

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361-65>

УДК 621.314

ТКАЧОВ АНДРІЙ

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

<https://orcid.org/0009-0008-7450-0733>

e-mail: andrey171995@gmail.com

ЯГАНОВ ПЕТРО

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

<https://orcid.org/0000-0001-7358-9846>

e-mail: piteryahanov@gmail.com

СИСТЕМА СЛІДКУВАННЯ ЗА ТОЧКОЮ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА ДЛЯ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

У роботі розглянуто основні принципи використання фотоелектричних систем та ключові компоненти, що впливають на їх ефективність. Більшість із сучасних систем, побудованих на базі сонячних елементів, складаються з допоміжного пристрою, а саме контролеру або системи слідування за точкою максимальної потужності сонячного елемента (ТМП). Це зумовлено нелінійним характером вольт-амперної характеристики сонячних елементів та необхідністю узгодження оптимального вихідного опору сонячного елемента та вхідного опору споживача. Встановлено, що системи, документація яких знаходиться у відкритому доступі, побудовані на ітераційних алгоритмах пошуку параметрів ТМП. Такі алгоритми мають серед основних недоліків необхідність постійного вимірювання фізичних величин та підлаштування напруги або струму для підтримання оптимального режиму роботи сонячного елемента. На основі проведених досліджень було запропоновано систему слідування за точкою максимальної потужності (ССТМП) сонячного елемента, орієнтовану на заряджання акумуляторних батарей. У її складі передбачено додатковий функціональний компонент, що забезпечує режим постійного струму на початковому етапі, що дозволяє реалізувати збалансований та ефективний процес заряджання. Саме впровадження режиму постійного струму забезпечує безпечний та ефективний процес заряджання акумуляторів, враховуючи їх специфічні експлуатаційні характеристики. Також механізмом визначення положення точки максимальної потужності сонячного елемента передбачено впровадження аналітичного алгоритму, що забезпечує встановлення режиму роботи одразу в околі цієї точки. Порівняння розрахунків за аналітичною формулою та очікуваними даними на основі параметрів моделі відхилення в межах до одного відсотка між ними. Практична цінність дослідження полягає у вдосконаленні ССТМП сонячного елемента для акумуляторів, враховуючи їх експлуатаційні рекомендації. Використання аналітичних підходів забезпечує встановлення режиму роботи в околі ТМП за мінімальний час, що підвищує ефективність їх використання за змінних зовнішніх умов.

Ключові слова: Сонячний елемент, ССТМП, методи пошуку ТМП, однодіодна модель заміщення

TKACHOV ANDRII, YAHANOV PETRO

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

SYSTEM FOR TRACKING THE MAXIMUM POWER POINT OF A SOLAR CELL FOR STORAGE BATTERIES

The paper considers the basic principles of using photovoltaic systems and key components that affect their efficiency. Most modern systems built on the basis of solar cells consist of an auxiliary device, namely a controller or a system for tracking the maximum power point of the solar cell (MPP). This is due to the nonlinear nature of the volt-ampere characteristic of solar cells and ensuring the coordination of the optimal output resistance of the solar cell and the input resistance of the consumer. It has been established that systems, the documentation of which is in the public domain, are created on iterative algorithms for searching for MPP parameters. Such algorithms have, among their main disadvantages, the need for current measurement of physical quantities and maintaining voltage or current to maintain the optimal operating mode of the solar cell. Based on the research conducted, a system for tracking the maximum power point (MPP) of the solar cell was proposed, focused on charging batteries. It includes an additional functional component that provides a constant current mode at the initial stage, which allows for a balanced and efficient charging process. It is the implementation of the DC mode that ensures a safe and efficient process of charging batteries, taking into account their specific operational characteristics. Also, the mechanism for determining the point of setting the maximum power of the solar cell provides for the implementation of an analytical algorithm that ensures the establishment of the operating mode immediately in the vicinity of this point. Comparison of calculations using the analytical formula and expected data based on the parameters of the deviation model within one distance between them. Research on the practical value of achieving improvement of the MPPT of the solar cell for batteries, taking into account their operational recommendations. The use of analytical approaches ensures the establishment of the operating mode in the TMP environment in the minimum time, which ensures the effectiveness of their use for changed external conditions.

Keywords: Solar cell, MPPT, MPP search methods, single diode equivalent model

Стаття надійшла до редакції / Received 12.12.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.01.2026

Опубліковано / Published 29.01.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Ткачов Андрій, Яганов Петро

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із практичними завданнями

Сучасний перехід до відновлюваних джерел енергії значно посилив інтерес до сонячної енергетики, зокрема до фотоелектричних систем (ФЕС), які здійснюють безпосереднє перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію. Завдяки екологічності, доступності, відсутності рухомих механічних частин та можливості масштабування, фотоелектричні системи широко застосовуються у побуті, промисловості та автономних електроживильних установках. Їх часто використовують як основне або резервне джерело живлення у сільських районах, у регіонах, де відсутнє централізоване електропостачання, а також у системах локальної енергетичної незалежності. Постійний розвиток технологій виробництва та експлуатації сонячних

панелей підвищують ефективність їх використання. Саме тому використання сонячної фотоелектричної енергії постійно зростає, що підкреслює критичну потребу в підвищенні ефективності її використання.

Основними фізичними компонентами сонячних панелей є сонячні елементи. Для сонячного елемента властиві суттєво нелінійні як вольт-амперна характеристика (ВАХ), так і залежність потужності від напруги. Точка на вольт-амперній характеристиці, у якій сонячний елемент забезпечує максимальну вихідну потужність, називається точкою максимальної потужності (ТМП). Підтримання режиму роботи сонячного елемента в області точки максимальної потужності є критично важливим для забезпечення максимальної ефективності передачі енергії від сонячного елемента до навантаження. Робота поза цією точкою призводить до неминучих втрат потужності, які можуть сягати 30-40%.

