

Тимофій Якушкін¹, Роман Єршов², Сергій Степенко³

¹здобувач ступеня доктора філософії на кафедрі електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: yakushkintima@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3432-9237>. SCOPUS Author ID: [57282689600](https://orcid.org/0000-0003-3432-9237)

²науковий співробітник, старший викладач кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: roman.d.yershov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0267-2906>

ResearcherID: [H-1432-2016](https://orcid.org/0000-0002-0267-2906). SCOPUS Author ID: [57188719994](https://orcid.org/0000-0002-0267-2906)

³кандидат технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник,
доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: serhii.stepenko@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7702-6776>

ResearcherID: [F-1018-2014](https://orcid.org/0000-0001-7702-6776). SCOPUS Author ID: [55570068000](https://orcid.org/0000-0001-7702-6776)

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТОПОЛОГІЙ ТА АЛГОРИТМІВ ДЛЯ ВІДСТЕЖУВАЧІВ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ У ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ

Стационарні сонячні електричні станції, що складаються з масиву сонячних панелей, – одні з найбільш вагомих складових автономних електричних мереж. Враховуючи різноманітність існуючих топологій та методів відстежування точки максимальної потужності, метою даної роботи є огляд топологій перетворювачів, класифікація алгоритмів MPPT та їх порівняльний аналіз. На основі проведеного аналітичного огляду складено порівняльну таблицю для розглянутих алгоритмів. У процесі порівняння основних алгоритмів MPPT встановлено, що інтелектуальні алгоритми мають ряд переваг над базовими. Але реалізація таких алгоритмів є комплексною і потребує більших обчислювальних ресурсів, що донедавна становило істотну проблему.

Ключові слова: автономні електричні мережі; алгоритми відстежування максимальної потужності; електроенергетичні системи; ефективність; порівняльний аналіз; сонячні панелі; топології перетворювачів; точка максимальної потужності; фотоелектричні перетворювачі; фотоелектричні системи.

Рис.: 13. Табл.: 1. Бібл.: 30.

Актуальність теми дослідження. Нині в Україні є проблема забезпечення сталого електропостачання, спричинена терористичною діяльністю підступної країни-сусіда. Така ситуація підтверджує необхідність розвитку альтернативної енергетики та її інтеграції в електричну мережу країни [1] з метою її оновлення та еволюційного перетворення у гнучко пов'язану сукупність автономних електричних мереж (АЕМ). Залежно від розміру АЕМ поділяють на Nanogrid, Microgrid, Minigrid [2]. Стационарні сонячні електричні станції (СЕС), що складаються з масиву сонячних панелей (СП) – одні з найбільш вагомих складових АЕМ, які в разі відключення (руйнування) зовнішньої електромережі здатні забезпечити автономне електроживлення від одного приватного господарства до мережі об'єктів критичної інфраструктури.

Постановка проблеми. АЕМ на основі СП мають свої недоліки, основний серед яких – невисока ефективність перетворення сонячної енергії в електричну. Він є наслідком динамічної та нелінійної генерації енергії в СП. У цьому легко впевнитись, знявши ват-амперну або вольт-амперну характеристику (ВАХ) СП. Вплив чинять такі фактори: зміна рівня сонячного освітлення протягом доби та пори року, зміна температури поверхні СП, повне або часткове затінення СП, внутрішній опір СП тощо [3]. Підключення СП як джерела живлення безпосередньо до навантаження призведе до ще менш ефективного перетворення енергії через неузгодження імпедансів. Це унеможливить оптимальне використання енергетичного ресурсу СП. Таким чином, постає необхідність у створенні та розвитку технологій, які дозволяють перетворювати сонячну енергію в електричну більш ефективно (з меншими втратами). Однією з таких парадигм є стеження за точкою максимальної потужності СП – *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). MPPT втілено в багатьох методах та алгоритмах, що враховують зміни факторів навколишнього середовища, фізичні процеси всередині СП та характер навантаження.

За способом інтеграції в АЕМ на основі СП, блоки МРРТ поділяють на централізовані (Centralized МРРТ, СМРРТ), де єдиний блок підключається до масиву СП (які через безліч факторів працюють у неоднакових режимах), та розподілені (Distributed МРРТ, ДМРРТ), де кожний блок підключається до окремої СП. Зважаючи на використання авторами структури та потужність АЕМ, у цій роботі під терміном МРРТ буде розглядатись саме ДМРРТ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. СП складається з послідовно з'єднаних напівпровідникових комірок, які перетворюють енергію сонця в електричну, за допомогою фотоелектричного ефекту. Комірку СП можна представити за допомогою еквівалентної електричної схеми (рис. 1). Така «однодіодна» схема є широко використовуваною і відносно точною для моделювання СП [4].

Як можна побачити (рис. 1), в ідеальному випадку еквівалентна схема складається з джерела струму I_{ph} та паралельно включеного з ним діоду D . Струм джерела I_{ph} відповідає струму, який генерується під час потрапляння фотонів на поверхню комірки. Діод D уособлює напівпровідник, з якого виготовлена комірка, і через який протікає струм I_d , який в свою чергу можна знайти за формулою (1):

$$I_D = I_o \cdot \left(\exp\left(\frac{q}{kT} \cdot v_l\right) - 1 \right), \tag{1}$$

де I_o – зворотний струм насичення; q – заряд електрона; k – стала Больцмана; T – абсолютна температура комірки; v_l – вихідна напруга ідеальної комірки.

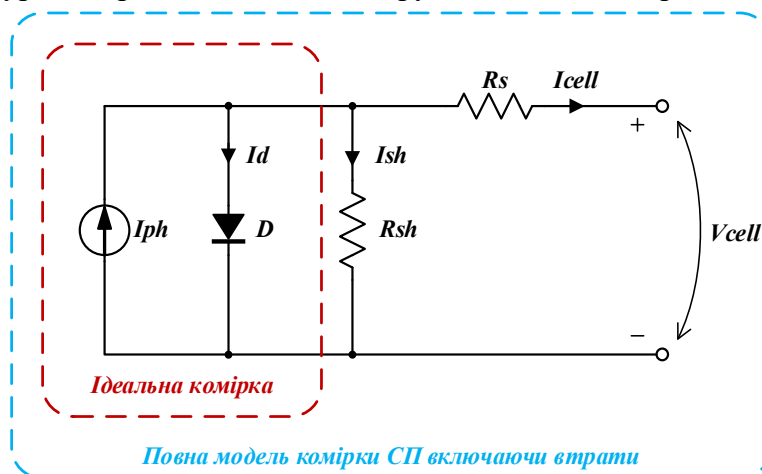


Рис. 1. Еквівалентна схема комірки сонячної панелі

Вихідний струм ідеальної комірки отримується за формулою (2).

$$i_l(v_l) = I_{ph} - I_D, \tag{2}$$

де i_l – вихідний струм ідеальної комірки.

Підставивши (1) у (2) отримаємо повне рівняння ВАХ ідеальної СП [5]:

$$i_l(v_l) = I_{ph} - I_o \cdot \left(\exp\left(\frac{q}{kT} \cdot v_l\right) - 1 \right), \tag{3}$$

Наведені вище залежності стосувалися ідеального випадку. Розглянемо реальну модель з урахуванням втрат. Можна помітити (рис. 1), що в схемі наявні опори R_s та R_{sh} , які впливають на вихідний струм, вносячи певні втрати. Послідовний опір R_s виникає при з'єднанні комірок між собою, а паралельний опір R_{sh} моделює струм витоку [6]. Враховуючи ці опори, формула вихідного струму буде такою:

$$I_{cell}(V_{cell}) = I_{ph} - I_D - I_{sh}, \tag{4}$$

де I_{cell} та V_{cell} – вихідний струм та вихідна напруга комірки СП; I_{sh} – струм витоку.

Формула струму діода I_d (1) зміниться:

$$i_D = I_o \cdot \left(\exp \left[\frac{q}{k \cdot T \cdot N_s \cdot m} \cdot (V_{cell} + I_{cell} \cdot R_s) \right] - 1 \right), \quad (5)$$

Також виділяють поняття термічної напруги V_t , що описується виразом (6):

$$V_t = \frac{k \cdot T \cdot N_s \cdot m}{q}, \quad (6)$$

де N_s – кількість послідовно з'єднаних комірок; m – фактор ідеальності р-п переходу, що залежить від матеріалу напівпровідника з якого виготовлена комірка СП, і набуває значення від 1.2 до 6.0 (наприклад $m = 1.2$ відповідає керамічному монокристалу) [7].

Струм, який протікає через резистор R_{sh} , визначається за формулою (7):

$$I_{sh} = \frac{V_{cell} + I_{cell} \cdot R_s}{R_{sh}}, \quad (7)$$

Фотострум I_{ph} , який залежить від температури комірки й величини сонячної інсоляції та зворотний струм насичення діода I_o знаходяться за формулами (8) та (9) [7]:

$$I_{ph} = \left[I_{sc} + K_i \cdot (T - T_{ref}) \right] \cdot \frac{G}{G_{ref}}, \quad (8)$$

де I_{sc} – струм короткого замикання; K_i – коефіцієнт зміни світлового потоку залежно від температури; T – абсолютна температура комірки; T_{ref} – опорна температура; G – значення освітленості; G_{ref} – опорне значення освітленості;

$$I_o(T) = I_{o(T_{ref})} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^2 \cdot \exp \left[\frac{E_q}{V_t} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}} - 1 \right) \right], \quad (9)$$

де E_q – енергія забороненої зони напівпровідникового матеріалу; $I_{o(T_{ref})}$ – зворотний струм насичення діода при температурі T_{ref} .

Нижче зображені вихідні характеристики СП: вольт-амперна (I-V) та ват-амперна (P-V), а також їх залежність від рівня інсоляції (рис. 2) і температури (рис. 3). Графіки змодельовані у MATLAB для СП моделі VERTEX TSM-DE18M(II) 490W.

