

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ТЕПЛОВІДАЧІ U_c ТА U_v ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ФЕС В ПРОГРАМІ PVSYST

М.М. Бордаков

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
02094, вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, Україна

У наш час розповсюдженням програмним продуктом для розрахунку планової роботи сонячних станцій є PVsyst. Цей програмний продукт використовує для розрахунків такі погодні дані:

- рівень сонячної радіації;
- температура навколишнього середовища;
- середня швидкість вітру.

Погодні дані програма отримує з баз даних метеостанцій. Історичні метеодані накопичуються в базах протягом багатьох років; для виконання розрахунків програма використовує середньозважені дані для одного року (середньозважений рік). Також програма враховує особливості конкретного обладнання, що планується встановити на майбутній фотоелектричній станції (ФЕС). Погодні дані програма обирає відповідно до географічних координат об'єкта. Для отримання даних в конкретній точці програма використовує алгоритми апроксимації даних. Відомо, що в процесі роботи сонячна панель нагрівається. Даний нагрів призводить до того, що потужність панелі падає з ростом температури при сталій сонячній радіації. Рівень зменшення потужності залежно від температури характеризується коефіцієнтом γ_{Pmax} , що відповідає зменшенню потужності при підвищенні температури на 1 °C (Температурний коефіцієнт потужності). Наприклад, для панелей із полікристалічного кремнію (Si-poly) він дорівнює 0,4 %/°C. Але температурний коефіцієнт зменшення потужності характеризує зменшення потужності ФЕМ від температури робочої поверхні модуля, далі Cell Temperature або T_{cell} (°C). Для розрахунку T_{cell} використовується температура навколишнього середовища (T_{Amb}), швидкість вітру (V_{Wind}). Ці величини пов'язуються між собою через сонячну радіацію, що потрапляє на модуль ($I_{P_{00}}$, Вт/м²), та коефіцієнти тепловіддачі U_c та U_v [1]. Величина цих коефіцієнтів суттєво впливає на розрахунок температури сонячного модуля. Програма рекомендує обирати стандартні значення, але не завжди такі значення правильно описують процес теплообміну. Тому, ця стаття присвячена визначенню даних параметрів на ФЕС, яка вже працює, і переоцінки планових показників її роботи. Бібл. 8, рис. 2.

Ключові слова: СЕС (Сонячна електростанція), коефіцієнти тепловіддачі, температура робочої поверхні ФЕМ, температура навколишнього середовища, лінійна регресія.

DETERMINATION HEAT TRANSFER COEFFICIENTS U_c AND U_v FOR PV PLANTS MODELING USING PVSYST SOFTWARE

M. Bordakov

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
02094, Hnata Khotkevycha St., 20A, Kyiv, Ukraine.

Nowadays, a common software product for calculating the planned operation of solar stations called PVsyst. This software product uses weather data for calculations. Weather data used by the program for calculations:

- Data of the solar radiation.
- The data of ambient the temperature.
- Data of average wind speed.

All weather data program takes form some data bases. In that data bases, climate information collecting during long periods. For making calculations program uses moderately weighted data for typical year. Also program uses features of the equipment, that can be installed on a future PV power plant. Weather data for a specific object gets by using it geographical coordinates. The data for different geographical points are approximated. As we know, during PV Panels work it temperature rising. Due such heating process panel reduce some power. The level of power reduction according to temperature is characterized by the coefficient γ_{Pmax} (Temperature power factor). It factor characterizes the power reduction by increasing temperature to 1 °K. For Si-poly PV panels typical value of γ_{Pmax} is 0,4 % for 1 °C. But this coefficient describes the process of modules power reduction according to temperature of working panels surface, usually such temperature calls cell temperature (T_{cell}). For cell temperature calculations we use ambient temperature

T_{Amb} °C and wind speed V_{wind} m/c. That parameters connecting to each author by solar irradiation that comes to plane of PV modules array (I_{Poa} , W/m^2) and heat transfer coefficients U_c and U_v [1]. The value of these coefficients significantly affects to the temperature calculation of the solar module. PVsyst suggests use standard default value for U_c and U_v . But, default values not describes with good accuracy heat transfer process in all cases for all locations. Therefore, this article is based on the definition U_c and U_v at PV power plant, which is already working. According to defined values we can overestimate the planned performance of its work. Ref. 8, fig. 2.

Keywords: heat transfer coefficients, PV panel surface temperature, ambient temperature, linear regression.