Для зменшення втрат виникає необхідність впровадження до схеми підключення сонячного елемента додаткового компонента, що забезпечуватиме його роботу в оптимальному режимі. Таку функцію виконують спеціальні пристрої, відомі як системи слідкування за точкою максимальної потужності (ССТМП). Вони здійснюють регулювання напруги або струму, необхідних для підтримання роботи сонячного елемента в області ТМП.

На сьогодні не існує універсального методу визначення положення ТМП, тому у ССТМП застосовується досить широкий спектр алгоритмів. Більшість із них належить до методів ітераційного пошуку, які базуються на поступовому підлаштуванні параметрів системи до досягнення максимального значення потужності. Такі методи характеризуються підвищеними енергетичними витратами через необхідність постійного вимірювання та регулювання параметрів сонячного елемента.

Фотоелектричні системи перетворюють сонячне випромінювання на електричну енергію, проте їхній коефіцієнт корисної дії залишається відносно низьким, а вартість сонячних панелей — досить високою. Тому особливого значення набуває створення системи передачі потужності від сонячного модуля до споживача з мінімальними втратами. Для цього ефективний опір сонячного елемента має бути узгоджений із вхідним опором навантаження. У випадку рівності цих опорів потужність передається максимально ефективно, а пряма навантаження перетинає ВАХ сонячного елемента в околі точки максимальної потужності. Водночас вхідний опір споживача може відрізнитися від ефективного вихідного опору в ТМП, тому ССТМП також виконують роль узгоджувача опорів, забезпечуючи ефективну передачу потужності до навантаження.

Враховуючи зазначене, виникає необхідність розробки системи слідкування за точкою максимальної потужності, яка за мінімальну кількість часу забезпечувала б оптимальний режим роботи сонячного елемента поблизу ТМП. Крім того, така система повинна забезпечувати узгодження ефективного опору джерела енергії з навантаженням для максимально ефективного передачі потужності.

Формулювання цілей статті

Метою цієї роботи є проектування системи слідкування за точкою максимальної потужності сонячного елемента, що має забезпечувати режим роботи в околі ТМП за мінімальну кількість часу. Крім того, вона має забезпечувати узгодження опорів між сонячним елементом та споживачем для передачі найбільшої потужності до нього.

Методи визначення ТМП та їх застосування в апаратних рішеннях

Серед найпростіших методів визначення точки максимальної потужності використовується покроковий підхід. Цей метод полягає у послідовній зміні навантаження на сонячний елемент із фіксацією відповідних значень напруги, струму та обчисленням потужності, що дозволяє безпосередньо визначити робочу точку з максимальною віддачею енергії. З графіку, наведеному на Рис. 1, можна зробити висновок, що ТМП є унікальною, тому цей метод дає змогу встановити її з необхідною точністю. Цей метод не є розповсюдженим, тому що вимірювання струму (або напруги) у всьому діапазоні ВАХ з метою пошуку ТМП є досить енергозатратним процесом. Враховуючи, що його треба повторювати з певним кроком, це призводить до надмірних втрат енергії через відключення навантаження на час вимірювання.

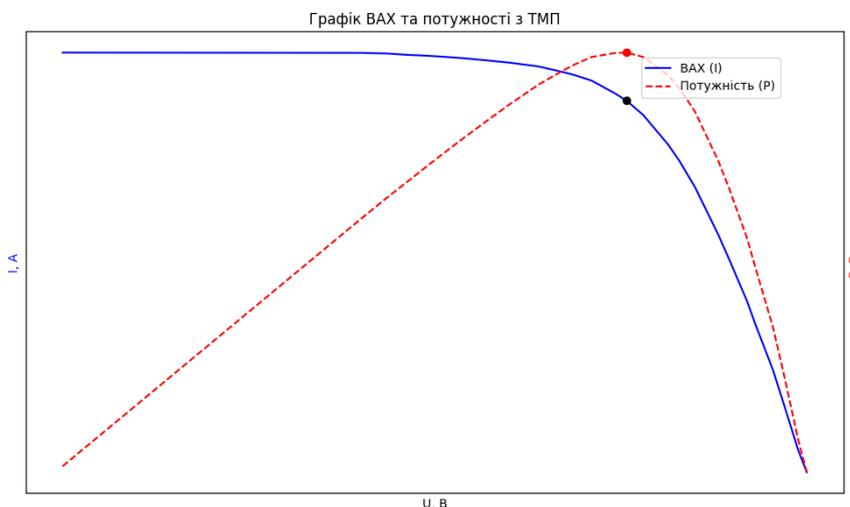


Рис.1. Графік ВАХ та крива P(U) для типового сонячного елемента

Методи, що забезпечують швидший пошук точки максимальної потужності, включають так звані фракційні методи, які базуються на використанні коефіцієнта — відношення струму (або напруги) у ТМП до струму короткого замикання чи напруги холостого ходу відповідно. Якщо для визначення приблизного значення струму в ТМП використовується струм короткого замикання, метод називають фракційним методом струму короткого замикання. Аналогічно, якщо розрахунок ведеться за напругою, застосовують фракційний метод напруги холостого ходу.

