

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО
ПЕРЕТВОРЮВАЧА МЕТОДОМ ПОШУКУ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЇ
ПОТУЖНОСТІ**

Д. С. Зибалов, аспірант

К.В. Соснин, кандидат технічних наук, доцент

НТУ "Дніпровська політехніка"

E-mail: kapetal@i.ua

Анотація. Підвищення ефективності перетворення сонячної енергії залежить від реалізації алгоритмів пошуку точки максимальної потужності (Maximum Power Point Tracking, MPPT), тому розроблення методів і моделей систем керування потужністю споживання під час роботи сонячного фотоелектричного перетворювача (СФП) є актуальною науковою задачею. Для дослідження алгоритмів MPPT було розроблено в середовищі MATLAB програму, яка дозволяє змодельовати та дослідити таку систему. Змінна інсоляція, що виступає основним вхідним параметром моделі, задавалася у вигляді комбінації двох синусоїдальних сигналів з додатковим обмеженням у межах 200–1200 Вт/м², що дозволяє моделювати динамічні погодні умови, наприклад, проходження хмар або часткову затіненість. У процесі симуляції напруга та струм на навантаженні обчислювались через умовний лінійний еквівалент СФП з урахуванням опору навантаження, який змінювався відповідно до алгоритму збурюючої та спостережної (Perturb and Observe, P&O). Розроблена система забезпечує підтримку максимальної потужності протягом усього періоду симуляції, що підтверджує практичну цінність системи для керування відбором генерованої енергії СФП.

Ключові слова: сонячний фотоелектричний перетворювач, точка максимальної потужності, математична модель, збурююча та спостережача

Актуальність. Підвищення ефективності перетворення сонячної енергії залежить від реалізації алгоритмів пошуку точки максимальної потужності (Maximum Power Point Tracking, MPPT), тому розроблення методів і моделей систем керування потужністю споживання під час роботи сонячного фотоелектричного перетворювача (СФП) є актуальною науковою задачею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Розглянуті дослідження [1,2] описують проблеми, які впливають на ефективність роботи СФП. Роботи [3,4,5] досліджують методи MPPT при змінній інсоляції та температурі. Дослідження алгоритмів розподілу навантаження та керування падінням напруги в мережах

постійного струму [6,13] спрямовані на забезпечення мінімізації втрат енергії та уникнення перевантажень у вузлах мережі. Моделі, що взаємодіють з мережею [7,8], описують методи керування потужністю. Диспетчеризація потужності зі скінченними станами [9] та управління потужністю на основі лінійної алгебри [10], дозволяють адаптивно реагувати на зміну навантаження. Динамічна оптимізація МРРТ [11] та гібридне регулювання фотоелектричних систем [13] демонструють перехід від традиційних детермінованих алгоритмів до більш адаптивних та інтелектуальних методів керування.

Мета дослідження - підвищення ефективності СФП шляхом вдосконалення методів та моделей автоматизованого керування МРРТ.

Матеріали та методи дослідження. Аналіз та узагальнення сучасної науково-технічної літератури, досвіду організації процесу проектування перетворювачів використано для визначення мети та задач досліджень. Математичне чисельне моделювання в середовищі MATLAB, експериментальне дослідження з використанням фізичної моделі використано для дослідження методів керування потужністю навантаження СФП.

Принцип підтримання максимальної потужності СФП базується на забезпеченні роботи системи в такому режимі, в якому добуток вихідної напруги і струму досягає свого максимального значення. Це реалізується шляхом динамічного відстеження точки максимальної потужності (Maximum Power Point, MPP), яка змінюється залежно від інтенсивності сонячного випромінювання, температури фотоелементів, кута падіння променів та опору навантаження. Для знаходження MPP було розроблено програмно-апаратний комплекс, структурна схема якого зображена на рисунку 1.

