УДК 621.311

П. Д. Лежнюк д-р техн. наук, проф.; Т. О. Лиса

ВПЛИВ ДЕГРАДАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ НА ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

В роботі проаналізовано стан, умови роботи фотоелектричних модулів (ФЕМ), що експлуатуються на діючій фотоелектричній станції (ФЕС). Оскільки ФЕС займають вагоме місце в балансі потужності та електроенергії електроенергетичних систем (ЕЕС), то важливо знати, яку кількість електроенергії і за яким можливим графіком в часі ФЕС можуть її генерувати. Адже в умовах сучасного ринку електроенергії власники відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) зобов'язані постачати електроенергію за чітким погодинним графіком, який погоджується з оператором системи розподілу (ОСР) потужності заздалегідь. У випадку відхилення від встановленого погодинного графіку до власника станції застосовуються штрафні санкції. Однією зі складових нестабільності генерування ФЕС є деградація її ФЕМ. Як правило, в технічному паспорті можливість поступового зменшення продуктивності ФЕМ передбачається, проте на практиці значення деградації значно перевищує допустиме. Оскільки основним елементом ФЕС прямого перетворення сонячного випромінювання є фотоелектричні модулі і вплив їх деградації на генерування електроенергії суттєвий, то розроблено математичні моделі та методи оцінювання технічного стану ФЕМ для врахування їх в балансуючій групі ОСР. В основу математичної моделі ФЕМ покладена можливість аналізу видів їх пошкоджень, а також дослідження факторів, які впливають на деградацію ФЕМ та їх залежність щодо генерування електроенергії. На практичному прикладі показано вплив деградації ФЕМ на результати генерування електроенергії. Показано, що крім перемінності сонячного випромінювання іншою причиною нестабільної генерації ФЕС є технічний стан ФЕМ та їх деградація. Отримані результати доцільно використовувати для уточнення графіків генерації ФЕС, оцінювання небалансів та підвищення надійності планування її роботи.

Ключові слова: *балансування електроенергетичної системи, генерування фотоелектричної станції, фотоелектричний модуль, деградація, градієнт температур, вольт-амперна характеристика.*

Вступ

На сьогодні відновлювані джерела енергії, в тому числі ФЕС, займають чільне місце в балансі потужності та електроенергії електроенергетичних систем (ЕЕС). Через нестабільність їх генерування виникають проблеми з балансуванням потужності та електроенергії в ЕЕС. На нестабільність вироблення електроенергії ФЕС впливають як метеорологічні умови, так і технічний стан їх обладнання. Особливо гостро проблема нестійкого генерування ФЕС проявляється тоді, коли вони вимушені працювати з ЕЕС згідно прогнозованого на наступну добу погодинного графіка генерування, який відповідним чином затверджується [1, 2]. Невідповідність фактичного і планового графіків генерування тягне за собою штрафні санкції, які зменшують економічну ефективність ФЕС. Виникає обґрунтована необхідність більш точно відноситися до планових та фактичних графіків генерування ФЕС, а також до реальних можливостей виробляти ними електроенергію у відповідному обсязі [2].

Для участі ФЕС в процесі балансування потужності й електроенергії в ЕЕС необхідно знати та уточнювати їх поточний технічний стан задля оцінювання перспективи щодо можливості вироблення електроенергії в заданому об'ємі, щоб ефективно і без штрафних санкцій приймати участь в балансуванні режимів ОЕС України. Особливо це стосується фотоелектричних модулів (ФЕМ), які є головними в перетворенні енергії сонячного випромінювання в електричну енергію і які в силу своєї конструкції є найбільш залежними від погодних умов та чутливими до фізичних пошкоджень, викликаних різними причинами (механічні, забруднення, ненормальна температура та ін.). Якщо ФЕС задіяні в погодинному

балансуванні режиму ЕЕС, то тут йдеться про поточний залишковий ресурс ФЕМ по відношенню до розрахункового на початок експлуатації. Це висуває відповідні умови щодо методів і засобів оцінювання технічного стану ФЕМ.