В основі цих методів лежить припущення про сталість відношення струму або напруги у ТМП до їхніх базових характеристик — напруги холостого ходу та струму короткого замикання. Насправді це відношення змінюється, проте фракційні методи дозволяють досить точно оцінити наближене значення струму чи напруги у ТМП. Слід враховувати, що зазначені коефіцієнти суттєво залежать від температури, рівня освітленості та інших зовнішніх факторів. В загальному випадку коефіцієнтом k і позначають відношення максимальної величини до величини в ТМП.

За даними експериментальних досліджень, значення k для напруги зазвичай знаходиться у межах від 0,7 до 0,85 (за деякими джерелами 0,76-0,78 для кремнієвих сонячних елементів) [1, 2, 3]. Водночас, значення коефіцієнта для струму має значення приблизно 0,85-0,95 [4, 5]. Також, серед основних недоліків цього методу є необхідність відключення навантаження під час вимірювань базових характеристик.

Серед більш точних ітераційних методів визначення точки максимальної потужності, що працюють без переривання енергопостачання, найпоширенішими є метод збурення і спостереження (Perturb and Observe, P&O) та метод інкрементальної провідності (Incremental Conductance). Вони забезпечують визначення ТМП з високою точністю без необхідності відключення навантаження, що підвищує їхню ефективність.

Метод збурення і спостереження ґрунтується на аналізі зміни потужності у відповідь на невеликі збурення робочої напруги або струму. Алгоритм визначає напрям зміни потужності та відповідно коригує робочу точку сонячного модуля, наближаючи її до ТМП. Завдяки поєднанню достатньої точності та простоти реалізації цей метод широко використовується у більшості контролерів МРРТ (Maximum Power Point Tracking – те саме що й ССТМП) та не має недоліків, властивих методам, що потребують переривання енергопостачання. Одним із ключових недоліків методу є відносно низька швидкодія у випадках, коли поточна робоча точка значно віддалена від ТМП, а також потреба у безперервному внесенні збурень і проведенні спостережень. Це призводить до зайвих витрат енергії навіть в тих випадках, коли контролер знаходиться безпосередньо в ТМП. Іншим його основним недоліком є суперечливість між швидкістю і точністю. Швидкість реакції може сповільнюватися, якщо для зменшення коливаних використовується невеликий крок збурення. Більший крок прискорює реакцію, але збільшує втрати потужності через неточне відстеження. У цьому полягає фундаментальний компроміс між швидкістю та точністю.

Аналогічним ітераційним методом, який усуває зазначений недолік, є метод інкрементальної провідності. Він працює значно ефективніше в умовах постійних змін ТМП, оскільки базується на визначенні її фактичного положення. Якщо робоча точка вже перебуває безпосередньо у ТМП, алгоритм не вносить додаткових змін, очікуючи на наступне відхилення, спричинене зовнішніми факторами.

Цей метод ґрунтується на математичній умові досягнення ТМП, яка задається рівнянням $\frac{dP}{dV} = 0$. Аналізуючи формулу (1), що визначає похідну потужності за напругою, отримуємо вираз який використовується для ітераційного порівняння у процесі роботи алгоритму. Ця формула має вигляд (2).

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

$$\frac{dI}{dV} = \frac{-I}{V} \quad (2)$$

Алгоритм пошуку може реалізовуватися як шляхом порівняння зміни потужності відносно напруги, так і шляхом аналізу зміни струму та напруги відповідно до умови провідності в ТМП. У порівнянні з методом збурення і спостереження, він забезпечує вищу швидкодію та менші осциляції після досягнення точки максимальної потужності.

Компроміс між точністю відстеження та швидкістю відстеження є фундаментальним обмеженням базових класичних алгоритмів з фіксованим кроком, таких як збурення і спостереження та інкрементальної провідності. Якщо крок великий, алгоритм швидкий, якщо крок малий, він точний, але повільний. Це класична проблема систем керування, обмеження, накладене їхнім принципом роботи. Навіть при використанні адаптивних алгоритмів зі змінним кроком, коливання все ще можуть виникати, що вказує на те, що цей компроміс глибоко вбудований у саму природу ітеративного пошуку і не повністю вирішується простими адаптаціями, що спонукає до пошуку нових апаратно-програмних рішень.

Для подолання цих недоліків і поліпшення адаптивності та швидкості реагування системи, дослідники почали використовувати методи нечіткої логіки (Fuzzy Logic). Нечітка логіка дозволяє більш гнучко моделювати невизначеність та варіативність зовнішніх умов, таких як коливання температури, рівень освітленості або зміни навантаження. Вона дає змогу не тільки точніше визначати ТМП, але й ефективно адаптувати алгоритм до динамічних змін у реальному часі.

До методів, що можуть забезпечувати вищу ефективність за певних умов, належать алгоритми ССТМП, реалізовані в використанні штучного інтелекту (ШІ). Такі алгоритми впроваджуються у контролерах, які завдяки наявності пам'яті здатні швидко визначати область розташування ТМП та адаптуватися до зміни зовнішніх умов. Однак їхнім головним недоліком є тривале навчання, яке необхідно проводити для конкретних сонячних елементів. Оскільки алгоритм ШІ ефективно працює лише з тими елементами, на яких він був

навчений, заміна або розширення сонячних панелей потребує повторного навчання на великому масиві тренувальних даних.

З метою зменшення впливу недоліків кожного з методів використовуються також гібридні методи визначення ТМП. Ці методи мають на меті зменшити недоліки кожного з них та використовувати декілька методів для досягнення більшої ефективності. Наприклад, перший метод використовується для пошуку області ТМП, а інший метод плавно підлаштовує напругу для досягнення точного значення в цій області.