М.М. Бордаков
M. Bordakov

Відомості про автора: аспірант Інституту відновлюваної енергетики НАН України
Освіта: Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського» за спеціальністю «Електротехніка та електротехнології». Отримав ступінь молодшого інженера-дослідника
Наукова діяльність: сонячна енергетика, апаратна частина інвертора для сонячних панелей
Публікації: 3
ORCID: 0000-0002-2890-5632
Контакти: тел.: +38(093)-56-69-447
e-mail: m.m.bordakov@gmail.com

Author information: postgraduate student Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine
Education: NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", specialty: electrical engineering and electrotechnology. Get a degree: junior research engineer
Research area: solar energy, hardware part of solar panel inverter
Publications: 3
ORCID: 0000-0002-2890-5632
Contacts: tel.: +38(093)56-69-447
e-mail: m.m.bordakov@gmail.com

Перелік використаних позначень та скорочень:

СЕС – сонячна електростанція;

U_c – коефіцієнт тепловіддачі вільного теплообміну,
 $W/m^2 \cdot ^\circ K$;

U_v – коефіцієнт тепловіддачі вимушеного теплообміну,
 $W/m^2 \cdot ^\circ K \cdot m/c$;

I_{Poa} – сонячна радіація, що потрапляє на поверхню фотомодуля W/m^2 ;

T_{cell} – робоча температура поверхні фотомодуля, °C;

T_{Amb} – температура навколишнього середовища, °C;

ФЕМ – фотоелектричний модуль.

Вступна частина. Під час будівництва промислової електростанції для оцінки її строків окупності та рентабельності будівництва за основу приймають звіт, зроблений в програмі PVsyst. Для розрахунку програма використовує погодні дані відповідно до географічного розташування ФЕС. Це такі дані:

- рівень сонячної радіації;
- температура навколишнього середовища;
- середня швидкість вітру.

Під час роботи сонячні панелі нагріваються, внаслідок чого втрачається їхня потужність. Рівень зменшення потужності залежно від температури характеризується коефіцієнтом γ_{Pmax} , що відповідає зменшенню потужності на 1 °K (Температурний коефіцієнт потужності). Наприклад для панелей із полікристалічного кремнію (Si-poly) він дорівнює 0,4 %/°C. Але коефіцієнт показує зменшення потужності залежно від температури робочої поверхні модуля, далі Cell Temperature або T_{cell} °C.

Для розрахунку T_{cell} використовується температура навколишнього середовища (T_{Amb}) і швидкість вітру (V_{wind}). Ці величини пов'язуються між собою через сонячну радіацію, що потрапляє на модуль (I_{Poa} , W/m^2), та коефіцієнти тепловіддачі U_c та U_v [1]. Величина коефіцієнтів суттєво впливає на розрахунок температури ФЕМ. Програма рекомендує обирати стандартні значення, але не завжди такі значення правильно описують процес теплообміну. Тому ця стаття присвячена визначенню даних параметрів на ФЕС, яка вже працює, і переоцінки планових показників її роботи.

Зв'язок коефіцієнтів тепловіддачі з конструктивом ФЕС. Під конструктивними особливостями розуміють спосіб, у який встановлюють сонячні панелі, а саме:

1. Наземна станція (вільне встановлення), значення коефіцієнтів приймається:

$$U_c = 29 W/m^2 \cdot ^\circ K, U_v = 0 W/m^2 \cdot ^\circ K \cdot m/c [2].$$

2. Дахова станція, значення коефіцієнтів приймається:

$$U_c = 15 \text{ Bm}/\text{m}^2 \cdot \text{K}, U_v = 0 \text{ Bm}/\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{M}/\text{C} \quad [2].$$

3. Нестандартне встановлення, наявність простору під панелями, значення коефіцієнтів приймається:

$$U_c = 20 \text{ Bm}/\text{m}^2 \cdot \text{K}, U_v = 0 \text{ Bm}/\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{M}/\text{C} \quad [2].$$

Зважаючи на швидкість вітру, програма пропонує прирівняти ці коефіцієнти до

$$U_c = 25 \text{ Bm}/\text{m}^2 \cdot \text{K}, U_v = 1,2 \text{ Bm}/\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{M}/\text{C} \quad [2].$$

Але такі значення не завжди є правильними для конкретного проєкту, тому рекомендовано з часом їх уточнити [1].

