

Розділ 4

ЕНЕРГЕТИКА АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

УДК 620.97

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ РІЗНИХ ВИДІВ

Анджей Хоховський¹, д. т. н., Йоана Алекссюк-Гаврон¹, к. т. н., Міхал Автонюк¹, к. т. н., Віталій Боярчук², к. т. н., Валерій Сиротюк², к. т. н., Сергій Сиротюк², к. т. н., Сергій Баранович², к. т. н., Катерина Янковська², к. е. н., Оксана Боярчук², к. т. н.

¹ Варшавський університет наук про життя
вул. Новоурсиновська, 166, Варшава, Польща,
e-mail: andrzej_chochowski@sggw.pl

² Львівський національний аграрний університет
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський район,
Львівська область, Україна,
e-mail: ssyr@ukr.net

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2020.24.083>

Хоховський А., Алекссюк-Гаврон Й., Автонюк М., Боярчук В., Сиротюк В., Сиротюк С., Баранович С., Янковська К., Боярчук О. Дослідження динамічних характеристик фотоелектричних панелей різних видів

Дослідження стосується аналізу динамічних характеристик фотоелектричних панелей різних типів. Для цього три фотоелектричні панелі на базі монокристалічного, полікристалічного та аморфного кремнію були розміщені на трекері, що обертається у напрямку схід-захід, у режимі стеження за Сонцем.

Експеримент проводили для двох варіантів роботи фотоелектричних панелей: з прямим зарядом акумулятора та прямим навантаженням на резистор. Дослідження проводили в режимі неперервної роботи, а результати вимірювань інсоляції та індукованої напруги на затискачах фотоелектричних панелей реєстрували за різний часовий відлік із добовим записом файлів.

Для отриманих файлів вимірювань електричних параметрів фотоелектричних панелей за допомогою методу параметричної ідентифікації, з використанням пакета інструментів System Identification Toolbox ідентифікації системи (MATLAB & Simulink) проводився пошук раціональної моделі, яка описує динаміку панелей з достатньою точністю. Зокрема, було оцінено динаміку добової зміни рівня сонячної радіації та відповідного їй значення напруги на затискачах фотоелектричних панелей різних типів, визначено крок відгуку панелей на зміну рівня сонячної радіації, а також розглянуто характер зміни крокового відгуку при застосуванні різних моделей. Для аналізу отриманих даних від різних фотоелектричних панелей було використано моделі типу *ARX*, *TF* та *OE*.

У результаті експериментальних досліджень та математичної обробки отриманих даних не вдалося знайти оптимального виду математичної моделі відгуку фотоелектричних панелей на поточну зміну рівня сонячної радіації.

Ключові слова: фотоелектрична панель, сонячний трекер, параметрична ідентифікація, параметрична модель, динамічні характеристики.

Chochowski A., Aleksejuk-Gawron J., Awtoniuk M., Boyarchuk V., Syrotiuk V., Syrotiuk S., Baranovych S., Yankovska K., Boiarchuk O. Research of the dynamic characteristics of photovoltaic panels of different kinds

The current research is devoted to the analysis of the dynamic characteristics of photoelectric panels of different kinds. To conduct the experiment, three monocrystalline-, polycrystalline- and amorphous-silicon photoelectric panels were attached to the tracker, rotating east westward in the regime of the Sun tracking.

The experiment was conducted under two variants of operation of the photoelectric panels, particularly with a direct charge of the storage battery and direct load on the resistor. The research was performed in the regime of continuous operation, and the results of measuring of the insolation and induced voltage on the clamps of the photoelectric panels were registered by different time intervals with a daily file recording.

Using the method of parameter identification and a set of instruments System Identification Toolbox of identification of the system (MATLAB & Simulink), the researchers made a search of a rational model for the obtained files of measuring of the electric parameters of photoelectric panels, which describes dynamics of the panels with the adequate accuracy. In particular, the authors assessed the dynamics of a daily change of the level of solar radiation and the corresponding value of its voltage on the clamps of the photoelectric panels of different kinds, determined the step of the panel response to the changes of the level of solar radiation, as well as considered the character of change of a step response under different

models. To analyze the data, obtained from different photoelectric panels, the researchers used the models of *ARX*, *TF* and *OE* type.

The experimental research and mathematical processing of the obtained data have not resulted in an optimal kind of the mathematical model of the photoelectric panel response to the current change of the level of solar radiation.

Key words: photovoltaic panel, solar tracker, parametric identification, parametric model, dynamic characteristics.

Постановка проблеми. Для розробки алгоритмів управління фотоелектричною установкою, розміщеною на конструкції, яка стежить за переміщенням Сонця, необхідно знати динаміку самої фотопанелі, особливо стосовно інших елементів цієї установки. Хоча фотоелектричне перетворення швидке явище, сам процес перетворення енергії з однієї форми в іншу може мати певні особливості. З погляду програміста-автоматика, для розробки алгоритму керування фотоелектричною установкою необхідне знання її ступеневих характеристик.

У літературі питання моделювання динаміки роботи сонячних установок не надто поширене. Особливо, якщо йдеться про моделювання такої установки в контексті побудови гібридної енергосистеми на базі відновлюваних джерел, де фотопанель є одним з елементів електрогенерації. Доцільно застосовувати моделі, засновані на тій самій методології створення, з виділеними вхідними/вихідними сигналами. Вони можуть бути записані у вигляді блок-діаграм з можливістю їх розширення, а кожен блок представлений оператором передачі, що описує взаємозв'язок між потоковими сигналами. Техніка побудови таких моделей є різною залежно від використовуваного методу. Якщо можливо описати зв'язок між вхідними/вихідними сигналами диференціальним рівнянням, то можна створити теоретичну динамічну модель. Зазвичай це важко, через велику кількість складових, що впливають на явище, часто невідомих. Частіше з'являються цифрові моделі, які на основі бази даних вимірювань вводу/виводу використовують конкретні методи для розробки моделі динаміки, не вдаючись до фізики описаного явища. Тут необхідний експеримент, як правило, тривалий, з великою базою вимірювань, що дозволяє створити та перевірити модель. Для цього можуть використовуватися різні числові методи, наприклад, штучні нейронні мережі (SSN) або параметрична ідентифікація.