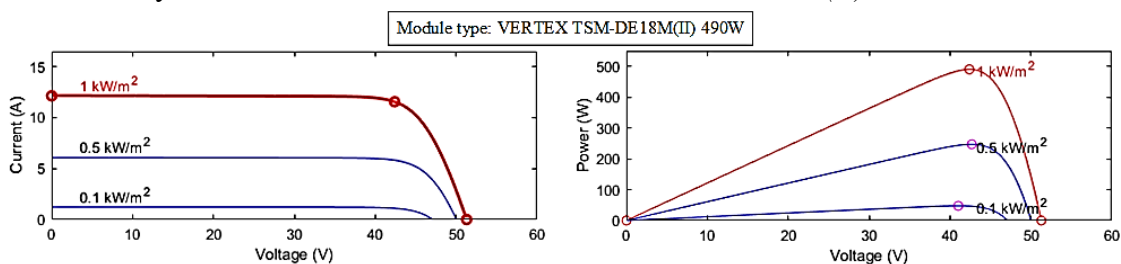


Рис. 2. Вихідні характеристики СП залежно від рівня інсоляції

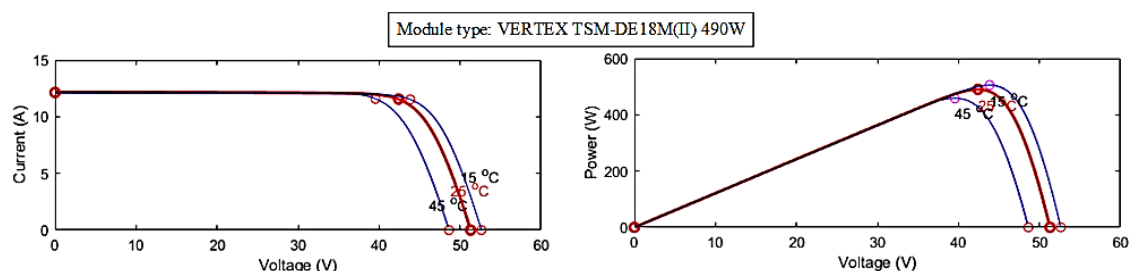


Рис. 3. Вихідні характеристики СП залежно від температури

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Розглянемо структуру АЕМ (рис. 4) та її складові. СП (*PV-panel*), або частіше їх масив (*PV-array*), є джерелом енергії для АЕМ. Вони перетворюють сонячну енергію в електричну завдяки явищу фотоефекту. Безпосередньо до виходу масиву СП послідовно включено блок *MPPT*, задача якого – відбір максимальної потужності від СП, тобто слідкування за узгодженням (збігом) вихідного імпедансу СП зі вхідним імпедансом перетворювача напруги (*DC-DC* або *DC-AC*).

Інвертор напруги (*DC-AC*) формує змінну синусоїдальну напругу з постійної, що дає можливість заживити відповідні побутові та промислові пристрої, або (за наявності вузла синхронізації *AC-Grid Sync*) постачати електричну енергію в зовнішню централізовану мережу. За несприятливих погодних умов та одночасної наявності мережевого живлення, інвертор напруги, який має функцію реверсування напрямку перетворення (*Bidirectional*), може живити внутрішню мережу АЕМ та підзаряджати блок акумуляторних батарей (*Accumulator Batteries*, АКБ).

Контролер заряду АКБ (*Bidirectional Charger*) дотримується специфічного для хімічного типу АКБ режиму заряджання (постійним струмом, постійною напругою) та балансує заряд між її комірками (*Battery Management System*, *BMS*). Це забезпечує наявність резервного джерела енергії в разі одночасної відсутності живлення у зовнішній мережі та поганих погодних умов для генерації за рахунок СП. Особливу увагу на початку формування АЕМ необхідно приділяти вибору акумуляторних батарей. Авторами [8; 9] було проведено огляд і порівняння свинцево-кислотних, нікель-кадмієвих, нікель-метал-гідридних, літій-іонних, літій-залізо-фосфатних АКБ. У роботі [30] розглянуто стійкість комбінованої системи накопичення енергії на основі суперконденсатора та акумуляторної батареї.

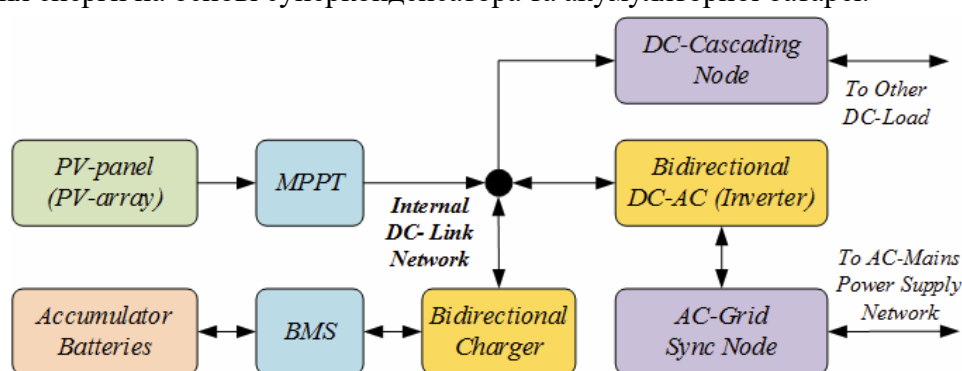


Рис. 4. Узагальнена структура АЕМ на основі СП

Основною функціональною підсистемою в АЕМ є силова частина, і більшість її блоків під'єднано до внутрішньої силової ланки постійного струму (*Internal DC-link Network*). Завданням контролера всієї АЕМ є підтримка напруги в цій ланці стабільною, що забезпечується тими чи іншими блоками, залежно від режиму роботи. Також саме постійну напругу зручно використовувати для каскадування АЕМ з метою нарощування їх потужності (*DC Cascading Node*).

Мета статті. Враховуючи різноманітність існуючих топологій та методів *MPPT*, метою даної роботи є огляд топологій перетворювачів, класифікація алгоритмів *MPPT* та їх порівняльний аналіз за критеріями: набір датчиків, обчислювальна складність, швидкість відстежування, точність відстежування, собівартість, обсяг використаної пам'яті, стабільність, ефективність.

Виклад основного матеріалу. Враховуючи вищезазначене та природу СП, саме перетворення постійної напруги лежить в основі більшості блоків АЕМ, зокрема, блоку *MPPT*, тому надалі розглянемо та порівняємо основні топології *DC-DC* перетворювачів.

Топології схем силової частини *MPPT*. Базовими топологіями *DC-DC* перетворювачів є безтрансформаторні підвищуючий (*Boost Converter*, рис. 5А) та понижуючий (*Buck Converter*, рис. 5В). *Buck Converter* побудований таким чином, що вихідна напруга

V_{out} (напруга навантаження R_{load}) не перевищує вхідну напругу V_s . Boost Converter працює навпаки і для нього V_{out} вище V_s . Також існує інвертуюча топологія (Inverting Buck-Boost Converter, рис. 5C), яка дозволяє отримувати полярність вихідної напруги протилежну відносно вхідної.

Понижучо-підвищуючий перетворювач (Non-Inverting Buck-Boost Converter, рис. 5D) поєднує властивості Buck- і Boost- перетворювачів. Тобто, якщо необхідно отримати на виході, наприклад, $V_{out} = 24$ В, а вхідна напруга V_s змінюється в межах від 20 В до 30 В, то коли $V_s > V_{out}$, перетворювач працює в Buck-режимі, а якщо $V_s < V_{out}$ – у Boost-режимі.

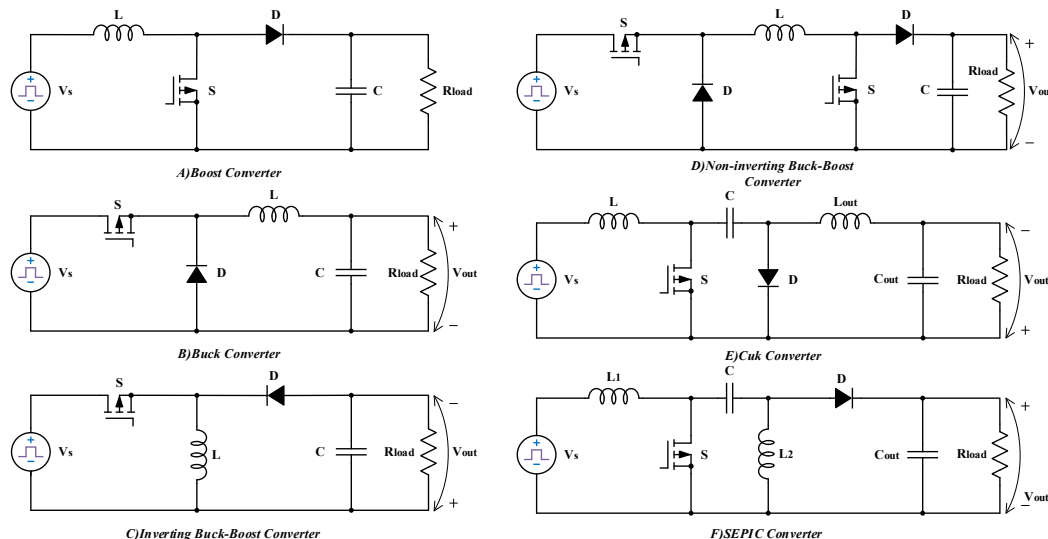


Рис. 5. Топології DC-DC перетворювачів, що можуть бути використані як силова частина для МРРТ

Cuk Converter (рис. 5E) утворений каскадуванням частин Boost- та Buck-перетворювачів через розділяючу ємність. Подібно до Inverting Buck-Boost, він інвертує полярність вихідної напруги відносно вхідної. Разом з тим, подібно до Non-Inverting Buck-Boost перетворювача, може як підвищувати, так і знижувати напругу за модулем, але на відміну від нього, має низькі пульсації вхідного та вихідного струмів.