Для ФЕМ природним є зменшення з часом їх продуктивності (деградація) [3–5]. Для ФЕМ необхідно контролювати показники, які вказують на їх аномальну роботу у стрінгу і сигналізують на наявність проблеми в його роботі. Програмно-апаратний комплекс (ПАК) дозволяє перевіряти стан контактних з'єднання ФЕС і визначати чи опори контактних з'єднань знаходяться в допустимих межах [5]. За необхідності формується база даних з використанням квадрокоптера. За допомогою тепловізора і пірометра здійснюється обстеження ФЕМ на предмет дефектів, що проявляються областями з температурою, вищою за температуру справних ФЕМ. На ФЕМ виявляються дефекти елементів, які обстежуються детальніше. Для визначення міри працездатності ФЕМ формується база даних для побудови і порівняння окремих вольт-амперних характеристик (ВАХ). Інформація передається в базу даних, де обробляється розробленою програмою для виявлення та діагностування появи дефектів або несправностей, а також визначаються коефіцієнти залишкового ресурсу і коефіцієнти-індикатори аномальної роботи ФЕМ [6]. За цими результатами приймається рішення щодо доцільності подальшої експлуатації ФЕМ. Визначається можливість їх відновлення або повної заміни.

В процесі експлуатації ФЕС через деградацію ФЕМ зменшується коефіцієнт корисної дії, від якого залежить її поточне генерування електроенергії і, відповідно, її фактичний графік генерування. Якщо під час визначення прогнозу генерування ФЕС за цей же час не враховується деградація її ФЕМ, то це збільшує похибку в балансуванні електроенергії, яка визначається як [2]

$$\delta = \frac{w_{np} - w_{\phi}}{w_{np}} 100\%, \quad (1)$$

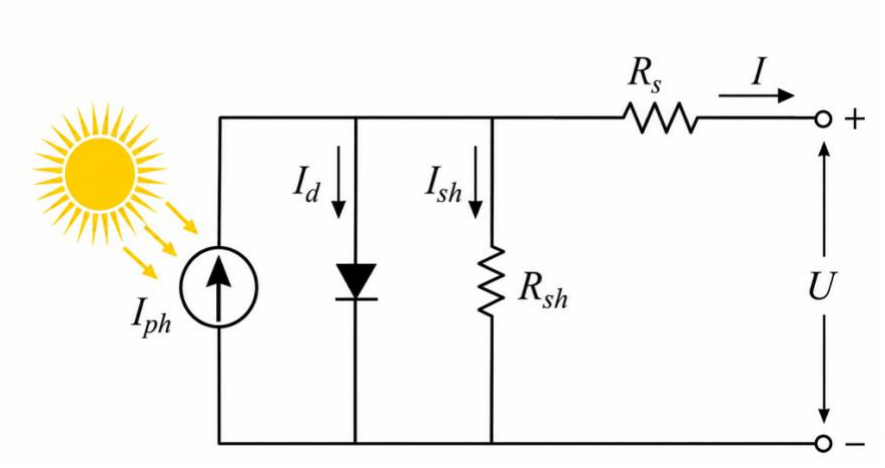
де w_{np}, w_{ϕ} – відповідно прогнозована і фактично вироблена кількість електроенергіє ФЕС за час t.

В δ є складова частина w_{ϕ} , значення якої залежить від міри деградації ФЕМ і яка постійно проявляється під час роботи ФЕС. Зменшити похибку δ можна тільки впливаючи на $w_{\text{пр}}$, тобто, покращуючи точність прогнозу і враховуючи значення деградації ФЕМ. На практиці в залежності від терміну, на який необхідно враховувати значення деградації ФЕМ, виникає два завдання: враховувати деградацію ФЕМ підчас прогнозування погодинного графіка генерування ФЕС на наступну добу і прогнозування на інтервалі місяць, сезон, рік. В першому випадку необхідно враховувати погодинне значення в залежності від поточної інсоляції сонця, а в іншому – в залежності від середнього значення інсоляції за відповідний період (наприклад, програма PVSyst).

