

УДК 620.92:621.383.51

<https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.1.4>

В.В. КУРАК

Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-4303-5671

О.В. АНДРОНОВА

Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-9597-8068

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПОТОКУ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПАСПОРТНИХ ПАРАМЕТРІВ МОДУЛЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Постановка натурних досліджень енергетичних характеристик фотоелектричних систем потребує даних з поточного надходження сонячного випромінювання на поверхню приймачів. Стандартні методи вимірювання потоку сонячної радіації передбачають використання спеціалізованих метеорологічних приладів або еталонних фотоелектричних перетворювачів, що мають доволі високу вартість. В той же час, роль еталонного може відігравати й звичайний серійний сонячний елемент або модуль за умови, що його паспортні характеристики є відомими для певної інтенсивності випромінювання.

В даній роботі запропоновано методика визначення потоку сонячного випромінювання, що спирається на паспортні параметри фотоелектричних модулів за стандартних умов тестування та безпосередньо виміряні в натурних умовах значення струму короткого замикання та температури модуля.

Спираючись на рівняння вольт-амперної характеристики фотоелектричного перетворювача та лінійну залежність струму короткого замикання від світлового потоку і температури, отримано математичний вираз, що пов'язує потік сонячного випромінювання з паспортним значенням струму короткого замикання при стандартних умовах, температурним коефіцієнтом струму, вимірними поточними значеннями струму короткого замикання та температури модуля. Показано, що запропонована методика визначення потоку сонячного випромінювання є коректною і може бути застосованою на практиці.

Для кремнієвого фотоелектричного модуля 120P/12 отримано зручний у практичному застосуванні аналітичний вираз, що дозволяє визначати потік падаючого на фотоприймальну поверхню сонячного випромінювання з вимірних поточних значень струму короткого замикання та температури модуля. На прикладі модуля 120P/12 здійснено експериментальну апробацію розробленої методики. Показано, що флуктуації струму короткого замикання від 0,73 А до 0,76 А, які спостерігалися протягом вимірювань, відповідають змінам у надходженні потоку сонячного випромінювання в діапазоні від 105 Вт/м² до 110 Вт/м².

Ключові слова: потік сонячного випромінювання, фотоелектричний перетворювач, струм короткого замикання, температура, температурний коефіцієнт струму, стандартні умови тестування.

В.В. КУРАК

Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-4303-5671

О.В. АНДРОНОВА

Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-9597-8068

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАСПОРТНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОДУЛЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Постановка натурных исследований энергетических характеристик фотоэлектрических систем требует данных по текущему поступлению солнечного излучения на поверхность приемников. Стандартные методы измерения потока солнечной радиации предполагают использование специализированных метеорологических приборов или эталонных фотоэлектрических преобразователей, имеющих достаточно большую стоимость. В то же время, роль эталонного может играть и обычный серийный солнечный элемент или модуль при условии, что его паспортные характеристики являются известными для некоторой интенсивности излучения.

В данной работе предложена методика определения потока солнечного излучения, опирающаяся на паспортные параметры фотоэлектрических модулей при стандартных условиях тестирования и непосредственно измеренные в натуральных условиях значения тока короткого замыкания и температуры модуля.

Опираясь на уравнение вольтамперной характеристики фотоэлектрического преобразователя и линейную зависимость тока короткого замыкания от светового потока и температуры, получено математическое выражение, связывающее поток солнечного излучения с паспортными значениями тока короткого замыкания при стандартных условиях, температурным коэффициентом тока, измеренными значениями тока короткого замыкания и температуры модуля. Показано, что предложенная методика определения потока солнечного излучения является корректной и может использоваться на практике.

