

УДК 658.260

**МАРТИНЮК В.В., БОЙКО Ю.М**  
Хмельницький національний університет

## **ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА УНІВЕРСИТЕТСЬКА СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ**

**Мета.** Метою даної статті є дослідження основних аспектів підвищення ефективності роботи фотоелектричних модулів сонячної електростанції.

**Методика.** Методика дослідження передбачає використання методів збурення і спостережень, метод на основі порівняння трьох точок потужності, метод напруги холостого ходу, метод струму короткого замикання, метод контролю кореляції коливань, метод інкрементальної провідності.

**Результати.** Запропоновано метод підвищення ефективності роботи фотоелектричних модулів сонячної електростанції.

**Наукова новизна.** Запропоновано метод, який дозволяє збільшити ефективність використання фотоелектричних модулів, що забезпечить збільшення кількості генерованої електричної енергії для підвищення ефективності роботи фотоелектричних модулів сонячної електростанції.

**Практична значимість.** Результати дослідження можуть бути використані при створенні системи ефективності енергозабезпечення навчальних корпусів університетських закладів.

**Ключові слова:** фотоелектричний модуль, енергозабезпечення, університетська сонячна електростанція, електрохімічний конденсатор, акумулятор.

**Вступ.** Основні втрати енергії фотоелектричних модулів (ФМ) пов'язані з неоптимальним режимом їх роботи, зокрема для стаціонарно зафіксованих ФМ кут падіння сонячних променів більшості часу не дорівнює  $90^\circ$  [1], а існуючі методи відслідковування точки максимальної потужності (ТМП) на рівні стрінгу не вирішують проблеми оптимальної роботи кожного окремого ФМ. Для забезпечення відбору максимальної потужності від ФМ, враховуючи їхню вольт-амперну характеристику (ВАХ) і залежність потужності від напруги, використовують спеціальні засоби для відслідковування ТМП. Існує декілька основних методів пошуку ТМП [2], які відрізняються складністю, швидкістю, ефективністю, вартістю тощо і кожен з них має свої недоліки. ФМ мають складний взаємозв'язок між умовами навколишнього середовища і максимальної виробленої потужністю.

Одним з найбільш поширених є метод збурення і спостережень (Perturbation & Observation, P&O) [3], що полягає у періодичній зміні з певним кроком вихідної напруги і вимірюванні потужності. Якщо потужність збільшується - контролер продовжує змінювати напругу в цьому ж напрямку поки потужність не перестане збільшуватися. Цей метод ефективно працює тільки у повільно змінних метеорологічних умовах і має достатньо тривалий пошук оптимуму; Подальшим розвитком P&O став метод на основі порівняння трьох точок потужності (Three Point Weight Comparison) [4]. Його перевагами над методом P&O є менші коливання вихідної потужності. У сучасних приладах широко застосовуються наближені методи пошуку ТМП метод напруги холостого ходу (Fractional Open-Circuit Voltage) [5] і метод струму короткого замикання (Fractional Short-Circuit Current) [6], у яких відбувається регулярне відімкнення навантаження для вимірювання напруги холостого ходу чи струму короткого замикання, що спричиняє втрати потужності під час вимірювання і втрати, пов'язані з неточним визначенням ТМП. Існує багато методів, які базуються на використанні похідних струму, напруги і потужності. Зокрема метод контролю кореляції коливань (Ripple Correlation Control – RCC) [6], та інкрементальної провідності (Incremental

Conductance) [7-9] характеризуються високою швидкістю та застосовуються для керування широтно-імпульсним перетворювачем. Однак у всіх цих методах з дискретною системою пошуку виникають осциляції робочої точки навколо точки максимуму  $i$ , відповідно, коливання потужності.

Типові системи сонячної енергетики сьогодні можуть об'єднувати багато ФМ включених послідовно у стрінги, щоб забезпечити високі вихідні напруги (понад 600 В), для мінімізації втрат провідності між ФМ і перетворювачів. До таких стрінгів застосовують пристрій стеження за ТМП, який оптимізує потужність на глобальній основі для всієї установки, незалежно від кількості використовуваних сонячних панелей.