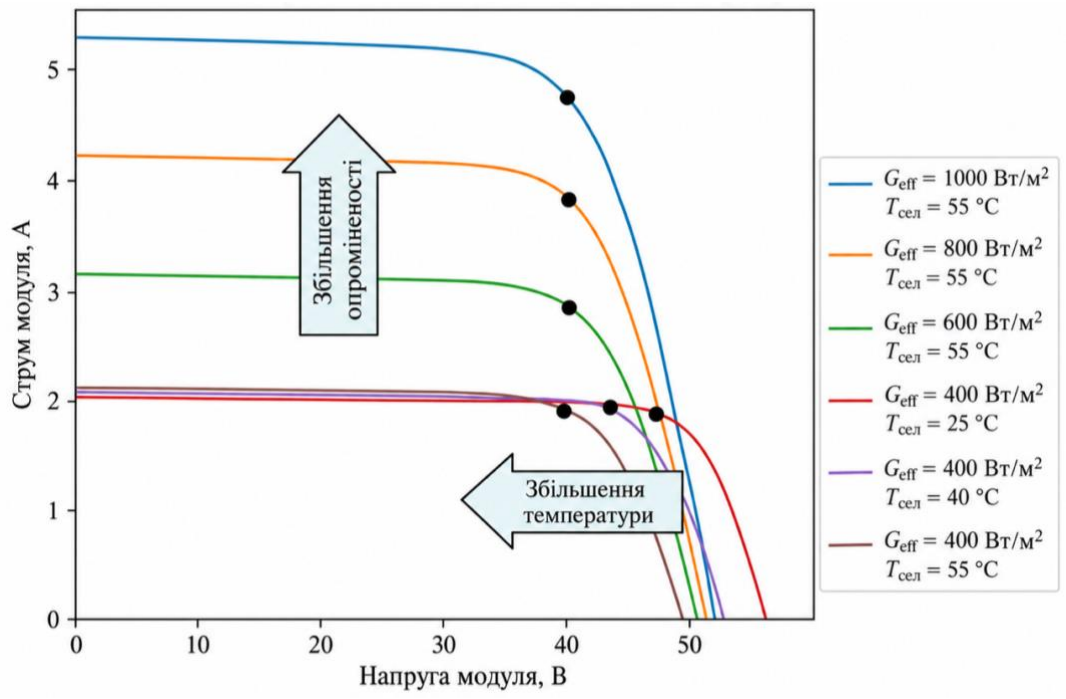
Метою статті є розробити алгоритм оцінювання впливу деградації фотоелектричних модулів на їх продуктивність для використання результатів під час прогнозування генерування електроенергії ФЕС.

Залежність струму, що генерується під дією сонячної радіації

Погодинне прогнозування генерування ФЕС для участі в балансуванні режиму електроенергетичної системи розпочинається з аналізу струму і напруги ФЕМ у відповідності до ВАХ ФЕМ. На рис. 1 показано одно діодну еквівалентну схему ФЕМ і вольт-амперні характеристики в залежності від сонячної радіації і температури.



а)



б)

Рис. 1 Еквівалентна схема а) та ВАХ фото електричного модуля за різних значень опроміненості та температури б)

Математичний вираз струму фотоелемента можна отримати з еквівалентної схеми, представленої на рис. 1,а [7]:

$$I = I_{ph} - I_o \left[e^{\frac{U - IR_s}{a}} - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} , \qquad (2)$$

де $I_{ph} = \left(I_{SC,ref} + \alpha_{I_{SC}} \times \left(T - T_{ref} \right) \right) \times \frac{G}{G_{ref}}$ – фотострум (light-generated current), що генерується під дією сонячної радіації; G – поточна сонячна інсоляція (Вт/м²), G_{ref} = 1000 (Вт/м²), T, T_{ref} – температура комірки і референтна температура (25 °C); $I_{SC,ref}$ – струм короткого замикання при стандартних умовах (STC); $\alpha_{I_{SC}}$ – температурний коефіцієнт струму короткого замикання; I_0 – зворотний (насичення) струм діода; R_s – послідовний опір (series resistance), яким враховуються втрати в провідниках, контактах та матеріалі комірки і який