SEPIC Converter (рис. 5F) також працює в Buck- та Boost- режимах, має низькі пульсації вхідного струму, але вищі пульсації вихідного струму [10]. Cuk та SEPIC перетворювачі можуть забезпечити вищий граничний коефіцієнт перетворення по напрузі, ніж звичайний Buck-Boost. В роботі [11] детально розглянуто і проведено порівняльний аналіз та моделювання топології: Buck-Boost, Cuk та SEPIC.

Аналізуючи реальні зразки МРРТ, помічено, що здебільшого використовується підвищуючий DC-DC перетворювач або його модифікації, оскільки він має властивості записання надлишку відібраної енергії у вихідній ємності, можливість забезпечити неперервний вхідний струм та вищий ККД у широкому діапазоні регулювання. Вища напруга на виході дозволяє забезпечувати необхідну потужність меншим струмом.

Удосконаленнями для топології Boost-перетворювача з метою покращення тих чи інших його характеристик залежно від застосування є: синхронний (з активним випрямлячем), з чергуванням фаз, квазірезонансний та квазіімпедансний. Дані топології перетворювачів, представлені нижче (рис. 6).

Synchronous Boost Converter на перший погляд ускладнюється тим, що треба керувати двома ключами S1 і S2. Сигнал на S2 має бути інвертованим до S1. Ці сигнали мають бути синхронні. Потрібно унеможливити випадок, коли S1 і S2 одночасно перебувають в однакових станах, адже це призведе до виходу із ладу схеми або навантаження. Втрати на MOSFET-ключі S2 будуть значно меншими, ніж на діоді D у звичайного Boost-перетворювача.

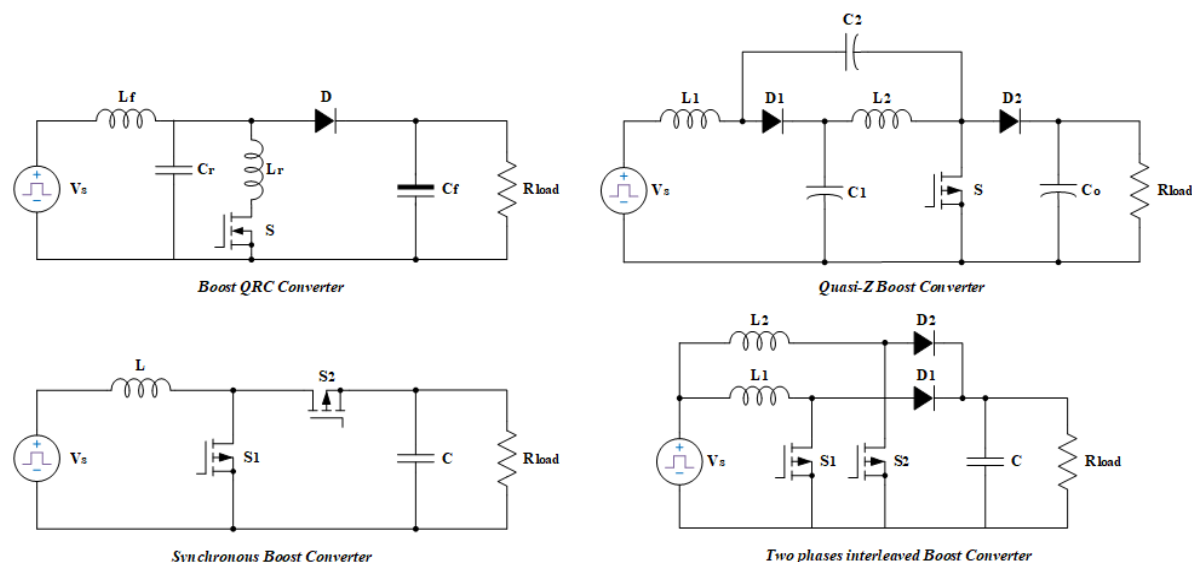


Рис.. 6. Модифіковані топології підвищувальних DC-DC перетворювачів, що можуть бути використані як силова частина для МРРТ

Two-Phase Interleaved Boost Converter дозволяє розширити діапазон перетворюваних напруг. Такий перетворювач має значно менші пульсації струмів, більшу ефективність перетворення і кращу динаміку. Індуктивності L_1 та L_2 можуть бути як окремими, так і магнітно-зв'язаними (на спільному осердді).

Quasi-resonant Boost Converter (QRC) – шляхом комутації при нульовому струмі та/або напрузі значно зменшуються втрати енергії в ключі, що дозволяє підвищити частоту комутації, зменшити габарити реактивних компонентів та покращити (звужити) спектральний склад як циркулюючих, так і відібраних в живлячій мережі напруг та струмів. Недоліками є ускладнений розрахунок та налаштування через наявність резонансного контуру та додаткової схеми контролю для забезпечення “м’якої” комутації ключа, а також необхідність більш ретельного вибору компонентів. Статичні та динамічні характеристики розглянуті та змодельовані у [12], [13].

Quasi-impedance Boost Converter (QZ) – завдяки наявності імпедансної ланки ефективно працює в досить широкому діапазоні входних напруг та струмів, адже може оперувати і як джерело напруги, і як джерело струму з метою узгодження імпедансу з вихідним навантаженням, що забезпечує максимальну відібрану потужність. За певних удосконалень [14] QZ може працювати і в двонаправленому режимі, тобто передавати потужність зі входу до виходу, і навпаки. Подібно до QRC, QZ також реалізовує варіант «м’якої» комутації ключа, зменшуючи втрати на перемикання, що своєю чергою підвищує ККД, та дозволяє отримати менші пульсації струму [15].

Керування будь-якою з наведених вище топологій зводиться до керування силовими ключами S для підтримки постійного значення вихідної напруги. Для цього необхідно змінювати значення коефіцієнта заповнення D в ШІМ (або частоту між імпульсами в ЧІМ). Саме в цьому полягає задача МРРТ-контролера на основі специфічних алгоритмів слідування та ланок систем автоматичного керування (наприклад, PI- та/або PID-регуляторів). МРРТ-контролери швидше і якісніше відпрацьовують, ніж звичайний DC-DC перетворювач без функції МРРТ (лише з функцією стабілізатора напруги та/або струму) в умовах, коли їх вхідна напруга (вона ж – вихідна напруга СП) специфічно коливається через погодні умови.

Аналіз різновидів алгоритмів МРРТ. Проаналізуємо та проведемо класифікацію основних алгоритмів МРРТ. На рис. 7 зображена узагальнена схема підключення СП до навантаження з використанням МРРТ-контролера [16].

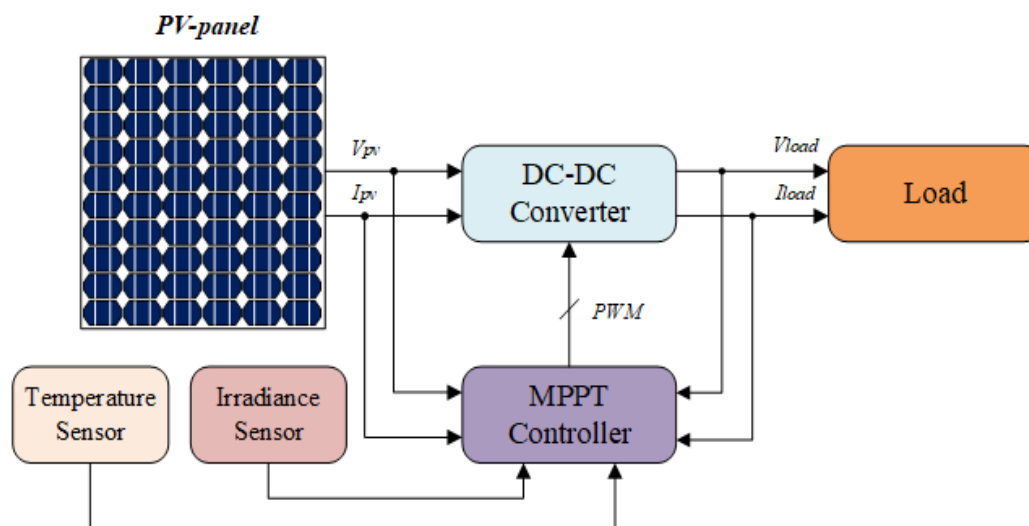


Рис. 7. Узагальнена структурна схема СП з MPPT-контролером

Як бачимо, для повноти контролю необхідний набір додаткових датчиків, а саме для визначення актуального значення температури та освітленості СП. Напруга та струм СП виступають як опорні значення, а напруга та струм навантаження – як вектор сигналів зворотного зв'язку. Конфігурація та кількість датчиків може різнитися залежно від обраного алгоритму MPPT та наявних конструктивних та/або фінансових обмежень.

Вимірювання напруги та струму на виході СП не є складною задачею. Достатньо використовувати спеціалізовані мікросхеми операційних підсилювачів (ОП) в поєднанні з зовнішнім або вбудованим в мікроконтролер (МК) аналого-цифровим перетворювачем (АЦП). Але вимірювання температури та рівня інсоляції, потребує більшої уваги розробників. У простішому випадку можна вимірювати загальну температуру навколишнього середовища поблизу СП за допомогою звичайного цифрового датчика температури. Рівень освітленості можна вимірювати за допомогою невеликої каліброваної фотоелектричної комірки зі схемою перетворювача на основі декількох ОП та оцифрування на основі МК (рис. 8). Це може бути саморобний датчик [17], або дорожче готове комерційне рішення. Метеорологічні станції та порівняння різних методів вимірювання освітленості опрацьовані в роботі [18].

Проте складність виникає в точному вимірюванні температури фотоелементів та освітленості тому, що ці параметри можуть бути нерівномірно розподіленими по всій поверхні СП. Наприклад, якщо ми маємо датчик інсоляції (рис. 8), встановлений поряд зі СП та його фотоелемент затінить хмара, а поверхня СП навпаки буде без затінення, то вимірне значення освітленості буде некоректним. В ідеалі було б доречним знати рівень освітленості та температуру кожної фотоелектричної комірки.