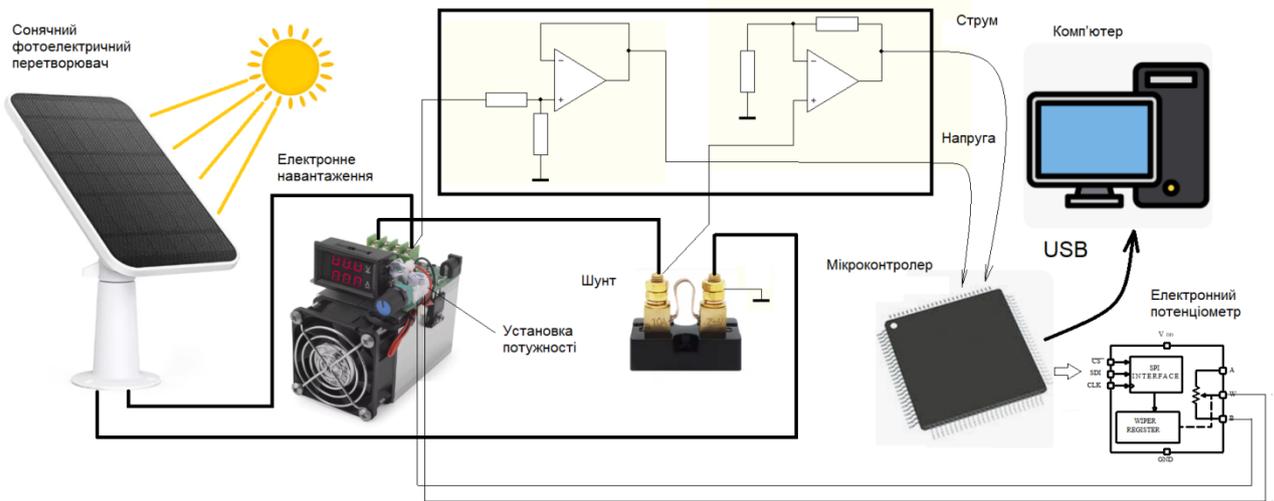


Рис 1. Структурна схема системи для фіксації показників потужності

Стенд автоматично змінює опір електронно керованого навантаження, потім через встановлений проміжок часу вимірює напругу і струм в колі та розраховує потужність, яка з часом виміру та значенням опору записується до файлу.

На рисунку 2 наведено графік залежності генерованої потужності СФП від опору навантаження.