Для кремниевого фотоэлектрического модуля 120P/12 получено удобное для практических применений аналитическое выражение, позволяющее определить поток падающего на фотоприемную поверхность солнечного излучения по измеренным значениям тока короткого замыкания и температуры модуля. На примере модуля 120P/12 осуществлено экспериментальную апробацию разработанной методики. Показано, что флуктуации тока короткого замыкания от 0,73 А до 0,76 А, наблюдавшиеся на протяжении измерений, соответствуют изменениям в поступлении потока солнечного излучения в диапазоне от 105 Вт/м² до 110 Вт/м².

Ключевые слова: поток солнечного излучения, фотоэлектрический преобразователь, ток короткого замыкания, температура, температурный коэффициент тока, стандартные условия тестирования.

V.V. KURAK

Kherson National Technical University

ORCID: 0000-0002-4303-5671

E.V. ANDRONOVA

Kherson National Technical University

ORCID: 0000-0001-9597-8068

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE SOLAR RADIATION FLUX USING PASSPORT PARAMETERS OF THE PHOTOVOLTAIC MODULE

To organize natural studies of the energy characteristics of photovoltaic systems, data on the current level of solar radiation incoming to the receiver surface are required. When using standard methods for measuring of the solar radiation flux, specialized meteorological instruments or reference solar cells are applied. Such devices are quite expensive. At the same time, an ordinary serial solar cell or module can also play the role of a reference cell under the stipulation that its passport characteristics are known for some radiation intensity.

In this paper, a method for determining of the solar radiation flux based on the passport parameters of photovoltaic modules under standard test conditions and the values of short-circuit current and module temperature directly measured in natural conditions is proposed.

Based on the equation of the solar cell current-voltage characteristic and the linear dependence of the short-circuit current and the temperature on the light flux a mathematical expression for solar radiation flux is obtained. This expression relates solar flux to the short-circuit current under standard test conditions, the temperature coefficient of the current and the measured values of the short-circuit current and the module temperature. It is shown that proposed method for determining of the solar radiation flux is correct and can be used in practice.

A convenient for practical application analytical expression has been obtained for a silicon photovoltaic module 120P/12. The expression makes it possible to determine the incited on the module surface solar flux from the measured values of the short-circuit current and the module temperature. Experimental testing of the developed method was carried out for the module 120P/12 as an example. It is shown that fluctuations in the short-circuit current from 0.73 A to 0.76 A observed during the measurements correspond to changes in the solar radiation flux in the range from 105 W/m² to 110 W/m².

Keywords: solar radiation flux, solar cell, short-circuit current, temperature, temperature coefficient of the current, standard test conditions.

Постановка проблеми

Ефективність сонячних фотоелектричних систем, доля яких в українській електроенергетиці останніми роками невідмінно збільшується, визначається не лише технічною досконалістю складових компонентів, але й значною мірою залежить від надходження сонячної енергії на поверхню приймачів.

Оскільки потоку сонячного випромінювання, що досягає поверхні Землі, притаманні мінливість і випадковий характер, то при оцінці енергетичних параметрів фотоелектричних систем на стадії їх проєктування орієнтуються на дані багаторічних метеорологічних спостережень щодо надходження прямої та дифузної складових сонячної радіації на приймальну поверхню [1]. Втім, постановка більшості натурних досліджень, пов'язаних з ефективністю сонячних фотоелектричних установок, вимагає даних з поточного надходження сонячної радіації, як головного вхідного енергетичного параметру.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Визначення інтенсивності потоку сонячного випромінювання, що потрапляє на поверхню приймача, є можливим шляхом безпосереднього вимірювання з використанням спеціальних метеорологічних приладів, як-то актинометрів, піранометрів та соляриметрів [2]. Ці прилади реєструють надходження сонячної радіації за тепловим впливом, що чиниться з боку сонячного випромінювання на поглинаючий елемент термоелектричного сенсора, та в комплексі дозволяють визначити пряму, розсіяну та сумарну радіацію. Втім, реалізація цього підходу до визначення потоку сонячного випромінювання потребує спеціального вартісного обладнання.