Нами для визначення динамічних властивостей панелей був використаний метод параметричної ідентифікації, який дозволяє моделювати будь-яке явище, в якому були визначені вхідні та вихідні сигнали. На основі вимірювальної бази даних модельоване явище можна відобразити з певною точністю. Кінцевим результатом є функція

передачі оператора, яка є динамічною моделлю і описує взаємозв'язок між вхідними/вихідними сигналами. На її основі можна визначити характеристику переходу, яка є реакцією на миттєве (стрибкове) збудження. З динаміки характеристики визначаються коефіцієнт посилення, сталі часу та будь-які інші параметри. Їх знання полегшує програмування алгоритму керування панеллю та допомагає уточнити можливі порушення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Фотоелектрика нині є однією з найшвидше зростаючих технологій відновлюваної енергетики. Основний акцент робиться на техніці та економіці фотоелектричних систем [1], на ефективності [2; 3] та періоді окупності [4]. Менша увага приділяється динамічним дослідженням, включаючи, наприклад, ступеневі характеристики, на основі яких можна визначити динамічні параметри фотоелектричних панелей.

Загалом аналізи стосуються параметрів стаціонарного стану, тобто визначення характеристик напруги, струму і так званих характеристик у точці максимальної потужності. Ці характеристики залежать від робочих параметрів: інтенсивності сонячної радіації та опору навантаження. Дані вимірювань, потрібні для розрахунків та побудови моделі, отримують експериментально. На їх основі розробляють удосконалені алгоритми для визначення вказаних характеристик для різних експлуатаційних режимів. Найпоширенішими алгоритмами оптимізації є JAYA [5; 6], Nelder-Mead (NM) [7; 8] та гібридні, які є комбінацією згаданих раніше (JAYA-NM) [9]. Ці алгоритми постійно вдосконалюються [10; 11]. Загальноприйнятими рішеннями є алгоритми, що базуються на технологіях штучного інтелекту (SSN), які мають здатність самонавчання та адаптації до будь-яких змін [12].

Для підвищення ефективності фотоелектричних установок фотопанелі розміщують на поворотній конструкції, яка відслідковує рух Сонця, для чого потрібні відповідні алгоритми управління цим рухом [13]. Розробка такого алгоритму управління положенням у звичайних умовах не є складною [14], але з урахуванням різних видів впливових чинників програмне забезпечення повинно бути більш досконалим [15].

Тим, хто розробляє алгоритм управління, необхідно знати модель динаміки роботи однієї панелі [16], а також усієї складної фотоелектричної системи [17]. Моделювання, як правило, ґрунтується на методі «чорної скриньки», який аналізує вхідні та вихідні дані системи [18]. Дослідники прагнуть, щоб модель була максимально простою, але з адекватною точністю відображення. У літературі є моделі фотоелектричної панелі, що аналізуються як об'єкт з 1-2 вхідними сигналами та одним вихідним сигналом. Вхідними сигналами є інтенсивність сонячного випромінювання і, наприклад, температура панелі, а вихідним сигналом – напруга або струм [19]. Однак найпоширенішою моделлю є та, в якій є один вхідний сигнал і один вихідний сигнал (SISO), заснований на техніці Хаммерштейна–Вайнера [20]. У нашому дослідженні також представлена модель сонячної панелі як об'єкт SISO.

Постановка завдання. На загальній поворотній конструкції (рис. 1, а) є три фотоелектричні панелі: зверху полікристалічна, монокристалічна та тонкоплівкова (подвійна), а також піранометр CM 3 (Kipp & Zonen) для оцінки інтенсивності сонячної радіації на сприймаючій площині. Система управління поворотом переміщує площину панелей за 12 кроків зі сходу на захід, згідно зі со-

нячим рухом. Привід здійснюється серводвигуном, який живиться невеликою фотоелектричною панеллю, що розташована у верхній частині поворотної конструкції. Кут нахилу площини в дослідженнях забезпечувався постійний, який становив 30° . Зміна кута нахилу до горизонту, що відображає регулювання вимірювальної площини на поточну висоту Сонця, пов'язану з часом, можлива, але лише вручну. Вимірювальні сигнали надсилаються по кабелю на випробувальний стенд (рис. 1, б), оснащений такими засобами: перетворювач напруги, регулятор, акумулятор – для кожної панелі окремо. Тобто кожна панель оснащена власним набором обладнання, що формує фотоелектричну установку.

Експериментальний стенд обладнаний комп'ютерною системою моніторингу (рис. 1, б), з можливістю вибору періоду відбору даних для вимірювань одночасно для трьох фотоелектричних установок. Результати щоденного моніторингу зберігаються у файлах, архівуються та можуть бути перетворені у файли Excel.

Як уже було зазначено, у цьому дослідженні була прийнята модель SISO, тобто один вхідний сигнал (інтенсивність сонячного випромінювання G) та один вихідний сигнал (напруга U). Вплив температури на значення напруги не враховували.



Рис. 1. Експериментальний стенд: а) фотоелектричні панелі; б) моніторингова система
Fig. 1. Test stand: а) photovoltaic panels; б) system monitoring

Через те що фотопанелі були випробувані під час роботи у двох системах: безпосередньо для зарядки акумулятора (осінь-весна 2018/2019, система А), для навантаження на опір $R = 12 \text{ Ом}$ (літо 2019, система В), здійснювався пошук моделей, які б добре відображали їхню роботу для обох варіантів досліду.

З різних параметричних моделей аналізували лише лінійні моделі, вибираючи ті, для яких найкраще підходять фактичний хід змін $U = f(G)$. Були розглянуті такі типи моделей: авторегресивна з екзогенними термами (ARX), функція передачі (TF), помилка на виході (OE), моделі процесу. Вибір типу моделі та її структури був пов'язаний з достатньо високим середньоквадратичним відхиленням (RMS), що перевищує 60 %, незалежно від ступеня хмарності та пори року.

Параметр RMS, що визначає відповідність моделі фактичним формам хвилі $U = f(G)$, є квадратним коренем помилок і є квадратним коренем MSE (середня квадратична помилка). MSE, з іншого боку, – очікуване значення квадрата «помилки», є різницею між оцінкою та оціночним значенням. Параметр RMS дозволяє порівнювати вихідні дані, що використовуються для ідентифікації, з вихідним сигналом вибраних моделей.

Виклад основного матеріалу. Робота панелі в системі А. Аналізуючи результати вимірювань панелей, що працюють у системі А, було обрано відповідний час вибірки. Вимірювання проводили для відбору даних з періодом: 5 секунд; 15 секунд; 30 секунд; 60 секунд.

Найвища придатність моделі RMS була отримана із часом вибірки 15 секунд.

Для параметричних моделей панелей, що працюють у системі А (для зарядки акумулятора),

лише в кількох випадках були отримані моделі зі ступенем відповідності не менше 60 %. Це були моделі TF та процесів. Тому було вирішено протестувати сонячні панелі в системі Б (під постійним резистивним навантаженням), що значно покращило ступінь придатності моделі.