Розрахунок T_{cell} за моделлю PVsyst. Програма пропонує для розрахунку використати таку формулу (формула Файмана) [1]:

$$T_{\text{Cell}} = T_{\text{Amb}} + \frac{\alpha \cdot I_{\text{Poa}} (1 - \eta_m)}{U_{\text{Gen}}}, \quad (1)$$

де I_{Poa} – сонячна радіація, що потрапляє на поверхню фотомодуля (Bm/m^2); T_{Cell} – робоча температура поверхні фотомодуля, °C; T_{Amb} – температура навколишнього середовища, °C; α – коефіцієнт абсорбції світла фотомодуля, зазвичай приймається 0,9 для панелей Si-poly; η_m – ефективність сонячної панелі (ККД); U_{Gen} – загальний коефіцієнт теплообміну, що враховує вільний та вимушений теплообмін, який розраховується за формулою:

$$U_{\text{Gen}} = U_c + U_v \cdot V_{\text{Wind}}, \quad (2)$$

де U_c – коефіцієнт тепловіддачі вільного теплообміну ($\text{Bm}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$); U_v – коефіцієнт тепловіддачі вимушеного теплообміну

$$\text{Bm}/\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{M}/\text{C}; V_{\text{Wind}} - \text{швидкість вітру, м/с.}$$

З формул (1) і (2) робимо висновок, що ці коефіцієнти характеризують відведення тепла від

сонячної панелі залежно від умов навколишнього середовища. Чим більша швидкість вітру, тим сильніше відводиться тепло від панелі.

Метод визначення коефіцієнтів тепловіддачі. Для розрахунку даних коефіцієнтів треба визначити U_{Gen} з формули (1). Насамперед потрібно формулу (1) перетворити на:

$$T_{\text{Cell}} - T_{\text{Amb}} = \frac{\alpha \cdot I_{\text{Poa}} (1 - \eta_m)}{U_{\text{Gen}}}, \text{ де } T_{\text{Cell}} - T_{\text{Amb}} = \Delta T. \quad (3)$$

Тоді

$$U_{\text{Gen}} = \frac{\alpha \cdot I_{\text{Poa}} (1 - \eta_m)}{\Delta T}. \quad (4)$$

Вирахувати загальний коефіцієнт тепловіддачі можна, якщо наявні фактичні погодні дані. Для розрахунку рекомендовано використовувати 15-хвилинні значення. Значення за 15 хв мають бути усереднені від хвилинних значень. Хвилинні значення мають бути виміряні відповідно до стандарту IEC TS 61 724к1 [3]. Також важливо зауважити, що при низьких рівнях сонячної радіації теплообміном можна нехтувати, оскільки він майже не відбувається. Вираз (2) є звичайним рівнянням з двома невідомими, U_c та U_v відповідно. Якщо по осі «X» відкласти швидкість вітру, по осі «Y» – сумарний коефіцієнт тепловіддачі, то, побудувавши лінійну регресію, можна буде визначити наші невідомі.

Для визначення коефіцієнтів тепловіддачі в цій статті використано заміряні протягом двох років фактичні дані. Всі дані зібрані відповідно до IEC TS 61 724-1 [3]. На точність збору даних вплинули такі фактори:

1. Була використана лише одна точка вимірювання температури сонячних панелей.
2. Датчик сонячної радіації має похибку до 3 %.
3. Датчик вимірювання швидкості вітру має похибку до 1 м/с.

Зібрані дані були відфільтровані та усереднені за описаним вище принципом. На рис. 1 зображено масив точок та лінійну регресію по них.