Рис. 8. Датчик освітленості SPEKTRON 485mb Digital Irradiance Sensor SI-RS485

Автори [19], [20] пропонують подібні загальні класифікації для МРРТ алгоритмів. Розподілимо їх на три групи, та проаналізуємо по два алгоритми з кожної:

1. Априорні алгоритми (на основі константних обмежень). Дані алгоритми шукають точку МРР на основі документальних або табличних константних значень параметрів та характеристик СП. До них належать Constant Voltage Tracking, Open-Circuit Voltage Tracking, Short-Circuit Current Tracking, Current Scanning Method, Curve-Fitting Method, Look-up Table Method [20].

2. Апостеріорні алгоритми (на основі поточних вибірок даних). Дані алгоритми проводять вимірювання вихідних значень СП та безпосередньо контролюють МРРТ. Вони прості у реалізації, і через це знаходять широке використання. До них належать Perturb & Observe, Incremental Conductance, Parasitic Capacitance, Ripple Correlation Control, Photovoltaic Array Combination, Actual Measurement, Voltage Feedback, Power Feedback [19].

3. Інтелектуальні алгоритми. Дані методи базуються на інтелектуальних алгоритмах, які більш ефективно враховують нелінійності в системі. До них належать Fuzzy Logic Control, Artificial Neural Network Control, Sliding Mode Control, Biological Swarm Chasing Algorithm [19].

Open-Circuit Voltage Tracking (OCVT)-алгоритм. OCVT алгоритм базується на тому, що вихідну напругу СП V_{pv} в точці МРР можна вважати пропорційною напрузі холостого ходу (XX) СП V_{oc} з коефіцієнтом K_{oc} . Тобто напруга в точці МРРТ V_{mpp} :

$$V_{mpp} = K_{oc} \cdot V_{oc}, \quad (10)$$

Для реалізації OCVT потрібно відключати СП від навантаження, вимірювати V_{oc} , розрахувати V_{mpp} та перепід'єднати СП до навантаження з уже налаштованим новим номінальним значенням напруги V_{ref} . Коефіцієнт K_{oc} обирається в діапазоні від 0,7 до 0,8. Хоча сам метод є простим у використанні, саме підбір оптимального значення K_{oc} є проблемним. Також до недоліків варто віднести те, що з певною періодичністю необхідно від'єднувати СП від навантаження для заміру значення V_{oc} .

Short-Circuit Current Tracking (SCCT)-алгоритм. SCCT алгоритм подібний до попереднього OCVT алгоритму, але базується на тому, що струм короткого замикання (КЗ) I_{sc} , який змінюється внаслідок зміни погодних умов (передусім, освітленості), в точці МРР можна вважати пропорційним струму I_{sc} :

$$I_{mpp} = K_{sc} \cdot I_{sc}, \quad (11)$$

Коефіцієнт пропорційності K_{sc} менше ніж 1,0 і залежить від моделей та матеріалів СП (наприклад, $K_{sc} = 0,85$ для полікристалічних СП). Даний алгоритм реалізується подібно до OCVT, але після від'єднання СП від навантаження, необхідно замикати вихідні контакти СП і вимірювати струм I_{sc} , наприклад, за допомогою шунта.

В алгоритмах OCVT та SCCT операції від'єднання СП від навантаження для вимірювання напруги XX та струму КЗ можна автоматизувати за допомогою пари реле, таймеру часу та двох вільних каналів АЦП.

Perturb&Observe (P&O) алгоритм. Даний алгоритм, напевно, найбільш розповсюджений в публікаціях, присвячених дослідженню МРРТ через свою простоту та ефективність роботи за сприятливих умов. У назві закладено основний принцип – *спостерігаємо* за величиною вихідної потужності P_{pv} , за необхідності *втручаємося* і вносимо корективу до опорної напруги V_{ref} на фіксовану величину для подальшого обчислення коефіцієнта заповнення ШІМ для DC-DC перетворювача, опісля повторюємо вищезгаданий процес. На рис. 9 проілюстровано схему P&O-алгоритму.

У кожному одиницю часу t дискретизації вимірюємо значення струму I_{pv} та напруги V_{pv} з СП, на основі яких розраховуємо вихідну потужність P_{pv} і проводимо порівняння з попереднім вимірюванням, на основі порівняння робимо крок ($Step$) – збільшуємо або зменшуємо значення опорної напруги V_{ref} на фіксовану величину. У такий спосіб алгоритм намагається знайти та утримувати точку MPP на P-V характеристиці.

З вищеприведеного випливають логічні недоліки такого методу відстежування, які впливають на якість вихідних параметрів та швидкість досягнення точки MPP. Передусім це наявність пульсацій біля точки MPP, величина яких може бути пропорційна до кроку $Step$. При збільшенні кроку пульсації будуть великими. При зменшенні кроку пульсації стануть меншими, але знизиться швидкість виходу на точку MPP [21]. Також відома проблема, коли за стрімкої зміни освітленості (наприклад, під час затінення хмарами) відбувається відстежування точки MPP у неправильному напрямку [22].

Для усунення недоліків класичного P&O-алгоритму вдаються до різних модифікацій. Найлегші шляхи – модифікувати та покращити вихідну характеристику за рахунок спостереження за додатковим параметром – зміною струму ΔI_{pv} . Також можна використовувати залежно від знаку зміни потужності ΔP_{pv} одиничний або подвійний крок, що запропоновано в [23]. Існує дещо складніший варіант модифікації P&O-алгоритму [24], де за допомогою генетичного алгоритму розраховуються коефіцієнти PID-регулятора, який своєю чергою регулює та оптимізує величину кроку для P&O. Це дозволяє ефективніше відпрацьовувати раптові зміни освітленості, а також зменшувати пульсації на виході в порівнянні зі звичайним P&O.

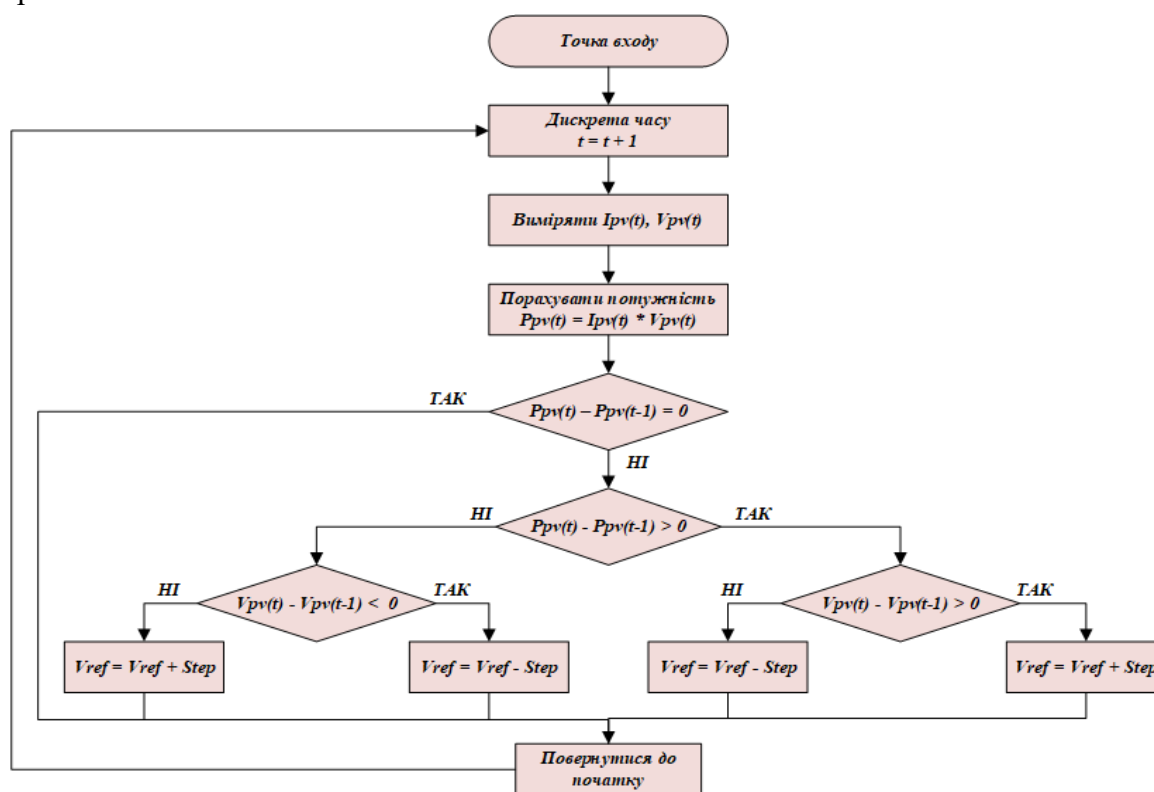


Рис. 9. Схема P&O-алгоритму

Incremental Conductance (InC)-алгоритм. Він поширений не менше, ніж P&O-алгоритм, та є дещо схожим у сенсі порівняння двох величин і відповідної зміни опорного значення напруги. Схема InC-алгоритму наведена на рис. 10.