Однак, відслідковування ТМП навіть на рівні одного стрінгу змушує працювати ФМ за однакового струму, який обмежений модулем, що генерує найнижчий струм. Зокрема нерівномірність параметрів різних ФМ, можливість затінення окремих модулів сторонніми предметами, їх забруднення чи пошкодження, нерівномірна деградація з плином часу, та інші фактори зумовлюють розбіжність параметрів ТМП окремих ФМ і призводять до втрат генерації енергії всього стрінгу. Все це вимагає нових високоефективних підходів, методів і пристроїв для оптимізації роботи ФМ і сонячних електростанцій в цілому.

**Постановка завдання.** Завданням даної статті є аналіз та дослідження основних факторів та напрямків забезпечення ефективної роботи фотоелектричних модулів і сонячних електростанцій в цілому завдяки впровадженню розроблених алгоритмів та пристроїв для відслідковування точки максимальної потужності ФМ в умовах зміни температури навколишнього середовища та в широкому інтервалі рівня інсоляції.

**Основний матеріал.** Пропонується ідея використання електрохімічного конденсатора (ЕК) у пристрої відбору електричної енергії від ФМ, яка ґрунтується на передумовах, що в електричному колі з паралельно увімкненими ФМ і ЕК струм у кожний момент часу залежить від відповідної миттєвої напруги на ЕК, і відповідно потужність ФМ в кожний момент часу залежить відповідної миттєвої напруги ЕК. Тому потужність, яку генерує ФМ можна змінювати змінюючи напругу ЕК.

Низький опір ЕК забезпечує ефект підсилення генерованої потужності та дозволяє одержувати великі миттєві вихідні струми. Для збільшення інтенсивності світлового потоку, що падає на робочу поверхню ФМ пропонується розробити пристрій високоточного динамічного позиціонування ФМ перпендикулярно до сонячного випромінювання.

Звідси можна зробити висновок, що розробка нового двох-координатного високоточного пристрою стеження за траєкторією сонця, а також розроблення високоефективного пристрою відслідковування ТМП на основі ЕК, що працює в широкому інтервалі рівня освітлення в сумі можуть покращити ефективність використання ФМ більш ніж на 40 %.

Нові методи відбору електричної енергії від ФМ дозволять знизити втрати завдяки підвищенню ефективності та узгодженню роботи систем автоматизованого відслідковування положення сонця та орієнтації ФМ, нових накопичувачів енергії на базі ЕК, що дає можливість вивільнити кошти на їх технічну експлуатацію і ремонт. Це обумовлює важливість запропонованого проекту для розвитку соціально-економічної системи України.

Промисловість індустріально розвинутих країн базується на інтегрованих комп'ютерних технологіях, в основі яких покладено ідею поєднання в часі комп'ютерного моделювання процесів відбору електричної енергії, виконання інженерних розрахунків та

технологічної підготовки їх монтажу при розробці автономних сонячних станцій. Потрібно враховувати стохастичний характер процесів генерування електричної енергії ФМ, можливість використання наявних експериментальних даних про системи накопичення електроенергії, буде реалізовано більш досконалий алгоритм керування процесом відбору електричної енергії від ФМ.

Запропоновану концепцію можна застосовувати для автономних систем різних потужностей: портативні прилади та обладнання, системи автономного енергозабезпечення будинків та інших об'єктів (в тому числі і військових) що не мають доступу до електромережі.

Для підвищення ефективності алгоритму керування при різних зарядних і розрядних струмах розроблено нестационарну частотнозалежну нелінійну математичну модель системи ФМ-ЕК та АБ, що містить показники дробових порядків, які враховують вплив перехідних процесів у пристроях відбору та накопичення енергії.

Нелінійна математична модель ЕК побудована на основі частотнозалежних нелінійних елементів пропонується використовувати в еквівалентній схемі заміщення ЕК еквівалентний нелінійний частотнозалежний активний опір втрат та еквівалентну нелінійну частотнозалежну ємність (рис. 1).