Робота панелі в системі Б. Нижче наведені моделі, для яких ступінь придатності становив не менше ніж 70 % (див. табл.). Підсумовуються результати трьох вибраних днів з різними погодними умовами періоду вимірювання, влітку 2019 р.

Діаграми денної хвилі сонячної радіації та напруги подаються за окремі дні (рис. 2–8). На горизонтальній осі подається послідовність вимірювання, де кількість вимірювань упродовж дня становила 5760 (період вибірки 15 секунд). Найкращі атмосферні умови спостерігалися 31 липня 2019 р., 20 липня була мінлива хмарність, а день 21 липня характеризувався цілодобовою хмарністю. Помітний швидкий вплив змін сонячної радіації на зміну напруги аморфної (див. рис. 2, 4, 7) та монокристалічної (див. рис. 3, 5, 8) фотопанелей. Для полікристалічної фотопанелі ці зміни були значно меншими (див. рис. 6).

На рис. 9–13 подано ступінчасту реакцію аналізованих моделей. 20 та 21 липня характер ступінчастої реакції аморфної та монокристалічної панелей є подібний (див. рис. 9). Ступінь відгуку коливається від 0,022 до 0,052 коефіцієнта підсилення. Варто зазначити, що в кожному випадку діаграми мають незначні коливання.

З цієї причини ступінчаста реакція аморфної панелі (позначення U_2) від 21 липня підсумована на наступному рисунку та початок діаграми збільшений (див. рис. 10).

Таблиця. Вибір моделей для аналізованих днів
Table. Selection of models for the analyzed days

Дата	Панель	Модель та ступінь відповідності	Хмарність *
20.07.2019	U_2 аморфний	OE221 – 74,99 %	2
20.07.2019	U_3 монокристалічний	OE221 – 82,67 %	2
21.07.2019	U_2 аморфний	OE221 – 82,85 %	3
21.07.2019	U_3 монокристалічний	OE221 – 74,12 %	3
31.07.2019	U_1 полікристалічний	OE111 – 71,03 %	1
31.07.2019	U_2 аморфний	OE221 – 72,71 % OE111 – 72,73 %	1
31.07.2019	U_3 монокристалічний	OE221 – 74,89 % OE111 – 73,99 %	1

*Рівень хмарності визначали за шкалою 0-1-2-3, де 0 – немає хмарності, а 3 – повна хмарність.

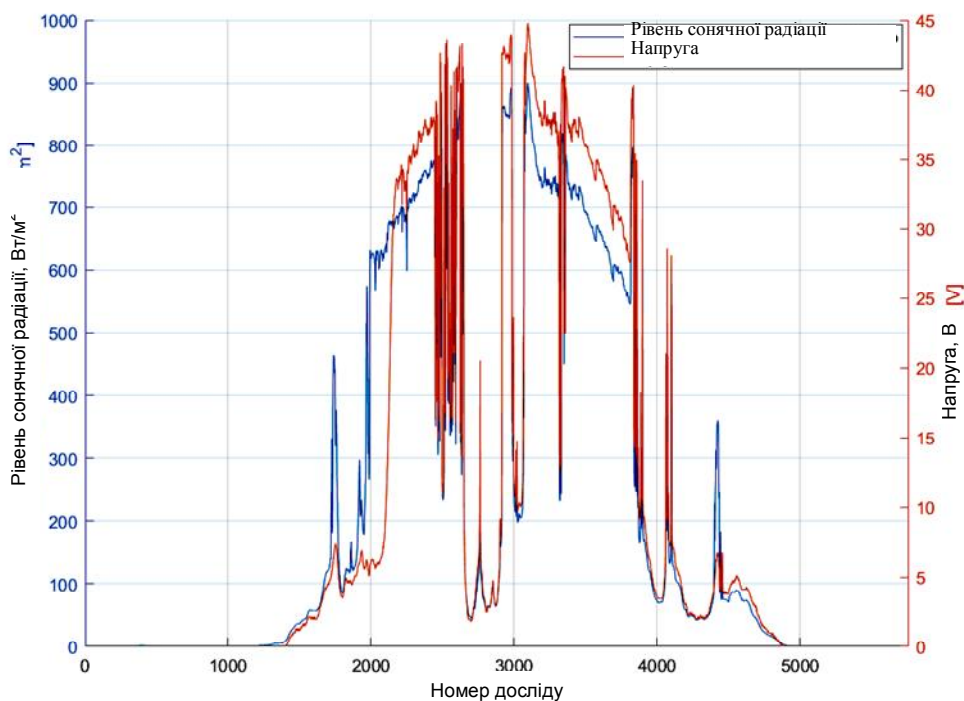


Рис. 2. Хід сонячного випромінювання та хід напруги на аморфній фотопанелі U2 – 20.07.2019
Fig. 2. The course of solar radiation and the course of voltage on the amorphous photo panel U2 on July 20, 2019

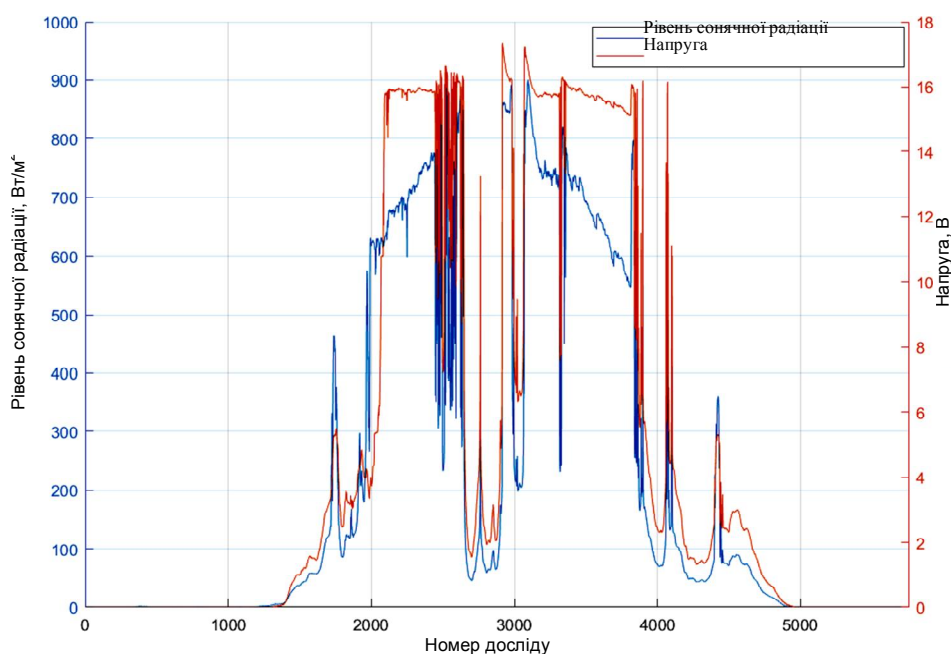


Рис. 3. Хід сонячного випромінювання та хід напруги на монокристалічній фотопанелі U3 – 20.07.2019
Fig. 3. The course of solar radiation and the course of voltage on the single-crystal photo panel U3 on July 20, 2019