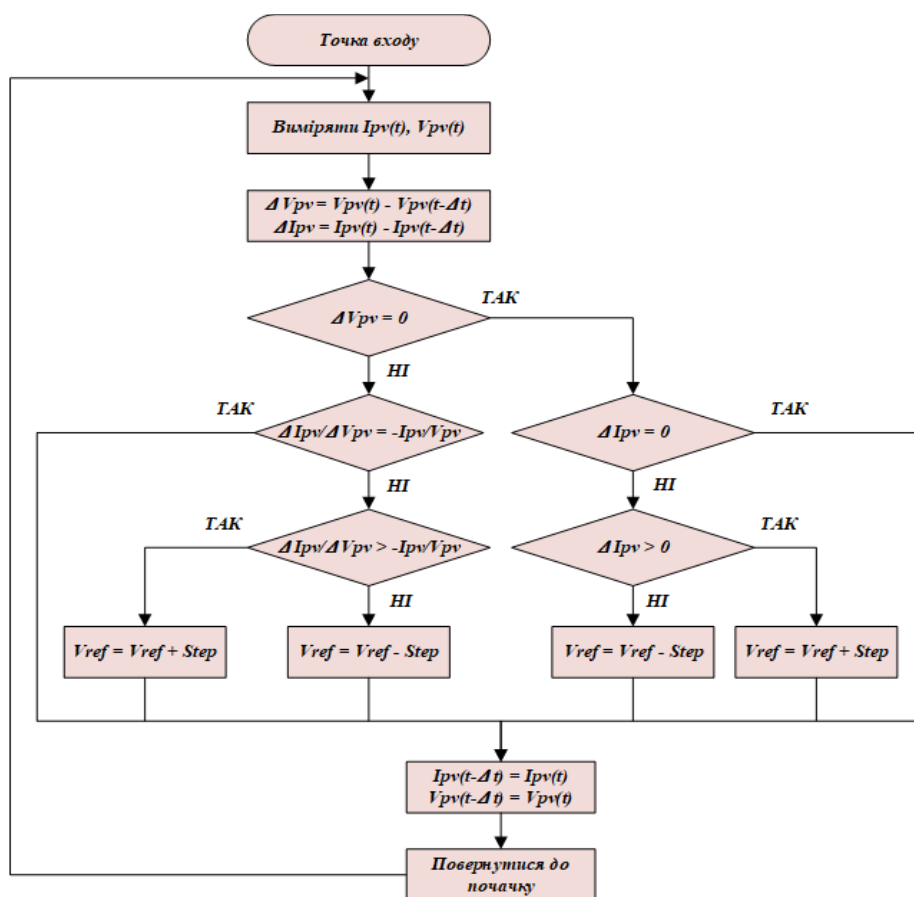


Рис. 10. Схема InC-алгоритму

InC-алгоритм базується на диференціюванні потужності СП по напрузі. Якщо результат такого диференціювання рівний нулю (або близький до нього), то можна вважати, що точка MPP знайдена:

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(V_{PV} \cdot I_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \cdot \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0, \tag{12}$$

Вираз (12) спрощується до рівності миттєвої та зростаючої провідності:

$$\frac{I_{PV}}{V_{PV}} = -\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}}, \tag{13}$$

Значення dV_{pv} та dI_{pv} апроксимують до таких значень ΔV_{pv} , ΔI_{pv} :

$$dV_{PV}(t_2) \approx \Delta V_{PV}(t_2) = V_{PV}(t_2) - V_{PV}(t_1) \tag{14}$$

$$dI_{PV}(t_2) \approx \Delta I_{PV}(t_2) = I_{PV}(t_2) - I_{PV}(t_1) \tag{15}$$

Звідси можна отримати систему нерівностей провідності, що описує поточне положення на P-V характеристиці. Як бачимо (рис. 11), умова A системи відповідає знаходженню в точці MPP, умова B – зліва від точки MPP, а умова C – справа від неї.

На відміну від P&O-алгоритму, InC-алгоритм має нижчі пульсації біля точки MPP. При її досягненні він залишається в робочій точці (а P&O-алгоритм продовжує працювати і вносить пульсації). Також InC-алгоритм більш ефективно спрацьовує за різких змін погодних умов [25]. Найвні недоліки алгоритму приховуються в розмірі кроку, в більших обчислювальних ресурсах для диференціювання, а у випадку використання апроксимованих значень ΔV_{pv} , ΔI_{pv} замість диференційних, не буде змоги відстежувати різкі зміни освітленості. Тому застосовують різні модифікації InC-алгоритму для підвищення ефективності його використання.

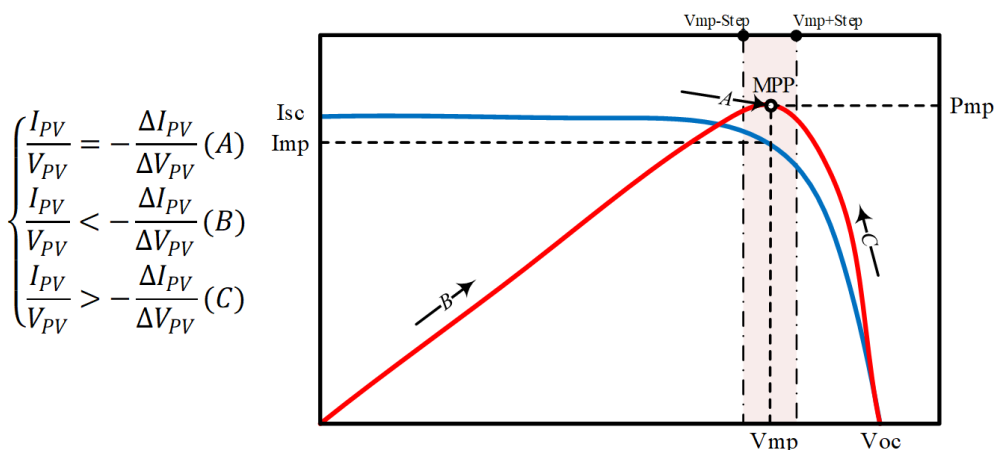


Рис. 11. Система нерівностей провідності та графіки P-V (червона крива) і I-V (синя крива) для СП

Fuzzy Logic Control (FLC)-алгоритм. Даний алгоритм базується на одній із математичних концепцій теорії автоматичного керування, а саме, нечіткій логіці (Fuzzy Logic). FLC-алгоритм дозволяє ефективно працювати при значних нелінійних складових системи та широкому діапазоні збурень, що відповідає процесу перетворення сонячної енергії в електричну. До переваг FLC відносять адаптивність та швидкість роботи у випадку різкої зміни погодних умов, а також простоту реалізації, що не вимагає знання структури моделі системи для точного керування. Така система є більш надійною, ніж попередні розглянуті. FLC як алгоритм «грубого» регулювання доцільно комбінувати у використанні з іншими алгоритмами, особливо, в поєднанні зі штучними нейронними мережами [4].

Алгоритм FLC виконується в три стадії (рис. 12): *фазифікація*, проходження через *механізм виведення* на основі певного набору нечітких правил, та завершальна стадія – *дефазифікація*. На стадії фазифікації вхідні числові значення, які в межах FLC називають чіткими значеннями, проходять процес перетворення до нечітких (лінгвістичних) значень. За допомогою цих змінних визначаються *функції приналежності*. Існує п'ять типів функцій належності нормальних нечітких множин – s, π, γ, t, L, що відрізняються між собою за формою кривих, які представляють графіки цих функцій. Популярними кривим є трапецієподібна, трикутна, гауссова, сигмоїдальна, поліноміальна та інтервальна.

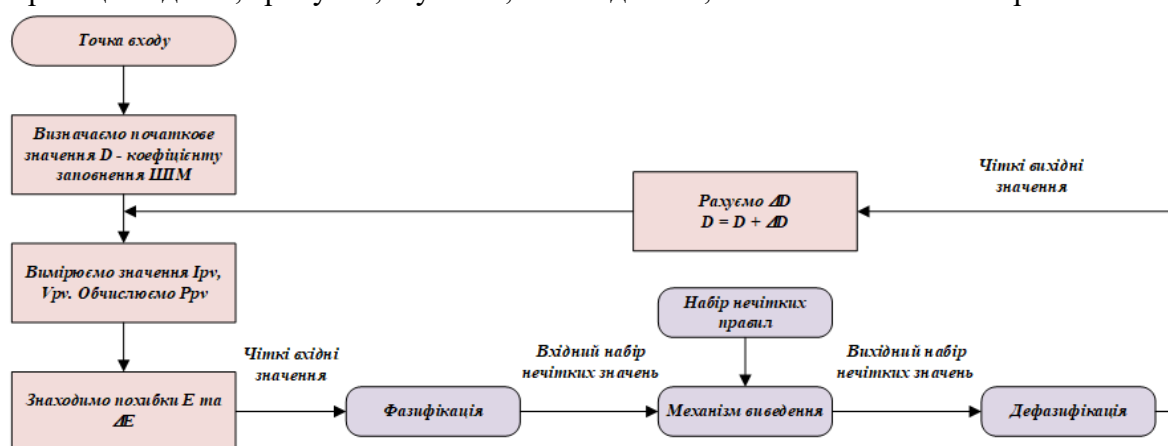


Рис. 12. Схема FLC-алгоритму

В основному, прийнято застосовувати п'ять ступенів належності для однієї лінгвістичної змінної. Якщо їх більше, то це призводить до ускладнення нечіткої системи. Якщо менше, то це зменшує точність обчислення вихідних значень [26]. Такі ступені називають Negative Big (NB), Negative Small (NS), Zero (ZE), Positive Small (PS), Positive Big (PB).

Вхідними значеннями для FLC слугують значення струму I_{pv} та напруги V_{pv} СП, у вигляді помилок E (показує нахил кривої P-V), та ΔE (показує швидкість зміни помилки E в дискретній системі). Помилка E розраховується за рівнянням (16), ΔE за рівнянням (17):

$$E(n) = \frac{V_{pv}(n) \cdot I_{pv}(n) - V_{pv}(n-1) \cdot I_{pv}(n-1)}{V_{pv}(n) - V_{pv}(n-1)} \quad (16)$$

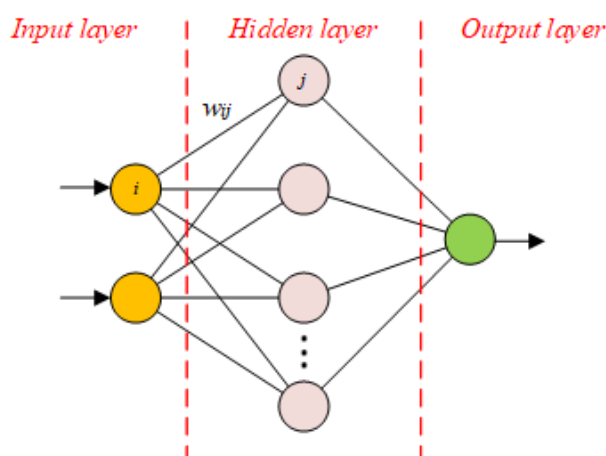
$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) \quad (17)$$

Отже, спочатку обчислюються значення E та ΔE , а далі вони під час фазифікації перетворюються на лінгвістичні значення. Ці значення за допомогою набору правил, приклад яких наведено на рис. 13, *a* визначають вихідні нечіткі значення.