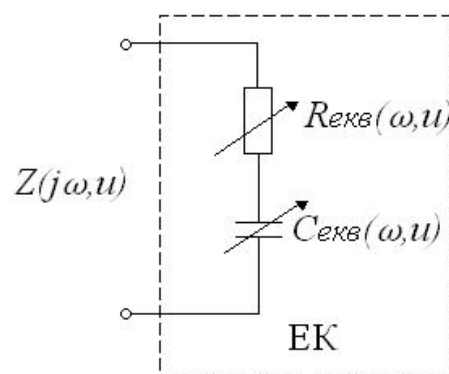


Рис. 1. Еквівалентна схема заміщення ЕК із еквівалентними нелінійними частотнозалежними елементами

Можна записати нелінійну математичну модель ЕК із частотною дисперсією в аналітичному вигляді [10], яка базується на основі частотнозалежних нелінійних елементів та має вигляд виразу вхідного комплексного опору (1) еквівалентної схеми заміщення ЕК із використання степеневі функції частоти

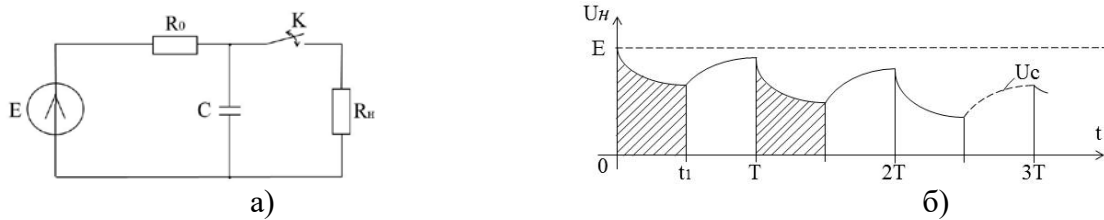
$$Z(j\omega, u) = \left( R_{\min} + \frac{R_{\max} - R_{\min}}{\omega^a + 1} \right) \cdot (1 + K_R u) + \frac{1}{j\omega \left( C_{\min} + \frac{C_{\max} - C_{\min}}{\omega^{1-a} + 1} \right) \cdot (1 + K_C u)}. \quad (1)$$

Проаналізуємо імпульсний режим роботи ФМ при під'єднанні до нього ЕК та опору навантаження за допомогою ключа К із певним періодом комутації Т [11], як показано на схемі рис. 2, а.

Розглянемо узгоджений режим, коли  $R_H = R_0$ . У першому циклі ключ К замикається при  $u_c(0) = E$ :

$$u_H = u_c = \frac{E}{2} + A \cdot e^{-t/\tau_1} = \frac{E}{2} + \frac{E}{2} e^{-t/\tau_1}, \quad (2)$$

$$\text{де } \tau_1 = \frac{R_0 C}{2}.$$



а) схема під'єднання активного навантаження  $R_n$  до ФМ  $E$  та ЕК  $C$ ;

б) залежність від часу напруги  $U_n = f(t)$  на активному навантаженні  $R_n$  та ЕК  $C$

Рис. 2. Імпульсний режим роботи ФМ із ЕК та опором навантаження

В кінці імпульсу  $t = t_1$ , а отже  $u_c = \frac{E}{2} + \frac{E}{2} e^{-t/\tau_1}$ .

При розмиканні ключа  $K$  відбувається процес заряду ЕК:

$$u_c = E + A \cdot e^{-t/\tau_2}, \quad (3)$$

де  $\tau_2 = R_0 C$ .

При  $t = 0$  можна визначити постійну інтегрування  $A$  із рівняння  $\frac{E}{2} + \frac{E}{2} e^{-t_1/\tau_1} = E + A$  за виразом:

$$A = -\frac{E}{2} + \frac{E}{2} e^{-t_1/\tau_1}. \quad (4)$$

В кінці циклу  $t_2 = T - t_1$  напруга на ЕК дорівнює  $u_c = E + \left(-\frac{E}{2} + \frac{E}{2} e^{-t_1/\tau_1}\right)$ . Цей вираз є початковою умовою для наступного циклу, коли ключ  $K$  замикається і напруга  $u_c = \frac{E}{2} + A e^{-t/\tau}$ .