Перспективним напрямом, на нашу думку, є розвиток методів, що дозволяють з високою точністю визначати координати ТМП, уникаючи зайвих вимірювань під час її пошуку. Ці підходи ґрунтуються на математичному аналізі та обчисленні похідної потужності. Завдяки їх застосуванню можна одразу визначити параметри ТМП та встановити режим роботи сонячного елемента в околі точки максимальної потужності.

Значна частина з перелічених методів знайшла своє використання в апаратних рішеннях ССТМП. Для найпростіших систем контролерів, що використовуються в простих ФЕС, притаманні методи покрокового знаходження ТМП, або ж фракційні методи через їх простоту у впровадженні в апаратно-програмні комплекси. Найбільш поширені у використанні метод збурення і спостереження та метод інкрементальної провідності. Це пояснюється досить високою швидкістю виходу пристрою у режим роботи в околі ТМП. Наприклад, у відкритому вихідному коді апаратно-програмного комплексу [6] на базі мікроконтролера STM32F4 запропоновано рішення на базі методу інкрементальної провідності. Цей МРРТ контролер має у складі перетворювач постійної напруги, що забезпечує вихідну стабільну напругу.

В іншому апаратно-програмному рішенні [7] використовується звичайний метод збурення і спостереження на базі мікроконтролера STM32. Пристрій побудований на базі зазначеного рішення має у складі понижувально-підвищувальний перетворювач напруги. Також розглянуто приклад побудови комерційного МРРТ на базі архітектури PIC32 [8], що також використовує за основу метод збурення і спостереження, як і в програмно-апаратному рішенні, згаданому раніше. Проте, цей пристрій описує лише частину апаратного комплексу, що також використовує понижувально-підвищувальний перетворювач постійної напруги. Існує також багато інших комерційних ССТМП, проте їхня реалізація визначення ТМП та апаратна частина не знаходяться у вільному доступі. Через це їх аналіз без експериментальних вимірювань є неможливим.

Враховуючи наявні апаратні рішення, можна зробити висновок, що в них застосовуються переважно ітераційні методи визначення ТМП. Водночас сьогодні вже існує низка аналітичних підходів, здатних обчислювати координати ТМП, які максимально наближені до параметрів реальних сонячних елементів. Однак результати аналізу інформації з відкритих джерел свідчать про відсутність реалізації програмно-апаратного комплексу ССТМП, який би використовував саме ці аналітичні методи. Крім того, жоден із відомих комплексів не оснащений апаратним блоком для узгодження ефективного опору зі споживачем — вони лише забезпечують подачу сталої вихідної напруги. Отже, актуальним науково-технічним завданням є розроблення комплексного рішення, що поєднає аналітичні методи визначення точки максимальної потужності з апаратними засобами узгодження навантаження в системах сонячної енергетики.

Виклад основного матеріалу

Сонячний елемент, як напівпровідниковий пристрій, що перетворює фотонну енергію в електричну, не описується єдиною аналітичною формулою, яка безпосередньо задає залежність напруги від струму. Натомість для аналізу та моделювання його роботи на практиці застосовують еквівалентні схеми заміщення, які враховують вплив внутрішніх фізичних параметрів елемента та умов його освітлення.

Найпоширенішими еквівалентними схемами заміщення сонячних елементів є однодіодна та дводіодна моделі. Дводіодна модель застосовується відносно рідко та переважно у спеціалізованих випадках, коли необхідно підвищити точність моделювання за умов низької освітленості або специфічних робочих режимів. В той же час, однодіодна модель є найбільш вживаною завдяки простоті реалізації та достатній точності для більшості інженерних і дослідницьких задач.

Аналітичний опис однодіодної моделі ґрунтується на рівнянні, що визначає ВАХ сонячного елемента з урахуванням фотоструму, діодного струму, а також впливу послідовного та паралельного опорів. Це рівняння подано у формулі (3):

$$I = I_{кз} - I_0 \left(e^{\left(\frac{U + IR_s}{n\phi_T} \right)} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

Основними складовими цієї формули є струм I , напруга U , та параметри I_s (струм насичення р-п переходу), I_ϕ (фотострум, який чисельно приймають рівним струму замкненого кола $I_{кз}$), n (параметр неідеальності р-п переходу), тепловий потенціал ϕ_T , шунтувальний $R_{ш}$ та послідовний R_s опори. Тепловий потенціал ϕ_T залежить від температури, і дорівнює приблизно 26 мВ за стандартних умов (температура 300К). З багатьох досліджень [9, 10] встановлено, що струм короткого замикання ($I_{кз}$) має лінійну залежність від освітленості, тоді як напруга холостого ходу ($U_{хх}$) – логарифмічна. Схема однодіодної моделі заміщення представлена на Рис.2.

У реальних сонячних елементах шунтовий опір має велике значення, що зумовлює протікання незначного шунтового струму паралельно основному колу навантаження. Його величина істотно менша за струм, що протікає через послідовний опір, тому цей струм у більшості розрахунків не враховується. Найчастіше, струм, що буде протікати через послідовний опір представляють формулою (4) без шунтового опору.

$$I = I_{кз} - I_0 \left(e^{\frac{(U+IR_s)}{n\phi_t}} - 1 \right) \quad (4)$$

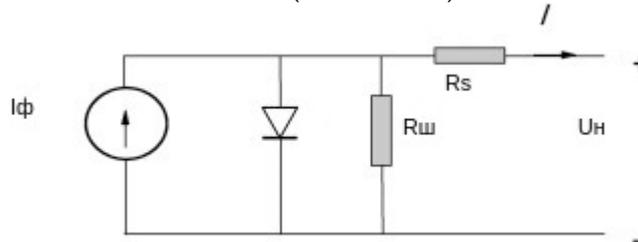


Рис.2. Схема однодіодної моделі заміщення

У більшості випадків фотоелектричні системи застосовуються для заряджання акумуляторних батарей, які надалі виступають джерелом живлення для споживачів. Безпосереднє підключення акумулятора як навантаження є неефективним, оскільки його електричні параметри не завжди відповідають оптимальним умовам роботи сонячного елемента. Це спричиняє зміщення робочої точки від точки максимальної потужності, що знижує енергетичну ефективність системи. На Рис.3. представлено криву навантаження, що має вхідний опір відмінний від ефективного опору навантаження і призводить до споживання меншої кількості потужності відносно максимально можливого значення.