Далі йде стадія дефазифікації, на якій за допомогою спеціальних дефазифікаційних методів (Mean of Maximum, Center of Gravity, Center Average), обирається оптимальне чітке значення, що є числовим значенням коефіцієнта заповнення D для ШІМ DC-DC перетворювача.

$\Delta E \backslash E$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

a



б

Рис. 13. Таблиця нечітких правил (*a*) та узагальнена структура ШІМ (*б*)

Як зазначено вище, FLC добре комбінується з іншими алгоритмами МРРТ. Так, у роботах [26], [27], [28] запропоновано та змодельовано алгоритм на основі нейронечіткої системи. Також за допомогою FLC, можна відстежувати не тільки МРР, а можливі помилки та несправності пов'язані з СП. Автори [6] визначили 8 різновидів таких несправностей та способи їх детектування за допомогою FLC.

Artificial Neural Network Control (ANNC)-алгоритм. Як випливає з назви, відстежування точки МРР здійснюється за допомогою штучної нейронної мережі (ШІМ), що складається з окремих нейронів, пов'язаних між собою за допомогою зважених зв'язків. Даний алгоритм базується на таких властивостях нейронів:

- *ваговий коефіцієнт w_{ij}* , налаштовуваний для кожного входу кожного нейрона, що може збуджувати (посилювати, $w_{ij} > 0$), гальмувати (послаблювати, $w_{ij} < 0$), або розривати (встановленням $w_{ij} = 0$) зв'язок між довільною парою нейронів i та j в сусідніх шарах;
- *нелінійна активаційна (вихідна) функція*, що може компенсувати собою нелінійність об'єкта керування, сформувати зону насичення чи зону нечутливості в нейрона. Шаблонами функцій можуть бути обрані такі: гаусіана, сигмоїда, зрізаний лінійний вузол (Rectified Linear Unit, ReLU), Softmax, Swish, порогова, гіперболічний тангенс тощо.

Вектор вхідних значень для ШІМ можуть утворювати як напруги та струми СП, так і температура та освітленість. Структура ШІМ (рис. 13 б), складається з трьох шарів:

вхідний шар (input layer), прихований шар (hidden layer), вихідний шар (output layer). На основі великої вибірки вхідних і необхідних вихідних значень ШНМ зважає зв'язки між вузлами за допомогою процесу *навчання (тренування) ШНМ* з метою конкретизації математичної моделі процесу, яким вона керуватиме. Під час навчання в створеному багатовимірному просторі рішень будується січна поверхня, задача якої – відділяти «правильні» рішення від «неправильних». Порядок такої поверхні залежить від кількості шарів нейронної мережі, а кількість вимірів простору – від кількості вхідних величин. Навчання ШНМ може займати багато часу залежно від обраної кількості нейронів у прихованому шарі, що також впливає на точність результату.

Процес навчання забезпечується алгоритмами, серед яких Supervised Learning, Unsupervised Learning, Reinforcement Learning, Deep Learning, Semi-supervised Learning, Transfer Learning, Supervised Reinforcement Learning та ін. Для *оптимізації навчання* ШНМ існує безліч алгоритмів, зокрема, зворотного розповсюдження помилки, гібридний, градієнтного спуску, Newton's Method, Levenberg-Marquardt algorithm, ADAM (Adaptive Moment Estimation), RMSprop, Rectified ADAM, Lookahead, AdaBelief. У статті [29] запропоновано модифікацію алгоритму Adam, та проведено порівняння з деякими вище зазначеними алгоритмами оптимізації (RMSprop, AdaBelief, Adam). Важливою є оцінка часу тренування ШНМ, хоча це є складною задачею. Вона залежить від багатьох факторів і параметрів (обсяг даних, складність моделі (структура ШНМ, кількість шарів), обраний алгоритм оптимізації, обчислювальна потужність системи).

Запропоновано ANN-алгоритм [22] на основі **двох** ШНМ. Перша за вхідними значеннями температури, напруги та струму СП розраховує значення освітленості, що разом з температурою є вхідним значенням для другої ШНМ. У результаті на виході отримують опорне значення напруги. Так можна заощадити на датчиках освітленості, вартість яких може перевищувати всю систему керування. В роботі [21] проведено порівняння ANN-алгоритму з найбільш простими та поширеними P&O та InC. Шляхом симуляцій показано, наскільки ефективно і якісно відпрацьовує ANN-алгоритм.

Результати аналітичного порівняння. На основі проведеного вище аналітичного огляду складено порівняльну таблицю для розглянутих алгоритмів МРРТ. Для порівняння було обрано такі якісні критерії:

1. Набір датчиків. Кількість та тип основних датчиків, що формуватимуть вектор вхідних параметрів для МРРТ-контролера. V – датчик напруги, I – датчик струму, T – датчик температури навколишнього середовища та/або СП, G – датчик освітленості;

2. Обчислювальна складність. Показує, яку кількість інструкцій мікропроцесора (та їх різновидів) необхідно витратити на виконання однієї ітерації алгоритму. Доцільно порівнювати алгоритми на одній апаратній платформі. Наприклад, в алгоритмі P&O необхідно лише вимірювати V та I , обраховувати значення потужності та порівнювати його з попереднім. У випадку InC необхідно робити те саме, але з додатковим чисельним диференціюванням, що значно підвищує обчислювальну складність;

3. Швидкість відстежування МРР. Цей критерій показує, яку кількість ітерацій алгоритму МРРТ необхідно виконати для знаходження нової МРР за різких збурень, що змінили режим генерації в СП. Суттєво зростає за умови частих та раптових затінь;

4. Точність відстежування МРР. Визначає, наскільки знайдене алгоритмом значення МРР відрізняється від реального значення. Залежить від апаратних можливостей підсистеми вимірювання, повноти опису моделі СП та обраного кроку в алгоритмі;

5. Собівартість. Вартість компонентів системи та складність її виготовлення, складність реалізації алгоритму і витрачений на нього час розробників;

6. Обсяг використаної пам'яті. Кількість постійної та оперативної пам'яті, необхідної для реалізації алгоритму та здійснення обчислень мікропроцесорною системою;

7. Стабільність. Визначає здатність блоку МРРТ забезпечувати навантаження максимально можливою потужністю в умовах різкої зміни збурюючих факторів або невизначеності поведінки навантаження (робастність). Складовими стабільності МРРТ-алгоритму також є: плавність (поступове, але безперервне коригування МРР) та збіжність (направлене відшукування точки МРР, коли кожна наступна ітерація покращує результати попередньої).

Таблиця – Результати порівняння МРРТ алгоритмів

Назва алгоритму	Набір датчиків	Обчислювальна складність	Швидкість відстежування	Точність відстежування	Собівартість	Обсяг використаної пам'яті	Стабільність	Ефективність
Апріорні алгоритми								
OCVT	<i>V</i>	Низька	Низька	Низька	Низька	Низький	Низька	<90%
SCCT	<i>I</i>	Низька	Низька	Низька	Низька	Низький	Низька	<90%
Апостеріорні алгоритми								
P&O	<i>V</i> та <i>I</i>	Низька	Середня	Середня	Середня	Низький	Низька	>95%
InC	<i>V</i> та <i>I</i>	Середня	Середня	Середня	Середня	Низький	Середня	>97%
Інтелектуальні алгоритми								
FLC	<i>V</i> та <i>I</i>	Висока	Висока	Висока	Висока	Високий	Дуже висока	>98%
ANNC	<i>V, I, G, T</i>	Дуже висока	Висока	Висока	Висока / Дуже висока	Дуже високий	Дуже висока	>98%

Для якісних критеріїв обрано ступені оцінки – **низький, середній, високий, дуже високий**. За кількісний критерій оцінювання алгоритму МРРТ обрано **ефективність (%)**, тобто здатність керувати силовою частиною перетворювача з максимально можливим для неї ККД. Коректним є порівняння ефективності алгоритмів, коли вони тестуються на одній топології перетворювача, що працює на однакове за величиною та поведінкою навантаження. На кількісний показник ефективності прямо впливають такі якісні критерії, як точність та швидкість відстежування (формують час, коли після дії збурення система не вийшла на оптимальний режим), а також стабільність.

Висновки. Підсумовуючи викладений та проаналізований у цій роботі матеріал, можна зробити наступні висновки:

1. АЕМ є комплексними системами. У цих системах необхідно проводити дослідження як окремих блоків, так і особливостей їх комбінування та взаємодії. Такі дослідження першочергово повинні бути спрямовані на підвищення загальної ефективності системи (перетворення сонячної енергії у електричну з меншими втратами), а за її досягнення – на покращення інших її параметрів (наприклад, розширення діапазону дозво-

лених напруг/струмів, пришвидшення стабілізації вихідних напруг/струмів, або ж мінімізація їх пульсацій). Надалі досліджуються шляхи здешевлення системи без втрати раніше досягнутої ефективності.

2. Значну кількість досліджень присвячено важливій складовій АЕМ-систем на основі СП – блоку МРРТ, адже він значно покращує ефективність перетворення енергії шляхом відбирання максимально можливої потужності безпосередньо від СП. В першу чергу досліджуються шляхи вдосконалення існуючих алгоритмів МРРТ (зменшення пульсацій біля МРР та підвищення швидкодії за невизначених мінливих збурень) та вибір оптимальної топології напівпровідникового перетворювача в силовій частині МРРТ (для заданих параметрів масиву СП та напруги ланки постійного струму АЕМ).

3. У процесі порівняння основних алгоритмів МРРТ встановлено, що *інтелектуальні алгоритми МРРТ* мають ряд переваг над базовими (простішими) – вищу ефективність, дуже високу стабільність, високу швидкість відстежування та точність знаходження. Але реалізація таких алгоритмів є комплексною і потребує більших обчислювальних ресурсів, що донедавна становило істотну проблему.