визначається експериментально з нахилу ВАХ в області великої напруги (близько до U_{OC}); R_{sh} – шунтовий опір (shunt resistance), яким моделюється струм витоку через дефекти кристалу чи поверхневі струми і який визначається з нахилу ВАХ поблизу струму короткого замикання I_{SC} (чим більший R_{sh}, тим краща якість комірки).

В (2) $I_o = \dfrac{I_{SC,ref} + \alpha_{I_{SC}}\left(T - T_{ref}\right)}{exp\left(\dfrac{U_{OC\,ref} + \alpha_{U_{OC}}\left(T - T_{ref}\right)}{\alpha}\right) - 1}$ – струм рекомбінації носіїв заряду відносно дуже малий за величиною, але сильно залежить від температури; $U_{OC\,ref}$ – напруга холостого ходу при STC; $\alpha_{U_{OC}}$ – температурний коефіцієнт напруги холостого ходу; $\alpha = n \cdot U_t$ – діодний фактор, який визначає, наскільки поведінка реального діода відхиляється від ідеального (n – ідеальність діода (1…2)); $U_t = \dfrac{kT}{q}$ – тепловий потенціал (~ 25.7 мВ при 25 °C); q = 1.6×10^{-19}C – заряд електрона; k = 1,38×10^{-23} Дж/К – постійна Больцмана.

Очевидно, що параметри моделі залежать від температури та сонячного випромінювання. Це впливає на вид ВАХ (див. рис. 1,б). Тому в задачі оцінювання рівня деградації принциповим є відокремлення впливу метеопараметрів від наслідків деградації. Так залежність α від температури зазвичай приймають лінійною [7]: $\dfrac{\alpha}{\alpha_{ref}} = \dfrac{T}{T_{ref}}$. Для зворотного струму діода залежність від температури нелінійна: $\dfrac{I_o}{I_{o,ref}} = \left[\dfrac{T}{T_{ref}}\right]^3 e^{\frac{\varepsilon N_s}{\alpha_{ref}}\left(1 - \frac{T_{ref}}{T}\right)}$.

Зменшення I_{ph} через погіршення прозорості скла призводить до зменшення I_{SC} та I_{mp} (струм точки максимальної потужності); зростання I_o, через погіршення стану діодів, призводить до зниження U_{OC}; збільшення R_s, в наслідок корозії контактів тощо, призводить до зменшення U_{mp} (напруга точки максимальної потужності). ε – енергія забороненої зони матеріалу, N_s – кількість послідовних комірок.

Якщо всі комірки модуля мають однакові електричні характеристики і всі вони отримують однакову інсоляцію та температуру, то вони будуть працювати за однакового струму та напруги. В цьому випадку характеристика *I-U* ФЕМ має ту саму форму, що й окремі комірки за винятком того, що напруга та струм збільшуються лінійно пропорційно до послідовно n_s і паралельно n_p кількості комірок. Напругу на навантаженні U та струм через навантаження I можна виразити через величини u, i комірки як

$$U = u\,n_s,\ I = i\,n_p. \tag{3}$$

Проте це можливо, якщо комірки ідентичні і коефіцієнт заповнення не змінюється під час переходу до модуля, складеного із паралельних або послідовних з'єднань. Однак, зазвичай, між комірками існує невідповідність параметрів навіть у новому модулі. Під час експлуатації ФЕМ через різну дію факторів електричні характеристики комірок змінюються і можуть суттєво відрізнятися, що впливає на ВАХ і продуктивність ФЕМ. Геометричною інтерпретацією потужності, що виділяється в навантаженні, є площа прямокутника (див. рис. 2) з вершинами в робочій точці та в початку координат. Максимальній потужності відповідає вписаний у криву ВАХ прямокутник найбільшої площі (зафарбована область на графіку). Чим ближче форма ВАХ до прямокутної, тим якісніший ФЕМ. Для оцінювання якості ВАХ вводиться фактор заповнення ВАХ [8, 9]:

$$F = \frac{P_m}{U_{OC} I_{SC}} = \frac{U_m I_m}{U_{OC} I_{SC}}\ , \tag{4}$$

де P_m – потужність ФЕМ в точці m ВАХ; U_m, I_m – максимальна напруга і струм, яка відповідає m; U_{OC}, I_{SC} – відповідно напруга холостого ходу і струм короткого замикання.

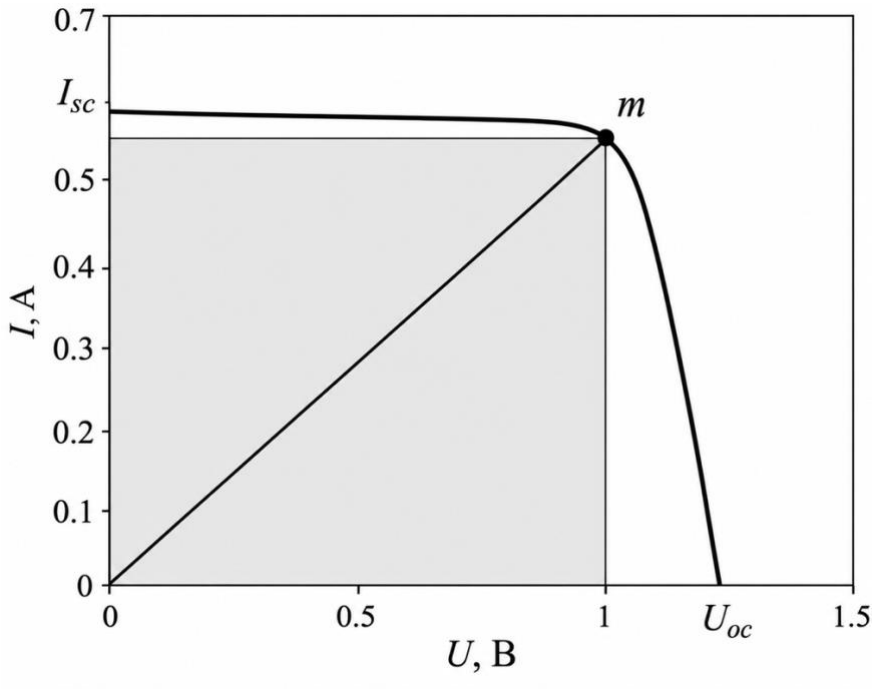


Рис. 2 Навантажувальна ВАХ фотоелектричного модуля

Вплив деградації ФЕМ на результати генерування

Для аналітичного представлення деградації фотоелектричного модуля введемо поточне значення коефіцієнта деградації продуктивності сонячної панелі D_n :

$$D_n = \frac{P_{m\,в} - P_{m\,n}}{P_{m\,в}} 100\%, \tag{5}$$

де $P_{mв}$ і P_{mn} – максимальні значення потужності панелі або стрінга в цілому в рік встановлення ФЕС і в поточний час t.

Час t в залежності від мети розрахунків може бути година, доба, місяць, рік. Година, коли формується погодинний графік прогнозу. В цьому випадку для поточного значення потужності P_{mn} визначається її залежність від конкретних метеорологічних параметрів. Для більш тривалого часу значення P_{mn} осереднюється до середніх значень метеорологічних параметрів за час t, в першу чергу до сонячної інсоляції. Даний коефіцієнт показує відсоткове зниження максимальної вихідної потужності панелі (стрінга). Він виражає несхожість фотоелектричних модулів під час виробництва сонячних панелей та їх експлуатації. Прийняте спрощення в роботі полягає в наступному: вважається, що Земля знаходиться в паралельному потоці сонячних променів, а явищем хмарності ігнорується (воно впливає лише на інтенсивність сонячного випромінювання, а кут падіння сонячних променів на модуль не змінюється).