При  $t_2 = T - t_1$  постійна процесу розряду  $A = \frac{E}{2} + \left(-\frac{E}{2} + \frac{E}{2} e^{-t_1/\tau_1}\right) e^{-t_2/\tau_2}$  і напруга на ЕК при розряді визначається виразом:

$$u_c = \frac{E}{2} + \left[ \frac{E}{2} + \left(-\frac{E}{2} + \frac{E}{2} e^{-t_1/\tau_1}\right) e^{-t_2/\tau_2} \right] e^{-t/\tau_1}. \quad (5)$$

Початкова умова для процесу заряду визначається виразом:

$$u_{c_{t=t_1}} = \frac{E}{2} + \left[ \frac{E}{2} + \left(-\frac{E}{2} + \frac{E}{2} e^{-t_1/\tau_1}\right) e^{-t_2/\tau_2} \right] e^{-t_1/\tau_1}. \quad (6)$$

Тоді постійна нового процесу заряду  $A = -\frac{E}{2} + \left[ \frac{E}{2} + \left(-\frac{E}{2} + \frac{E}{2} e^{-t_1/\tau_1}\right) e^{-t_2/\tau_2} \right] e^{-t_1/\tau_1}$ , а напруга на ЕК в кінці заряду дорівнює:

$$u_{c_{t=t_1}} = E + A e^{-t_2/\tau_2} = E + \left\{ -\frac{E}{2} + \left[ \frac{E}{2} + \left(-\frac{E}{2} + \frac{E}{2} e^{-t_1/\tau_1}\right) e^{-t_2/\tau_2} \right] e^{-t_1/\tau_1} \right\} e^{-t_2/\tau_2}. \quad (7)$$

Для нового циклу розряду постійна  $A = \frac{E}{2} + \left\{ -\frac{E}{2} + \left[ \frac{E}{2} + \left(-\frac{E}{2} + \frac{E}{2} e^{-t_1/\tau_1}\right) e^{-t_2/\tau_2} \right] e^{-t_1/\tau_1} \right\} e^{-t_2/\tau_2}$ .

Цього достатньо, щоб встановити загальні закономірності зміни  $u_n = u_c$  в кожному циклі приймемо для спрощення  $t_1 = t_2 = T/2$  і врахуємо, що  $\tau_2 = 2\tau_1$ .

В загальній формулі напруги  $u_{n(k)} = u_{c(k)} = \frac{E}{2} + A_k e^{-t/\tau_1}$  постійні будуть:

$$A_1 = \frac{E}{2}; \quad A_2 = \frac{E}{2} - \frac{E}{2} e^{-T/4\tau_1} + \frac{E}{2} e^{-3T/4\tau_1}; \quad A_3 = \frac{E}{2} - \frac{E}{2} e^{-T/4\tau_1} + \frac{E}{2} e^{-3T/4\tau_1} - \frac{E}{2} e^{-5T/4\tau_1} + \frac{E}{2} e^{-7T/4\tau_1};$$

$$A_4 = \frac{E}{2} - \frac{E}{2} e^{-T/4\tau_1} + \frac{E}{2} e^{-3T/4\tau_1} - \frac{E}{2} e^{-5T/4\tau_1} + \frac{E}{2} e^{-7T/4\tau_1} - \frac{E}{2} e^{-9T/4\tau_1} + \frac{E}{2} e^{-11T/4\tau_1}. \quad (8)$$

Бачимо, що, за виключенням  $A_1$ , всі постійні містять експоненти з непарними степенями, причому, кожна наступна постійна відрізняється від попередньої двома експонентами, перед першою з них стоїть знак мінус, а перед другою знак плюс. Кількість експонент визначається формулою  $2(k-1)-1$ . Степінь останньої експоненти для довільного  $A_k$  визначається числом  $4(k-1)-1$ .

Особливість схеми рис. 2, а є те, що до початку кожного нового циклу ЕК не встигає за час  $T-t_1$  зарядитися до початкового значення напруги в попередньому циклі, але через достатню кількість періодів (циклів) схема прийде до якогось сталого режиму. Якщо позначити  $e^{-T/4\tau_1} = a$ , то для  $A_k$  можна записати:

$$A_k = \frac{E}{2} \left( 1 - a^1 + a^3 - a^5 + a^7 - a^9 + a^{11} - \dots + a^{4(k-1)-1} \right) = \frac{E}{2} C_k. \quad (9)$$

