microcontroller-based solar charge controller using modified incremental conductance MPPT algorithm. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. Volume 17. Issue 2. 2024.100938.ISSN 1687-8507. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2024.100938>.
9. M. H. H. Yahaya, A. A. A. Samat, S. M. Muhamad, M. N. A. N. Azari, M. A. M. Idin and M. M. Jumidali, "Optimizing Photovoltaic Systems with an Incremental Conductance Algorithm," 2024 IEEE 14th International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE), Penang, Malaysia, 2024, pp. 237-242. doi: 10.1109/ICCSCE61582.2024.10696783.
10. Çakmak, F., Aydoğmuş, Z., & Tür, M. R. (2023). Analysis of Open Circuit Voltage MPPT Method with Analytical Analysis with Perturb and Observe (P&O) MPPT Method in PV Systems. *Electric Power Components and Systems*, 52(9), 1528–1542. <https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2296958>.
11. Djilali, A.B., Bounadja, E., Yahdou, A. et al. Enhanced variable step sizes perturb and observe MPPT control to reduce energy loss in photovoltaic systems. *Sci Rep* 15, 11700 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95309-y>.
12. Benjia Li, Zhongbing Liu, Yaling Wu, Pengcheng Wang, Ruimiao Liu, Ling Zhang. Review on photovoltaic with battery energy storage system for power supply to buildings: Challenges and opportunities. *Journal of Energy Storage*. Volume 61. 2023. 106763. ISSN 2352-152X. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106763>.

Надійшла: 14.07.2025  
Received: 14.07.2025