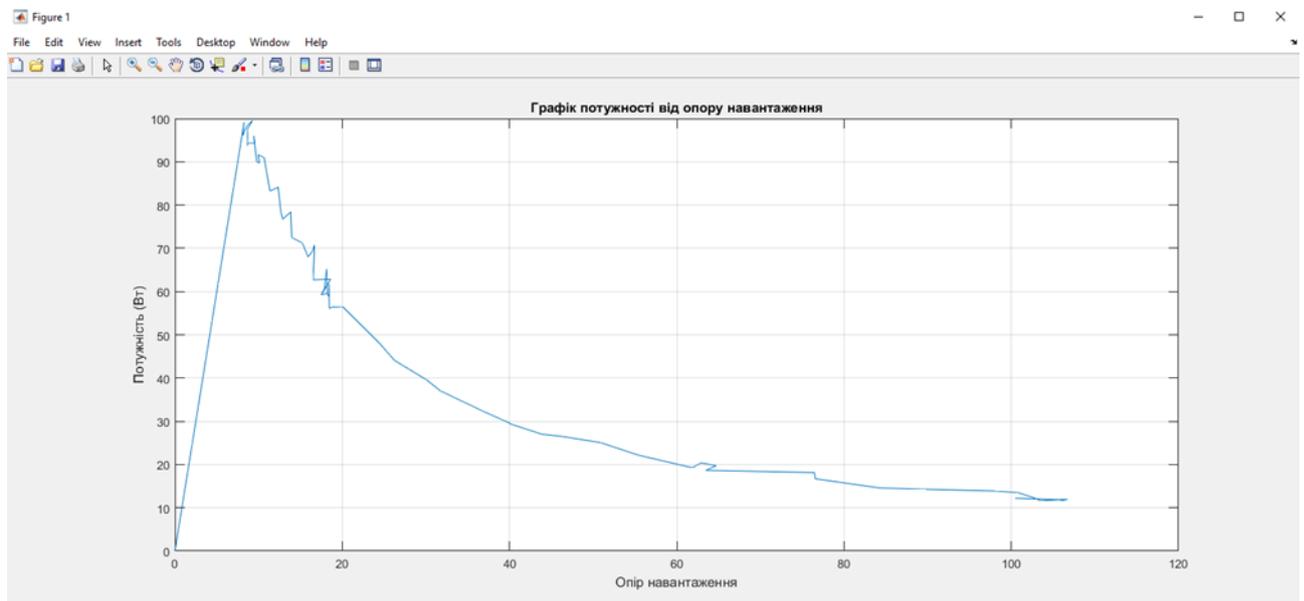


Рис 2. Графік залежності генерованої потужності від опору навантаження

Отримані дані були оброблені в програмному комплексі MATLAB, у якому за ними побудовано графік. Як видно з графіка, СФП генерує максимальну потужність у 100 Вт. Чим більше зменшувати опір, тим більша буде потужність. Однак

потужність буде збільшуватись лише до MPP, у якій досягне свого максимуму. Якщо далі зменшувати опір, то потужність почне падати. Це видно на графіку. При цьому зменшується напруга, а струм залишається такий, який був у MPP. Дане явище характерне не тільки для СФП, але і для інших джерел енергії. У зв'язку з цим виникає необхідність у реалізації механізмів динамічного відстеження MPP, які дозволяють змінювати робочі параметри системи регулювання з метою досягнення оптимального енергетичного балансу. Для реалізації пошуку MPP розроблено багато методів, опис найрозповсюдженіших приведено нижче.

Метод фіксованої напруги FVM (Fixed Voltage Method) ґрунтується на припущенні, що напруга на виході СФП при досягненні MPP є пропорційною до напруги холостого ходу. У цьому методі контролер періодично вимірює напругу холостого ходу під час короткочасного від'єднання навантаження від СФП. Після цього обчислюється напруга MPP. Далі система регулює робочу напругу. При хмарності система може значно відхилитися від реальної MPP за рахунок швидких змін освітлення. Тому цей метод не підходить до систем, які використовуються в країнах, де багато хмарних днів, до яких належить Україна.

Метод токової розгортки CSM (Current Sweep Method) належить до прямих алгоритмів відстеження MPP, які базуються на експериментальному визначенні повної вольт-амперної характеристики (ВАХ) СФП у реальному часі. Основна ідея методу полягає в поступовій зміні струму навантаження від нуля до максимального значення з одночасним вимірюванням напруги на виході СФП. У результаті формується миттєва вольт-амперна характеристика, з якої розраховується потужність. Для ідентифікації MPP використовується залежність 1.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V * I)}{dV} = I + V * \frac{dI}{dV} = 0. \quad (1)$$

На ділянці до MPP похідна $\frac{dP}{dV} > 0$, при цьому потужність зростає так як збільшується напруга, тоді як після MPP $\frac{dP}{dV} < 0$, і потужність зменшується. Таким чином, момент зміни знаку похідної є критерієм досягнення MPP. Цей метод призводить до значної втрати енергії під час побудови ВАХ, адже частину часу система працює поза MPP.

Метод збурення та спостереження в міжнародній літературі називається Р&О (Perturb and Observe) є ітераційним алгоритмом МРРТ, який періодично змінює значення керуючого параметра і спостерігає зміну вихідної потужності. Якщо після зміни керуючого параметра потужність зростає, напрямок зміни параметру зберігається, а якщо навпаки, то змінює напрямок на протилежний. Це дозволяє поступово наблизитися до МРР. Метод Р&О, попри схильність до коливань робочої точки поблизу положення МРР у сталому режимі, характеризується простотою реалізації, надійністю та невисокою обчислювальною складністю. Завдяки цим перевагам він набув широкого поширення в системах пошуку МРР. У подальшій роботі для моделювання процесу відстеження МРР у середовищі MATLAB буде застосовано саме цей метод.