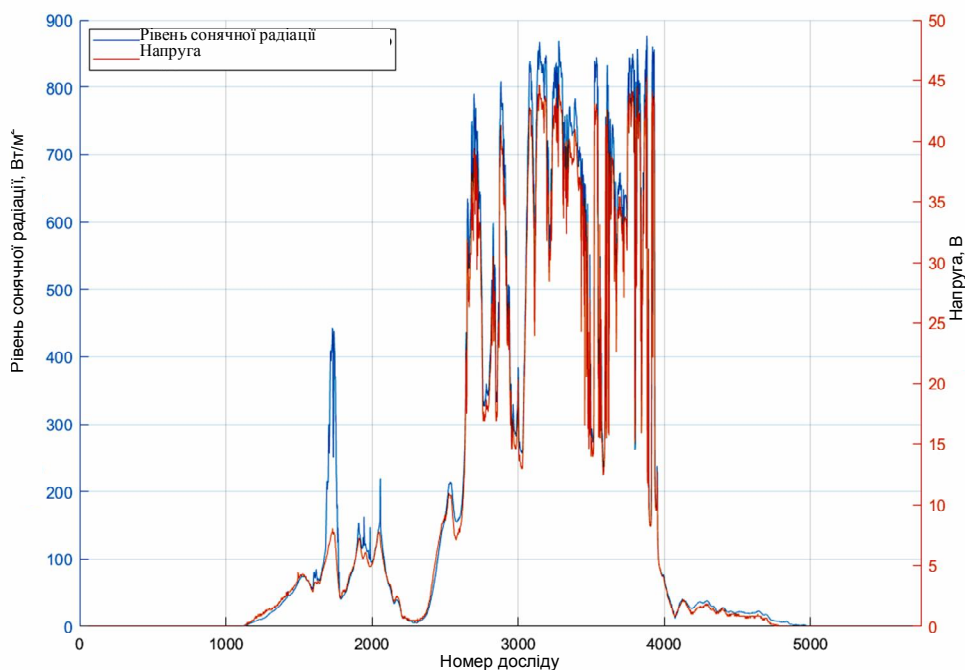


Рис. 4. Хід сонячної радіації та напруги на аморфній фотопанелі $U2$ – 21.07.2019
Fig. 4. The course of solar radiation and voltage on the amorphous photo panel $U2$ on July 21, 2019

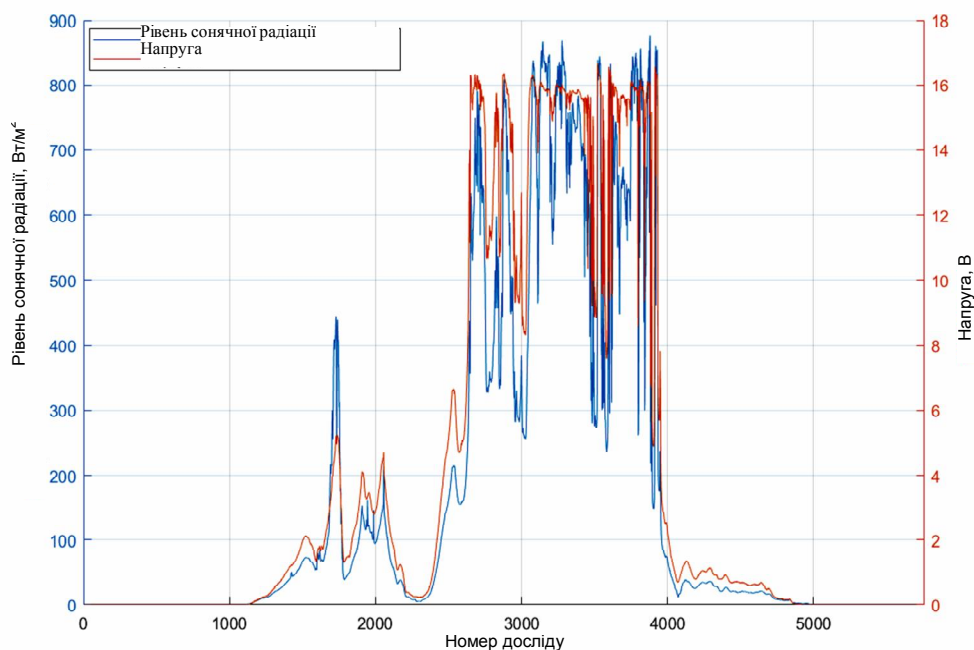


Рис. 5. Хід сонячної радіації та напруги на монокристалічній фотопанелі $U3$ – 21.07.2019
Fig. 5. The course of solar radiation and voltage on the single-crystal photo panel $U3$ on July 21, 2019