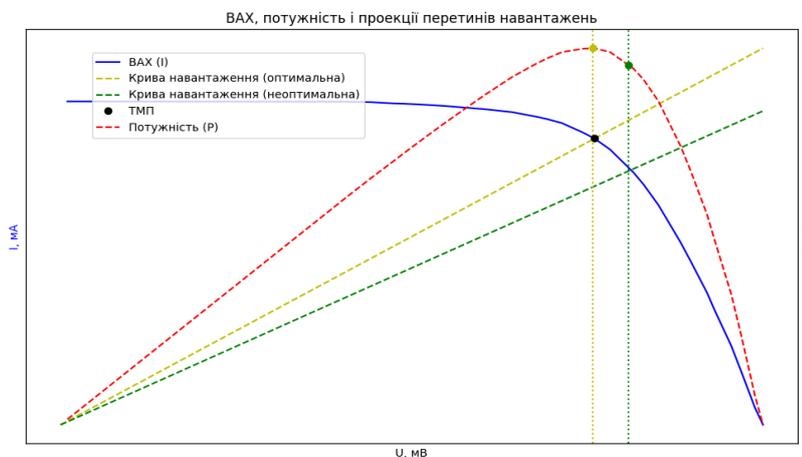


Рис.3. ВАХ із оптимальною та неоптимальною кривими навантаження

Аналіз наведеного графіку на Рис.3 показує, що навіть незначне відхилення навантаження від оптимального призводить до істотного зменшення споживаної потужності, оскільки крива ВАХ в околі ТМП характеризується значною кривизною. Тому в сучасних схемах для узгодження вихідного опору від сонячної батареї та вхідного опору навантаження використовується проміжний блок. Цей блок в загальному має назву «блок слідкування за точкою максимальної потужності», або МРРТ-пристрій (Maximum Power Point Tracking). Його задача є як підтримання параметрів навантаження у ТМП сонячної батареї, так і узгодження вихідного та вхідного опорів навантаження. Враховуючи область застосування ФЕС, вихідний опір має бути узгодженим із вхідним опором акумулятора, що заряджається.

Аналітичні методи визначення ефективного опору базуються на рівняннях струму сонячного елемента, однак через наявність спрощень їх результати є наближеними [11]. Найбільш достовірним підходом є розрахунок ефективного опору після визначення ТМП, на основі фактичних значень напруги та струму у цій точці.

Основною метою впровадження ССТМП є відносно висока вартість самих сонячних панелей та відносно низька їх ефективність. Згідно з останніми дослідженнями [12], ККД монокристалічних сонячних панелей коливається в межах від 16 до 22 відсотків. Підтримання неоптимального режиму роботи сонячних панелей ще знижує ККД, таким чином, загальна ефективність може бути навіть нижча за 10 відсотків. Використання цих систем дозволяє суттєво підвищити ефективність роботи сонячних панелей. Тобто контролер слідкування за ТМП є не просто засобом оптимізації, а ключовим компонентом, що забезпечує значне підвищення ефективності та стабільності роботи фотогальванічних систем в області максимального перетворення потужності. Завдяки конструктивним особливостям і врахуванню нелінійності вольт-амперних характеристик, ССТМП залишаються основою для побудови високоефективних сонячних енергосистем навіть при покращенні характеристик самих панелей.

Процес заряджання акумуляторів складається з двох основних етапів. На першому етапі — у режимі постійного струму (Constant Current, CC) — заряд відбувається з максимальною ефективністю, і на цій стадії акумулятор набирає близько 60–80 % своєї номінальної ємності залежно від типу акумулятора. Другий етап — режим постійної напруги (Constant Voltage, CV) — забезпечує доведення заряду до повної ємності, при цьому струм поступово зменшується, а енергетична ефективність знижується. Графік зарядки для більшості акумуляторів (як свинцевих, так і літій-ферумних) наведено на Рис.4.

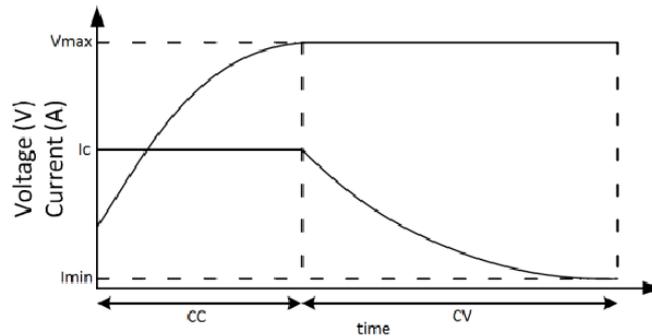


Рис.4. Графік напруги і струму під час зарядки акумулятора

Саме тому МРРТ-контролер для забезпечення ефективної зарядки основної частини ємності акумулятора повинен підтримувати режим постійного вихідного струму. Узгодження опорів в цьому режимі досягається встановленням напруги на виході перетворювача, щоб вихідна напруга була трохи вища за напругу на навантаженні. Другий етап, що слідує за основним, виконує функцію завершальної зарядки, дозволяючи акумулятору повністю досягти своєї ємності без ризику перезарядження, причому струм на цьому етапі визначається самою батареєю відповідно до її стану.