Результати досліджень та їх обговорення. Для моделювання роботи СФП з відстеженням МРР використано метод Р&О. Вхідними параметрами системи є напруга холостого ходу і струм короткого замикання. Ці параметри можна взяти з паспортних даних СФП. Лістинг фрагменту програми з визначення основних змінних наведено на рисунку 3.

```
Voc = 37.5;           % Напруга холостого ходу, В
Isc = 9.5;           % Струм короткого замикання, А
Gref = 1000;        % Опорна інсоляція для STC, Вт/м²
Rload = 10;         % початковий опір навантаження
deltaR = 0.1;       % крок регулювання
direction = 1;      % напрям зміни
prevP = 0;          % попередня потужність
t = linspace(0, 20, 1000); % Час моделювання
```

Рис 3. Лістинг фрагменту програми визначення основних змінних.

Інсоляція на СФП змінювалась у часі за синусоїдальним законом, що дозволяє імітувати природні коливання освітленості протягом дня. Приклад лістинга фрагменту коду програми емуляції зміни сонячної інсоляції приведено на рисунку 4. Максимальна інсоляція обмежувались в межах 1200 Вт/м² та мінімальна 200 Вт/м².

```
G = 750 + 250 * sin(0.4*t) + 100 * sin(1.3*t); % комбінація двох синусів
G = max(200, min(G, 1200)); % обмежуємо в межах [200..1200]
```

Рис 4. Лістинг фрагменту програми емуляції зміни сонячної інсоляції.

Для забезпечення відстеження точки MPPT було реалізовано алгоритм P&O, який змінює опір навантаження в залежності від динаміки потужності на виході СФП. Якщо потужність зростає, зміна опору продовжується в тому ж напрямку, а якщо потужність зменшується, напрям зміни інвертується. Лістинг фрагменту програми емуляції роботи СФП та реалізація алгоритму P&O наведені на рисунку 5.

```
Vout = zeros(size(t)); % Напряга на виході сонячної панелі (В)
Iout = zeros(size(t)); % Струм на виході сонячної панелі (А)
Pout = zeros(size(t)); % Потужність, яку генерує панель (Вт)
for k = 1:length(t) % Прохід по часових відліках симуляції
    Isc_now = Isc * (G(k)/Gref); % Поточний короткозамкнений струм залежно від інсоляції
    Vwork = Voc * Rload / (Rload + (Voc / Isc_now)); % Поточна напруга на навантаженні
    Iwork = Vwork / Rload; % Поточний струм у навантаженні
    Pwork = Vwork * Iwork; % Поточна потужність
    Vout(k) = Vwork; % Збереження результатів у масиви
    Iout(k) = Iwork;
    Pout(k) = Pwork;
    if k > 1 % АЛГОРИТМ MPPT
        if Pwork > prevP
            % Якщо потужність зросла — продовжуємо зміну опору в тому ж напрямку
            Rload = Rload + direction * deltaR;
        else
            % Якщо потужність зменшилась — змінюємо напрямок збурення
            direction = -direction;
            Rload = Rload + direction * deltaR;
        end
    end
    prevP = Pwork; % Збереження поточної потужності для наступного кроку
end
```

Рис 5. Лістинг фрагменту програми емуляції СФП та реалізація алгоритму P&O

Результати моделювання представлені у вигляді часових графіків інтенсивності інсоляції, струму і потужності та будуються в середовищі MATLAB, що наведено на рисунку 6.