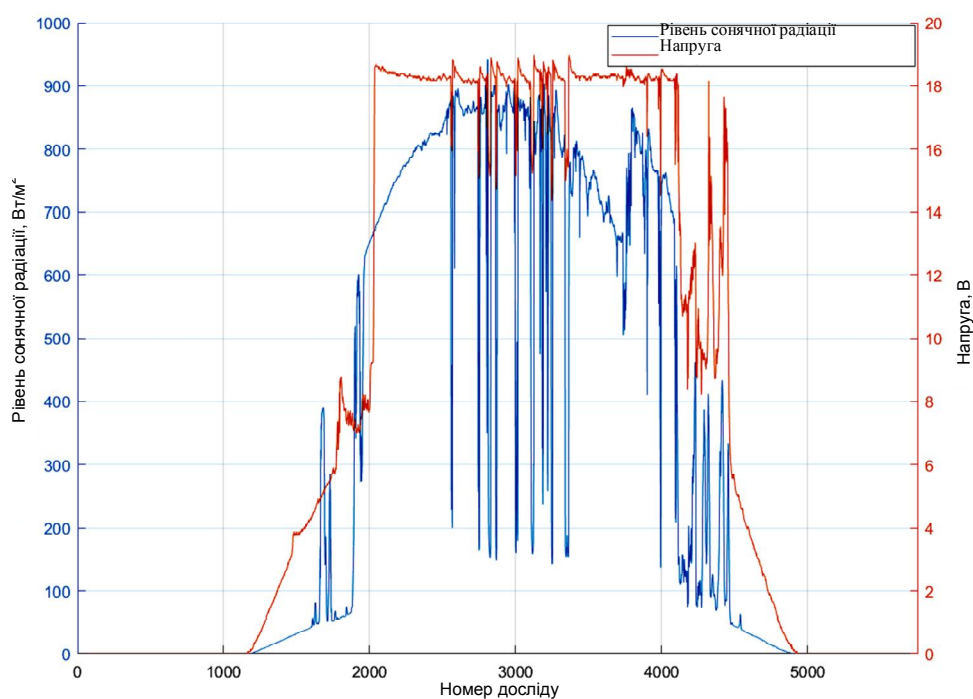


Рис. 6. Хід сонячного випромінювання та напруги на полікристалічній панелі *U1* – 31.07.2019
Fig. 6. The course of solar radiation and voltage on the polycrystalline panel *U1* on July 31, 2019

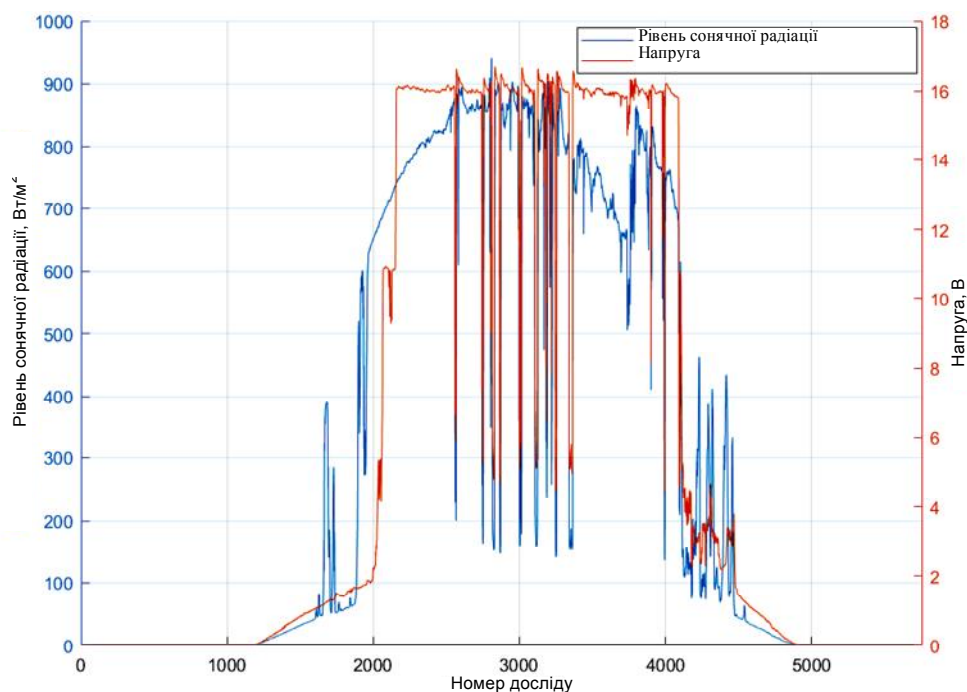


Рис. 7. Хід сонячної радіації, напруги та потужності на аморфній фотопанелі *U2* – 31.07.2019
Fig. 7. The course of solar radiation, voltage and power on the amorphous photo panel *U2* on July 31, 2019

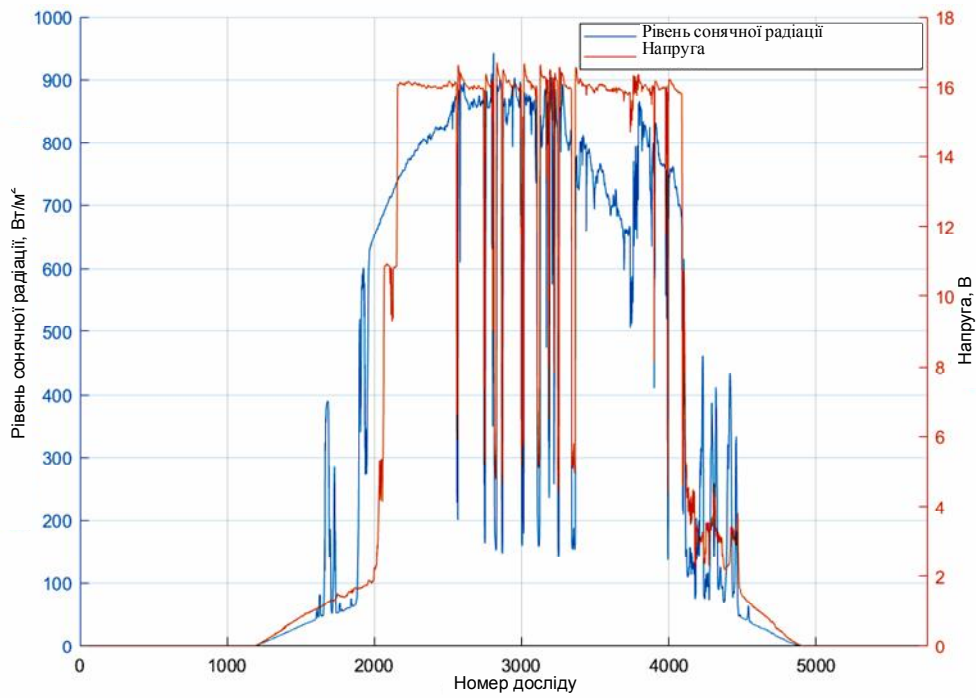


Рис. 8. Хід сонячного випромінювання, напруга та потужність на монокристалічній фотопанелі U3 – 31.07.2019
Fig. 8. The course of solar radiation, voltage and power on the single-crystal photo panel U3 on July 31, 2019