Важливо визначити, яким стане  $A_k$  після завершення перехідного процесу (процесів розряду-заряду) в сталому режимі. Тоді розглянемо два степеневих ряди:

$$-(a^1 + a^5 + a^9 + a^{13} + a^{17} + \dots). \quad (10)$$

$$+(a^3 + a^7 + a^{11} + a^{15} + a^{19} + \dots). \quad (11)$$

В геометричній прогресії (10)  $b_1 = a^1$  і  $q = a^4$ , тоді сума членів ряду при  $n \rightarrow \infty$

$$S_1 = \frac{b_1}{1-q} = \frac{a^1}{1-a^4}.$$

В геометричній прогресії (11)  $b_1 = a^3$  і  $q = a^4$ , тоді сума членів ряду при  $n \rightarrow \infty$

$$S_2 = \frac{b_1}{1-q} = \frac{a^3}{1-a^4}.$$

Отже:

$$A_{n=\infty} = \frac{E}{2} \left( 1 - \frac{a^1}{1-a^4} + \frac{a^3}{1-a^4} \right). \quad (12)$$

Взявши у виразі для  $a = e^{T/4\tau_1}$ , в якості прикладу  $T = \frac{\tau_1}{5}$ ;  $T = \frac{\tau_1}{10}$ ;  $T = \frac{\tau_1}{25}$ , ми для всіх випадків отримали  $A_{n=\infty} = \frac{E}{2} \cdot 0,5 = 0,25E$ , тобто  $C_n = 0,5$ . Порівняємо енергії в навантаженні за один цикл ( $\Delta t = T$ ) для двох схем. Для схеми без ЕК:

$$W = \frac{1}{R_H} \left( \frac{E}{2} \right)^2 T = 0,25 \frac{E^2 T}{R_H}. \quad (13)$$

Для схеми з ЕК, взявши  $A_k = c_k \frac{E}{2}$ , отримаємо  $U_{CK} = \frac{E}{2} + c_k \frac{E}{2} e^{-t/\tau_1}$ , а енергія дорівнює:

$$W_2 = \frac{1}{R_H} \int_0^{T/2} \left( \frac{E}{2} + c_k \frac{E}{2} e^{-t/\tau_1} \right)^2 dt = \frac{1}{R_H} \left[ \frac{E^2 T}{4} + \frac{c_k E^2}{2} \tau_1 (1 - e^{-T/2\tau_1}) + \frac{c_k^2 E^2}{4} \frac{\tau_1}{2} (1 - e^{-T/\tau_1}) \right]. \quad (14)$$

Виберемо  $\tau_1 = 5T$ , тоді енергія  $W_2 = \frac{E^2 T}{8R_H} (1 + 2c_k + 0,9c_k^2)$ , а враховуючи, що для сталого режиму встановлено  $c_k \approx 0,5$ , тоді отримаємо вираз для розрахунку енергії  $W_2 = 0,278 \frac{E^2 T}{8R_H}$ . Збільшення енергії становить близько 11%. Зрозуміло, що в перехідному процесі енергія в схемі з ЕК буде значно перевищувати  $W_1$ . Так в першому циклі  $K=1$  і  $W_{2(1)} = 0,48 \frac{E^2 T}{R_H}$ , а

другому циклі  $K=0,91$  і  $W_{2(2)} = 0,44 \frac{E^2 T}{R_H}$ , тому за перших 5 циклів сумарна енергія перевищує  $W_1$  в 1,66 разів. Якщо  $R_H < R_0$ , то в сталому режимі перевага другої схеми буде більша, а при  $R_H > R_0$  результат може бути негативним тому, що збільшується  $U_H = \frac{R_H}{R_H + R_0}$  і менша різниця між  $u_c(0)$  та  $U_H$  для кожного нового циклу. На енергію впливає наявність «паузи» напруги в навантаженні другої схеми.