4. Враховуючи вичерпні дослідження алгоритмів, що спираються на класичні математичні моделі, можна припустити, що подальші дослідження будуть здебільшого спрямовані на інтелектуальні алгоритми МРРТ. Це дозволить підвищити загальну ефективність АЕМ на основі СП за рахунок розширення переліку та діапазонів факторів впливу навколишнього середовища, а також швидкого реагування на їх раптові зміни (наприклад, знаходження МРРТ в умовах часткового затінення).

Наступним важливим етапом роботи стане багатокритеріальне моделювання АЕМ, а саме її первинної ланки, яка утворена поєднанням трьох блоків – СП, МРРТ та двонаправленого DC/DC перетворювача для зарядки АКБ, де основна увага буде приділена МРРТ. Поточний матеріал слугуватиме основою для подальшої роботи.

Дане дослідження виконується в рамках науково-дослідного проекту молодих вчених «Забезпечення максимальної ефективності автономних електроенергетичних систем на основі фотоелектричних перетворювачів для спеціальних застосувань» №0123U100975 за підтримки Міністерства освіти і науки України.

Список використаних джерел

1. Yershov, R. D. Energy efficiency analysis in distributed electrical networks based on embedded system and combined calculation algorithm / R. D. Yershov, D. O. Naumov, A. S. Revko, K. O. Tytelmaier // International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF). – 2015. – Pp. 1-4. DOI: 10.1109/YSF.2015.7333224.
2. Overview of the Optimal Smart Energy Coordination for Microgrid Applications / Mbungu Nsilulu, Naidoo Raj, Bansal Ramesh, Vahidinasab Vahid // IEEE Access. – 2019. – Pp. 1-1. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2951459.
3. A novel hysteresis power point optimizer for distributed solar power generation / O. Veligorskyi, O. Husev, V. Shevchenko, K. Tytelmaier, R. Yershov, R. Kosenko, D. Vinnikov // Electrical, Control and Communication Engineering. – 2018. – Vol. 14, no. 1. – Pp. 12-22. DOI: <https://doi.org/10.2478/ecce-2018-0002>.
4. Bhukya L. Enhanced Maximum Power Point Techniques for Solar Photovoltaic System under Uniform Insolation and Partial Shading Conditions / L. Bhukya, N.R. Kedika, S.R. Salkuti // A Review. Algorithms. – 2022. – Vol. 15. – P. 365. DOI: <https://doi.org/10.3390/a15100365>.
5. A solar photovoltaic system with ideal efficiency close to the theoretical limit / Zhao Yuan, Sheng Ming-Yu, ZhouWei-Xi, ShenYan, Ertao Hu, Chen Jian-Bo, Zheng Yu-Xiang, Lee Youngpak, Lynch D., Chen Liang-Yao // Optics express. – 2012. – Vol. 20. – A28-38. DOI:10.1364/OE.20.000A28.
6. Marah Bacha. Diagnosis algorithm and detection faults based on fuzzy logic for PV panel / Marah Bacha, Amel Terki // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 51, Part 7. – Pp. 2131-2138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.490>.
7. Development software program for extraction of photovoltaic cell equivalent circuit model parameters based on the Newton–Raphson method / Adak S., Cangı H., Yılmaz A.S. et al. // J Comput Electron. – 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10825-022-01969-8>.

8. Фесенко А. П. Огляд та обґрунтування вибору акумуляторних батарей для автономної системи електроживлення на основі фотоелектричних перетворювачів / А. П. Фесенко, Р. Д. Єршов, С. А. Степенко // *Технічні науки та технології*. – 2021. – № 1(7). – Pp. 177–186.
9. Захарченко Д. Огляд та обґрунтування вибору накопичувачів електроенергії для роботи електроенергетичних об'єктів / Д. Захарченко, С. Степенко // *Технічні науки та технології*. 2021. – № 4(22). – С. 198–209. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4\(22\)-198-209](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4(22)-198-209).
10. Rudy Severns, Springtime Enterprises, Hal Wittlinger. High frequency power converters. Application Note. No. AN9208, Intersil Semiconductor. April 1994.
11. An assessment on performance of DC-DC converters for renewable energy applications / Selvam Sivakumar, Mohamed Ali Jagabar S., Manoj P.s, Sundararajan G. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 58. – Pp. 1475-1485. DOI:10.1016/j.rser.2015.12.057.
12. Static Characteristics of Zero-Current-Switching Quasi-Resonant Boost Converter under Variation of Resonant Circuit and Load Parameters / A. V. Dymerecs, A. N. Gorodny, R. D. Yershov, A. S. Revko, S. A. Stepenko // 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – Kyiv, 2022. – Pp. 357-362. DOI:10.1109/ESS57819.2022.9969266.
13. Dynamic Characteristics of Zero-Current-Switching Quasi-Resonant Boost Converter under Variation of Resonant Circuit and Load Parameters / A. V. Dymerecs, A. N. Gorodny, R. D. Yershov, Y. O. Denisov, O. Roslik, M. M. Tryputen // 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – Pp. 283-288. DOI:10.1109/ESS50319.2020.9160220.
14. Bidirectional cascaded quasi-Z-source DC-DC converter / T. Sato, T. Shimo, T. Takiguchi, H. Koizumi // *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. – Dallas, TX, USA. – 2014. – Pp. 1270-1276. DOI:10.1109/IECON.2014.7048665.
15. Review of Extended Boost qZSI Topologies for Single Phase Applications / J. G. N. Barath, A. Soundararajan, S. Stepenko, S. Padmanaban, A. Prystupa and M. Bolotov // 2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). – Riga, Latvia, 2019. – Pp. 1-8. DOI:10.1109/RTUCON48111.2019.8982342.
16. Yakushin T. V. Modeling of the photovoltaic based energy systems / T. V. Yakushin, S. A. Stepenko // *Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі»: тези доповідей*. – Чернівці : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – С. 198-199.
17. Plesz B. Low cost solar irradiation sensor and its thermal behaviour / B. Plesz, Á. Földváry, E. Bándy // *Microelectronics Journal*. – 2011. – Vol. 42, Issue 4. – Pp. 594-600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2010.06.003>.
18. GEUDER, N., et al. Comparison of different methods for measuring solar irradiation data. In: 3rd International Conference on Experiences with Automatic Weather Stations. – Torremolinos, Spain: Spanish National Meteorological Institute, 2003. – p. 19-21.
19. Classification and summarization of solar photovoltaic MPPT techniques: A review based on traditional and intelligent control strategies / Mingxuan Mao, Lichuang Cui, Qianjin Zhang, Ke Guo, Lin Zhou, Han Huang // *Energy Reports*. – 2020. – Vol. 6e – Pp. 1312-1327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.05.013>.
20. Nabil Karami. General review and classification of different MPPT Techniques / Nabil Karami, Nazih Moubayed, Rachid Outbib // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Vol. 68, Part 1. – Pp. 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.132>.
21. Gundogdu Ahmet. ANN-Based MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems / Gundogdu, Ahmet & Celikel, Resat. – 2020. – Vol. 15. – Pp. 101-110.
22. Maximum Power Point Tracking For Pv Systems Using Artificial Neural Networks / Sepulveda Tiago, Martinez Luciana, Pires André. DOI:10.20906/CPS/CBA2018-0327.
23. Belkaid A. Implementation of a modified P&O-MPPT algorithm adapted for varying solar radiation conditions / A. Belkaid, I. Colak, K. Kayisli // *Electr Eng*. – 2017. – Vol. 99. – Pp. 839–846. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-016-0457-3>.
24. Abdelghani Harrag. Variable step size modified P&O MPPT algorithm using GA-based hybrid offline/online PID controller / Abdelghani Harrag, Sabir Messalti // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – Vol. 49. – Pp. 1247-1260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.003>.
25. Xuejun Liu. An improved perturbation and observation maximum power point tracking algorithm for PV arrays / Liu Xuejun, Luiz AC Lopes // 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No. 04CH37551). – 2004. – Vol. 3. – IEEE.

26. Іванець С. А. Дослідження роботи нейронечіткої системи відстеження точки максимальної потужності фотоелектричного перетворювача / С. А. Іванець, О. В. Красножон // Технічні науки та технології. – 2016. – № 3 (5). – С. 146-155.

27. Harrag, Abdelghani. IC-based Variable Step Size Neuro-Fuzzy MPPT Improving PV System Performances / Harrag Abdelghani, Messalti Sabir // Energy Procedia. – 2019. – Vol. 157. – Pp. 362–374. DOI:10.1016/j.egypro.2018.11.201.

28. Heelan Mayada Yousif. International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE) - Design and Simulation of Neuro-Fuzzy Based MPPT Controller for PV Power System / Heelan Mayada Yousif, Al-Qrimli Fadhil Abbas M. – 2020. – Vol. 1–6. DOI:10.1109/ICECCE49384.2020.9179287.

29. Reyad Mohamed. A modified Adam algorithm for deep neural network optimization / Reyad Mohamed, Sarhan Amany, Arafa Mohammad // Neural Computing and Applications. – 2023. – Pp. 1-18. DOI:10.1007/s00521-023-08568-z.

30. Стійкість комбінованої системи накопичення енергії на основі суперконденсатора та акумуляторної батареї / О. Ф. Бондаренко, Ю. В. Кожушко, Т. О. Карбівська, Є. О. Желязков, П. С. Сафронов // Електротехніка і Електромеханіка. 2020. – № 5(11). – С. 31-37. DOI:10.20998/2074-272X.2020.5.05.

References

1. Yershov R.D., Naumov D.O., Revko A.S., & Tytelmaier K.O. (2015). Energy efficiency analysis in distributed electrical networks based on embedded system and combined calculation algorithm. *International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF)* (pp. 1-4). doi:10.1109/YSF.2015.7333224.

2. Mbungu, N. Nsilulu, B. Raj, V. Ramesh, Vahid. (2019). Overview of the Optimal Smart Energy Coordination for Microgrid Applications. *IEEE Access*, 1-1. doi:10.1109/ACCESS.2019.2951459.