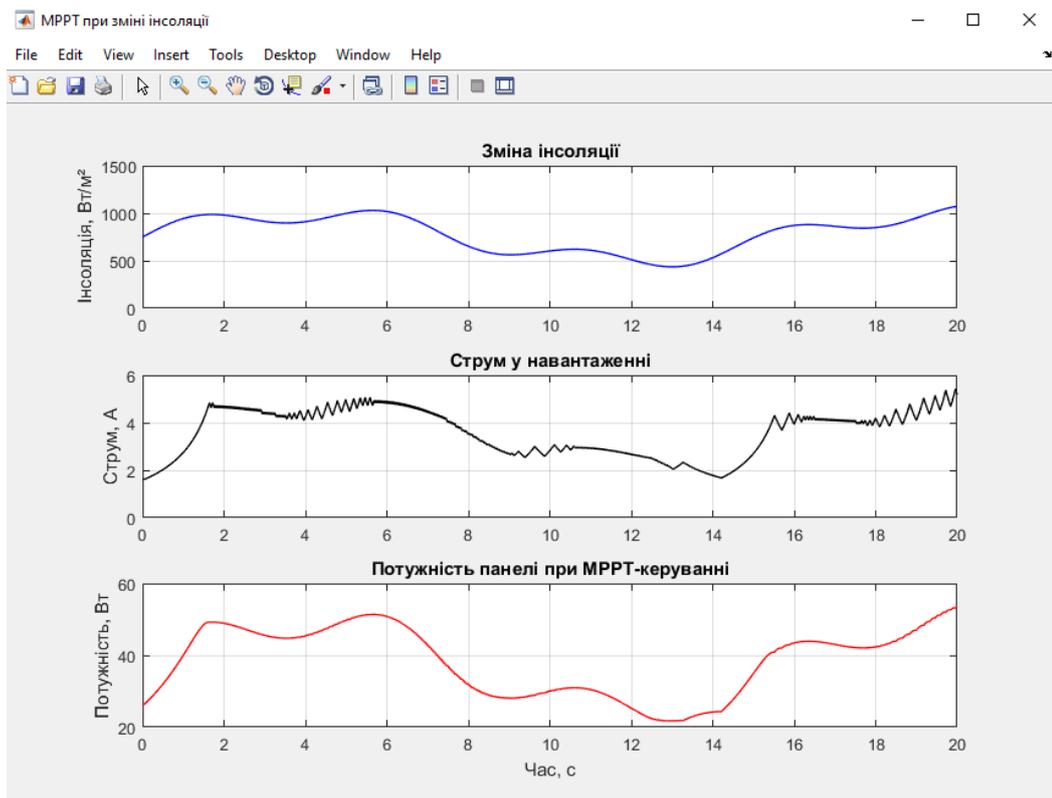


Рис 6. Графіки моделі для дослідження алгоритму МРРТ

З графіку інсоляції випливає, що інтенсивність освітленості змінюється в межах 200-1200 Вт/м², що відображає змінні погодні умови, наприклад, часткову хмарність. Струмовий графік СФП має невеликі коливання, які виникають через безперервну зміну опору навантаження алгоритмом Р&О у пошуку МРР. Крок регулювання опору обмежує амплітуду цих флуктуацій, проте, вони відображають безперервний процес корекції режиму роботи. Графік потужності залишається відносно рівним і слідує за змінами інсоляції, що пояснюється компенсуючим ефектом взаємодії напруги та струму. Короткочасне зменшення струму компенсується відповідним збільшенням напруги на навантаженні, завдяки чому потужність залишається близькою до максимальної величини. Така поведінка демонструє ефективність алгоритму МРРТ у підтримці потужності на рівні, наближеному до її максимуму, навіть за умов швидких і непередбачуваних змін освітленості.

Висновки і перспективи. Розроблено гнучку апаратно-програмну систему керування потужністю фотоелектричного перетворювача, яка дозволяє проводити

фізичні експерименти, що забезпечує варіативність досліджень при зміні методів та моделей керування. Розроблено математичну модель системи керування потужністю СФП у середовищі MATLAB для проведення обчислювальних досліджень. Модель системи керування складається з моделі об'єкта, моделі керуючого пристрою, моделі, що задає збурення. Моделювання роботи системи керування потужністю СФП було виконано за допомогою розробленої математичної моделі керуючого пристрою, що реалізує модель методу пошуку МРР при зміні величини освітленості. Результати показали, що струм у навантаженні зазнає невеликих коливань, обумовлених безперервним пошуком МРР через малі кроки зміни опору. Ці коливання відображають адаптивний процес керування, коли метод визначає приріст або спад потужності для визначення напрямку подальшого збурення. Водночас потужність залишається відносно стабільною, оскільки короткочасне зменшення струму компенсується відповідним підвищенням напруги, що забезпечує генерацію СФП близьку до її максимального енергетичного потенціалу.