Структурна схема, що описує основні складові побудови контролера ССТМП з врахуванням правильної зарядки акумулятора, представлена на Рис.5. Основним пристроєм, що споживає потужність в цих контролерах є обчислювальний пристрій. У випадку використання мікроконтролерів (МК) споживання системи може бути в межах до 1 Вт (основною споживання є мікроконтролер, що має максимальне споживання від 100 мА до 200 мА за напруги живлення 5 В) [13].

Іншою складовою побудови ефективного контролера слідкування за ТМП є алгоритм, що використовується мікроконтролером для пошуку параметрів, у якій потужність що споживається є максимальна. Раніше зазначено, що використання аналітичних методів, як подальшого розвитку технологій побудови ССТМП є перспективним. Це дозволяє уникнути постійних і багаторазових вимірювань фізичних величин (такі як струм, напруга або освітленість) і дозволяють одразу розрахувати параметри на поточному рівні освітленості. Ці аналітичні методи побудовані на основі математичного розрахунку похідної формули однодіодної моделі заміщення (2).

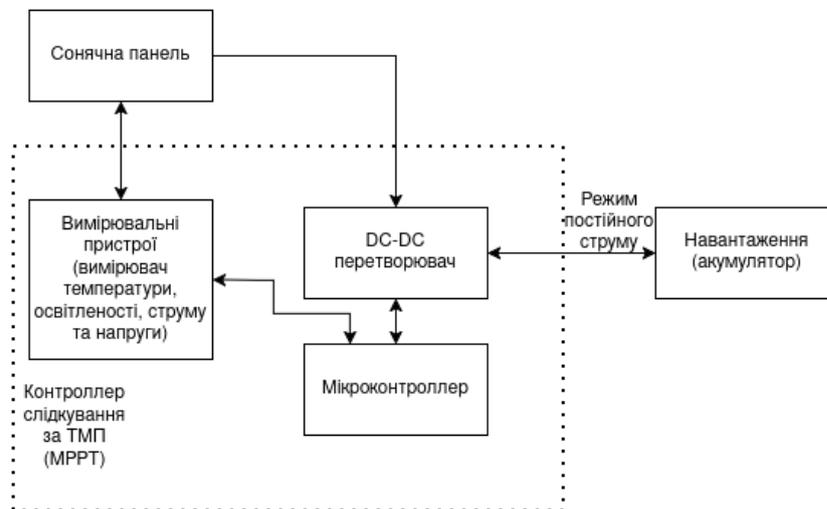


Рис. 5. Структурна схема підключення МРРТ до сонячної панелі

У цій роботі за основу аналітичного алгоритму пошуку ТМП взято метод, що ґрунтується на визначенні похідної потужності за напругою в точці, де похідна дорівнює нулю. Взявши за основу формулу (2) та визначивши похідну в ТМП за умови $\frac{dP}{dU} = 0$, була отримана формула (5), де для спрощень була введена заміна $\alpha = n\phi t$ [14].

$$\ln\left(\frac{(I_f - I)}{I_0}\right) - I\left(\frac{1}{(I_f - I)} + 2\alpha R_s\right) = 0 \quad (5)$$

У останньому рівнянні, після введення заміни $A = 2I_f R_s \alpha$, $B = 1 - \ln\left(\frac{I_0}{I_f}\right)$, $C = 1 - \frac{I}{I_f}$ та виконання незначних перетворень, отримано формулу (6). Для приведення останнього рівняння до форми, яку можна представити через функцію Ламберта, вводяться певні спрощення. У рівнянні (6) вираз $A(1-C)$ було замінено

до виразу А, оскільки знехтуване значення у діапазоні 0.1–0.2 А містить незначну похибку, яка не здатна суттєво вплинути на розв'язок рівняння.

$$B = \frac{1}{C} - \ln(C) + A(1 - C) \quad (6)$$

Враховуючи формулу (6) та значення, що було спрощено, після перетворень отримано вираз (7) що може бути представлено як функція Ламберта. Таке представлення дозволяє звести нелінійне рівняння до рівняння з однією змінною, що може бути розв'язане за допомогою сучасних обчислювальних засобів.

Функція Ламберта не є фундаментальним рівнянням, проте сьогодні існує багато інструментів, які дозволяють знаходити її розв'язки досить простими методами. Одним із таких є функція модуля `scipy` [15] у мові програмування Python. Вона дозволяє ефективно розв'язувати це рівняння без необхідності розуміння деталей його реалізації.

$$e^{(B-A)} = e^{\left(\frac{1}{C}\right)} * \left(\frac{1}{C}\right) \quad (7)$$

Підставивши зроблені заміни у рівняння (7), отримано рівняння (8), за яким визначається струм у ТМП. Знаючи значення цього струму та параметри моделі заміщення, напругу можна знайти, підставивши отриманий струм у рівняння (2).

$$I_{mp} = \left(1 - \frac{1}{w_0 \left(\frac{I_f}{I_0} e^{\left(1 - \frac{2I_f R_s}{nVt} \right)} \right)} \right) I_f \quad (8)$$

Вихідними даними для порівняння були взяті експериментальні дані сонячних елементів з роботи [16]. Ця робота описує дослідження і визначення параметрів однодіодної моделі заміщення. Для порівняння, було взято декілька гілок ВАХ з наступними параметрами моделі заміщення:

$E = 1000 \text{ Вт/м}^2$, $\alpha = 24.141 \text{ мВ}$, $I_0 = 8.38 \cdot 10^{-8} \text{ мА}$, $R_s = 21 \text{ мОм}$, $I_f = 5226.76 \text{ мА}$.