Для розв'язування задачі по оцінюванні ефективності ФЕМ скористаємося виразом по визначенню питомої потужності на квадратний метр:

$$\frac{P_m}{S} = G\ \eta\ \cos\theta, \tag{6}$$

де P_m – потужність ФЕМ в точці максимальної потужності з вольт амперної характеристики (ВАХ); S – площа ФЕМ; G – інтенсивність сонячної радіації; η – коефіцієнт корисної дії ФЕМ; θ – кут між панеллю і сонячним випромінюванням.

З (6) отримаємо коефіцієнт корисної дії як вираз для оцінки ефективності сонячної панелі під час прогнозування генерації ФЕС на час Т:

$$\eta_T = \frac{P_{mT}}{G_T S \cos\theta}, \quad (7)$$

де P_{mT} – середня потужність за час Т; G_T – осереднене значення сонячної радіації за час Т.

Для прогнозування погодинного графіка вираз (7) трансформується в наступному вигляді:

$$\eta(t) = \frac{P_m(t)}{G(t) S \cos\theta}, \quad (8)$$

де $P_m(t)$, $G(t)$ – погодинні значення відповідно потужності та інтенсивності сонячної радіації.

Ця залежність, за своєю структурою, дає три основні напрямки вдосконалення фотоелектричних модулів, а саме: вивчення природи інтенсивності сонячного випромінювання, підвищення ефективності самого фотоелектричного модуля та підвищення ефективності установки (зменшення кута між напрямком падіння сонячного випромінювання та кутом, перпендикулярним до фотоелектричного модуля)

Інтенсивність сонячного випромінювання є природним явищем і тому впливати на її значення неможливо. Впливати на значення питомої потужності фотоелектричних модулів можна шляхом контролю параметрів ВАХ, напруги та струму, які залежать від умов експлуатації панелі та стану панелі (нова панель чи панель з розвиненим дефектом, наприклад градієнт температури), у відповідності до (4).

Оскільки фотоелектричний модуль за своєю конструкцією складається з послідовно з'єднаних фотоелектричних елементів, то загальна напруга холостого ходу визначатиметься як їх сума. Якщо деякі елементи нагріті більше, то сумарна напруга зменшуватиметься. Струм короткого замикання зазнає меншого впливу від напруги, але за наявності градієнту температур не всі елементи генерують однаково. Гарячі елементи створюють менші струми через локальні гарячі точки. Якщо частина модуля затінена, то вона може стати баластом – як наслідок, зниження струму всього модуля.

Ввівши вираз (4) в вираз (8) ми отримаємо залежність ККД модуля від коефіцієнту заповнення ФЕМ:

$$\eta(t) = \frac{F \cdot U_{oc} \cdot I_{cs}}{G\, S \cos\Theta}. \quad (9)$$

Приклад.

Як приклад розглянуто ФЕС потужністю 4 МВт, кількість ФЕМ 18348 шт, площа 10 га.

Тип модулів Hanwha SolarOne (Qidong) SF220-30-M245L. Паспортні дані: S=1,652 м^2, $P_{mв}$ = 245 Вт, θ=30^o . Станція вибрана через те, що вона експлуатується 10 років і за попередніми даними потужність її суттєво зменшилася. Як виявилося, в першу чергу, через деградацію фотоелектричних модулів. За результатами тепловізійного обстеження було виявлено аномальні температурні відхилення поверхні ряду ФЕМ.

Результати вимірювання: знято ВАХ і визначено $P_{mп}$ = 161 Вт, I=778 .