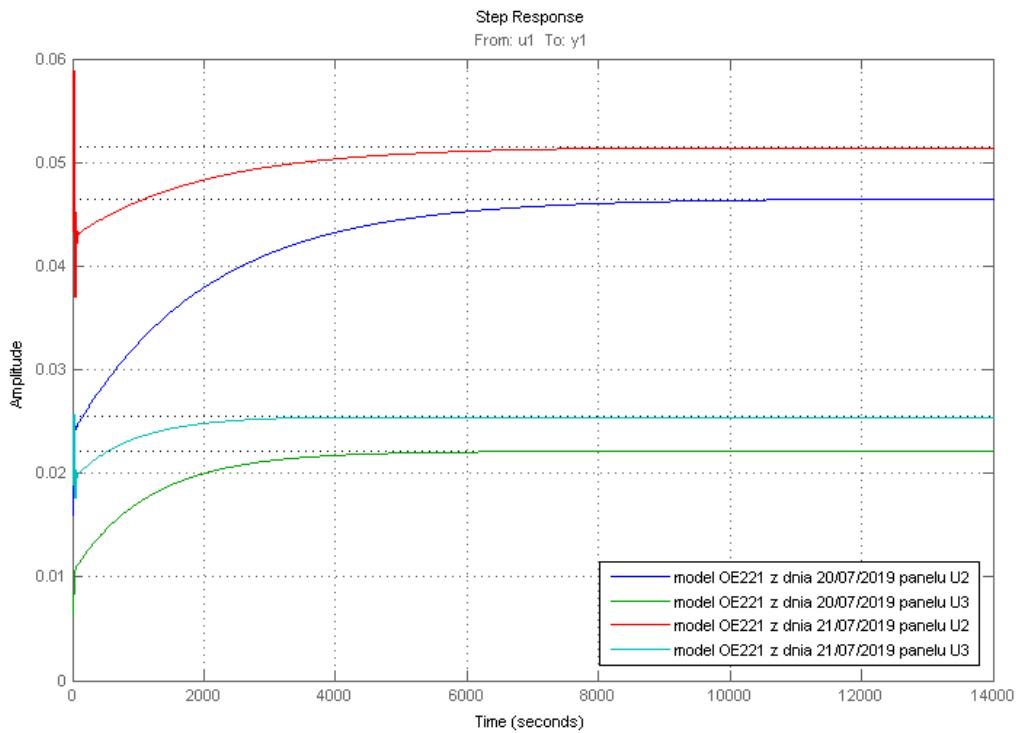


Рис. 9. Крок відгуку окремих фотопанелей 20–21 липня 2019 року
Fig. 9. Response step of individual photo panels on July 20–21, 2019

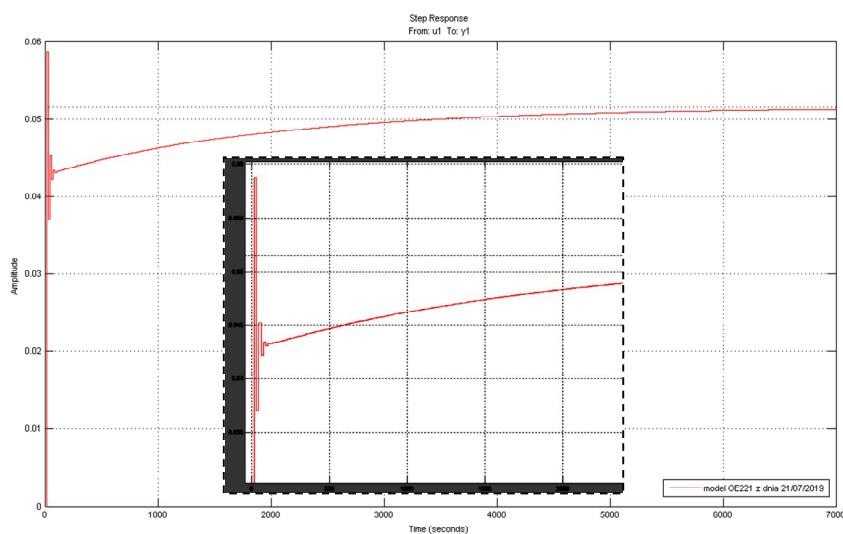


Рис. 10. Крок відгуку на аморфну панель (позначення $U2$) від 21 липня 2019 року
Fig. 10. Response step to the amorphous panel (designation $U2$) on July 21, 2019

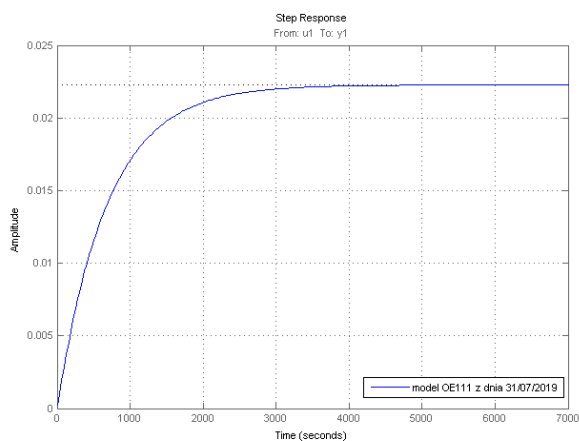


Рис. 11. Крок відгуку полікристалічної панелі (позначення $U1$) 31 липня 2019 року
Fig. 11. Response step of the polycrystalline panel (designation $U1$) on July 31, 2019

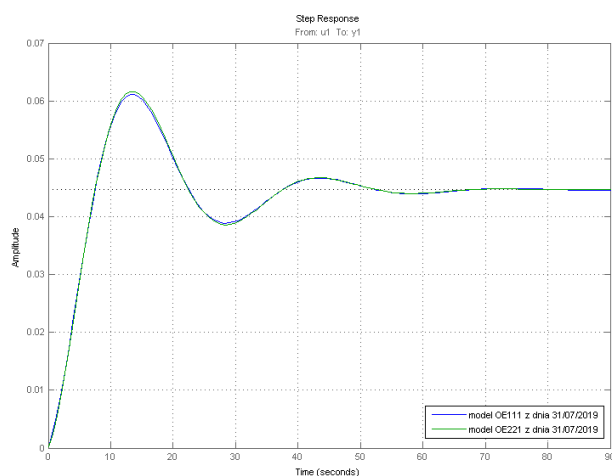


Рис. 12. Крок відгуку аморфної панелі (позначення $U2$) 31 липня 2019 року
Fig. 12. Response step of the amorphous panel (designation $U2$) on July 31, 2019