Створена платформа може бути використана як у науково-дослідницькій діяльності, так і в освітньому процесі під час вивчення дисциплін, пов'язаних з відновлюваною енергетикою, цифровими системами керування та моделюванням електронних пристроїв. Отримані результати моделювання можуть бути безпосередньо застосовані при розробленні МРРТ контролерів. Структура платформи дозволяє легко інтегрувати нові алгоритми, зокрема, метод інкрементальної провідності та інші, що забезпечує її придатність для подальших досліджень та удосконалення сучасних систем керування МРРТ.

Список використаних джерел

1. O. Zaslavsky, V. Tkachov, and K. Sosnin, "Improving the efficiency of electrical energy distribution with decentralized electric heating control based on nash equilibrium", *EEJET*. Oct. 2020. Vol. 5, no. 8 (107), pp. 17–23. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.213492> (Scopus)
2. Зибалов Д.С. Дослідження впливу на згенеровану потужність кута падіння сонячних променів на поверхню сонячного фотоелектричного перетворювача. *Енергетика і автоматика*. 2022. №5. <https://doi.org/10.31548/energiya2022.05.062>
3. Katche, M. L. (2023). A comprehensive review of maximum power point tracking (MPPT) techniques used in solar PV systems. *Energies*, 16(5), 2206. <https://doi.org/10.3390/en16052206>.

4. Verma, D., Nema, S., Shandilya, A. M., & Dash, S. K. (2016). Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1018–1034. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.068>.
5. Subudhi, B., & Pradhan, R. (2013). A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(1), 89–98. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2012.2202294>.
6. Augustine, S., Lakshminarasamma, N., & Mishra, M. K. (2016). Control of photovoltaic-based low-voltage DC microgrid system for power sharing with modified droop algorithm. *IET Power Electronics*, 9(6), 1132–1143. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2015.0325>.
7. Aldbaiat, B., Nour, M., Radwan, E., & Awada, E. (2022). Grid-connected PV system with reactive power management and an optimized SRF-PLL using genetic algorithm. *Energies*, 15(6), 2177. <https://doi.org/10.3390/en15062177>.
8. Arias, M. B., & Bae, S. (2020). Design models for power flow management of a grid-connected solar photovoltaic system with energy storage system. *Energies*, 13(9), 2137. <https://doi.org/10.3390/en13092137>.
9. Konara, K. M. S. Y., Kolhe, M. L., & Sharma, A. (2020). Power dispatching techniques as a finite-state machine for a standalone photovoltaic system with a hybrid energy storage. *AIMS Energy*, 8(2), 214–230. <https://doi.org/10.3934/energy.2020.2.214>.
10. Basantes, B., Ulloa-Herrera, F., Pozo, M., & Camacho, O. (2024). Power management of an off-grid photovoltaic system using a linear-algebra-based control. *Renewable Energy Reports / ScienceDirect* (article). <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102375>
11. Moosavi, S. K. R., & others (2022). Highly efficient MPPT control using a dynamic group based cooperation optimization (DGBCO) algorithm for PV systems. *Engineering Applications / Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.011>.
12. Nassar, W. M., Anaya-Larab, O., & Ahmed, K. H. (2021). A new adaptive instantaneous average current sharing technique for circulating current minimization among parallel converters in a LV DC-microgrid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107562>.
13. Kanouni, B., et al. (2024). Advanced efficient energy management strategy based on PV-PEMFC-batteries for DC-link regulation (review / case study). *Applied Sciences / MDPI*. <https://doi.org/10.3390/app14123456>.