$E = 800 \text{ Вт/м}^2$, $\alpha = 24.141 \text{ мВ}$, $I_0 = 8.38 \cdot 10^{-8} \text{ мА}$, $R_s = 23 \text{ мОм}$, $I_f = 4183.64 \text{ мА}$.

$E = 600 \text{ Вт/м}^2$, $\alpha = 24.141 \text{ мВ}$, $I_0 = 8.38 \cdot 10^{-8} \text{ мА}$, $R_s = 23 \text{ мОм}$, $I_f = 3140.52 \text{ мА}$.

Отримані результати, наведені нижче, демонструють, що застосування цього підходу для визначення точки максимальної потужності (ТМП) є досить ефективним і дозволяє встановити режим роботи сонячного елемента в околі ТМП. Порівняння проводилось із значеннями, отриманими шляхом визначення максимуму потужності за формулою (2) з використанням визначених параметрів, а також зі значеннями, розрахованими за формулою (8). Вважається, що результати, отримані за формулою (2), близькі до реальної точки максимальної потужності (ТМП) сонячного елемента і можуть розглядатися як передбачуване положення ТМП.

$E = 1000 \text{ Вт/м}^2$, напруга в передбачуваному положенні ТМП 0.433 В, розраховане значення 0.434 В.

$E = 800 \text{ Вт/м}^2$, напруга в передбачуваному положенні ТМП 0.439 В, розраховане значення 0.440 В.

$E = 600 \text{ Вт/м}^2$, напруга в передбачуваному положенні ТМП 0.452 В, розраховане значення 0.452 В.

На основі розрахованих значень можна зробити висновок, що застосування розглянутого методу є ефективним для визначення точки максимальної потужності сонячного елемента. Метод дозволяє встановити режим роботи панелі в околі ТМП, що забезпечує оптимальне використання її енергетичного потенціалу та підвищує ефективність перетворення сонячної енергії. Інтеграція цього підходу у контролери з перетворювачем на постійний струм дозволяє сформувати ефективну систему слідкування за ТМП для акумуляторних батарей, забезпечуючи узгодженість режимів роботи сонячної панелі та акумулятора.

Висновки з даного дослідження

У даній роботі було розроблено та проаналізовано структурну схему системи відстеження точки максимальної потужності (ТМП) сонячної панелі, орієнтовану на специфічний тип споживачів — акумуляторні батареї (АКБ). На основі проведеного аналізу встановлено, що забезпечення оптимального режиму заряджання АКБ вимагає не лише стандартного відстеження ТМП, а й дотримання експлуатаційних вимог самих акумуляторів. З метою підвищення ефективності та безпеки процесу заряджання запропоновано інтегрувати до системи додатковий функціональний блок, який забезпечує режим постійного струму на початковій стадії зарядки.

Ключовим елементом підвищення ефективності системи є алгоритм визначення координат ТМП. На противагу поширеним ітераційним методам, які потребують безперервних вимірювань струму та напруги, у дослідженні запропоновано аналітичний алгоритм пошуку ТМП, який дає змогу визначити точку максимальної потужності без необхідності постійних вимірювань, що забезпечує негайний вихід пристрою в оптимальний робочий режим та безперервне підтримання ТМП.

Розрахунки підтвердили високу точність запропонованого підходу: відхилення розрахованого положення ТМП від передбачуваного не перевищує 3 мВ, що становить приблизно 1%. Впровадження даного аналітичного механізму пошуку ТМП дозволяє істотно підвищити швидкість та надійність системи, забезпечуючи стабільно високий рівень перетворення сонячної енергії в умовах динамічної зміни параметрів довкілля.

Література

1. Subudhi B., Pradhan R. MPPT methods for solar PV systems: a critical review based on tracking nature // *International Journal of Renewable Energy Research*. – 2015.