3. Veligorskyi, O., Husev, O., Shevchenko, V., Tytelmaier, K., Yershov, R., Kosenko, R., & Vinnikov, D. (2018). A novel hysteresis power point optimizer for distributed solar power generation. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 14(1), 12-22. <https://doi.org/10.2478/ecce-2018-0002>.

4. Bhukya, L., Kedika, N.R., & Salkuti, S.R. (2022). Enhanced Maximum Power Point Techniques for Solar Photovoltaic System under Uniform Insolation and Partial Shading Conditions. *Algorithms*, 15, 365. <https://doi.org/10.3390/a15100365>.

5. Zhao, Y., Sheng, M.-Y., Zhou, W.-X., Shen, Y., Ertao, H., Chen, J.-B., Zheng, Y.-X., Lee, Y., Lynch, D., & Chen, L.-Y. (2012). A solar photovoltaic system with ideal efficiency close to the theoretical limit. *Optics express*, 20, A28-38. doi:10.1364/OE.20.000A28.

6. Bacha, M., Terki, A. (2022). Diagnosis algorithm and detection faults based on fuzzy logic for PV panel. *Materials Today: Proceedings*, 51(7), 2131-2138. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.490>.

7. Adak S., Cangi H., Yilmaz A. S. et al. (2022). Development software program for extraction of photovoltaic cell equivalent circuit model parameters based on the Newton–Raphson method. *J Comput Electron*. <https://doi.org/10.1007/s10825-022-01969-8>.

8. Fesenko, A.P., Yershov, R.D., & Stepenko, S. (2017). Ohliad ta obgruntuvannia vyboru akumuliatornykh batarei dlia avtonomnoi systemy elektrozhyvlennia na osnovi fotoelektrychnykh peretvoriuvachiv [A Review and justification of the choice of batteries for autonomous power supply system based on photovoltaic converters]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (1(7)), 177-186. http://nbuv.gov.ua/UJRN/tnt_2017_1_23.

9. Zakharchenko, D., & Stepenko, S. (2021). Ohliad ta obgruntuvannia vyboru nakopychuvachiv elektroenerhii dlia roboty elektroenerhetychnykh obektiv [Review and justification of the energy storage devices selection for electric power facilities operation]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (4(22)). 198-209. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4\(22\)-198-209](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4(22)-198-209).

10. Severns, R., Enterprises, S., & Wittlinger, H. (1994). High frequency power converters. *Application Note*, No. AN9208, Intersil Semiconductor, 11-178-11-186. https://www.mouser.com/pdfDocs/intersil_high_frequency_power_converters.pdf.

11. Selvam, S., Mohamed, A., Jagabar, S., Manoj, P., & Sundararajan, G. (2016). An assessment on performance of DC-DC converters for renewable energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (58), 1475-1485. doi:10.1016/j.rser.2015.12.057.

12. Dymerecs, A.V., Gorodny, A.N., Yershov, R.D., Revko, A.S., Stepenko, S.A. (2022). Static Characteristics of Zero-Current-Switching Quasi-Resonant Boost Converter under Variation of Resonant Circuit and Load Parameters. *IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. (pp. 357-362). doi:10.1109/ESS57819.2022.9969266.
13. Dymerecs, A.V., Gorodny, A.N., Yershov, R.D., Denisov, Y.O., Roslik, O., & Tryputen, M.M. (2020). Dynamic Characteristics of Zero-Current-Switching Quasi-Resonant Boost Converter under Variation of Resonant Circuit and Load Parameters. *IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)* (pp. 283-288). doi:10.1109/ESS50319.2020.9160220.
14. Sato, T., Shimo, T., Takiguchi, T., & Koizumi, H. (2014). Bidirectional cascaded quasi-Z-source DC-DC converter. *IECON 2014 : 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 1270-1276). doi:10.1109/IECON.2014.7048665.
15. Barath, J.G.N., Soundarrajan, A., Stepenko, S., Padmanaban, S., Prystupa, A., & Bolotov, M. (2019). Review of Extended Boost qZSI Topologies for Single Phase Applications. *2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. (pp. 1-8). doi:10.1109/RTUCON48111.2019.8982342.
16. Yakushin, T.V., Stepenko, S.A. (2023). Modeling of the photovoltaic based energy systems. *Newest technologies in scientific activity and educational process : Ukrainian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists : theses of reports* (pp. 198-199). Chernihiv Polytechnic National University.
17. Plesz, B., Földváry, Á., Bándy, E. (2011). Low cost solar irradiation sensor and its thermal behaviour. *Microelectronics Journal*, 42(4), 594-600. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2010.06.003>.
18. Geuder, N., Trieb, F., Schillings, C., & Meyer, R. (2003). Comparison of different methods for measuring solar irradiation data. *3rd International Conference on Experiences with Automatic Weather Stations. Torremolinos* (pp. 19-21). Spanish National Meteorological Institute.
19. Mao, M., Cui, L., Zhang, Q., Guo, K., Zhou, L., & Huang, H. (2020). Classification and summarization of solar photovoltaic MPPT techniques: A review based on traditional and intelligent control strategies. *Energy Reports*, 6, 1312-1327. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.05.013>.
20. Karami, N., Moubayed, N., & Outbib, R. (2017). General review and classification of different MPPT Techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(1), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.132>.
21. Gundogdu, Ahmet, & Celikel, Resat. (2020). ANN-Based MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems. *Turkish Journal of Science & Technology*, (15), 101-110.
22. Sepulveda, T., Martinez, L., & Pires, A. (2018). *Maximum Power Point Tracking for PV Systems Using Artificial Neural Networks*. doi:10.20906/CPS/CBA2018-0327.
23. Belkaid, A., Colak, I., & Kayisli, K. (2017). Implementation of a modified P&O-MPPT algorithm adapted for varying solar radiation conditions. *Electr Eng.*, (99), 839-846. <https://doi.org/10.1007/s00202-016-0457-3>.
24. Harrag, A., Messalti, S. (2015). Variable step size modified P&O MPPT algorithm using GA-based hybrid offline/online PID controller. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 1247-1260. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.003>.
25. Xuejun L., & Luiz A.C. Lopes. (2004). An improved perturbation and observation maximum power point tracking algorithm for PV arrays. *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No. 04CH37551)*, 3.
26. Ivanets, S.A., & Krasnozhan, O.V. (2016). Doslidzhennia roboty neironechitkoi systemy vidstezhennia tochky maksimalnoi potuzhnosti fotoelektrychnoho peretvoriuvacha [The study of work of neuro fuzzy system of tracking the point of maximum power of photovoltaic inference]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (3(5)), 146-155.
27. Abdelghani, H., Sabir, M. (2019). IC-based Variable Step Size Neuro-Fuzzy MPPT Improving PV System Performances. *Energy Procedia*, (157), 362-374. doi:10.1016/j.egypro.2018.11.201.
28. Heelan, M. Y., Al-Q., M Fadhil Abbas. (2020). International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering. *(ICECCE) Design and Simulation of Neuro-Fuzzy Based MPPT Controller for PV Power System* (pp. 1-6). doi:10.1109/ICECCE49384.2020.9179287.
29. Reyad, M., Sarhan, A., & Arafa, M. (2023). A modified Adam algorithm for deep neural network optimization. *Neural Computing and Applications* (pp. 1-18). doi:10.1007/s00521-023-08568-z.

30. Bondarenko, O.F., Kozhushko, Yu.V., Karbivska, T.O., Zheliazkov, Y.O., & Safronov, P.S. (2020). Stiiikist kombinovanoi systemy nakopychennia enerhii na osnovi superkondensatora ta akumu-liatornoi batarei [Stability analysis of hybrid energy storage based on supercapacitor and battery. *El-ektrotekhnika i Elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, (5), 31-37. doi:10.20998/2074-272X.2020.5.05.

Отримано 30.06.23

UDC 621.31:621.383

Tymofii Yakushkin¹, Roman Yershov², Serhii Stepenko³

¹PhD student at the Electrical Engineering, Information and Measurement Technologies Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: yakushkintima@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3432-9237>. SCOPUS Author ID: 57282689600

²Research Scientist, Senior Lecturer at the Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: roman.d.yershov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0267-2906>

ResearcherID: [H-1432-2016](https://orcid.org/0000-0002-0267-2906). SCOPUS Author ID: 57188719994

³PhD in Electrical Engineering, Associate Professor, Leading Research Scientist, Associate Professor
at the Electrical Engineering, Information and Measurement Technologies Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: serhii.stepenko@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7702-6776>

ResearcherID: [F-1018-2014](https://orcid.org/0000-0001-7702-6776). SCOPUS Author ID: 55570068000

COMPARATIVE ANALYSIS OF TOPOLOGIES AND ALGORITHMS FOR MAXIMUM POWER POINT TRACKERS IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Currently, there is a problem of ensuring a stable electricity supply in Ukraine, caused by the terrorist activities of an insidious neighboring country. Stationary solar power stations consisting of an array of solar panels are one of the most important components of autonomous power networks.

The main functional subsystem in autonomous electrical networks is the power part, and most of its units are connected to the internal DC power link. The task of the controller of the entire system is to keep the voltage in this link stable, which is provided by certain units, depending on the operating mode. It is also convenient to use constant voltage for cascading in order to increase power.

Taking into account the variety of existing topologies and methods of tracking the point of maximum power, the purpose of this work is to review the topologies of converters, classify MPPT algorithms and compare them according to the following criteria: set of sensors, computational complexity, tracking speed, tracking accuracy, cost, amount of used memory, stability, efficiency.

On the basis of the conducted analytical review, a comparative table was compiled for the considered algorithms. In the process of comparing the main MPPT algorithms, it was established that intelligent algorithms have a number of advantages over the basic (simpler) ones - higher efficiency, very high stability, high tracking speed and accuracy of finding. But the implementation of such algorithms is complex and requires more computing resources, which was a significant problem until recently.

Key words: *autonomous electrical networks; maximum power point tracking algorithms; electric power systems; efficiency; comparative analysis; solar panels; topologies of converters; maximum power point; photovoltaic converters; photo-voltaic systems.*

Figures: 13. Table: 1. References: 30.