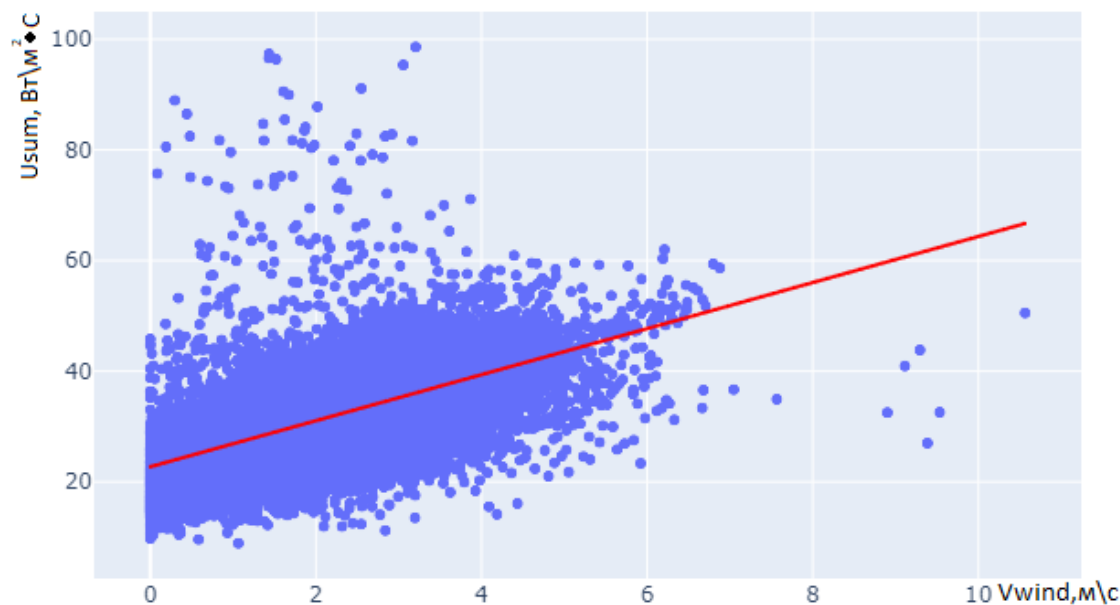


Рис. 1. Лінійна регресія побудована за масивом даних

Fig. 1. Linear regression is built on an array of data

Регресія побудована за допомогою бібліотеки Plotly для мови програмування Python. За даними регресії значення наших параметрів такі: $U_c = 22,72 \text{ Вт}(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $U_v = 4,16 \text{ Вт}(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \cdot (\text{м}/\text{с})$. Регресія була побудована методом звичайних найменших квадратів. Відповідно коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,3477704$. Стандартна похибка даної регресії s^2 для коефіцієнта U_c дорівнює 0,083, а для коефіцієнта U_v – 0,036. Всі параметри розраховані за методами, описаними в літературі [5].

Оцінка отриманих результатів. Для оцінки коректності отриманих результатів потрібно перевірити, наскільки точно можна вирахувати температуру панелей та виконати розрахунок в програмі PVsyst. Після цього слід порівняти розрахунки з фактичними значеннями.

Потужність ФЕС, для якої проводились розрахунки, – 9 МВт за змінним струмом. Температурні коефіцієнти, які використовувались для початкового моделювання її роботи, такі: $U_c = 22,4 \text{ Вт}(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $U_v = 5,7 \text{ Вт}(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \cdot (\text{м}/\text{с})$. За формулою (1) розраховуємо температуру панелей з використанням обох варіантів коефіцієнтів теплообміну. Тоді вираховуємо стандартну похибку для кожного варіанту порівняно з фактично виміряним значенням. Для наочності будуємо графік за середньою температурою за місяць для обох варіантів та графіки стандартних помилок. По осі «Y» відкладаємо температури, По осі «Y2» відкладаємо похибку, по осі «X» – місяць року. На рис. 2 зображено даний графік.