Наприклад, при  $R_H = 3R_0$  для першої схеми  $U_H = \frac{3}{4}E$ , а для другої схеми  $\tau_1 = \frac{3}{4}R_0C$  та  $\tau_2 = R_0C$ . Аналіз показує наступний результат, наприклад, для 6-го циклу при  $t_1 = t_2 = \frac{T}{2}$ :

$$A_6 = \frac{E}{4} \left( 1 - e^{-3T/8\tau_1} + e^{-7T/8\tau_1} - e^{-10T/8\tau_1} + e^{-14T/8\tau_1} - e^{-17T/8\tau_1} + e^{-21T/8\tau_1} - e^{-24T/8\tau_1} + e^{-28T/8\tau_1} - e^{-31T/8\tau_1} + e^{-35T/8\tau_1} \right). \quad (15)$$

Отже для  $A_{n \rightarrow \infty}$  можна записати:

$$A_{n \rightarrow \infty} = \frac{1}{4}E - \frac{1}{4}E \left( e^{-3T/8\tau_1} + e^{-10T/8\tau_1} + e^{-17T/8\tau_1} + \dots \right) + \frac{1}{4}E \left( e^{-7T/8\tau_1} + e^{-14T/8\tau_1} + e^{-21T/8\tau_1} + \dots \right) = \frac{1}{4}E - \frac{1}{4}ES_1 + \frac{1}{4}ES_2; \quad (16)$$

Якщо  $a = e^{-T/8\tau_1}$ , то при  $\tau_1 = 5T$  та  $a = e^{-1/40} = 0,9753$  матимемо:

$$A_n = \frac{1}{4}E - \frac{1}{4}E \left( a^3 + a^{10} + a^{17} + a^{24} + \dots \right) + \frac{1}{4}E \left( a^7 + a^{14} + a^{21} + a^{28} + \dots \right) = \frac{1}{4}E - \frac{1}{4}E \frac{a^3}{1-a^7} + \frac{1}{4}E \frac{a^7}{1-a^7} = 0,1125E. \quad (17)$$

Тоді в сталому режимі для  $0 \leq t \leq t_1$  напруга на навантаженні дорівнює  $u_H = u_c = \frac{3}{4}E + 0,1125Ee^{-t/\tau_1}$ . Порівняння енергії для двох схем за один цикл показує, що для другої схеми енергія в опорі навантаження буде в 1,53 рази менша, ніж для першої схеми.

При  $R_H = 0,5R_0$  для схеми без ЕК напруга  $U_H = \frac{1}{3}E$ , а енергія  $W_1 = \frac{U_H^2}{R_H}T = \frac{1}{9} \frac{E^2 T}{R_H}$ . Для схеми із ЕК  $U_{Cnp} = \frac{1}{3}E$ , тоді формула  $u_c$  для розряду буде мати вигляд:

$$u_{c(n)} = \frac{1}{3}E + C_n \frac{2}{3}Ee^{-t/\tau_1}, \quad (18)$$

де  $\tau_1 = \frac{R_0C}{3}$ ;

$$C_n = 1 - e^{-T/6\tau_1} + e^{-4T/6\tau_1} - e^{-5T/6\tau_1} + e^{-8T/6\tau_1} - e^{-9T/6\tau_1} + e^{-12T/6\tau_1} - \dots = 1 - \left( a^1 + a^5 + a^9 + a^{13} + \dots \right) + \left( a^4 + a^8 + a^{12} + a^{16} + \dots \right); \quad a = e^{-T/6\tau_1}.$$

Для нескінченної кількості циклів  $C_{n \rightarrow \infty} = 1 - \frac{a^1}{1-a^4} + \frac{a^4}{1-a^4}$  та  $T = 5\tau_1$ , отримаємо

$$C_{n \rightarrow \infty} = 0,1763. \text{ Тоді енергія } W_2 = \frac{1}{R_H} \int_0^{T/2} \left( \frac{1}{3}E + C_n \frac{2}{3}Ee^{-t/\tau_1} \right)^2 dt = \dots = 0,136 \frac{E^2 T}{R_H}, \text{ а збільшення енергії становить}$$

$W_2 / W_1 = 1,22$  рази.

Використовуючи еквівалентну схему заміщення ЕК із еквівалентними нелінійними частотнозалежними елементами у Хмельницькому національному університеті розроблено прототип енергоефективної університетської сонячної електростанції, яка складається із вузла ФМ (рис. 3), вузла зарядження-розрядження акумуляторних батарей (рис. 4) та вузла відслідковування точки максимальної потужності ФМ на основі ЕК (рис. 5).