2. Al-Shetwi A. M., Sujod M. S., Rahman T. K. A. Accurate simulation of MPPT methods performance when applied to commercial photovoltaic panels // *Journal of Renewable Energy*. – 2015. – Vol. 2015. – Article ID 914212. – 10 p. – DOI: 10.1155/2015/914212.
3. Batzelis E. I., Kampitsis G. E., Papathanassiou S. A., Manias S. N. Direct MPP calculation in terms of the single-diode PV model parameters // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 2015. – Vol. 30, No. 1. – P. 226–236. – DOI: 10.1109/TEC.2014.2356017.
4. Al-Adwan I. M. Performance assessment of the first residential grid-tie PV system in Jordan. – 2013. – Режим доступу: <https://www.iiste.org/Journals/index.php/JETP/article/download/5255/5268> (дата звернення: 30.01.2026).
5. Malik S., Parekh B. R. The performance of solar PV array using different MPPT techniques. – 2017. – Режим доступу: <https://easychair.org/publications/paper/Ks6/open> (дата звернення: 30.01.2026).
6. Szbeni. Solar: solar MPPT charge controller and van management system : GitHub repository. – 2025. – Режим доступу: <https://github.com/szbeni/solar> (дата звернення: 30.01.2026).
7. Seandepagnier. MPPT: free software/hardware MPPT solar controller : GitHub repository. – 2025. – Режим доступу: <https://github.com/seandepagnier/mppt> (дата звернення: 30.01.2026).
8. Rosu-Hamzescu M., Oprea S. Practical guide to implementing solar panel MPPT algorithms : application note AN1521. – Microchip Technology Inc., 2013.
9. Nelson J. *The physics of solar cells*. – London : Imperial College Press, 2003.
10. King D. L., Kratochvil J. A., Boyson W. E. Modeling photovoltaic array performance — a review // *Solar Energy*. – 1997. – Vol. 62, No. 3. – P. 175–179. – DOI: 10.1016/S0038-092X(97)00092-6.
11. Ткачов А. К., Яганов П. О., Черненко В. В. Узгодження оптимального опору навантаження сонячної батареї зі споживачами електроенергії // *Приладобудування: стан і перспективи* : матеріали XXIV Міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 13–14 трав. 2025 р.). – Київ : КП ім. Ігоря Сікорського, 2025. – С. 353–357.
12. Vora A., Kumar S., Sharma P. A comprehensive evaluation of solar cell technologies, associated loss mechanisms, and performance metrics // *Journal of Energy Storage*. – 2024. – Vol. 61. – Art. 106871. – DOI: 10.1016/j.est.2024.106871.
13. STMicroelectronics. *STM32F4 series reference manual (RM0090)*. – 2020.
14. Tirado-Serrato J. G., Garcia A. S., Maximov S. Analytical computation of the maximum power point of solar cells using perturbation theory // *Energies*. – 2024. – Vol. 17, No. 23. – Art. 6035. – DOI: 10.3390/en17236035.
15. Python SciPy function documentation. SciPy.special.lambertw. – Режим доступу: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.special.lambertw.html> (дата звернення: 30.01.2026).
16. Chernenko V., Yahanov P., Pekur D., Korkishko R., Kornaga V., Sorokin V. Analytical model of light current-voltage characteristics of a solar cell based on experimental data // *Solar Energy Advances*. – 2024. – Vol. 4. – Art. 100073. – DOI: 10.1016/j.seja.2024.100073.

References

1. Subudhi B., Pradhan R. MPPT methods for solar PV systems: a critical review based on tracking nature // *International Journal of Renewable Energy Research*. – 2015.
2. Al-Shetwi A. M., Sujod M. S., Rahman T. K. A. Accurate simulation of MPPT methods performance when applied to commercial photovoltaic panels // *Journal of Renewable Energy*. – 2015. – Vol. 2015. – Article ID 914212. – 10 p. – DOI: 10.1155/2015/914212.
3. Batzelis E. I., Kampitsis G. E., Papathanassiou S. A., Manias S. N. Direct MPP calculation in terms of the single-diode PV model parameters // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 2015. – Vol. 30, No. 1. – P. 226–236. – DOI: 10.1109/TEC.2014.2356017.
4. Al-Adwan I. M. Performance assessment of the first residential grid-tie PV system in Jordan. – 2013. – Режим доступу: <https://www.iiste.org/Journals/index.php/JETP/article/download/5255/5268> (дата звернення: 30.01.2026).
5. Malik S., Parekh B. R. The performance of solar PV array using different MPPT techniques. – 2017. – Режим доступу: <https://easychair.org/publications/paper/Ks6/open> (дата звернення: 30.01.2026).
6. Szbeni. Solar: solar MPPT charge controller and van management system : GitHub repository. – 2025. – Режим доступу: <https://github.com/szbeni/solar> (дата звернення: 30.01.2026).
7. Seandepagnier. MPPT: free software/hardware MPPT solar controller : GitHub repository. – 2025. – Режим доступу: <https://github.com/seandepagnier/mppt> (дата звернення: 30.01.2026).
8. Rosu-Hamzescu M., Oprea S. Practical guide to implementing solar panel MPPT algorithms : application note AN1521. – Microchip Technology Inc., 2013.
9. Nelson J. *The physics of solar cells*. – London : Imperial College Press, 2003.
10. King D. L., Kratochvil J. A., Boyson W. E. Modeling photovoltaic array performance — a review // *Solar Energy*. – 1997. – Vol. 62, No. 3. – P. 175–179. – DOI: 10.1016/S0038-092X(97)00092-6.
11. Ткачов А. К., Яганов П. О., Черненко В. В. Узгодження оптимального опору навантаження сонячної батареї зі споживачами електроенергії // *Приладобудування: стан і перспективи* : матеріали XXIV Міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 13–14 трав. 2025 р.). – Київ : КП ім. Ігоря Сікорського, 2025. – С. 353–357.
12. Vora A., Kumar S., Sharma P. A comprehensive evaluation of solar cell technologies, associated loss mechanisms, and performance metrics // *Journal of Energy Storage*. – 2024. – Vol. 61. – Art. 106871. – DOI: 10.1016/j.est.2024.106871.
13. STMicroelectronics. *STM32F4 series reference manual (RM0090)*. – 2020.
14. Tirado-Serrato J. G., Garcia A. S., Maximov S. Analytical computation of the maximum power point of solar cells using perturbation theory // *Energies*. – 2024. – Vol. 17, No. 23. – Art. 6035. – DOI: 10.3390/en17236035.
15. Python SciPy function documentation. SciPy.special.lambertw. – Режим доступу: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.special.lambertw.html> (дата звернення: 30.01.2026).
16. Chernenko V., Yahanov P., Pekur D., Korkishko R., Kornaga V., Sorokin V. Analytical model of light current-voltage characteristics of a solar cell based on experimental data // *Solar Energy Advances*. – 2024. – Vol. 4. – Art. 100073. – DOI: 10.1016/j.seja.2024.100073.