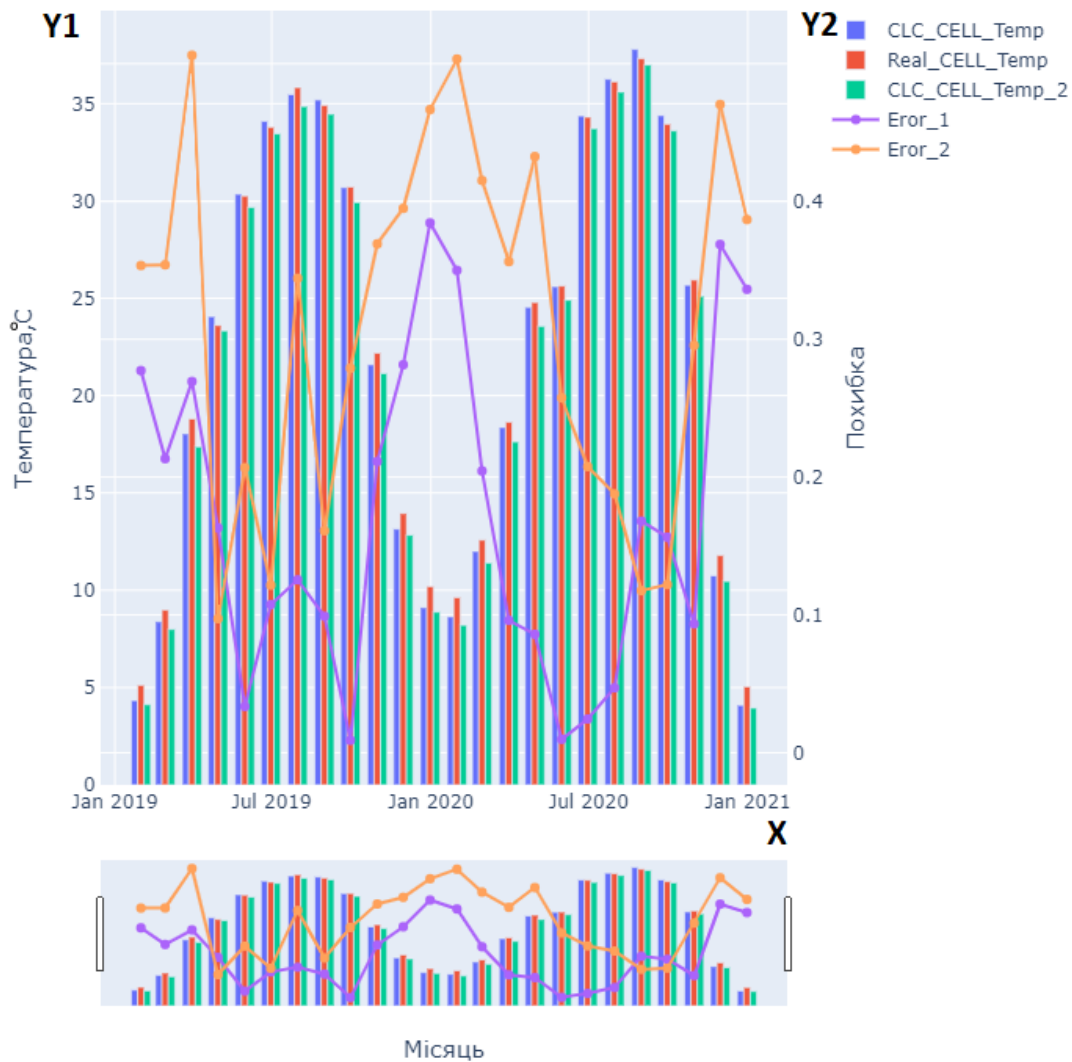


Рис. 2. Оцінка отриманих даних

Fig. 2. Evaluation of the obtained data

Крива Eror_1 відповідає похибці розрахунку температури відповідно до коефіцієнтів, визначених в цій статті. Крива Eror_2 відповідає похибці розрахунку температури відповідно до коефіцієнтів, що були використані для початкової модуляції. З рис. 2 робимо висновок, що похибка збільшується в зимовий час. Це, можливо, пов'язане з точністю вимірних величин, оскільки пристрої виміру, використані на даній ФЕС, збільшують похибку за низьких температур. Також крива Eror_1 проходить нижче, ніж крива Eror_2. Це свідчить про те, що розрахунки, виконані з використанням коефіцієнтів, визначених в даній статті, є більш точними, ніж ті, що виконані на основі закладених в початковий розрахунок.

При порівнянні розрахунків, зроблених в програмі PVSyst, слід враховувати не тільки «виконання» запланованих показників генерації, а й «виконання» запланованих показників по приходу сонячної радіації. Планові показники початкового варіанту були такі: 15 250 МВт-год в рік. Отриманий плановий результат відповідно до отриманих коефіцієнтів: 15 175 МВт-год в рік. За 2019 рік ФЕС «виконала» свій план відповідно до першого варіанту на 96,27 %, а відповідно до другого – на 96,74 %. План щодо сонячної радіації виконаний на 100,59 % для обох варіантів, адже значення коефіцієнтів не впливає на рівень сонячної радіації. За 2019 рік виконання планових показників по виробленій електроенергії ближчі

на 0,47 % до виконання плану щодо сонячної радіації.

За 2020 рік ФЕС «виконала» свій план відповідно до першого варіанту на 101,88 %, а відповідно до другого – на 102,38 %. План щодо сонячної радіації виконаний на 104,67 %. За 2020 рік планові показники по виробленій електроенергії ближчі на 0,53 % до планових показників по сонячній радіації.

Висновки по роботі. В цій статті було проведено оцінку коефіцієнтів тепловіддачі для сонячних панелей на існуючій станції. Для проведення оцінки були використані дані роботи СЕС за два роки. За описаним в статті алгоритмом можна провести аналогічні дослідження і для інших СЕС на території України та за її межами.