Рис. 3. Вузол ФМ енергоефективної університетської сонячної електростанції



Рис. 4. Вузол зарядження-розрядження акумуляторних батарей



Рис. 5. Вузол відслідковування точки максимальної потужності ФМ на основі ЕК

### Висновки.

1. Таким чином, в результаті проведених досліджень розроблено новий високоефективний та високоточний метод відслідковування ТМП з використанням ЕК, зарядження-розрядження АБ, що забезпечать роботу ФМ в точці максимальної потужності при різних погодних умовах. Для реалізації алгоритмів використано нові методи теорії дробового числення та нелінійної динаміки, що дають можливість підвищення точності і адекватності методів та моделей. Створено програмне забезпечення для керування основними вузлами системи з використанням мікроконтролерів.

2. Імпульсний режим роботи ФМ із конденсатором є більш ефективним для передачі енергії в активний опір навантаження, але його доцільно застосовувати лише при  $R_H \leq R_0$ .

3. Максимальне збільшення енергії, яка виділяється на активному опорі навантаження (для  $R_H = 0,5R_0$ ) при імпульсному режимі роботи ФМ із конденсатором, становить

$W_2 / W_1 = 1,22$  рази по відношенню до режиму роботи джерела постійної напруги із активним навантаженням без конденсатора.

## Література

1. Tiwari G.N. *Handbook of Solar Energy.Theory, Analysis and Applications.* Shyam, Energy Systems in Electrical Engineering: Springer, 2016, pp. 764
2. Subudhi B., Pradhan R.. “A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems”. *The IEEE Transactions on Sustainable Energy archival journal*, vol. 4, pp. 1249-1252, Jan. 2013.
3. Zhang Q., Hu C., Chen L., Amirah A., Kutkut N., John Shen Z., Bartarseh I. “A Center Point Iteration MPPT Method With Application on the Frequency-Modulated LLC Microinverter”. *The IEEE Transactions on Power Electronics journal*, vol. 29, pp.1262 – 1274, March 2014.
4. Roy C.P., Naick B.K.and Shankar G. “Comparative Study of Photovoltaic MPPT Algorithms”. *International Journal on Recent Trends in Engineering & Technology*, vol. 11, pp. 191- 201, July 2014.
5. Zhang F., Thanapalan K., Procter A., Carr S., and Maddy J. “Adaptive Hybrid Maximum Power Point Tracking”. *IEEE Transactions on energy conversion journal*, vol. 28, pp. 353- 360, July 2014.
6. Bazzi A. and Krein P. “Ripple correlation control: An extremum seeking control perspective for real-time optimization.” *IEEE Trans. Power Electron. journal*, vol. 29, no. 2, pp. 988–995, Feb. 2014.
7. Chafle S.R., Vaidya U.B. “Incremental Conductance MPPT Technique for PV System.” *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 2, pp. 2719 – 2726, June 2013.
8. Martynyuk V., Vdovin O., Boyko J. and. Vlasenko N. “Super-high capacitor analyzer with compensation of common-mode error,” in *Proc. IMECO TC-4*, 2001, pp. 340-343.
9. Martynyuk V., Makaryshkin D., Boyko J. “Frequency Domain Analysis for Electrochemical Supercapacitors” in *Proc. IMEKO TC-4*, 2007, pp. 357-361.
10. Мартинюк В. В. Нелінійна математична модель електрохімічного конденсатора / В. В. Мартинюк // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 6. – С. 78 – 82.
11. Косенков В. Д., Мартинюк В. В., винахідники. Спосіб збільшення енергії в опорі