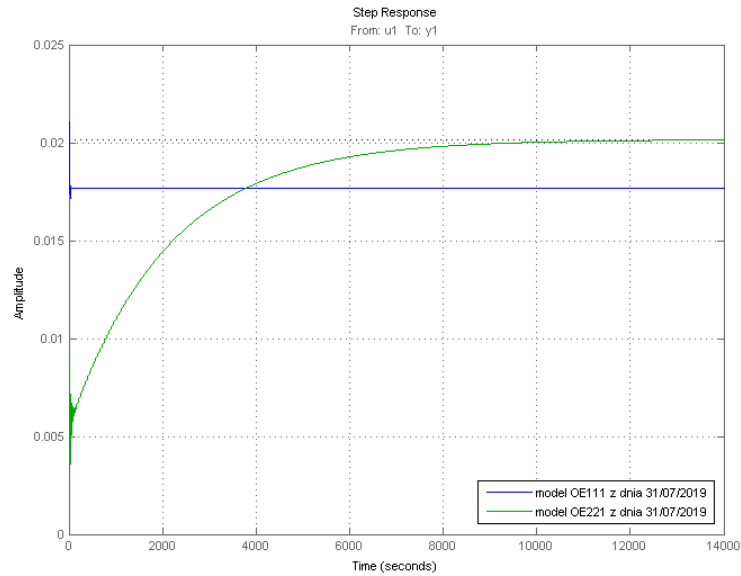


Рис. 13. Крок відгуку монокристалічної панелі (позначення $U3$) 31 липня 2019 року
Fig. 13. Response step of the single-crystal panel (designation $U3$) on July 31, 2019

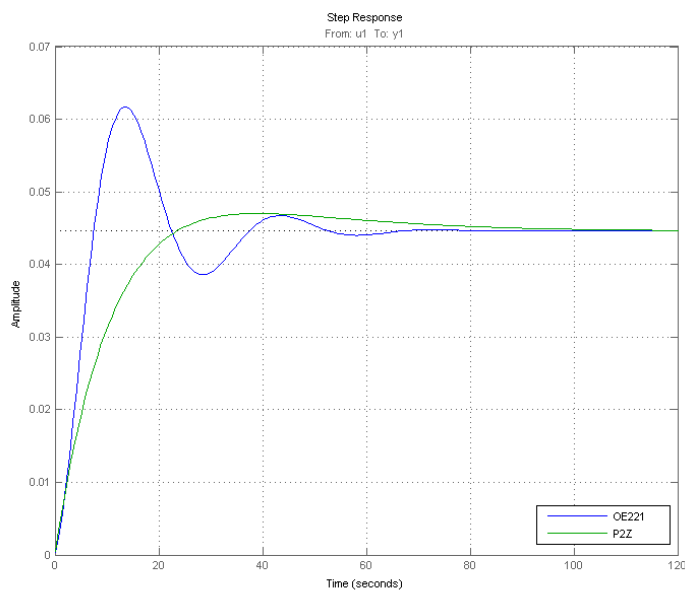


Рис. 14. Приклад зміни характеру крокового відгуку на прикладі аморфної фотопанелі (позначення $U2$) від 31 липня 2019 року

Fig. 14. Example of changing the nature of the step response on the example of an amorphous photo panel (designation $U2$) on July 31, 2019

Для 31 липня (за найкращих погодних умов) ступінчаста реакція трьох типів панелей безумовно відрізняється. Ступінь відгуку полікристалічної панелі (позначення $U1$) є інерційним (див. рис. 11) і має коефіцієнт посилення приблизно 0,022. З іншого боку, ступінчаста реакція аморфної панелі (позначення $U2$) має коливальний характер (див. рис. 12) і коефіцієнт посилення 0,045. Крок відгуку монокристалічної

панелі аналогічний моделям 20-21 липня (див. рис. 13) та коефіцієнт посилення 0,0155 OE111 та 0,02 OE221.

Аналіз індивідуальних крокових відгуків та параметричні моделі фотоелектричних панелей показали, що аналогічний ступінь відповідності (+/- 0,01-2,00%) отримується як для моделей TF , так і для технологічних моделей (з однаковою структурою).

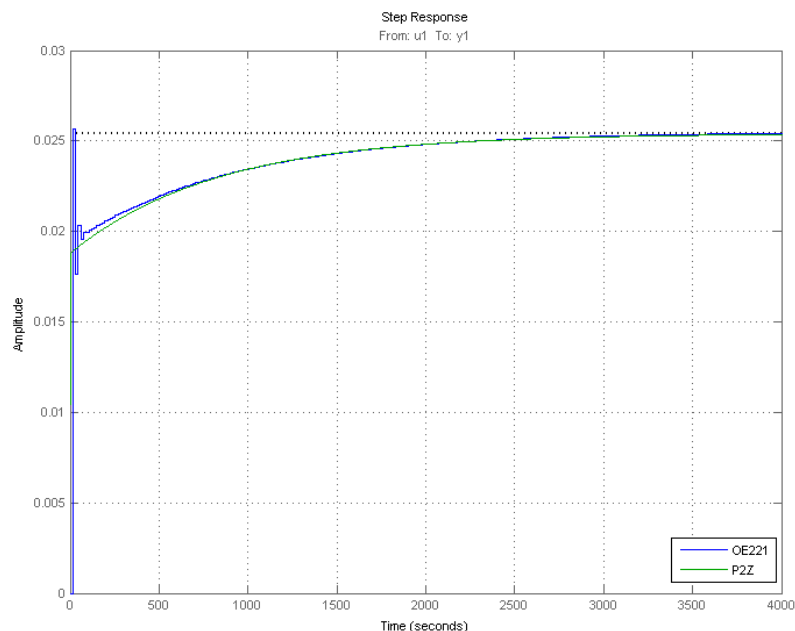


Рис. 15. Приклад зміни характеру крокового відгуку на прикладі монокристалічної фотопанелі (позначення $U3$) від 21 липня 2019 року
Fig. 15. Example of changing the nature of the step response on the example of a single-crystal photo panel (designation $U3$) on July 21, 2019