Основними результатами дослідження є:

1. Визначення коефіцієнтів тепловіддачі від ФЕМ.

2. Уточнення планових показників на основі отриманих даних в статті.

Планові показники, розраховані з використанням отриманих коефіцієнтів, на 0,5 % є більш точними, ніж розрахований план зі стандартними коефіцієнтами. Отже, робимо висновок, що дане дослідження дасть змогу покращити планування роботи СЕС і розрахунок їх строків окупності.

Також було проведено розрахунок температури панелей з використанням отриманих даних. Цей розрахунок показав, що похибка порівняно з реальним значенням є меншою, ніж при використанні значень, запропонованих програмою PVsyst.

Проводячи аналогічні дослідження, власники СЕС зможуть отримати дані уточнення розрахунків очікуваної потужності СЕС у конкретний проміжок часу, що дозволить правильно оцінити якість роботи обладнання та персоналу, що обслуговує СЕС. Також власник зможе швидко і точно визначити втрати від простоїв обладнання та виконання обмежень. В разі подачі прогнозних даних на добу наперед він зможе покращити точність прогнозу та зменшити свої витрати на виконання штрафів за небаланси.

1. *Faiman D.* Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics*. № 16(4). Pp. 307–315.

2. PVsyst 7.2. Photovoltaic system study. [Електронний ресурс]. URL: <http://files.pvsyst.com/help/index.html>. (дата звернення: 21.01.2021).

3. International standard IEC 61724-1. Photovoltaic system performance. Part 1. Monitoring. 2017. 10 p.

4. International standard IEC 61724-2. Photovoltaic system performance. Part 2. Capacity evaluation method. 2016.

5. *Карташов М.В.* Імовірність, процеси, статистика. Київ. ВПЦ Київський університет. 2007. 504 с.

6. *Rao C.R., Toutenburg H., Shalabh, Heumann C.* Linear Models and Generalizations (3rd ed.). Berlin. Springer. 2008. 487 p. ISBN 978-3-540-74226-5

7. Постанова НКРЕКП № 312 від 14.03.2018. [Електронний ресурс]. URL: <http://www.nerc.gov.ua/?id=31833>. (дата звернення: 21.01.2021).

8. ДСТУ 8635:2016. Геліоенергетика. Площадки для фотоелектричних станцій. Приєднання станцій до електроенергетичної системи. ДП «УкрНДНЦ». Київ. 2017. 26 с. [Електронний ресурс].

URL: <http://eom.com.ua/index.php?action=downloads;sa=download&id=3656>. (дата звернення: 21.01.2021).

REFERENCES

1. *Faiman D.* Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics*. № 16(4). Pp. 307–315. [in English]

2. PVsyst 7.2. Photovoltaic system study. [Електронний ресурс]. URL: <http://files.pvsyst.com/help/index.html>. (дата звернення: 21.01.2021). [in English]

3. International standard IEC 61724-1. Photovoltaic system performance. Part 1. Monitoring. 2017. 10 p. [in English]

4. International standard IEC 61724-2. Photovoltaic system performance. Part 2. Capacity evaluation method. 2016. [in English]

5. *Kartashov M.V.* Imovirnist, protsesy, statystyka. [Probability, processes, statistics]. Kiev. VPC Kyiv University. 2007. 504 p.

6. *Rao C. R., Toutenburg H., Shalabh, Heumann C.* Linear Models and Generalizations (3rd ed.). Berlin. Springer. 2008. 48 p. ISBN 978-3-540-74226-5 [in English]

7. Postanova NKREKP № 312 vid 14.03.2018. [Resolution of the National Commission for Regulation of Economic Competition № 312 of March 14, 2018]. [Electronic resource]. URL: <http://www.nerc.gov.ua/?id=31833>. (Applying date: 21.01.2021).

8. DSTU 8635:2016. Helioenerhetyka. Ploshchadky dlya fotoelektrychnykh stantsiy. Pryyednannya stantsiy do elektroenerhetychnoyi systemy. [DSTU 8635: 2016. Solar energy. Sites for photovoltaic stations. Connection of stations to the power system]. DP "UkrNDNC". Kiev. 2017. 26 p. [Electronic resource].

URL: <http://eom.com.ua/index.php?action=downloads;sa=download&id=3656>. (Applying date: 21.01.2021).