## References

1. Tiwari G.N. *Handbook of Solar Energy.Theory, Analysis and Applications.* Shyam, Energy Systems in Electrical Engineering: Springer, 2016, pp. 764.
2. Subudhi B., Pradhan R. “A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems”. *The IEEE Transactions on Sustainable Energy archival journal*, vol. 4, pp. 1249-1252, Jan. 2013.
3. Zhang Q., Hu C., Chen L., Amirah A., Kutkut N., John Shen Z., Bartarseh I. “A Center Point Iteration MPPT Method With Application on the Frequency-Modulated LLC Microinverter”. *The IEEE Transactions on Power Electronics journal*, vol. 29, pp.1262 – 1274, March 2014.
4. Roy C.P., Naick B.K. and Shankar G. “Comparative Study of Photovoltaic MPPT Algorithms”. *International Journal on Recent Trends in Engineering & Technology*, vol. 11, pp. 191- 201, July 2014.
5. Zhang F., Thanapalan K., Procter A., Carr S., and Maddy J. “Adaptive Hybrid Maximum Power Point Tracking”. *IEEE Transactions on energy conversion journal*, vol. 28, pp. 353- 360, July 2014.
6. Bazzi A. and Krein P. “Ripple correlation control: An extremum seeking control perspective for real-time optimization.” *IEEE Trans. Power Electron. journal*, vol. 29, no. 2, pp. 988–995, Feb. 2014.
7. Chafle S.R., Vaidya U.B. “Incremental Conductance MPPT Technique for PV System.” *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 2, pp. 2719 – 2726, June 2013.
8. Martynyuk V., Vdovin O., Boyko J. and. Vlasenko N. “Super-high capacitor analyzer with compensation of common-mode error,” in *Proc. IMECO TC-4*, 2001, pp. 340-343.
9. Martynyuk V., Makaryshkin D., Boyko J. “Frequency Domain Analysis for Electrochemical Supercapacitors” in *Proc. IMEKO TC-4*, 2007, pp. 357-361.
10. Martynyuk, V. V. (2011). Nelineiina matematychna model elektrokhimichnoho kondensatora [Nonlinear mathematical model of electrochemical capacitor] *Tekhnichna elektrodynamika –Technical Electrodynamics*. Vol. 6, 78 – 82 [in Ukraine].
11. Kosenkov VD, Martynyuk VV, inventors (2017).



навантаження в електричному колі з постійною електрорушійною силою. Український патент, № 116473, 2017.

Sposib zbilshennia enerhii v opori navantazhennia v elektrychnomu koli z postiinoiu elektrorushiinoiu syloiu [A method for increasing energy in a load-bearing load in an electric circuit with a constant electromotive force]. Ukrainian patent no 116473, 21.11.2016, 25.05.2017.

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ УНИВЕРСИТЕТСКАЯ СОЛНЕЧНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ

МАРТЫНЮК В.В., БОЙКО Ю.Н.

*Хмельницький національний університет*

**Цель.** Целью данной статьи является исследование основных аспектов повышения эффективности работы фотоэлектрических модулей солнечной электростанции.

**Методика.** Методика исследования предусматривает использование методов возмущения и наблюдений, метод на основе сравнения трех точек мощности, метод напряжения холостого хода, метод тока короткого замыкания, метод контроля корреляции колебаний, метод инкрементальной проводимости.

**Результаты.** Предложен метод повышения эффективности работы фотоэлектрических модулей солнечной электростанции.

**Научная новизна.** Предложен метод, который позволяет увеличить эффективность использования фотоэлектрических модулей, что обеспечит увеличение количества генерируемой электрической энергии для повышения эффективности работы фотоэлектрических модулей солнечной электростанции.

**Практическая значимость.** Результаты исследования могут быть использованы при создании системы эффективного энергообеспечения учебных корпусов учебных заведений.

**Ключевые слова:** фотоэлектрический модуль, энергообеспечение, университетская солнечная электростанция, электрохимический конденсатор, аккумулятор.

## ENERGY EFFICIENT UNIVERSITY SOLAR POWER STATION

MARTYNYUK V.V., BOIKO J.M.

*Khmelnytskyi National University*

**Goal.** The purpose of this article is to study the main aspects of increasing the efficiency of the photovoltaic modules of the solar power station.

**Methods.** The research methodology involves the use of perturbation and observation methods, the method based on the comparison of three power points, the method of idle voltage, the method of short-circuit current, the method of control of the correlation of oscillations, the method of incremental conductivity.

**Results.** The method of increasing the efficiency of the photovoltaic modules of the solar power station is proposed.

**Scientific novelty.** A method is proposed which allows to increase the efficiency of the use of photovoltaic modules, which will provide an increase in the amount of generated electric energy to increase the efficiency of the operation of the photovoltaic modules solar power station.

**Practical significance.** The results of the research can be used to create an effective energy supply system for the educational buildings of educational institutions.

**Keywords:** photoelectric module, power supply, university solar power station, electrochemical capacitor, battery.