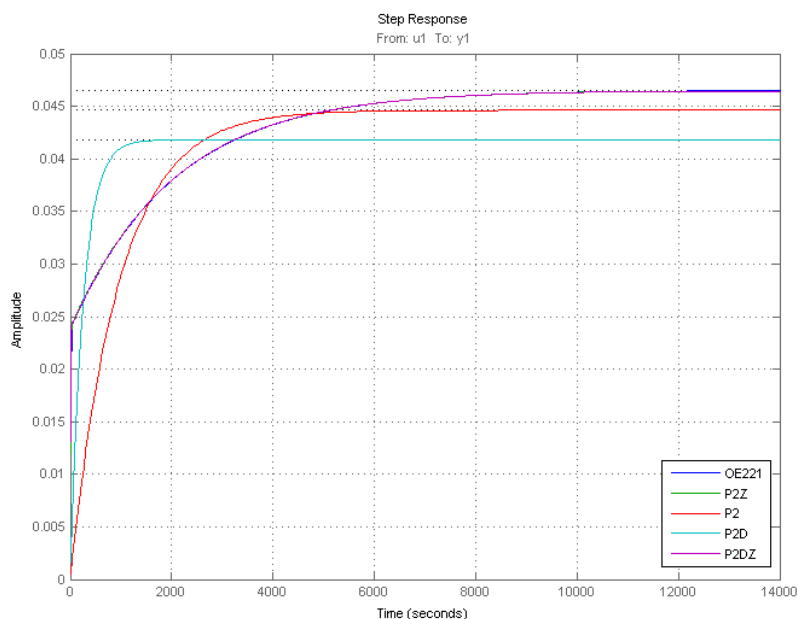


Рис. 16. Приклад зміни константи часу крокового відгуку на прикладі аморфної фотопанелі (позначення $U2$) від 20 липня 2019 року
Fig. 16. Example of changing the step response time constant on the example of an amorphous photo panel (designation $U2$) on July 20, 2019

Крокові відгуки моделей TF (з однаковою структурою) незначно відрізняються від моделей OE . Вони мають подібні форми хвиль, коефіцієнти посилення та сталі часу. Однак у випадку моделей процесів здебільшого характер крокової реакції змінюється (вони не демонструють осциляції та

коливань) (див. рис. 14, 15), а в разі спрощення моделі більшість аналізованих моделей отримують коротші сталі часу (рис. 16). Модель процесу $P2Z$ – це модель із тією ж структурою, що й модель $OE221$. З іншого боку, модель $P2ZD$ – це модель із тією ж структурою, що й модель $OE221$,

але із запізненням. Модель процесу з позначенням $P2$ – це спрощена модель із тією ж структурою, що й модель $OE211$. На відміну від цього, модель $P2D$ – це модель із тією ж структурою, що й модель $OE211$, але із запізненням.

Висновки

1. Проведені експерименти не дали однозначного результату щодо типу та структури моделі, отже, динамічні моделі для обох робочих (А і Б) систем панелей – різні.

2. Принцип розробки параметричних моделей необхідно визначати детальніше, оскільки є відмінності у ступінчастій реакції моделей TF , OE та їх процесів. Усунення неточностей у виборі типу моделі буде предметом подальших досліджень.

Бібліографічний список

- Horowitz K., Palmintier B., Mather B., Denholm P. Distribution system costs associated with the deployment of photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 90. P. 420–433.
- Ramanan P., Kalidasa K. Murugavel, Karthick A. Performance analysis and energy metrics of grid-connected photovoltaic systems. *Energy for Sustainable Development*. 2019. Vol. 52. P. 104–115.
- Venkateswari R., Sreejith S. Factors influencing the efficiency of photovoltaic system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 101. P. 376–394.
- Tervo E., Agbim K., DeAngelis F. et al. An economic analysis of residential photovoltaic systems with lithium ion T battery storage in the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 94. P. 1057–1066.
- Venkata R. Rao. Jaya: a simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. *Int. J. Ind. Eng. Comput.* 2016. Vol. 7. P. 19–34.
- Yu K., Qu B., Yue C. et al. A performance-guided JAYA algorithm for parameters identification of photovoltaic cell and module. *Applied Energy*. 2019. Vol. 237. P. 241–257.
- Chan D., Pahng J. Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from I-V characteristics. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1987. Vol. 34. P. 286–293.
- Chen Z., Wu L., Lin P. et al. Parameters identification of photovoltaic models using hybrid adaptive Nelder-Mead simplex algorithm based on eagle strategy. *Applied Energy*. 2016. Vol. 182. P. 47–57.
- Luo X., Cao L., Wang L. et al. Parameter identification of the photovoltaic cell model with a T hybrid Jaya-NM algorithm. *Optik*. 2018. Vol. 171. P. 200–203.
- Yu K., Liang J., Qu B. et al. Parameters identification of photovoltaic models using an improved JAYA optimization algorithm. *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 150. P. 742–753.
- Wu Z., Yu D., Kang X. Parameter identification of photovoltaic cell model based on improved ant lion optimizer. *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 151. P. 107–115.
- Yu K., Chen X., Wang X., Wang Z. Parameters identification of photovoltaic models using self-adaptive teaching-learning-based optimization. *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 145. P. 233–246.
- Yang Y., Kim K., Ding T. Chapter 9 - Modeling and Control of PV Systems in Control of Power Electronic Converters and Systems. *Academic Press*. 2018. P. 243–268.
- Yang Y., Kim K., Blaabjerg F., Sangwon-gwanich A. 4 - Control of PV systems under normal grid conditions in Advances in Grid-Connected Photovoltaic Power Conversion Systems. *Woodhead Publishing*. 2019. P. 75–112.
- Yang Y., Kim K., Blaabjerg F., Sangwon-gwanich A. 5 - Advanced control of PV systems under anomaly grid conditions in Advances in Grid-Connected Photovoltaic Power Conversion Systems. *Woodhead Publishing*. 2019. P. 113–152.
- Madinata K., Rahim N., Ping H., Selvaraj J. Photovoltaic module modeling using simulink/matlab. *Procedia Environmental Sciences*. 2013. Vol. 17. P. 537–546.
- Hansen A., Sørensen P., Hansen L., Bindner H. Models for a Stand-Alone PV System. Roskilde: Risø National Laboratory, 2000. 77 p.
- Alqahtani A., Alsaffar M., El-Sayed M., Alajmi B. Data-Driven Photovoltaic System Modeling Based on Nonlinear System Identification. *International Journal of Photoenergy*. 2016. URL: <https://www.hindawi.com/journals/ijp/2016/2923731/> (Last accessed: 16.08.2020).
- Hussain M. N. M., Omar A. M., Samat A. A. A. Identification of Multiple Input-Single Output (MISO) model for MPPT of Photovoltaic System 2011 *IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*. Penang, 2011. P. 49–53. doi: 10.1109/ICCSCE.2011.6190494.
- Hussain M., Omar A., Saidin P. et al. Identification of Hammerstein-Weiner System for Normal and Shading Operation of Photovoltaic System. *International Journal of Machine Learning and Computing*. 2012. Vol. 2. P. 239–243.
- Aleksiejuk-Gawron J., Milčiuviene S., Kiršienė J. et al. Net-Metering Compared to Battery-Based Electricity Storage in a Single-Case PV Application Study Considering the Lithuanian Context. *Energies*. 2020. 13(9). P. 2286.

Стаття надійшла 05.10.2020