Поточне значення коефіцієнта деградації сонячної панелі визначимо за (5):

$$D_n = \frac{245-161}{245}100 = 34{,}2\,\%.$$

Значення коефіцієнтів корисної дії сонячної панелі визначимо за (8):

$$\eta_{ном} = \frac{245}{778 \times 1{,}652 \times 0{,}86} = 0{,}22 \text{ або } 22\%, \qquad \eta_n = \frac{161}{778 \times 1{,}652 \times 0{,}86} = 0{,}145 \text{ або } 14{,}5\%.$$

Через деградацію сонячних панелей ККД ФЕС зменшився на 22–14,5=7,5%.

Висновки

В задачі балансування потужності та електроенергії в електроенергетичній системі в яких встановлені джерела відновлювальної енергії вагомим є не лише метеорологічні фактори, а й технічний стан обладнання ФЕС, а саме стан фотоелектричних панелей. З впровадженням процедури відшкодування гарантованому покупцю частки вартості небалансів електричної енергії для всіх виробників ВДЕ питання стабільного генерування є актуальним. Достовірне прогнозування генерування ФЕС неможливе без визначення їх технічного стану та врахування деградації ФЕМ під час їх експлуатації.

Для аналізу стану та умов роботи фотоелектричних модулів, що експлуатуються на діючій фотоелектричній станції, розглянуто математичні моделі та методи оцінювання впливу деградації ФЕМ на генерування електроенергії. В основу математичної моделі ФЕМ покладена можливість аналізу видів їх пошкоджень, а також дослідження факторів, які впливають на деградацію ФЕМ. З метою оцінювання впливу деградації ФЕМ на залежність генерування електроенергії і подальшого практичного використання під час експлуатації ФЕС найбільш ефективним і достовірним є періодичне зняття ВАХ і відносне їх порівняння. Тоді зменшення продуктивності ФЕС як результат деградації ФЕМ визначається через параметри ВАХ і зводиться до розрахунку поточного значення коефіцієнта корисної дії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Про затвердження Правил ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку : постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 14.03.2018. № 308. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18#Text.

2. Про затвердження нормативно-правових актів, що регулюють діяльність гарантованого покупця та купівлі електричної енергії за «зеленим» тарифом : постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 26.04.2019 № 641 : зі змінами, затвердженими постановою НКРЕКП від 15.01.2021 № 46. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=83276.

3. A Review of the Degradation of Photovoltaic Modules for Life Expectancy / J. Kim et al. *Energies*. 2021. Vol. 14. P. 4278. DOI: 10.3390/en14144278.

4. Оцінювання технічного стану обладнання фотоелектричних станцій програмно-апаратними засобами / В. О. Комар та ін. *Відновлювана енергетика*. 2023. № 1. С. 19–26. DOI: 10.36296/1819-8058.2023.1(72)19-26.

5. Програмно-апаратний комплекс діагностування технічного стану обладнання фотоелектричних станцій / В. О. Комар та ін. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2022. № 2. С. 43–50. DOI: 10.20998/2224-0349.2022.02.05.

6. Визначення ймовірних місць пошкоджень фотомодулів ФЕС /П. Д. Лежнюк та ін. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2025. № 2. С. 230–239. DOI: 10.3189/2307-5732-2025-349-33.

7. De Soto W., Klein S. A., Beckman W. A. Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance. *Solar Energy*. 2006. Vol. 80. P. 78–88. DOI: 10.1016/j.solener.2005.06.010.

8. Гаєвський О. Ю. Фотоенергетика. Частина І. Сонячна радіація і фотоелектричні модулі : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 150 с.

9. Skoplaki E., Palyvos J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*. 2009. Vol. 83, № 5. P. 614–624.

Стаття надійшла до редакції 08.09.2026.
Стаття пройшла рецензування 28.09.2026.
Стаття опублікована 30.09.2026.

Лежнюк Петро Дем'янович – д-р техн. наук, професор кафедри електричних станцій і систем, e-mail: lezhpd@gmail.com , ORCID: 0000-0002-9366-3553.
Вінницький національний технічний університет.

Лиса Тетяна Олегівна – аспірантка, e-mail: tanyastyskal@ukr.net , ORCID: 0009-0004-8422-7778.
Вінницький національний технічний університет.