References

1. O. Zaslavsky, V. Tkachov, and K. Sosnin (2020). “Improving the efficiency of electrical energy distribution with decentralized electric heating control based on nash equilibrium”, *EEJET*, 5, 8 (107), 17–23. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.213492> (Scopus)
2. Zыbalov, D.S. (2022). Doslidzhennia vplyvu na zghenerovanu potuzhnist kuta padinnia soniachnykh promeniv na poverkhniu soniachnoho fotoelektrychnoho peretvoriuvacha [Study of the influence of the angle of incidence of solar rays on the

surface of a solar photovoltaic converter on the generated power]. Energy and Automation, 5. <https://doi.org/10.31548/energiya2022.05.062>

3. Katche, M. L. (2023). A comprehensive review of maximum power point tracking (MPPT) techniques used in solar PV systems. Energies, 16(5), 2206. <https://doi.org/10.3390/en16052206>.

4. Verma, D., Nema, S., Shandilya, A. M., & Dash, S. K. (2016). Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, 1018–1034. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.068>.

5. Subudhi, B., & Pradhan, R. (2013). A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 4(1), 89–98. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2012.2202294>.

6. Augustine, S., Lakshminarasamma, N., & Mishra, M. K. (2016). Control of photovoltaic-based low-voltage DC microgrid system for power sharing with modified droop algorithm. IET Power Electronics, 9(6), 1132–1143. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2015.0325>.

7. Aldbaiat, B., Nour, M., Radwan, E., & Awada, E. (2022). Grid-connected PV system with reactive power management and an optimized SRF-PLL using genetic algorithm. Energies, 15(6), 2177. <https://doi.org/10.3390/en15062177>.

8. Arias, M. B., & Bae, S. (2020). Design models for power flow management of a grid-connected solar photovoltaic system with energy storage system. Energies, 13(9), 2137. <https://doi.org/10.3390/en13092137>.

9. Konara, K. M. S. Y., Kolhe, M. L., & Sharma, A. (2020). Power dispatching techniques as a finite-state machine for a standalone photovoltaic system with a hybrid energy storage. AIMS Energy, 8(2), 214–230. <https://doi.org/10.3934/energy.2020.2.214>.

10. Basantes, B., Ulloa-Herrera, F., Pozo, M., & Camacho, O. (2024). Power management of an off-grid photovoltaic system using a linear-algebra-based control. Renewable Energy Reports / ScienceDirect (article). <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102375>

11. Moosavi, S. K. R., & others (2022). Highly efficient MPPT control using a dynamic group based cooperation optimization (DGBCO) algorithm for PV systems. Engineering Applications / Renewable Energy. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.011>.

12. Nassar, W. M., Anaya-Larab, O., & Ahmed, K. H. (2021). A new adaptive instantaneous average current sharing technique for circulating current minimization among parallel converters in a LV DC-microgrid. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107562>.

13. Kanouni, B., et al. (2024). Advanced efficient energy management strategy based on PV-PEMFC-batteries for DC-link regulation (review / case study). Applied Sciences / MDPI. <https://doi.org/10.3390/app14123456>.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF A PHOTOVOLTAIC CONVERTER USING THE MAXIMUM POWER POINT TRACKING METHOD.

D. Zibalov, K. Sosnin

Abstract. *Methods and models of power consumption control systems for energy generation by solar photovoltaic converter (SPC) is an urgent task of finding the*

maximum power point (Maximum Power Point Tracking, MPPT) to increase efficiency. The results of mathematical numerical modeling in the MATLAB environment and experimental research using the physical model of SPC confirm the effectiveness of the developed control system. The input conditions included variable insolation, which was specified as a combination of two sinusoidal signals with an additional restriction within 200–1200 W/m², which allows modeling dynamic weather conditions, for example, the passage of clouds or partial shading. During the simulation, the voltage and current on the load were calculated through the conditional linear equivalent of the SPC taking into account the load resistance, which was changed according to the Perturb and Observe (P&O) algorithm. The developed system provides maximum power support throughout the entire simulation period, which confirms the practical value of the system for controlling SPC in energy systems.

Key words: *solar photovoltaic converter, resistance, maximum power point, mathematical model, perturb and observe*