Залежність параметрів фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) від інтенсивності світлового потоку дає можливість реалізувати альтернативний підхід щодо визначення потоку сонячного випромінювання, який базується на використанні еталонних сонячних елементів [3]. Цей спосіб широко використовують для налаштування імітаторів сонячного випромінювання, вимірюючи струм короткого замикання еталонного ФЕП, що за незмінного спектрального складу випромінювання лінійно залежить від рівня освітленості. Налаштування потоку випромінювання від імітатора проводять до тих пір, поки струм короткого замикання, що генерується еталонним ФЕП, не буде дорівнювати тому, що визначений в умовах градування.

Використання еталонних ФЕП забезпечує задовільні за точністю результати вимірювань сумарного потоку випромінювання навіть при застосуванні в імітаторі джерел зі спектральним складом, що сильно відрізняється від сонячного. Втім, важливим моментом під час градування є забезпечення високої термостабільності еталонного зразку. На практиці це реалізується його розміщенням на термостатованому столику, або точним контролем температури зразку з наступним врахуванням температурної поправки до вимірюваного значення струму короткого замикання.

Вочевидь, еталонний ФЕП можна застосувати не лише для налаштування імітаторів Сонця, але й для визначення поточної інтенсивності сонячного випромінювання в натурних умовах за миттєвими значеннями струму короткого замикання. Однак, процедура градування еталонних сонячних елементів є доволі кропіткою і витратною, потребує дотримання відповідних умов, наявності точного й повіреного обладнання, внаслідок чого такі ФЕП зазвичай використовують лише в якості зразкових еталонів [4].

Втім, в якості еталонного можна розглядати ФЕП або фотоелектричний модуль з наперед відомими для певної інтенсивності випромінювання параметрами. Такими умовами тестування ФЕП та модулів з відомою інтенсивністю світлового потоку можуть слугувати, наприклад, стандартні умови STC, що відповідають спектру сонячного випромінювання AM1,5g зі щільністю потоку 1000 Вт/м² та температурі ФЕП 25 °C [5]. Параметри, виміряні в умовах STC, зазначаються в паспортних характеристиках фотоелектричних модулів. Встановивши значення параметрів модуля ФЕП для умов іншої освітленості та температури, можна визначити інтенсивність падаючого на фотоприймальну поверхню сонячного випромінювання з реалізації експериментальних вимірювань цих параметрів.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є розробка методики визначення потоку сонячного випромінювання, що спирається на паспортні параметри фотоелектричних модулів за стандартних умов тестування та параметри, безпосередньо виміряні в натурних умовах.

Викладення основного матеріалу дослідження

Відповідно до однопієдної еквівалентної схеми рівняння світлової вольт-амперної характеристики сонячного елемента, як залежність струму I від напруги U на опорі навантаження, записується у наступному вигляді [5]:

$$I = I_L - I_s \cdot \left[e^{\frac{q_e(U+IR_s)}{AkT}} - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_p}, \quad (1)$$

де I_L – величина фотоструму;
 I_s – струм насичення діоду;
 A – коефіцієнт якості діоду;
 k – постійна Больцмана;
 q_e – елементарний заряд;
 T – абсолютна температура ФЕП;
 R_s – внутрішній послідовний опір сонячного елемента;

R_p – шунтуючий опір ФЕП.

В режимі короткого замикання напрута на навантаженні $U = 0$. Тоді, згідно з рівнянням (1), струм короткого замикання ФЕП I_{SC} запишеться у вигляді:

$$I_{SC} = I_L - I_s \cdot \left[e^{\frac{q e I_{SC} R_s}{A k T}} - 1 \right] - \frac{I_{SC} R_s}{R_p}. \quad (2)$$

Рівняння (2) є трансцендентним відносно I_{SC} , однак його можна спростити, враховуючи те, що послідовний опір R_s сучасних ФЕП складає соті і навіть тисячні долі Ома, а струм насичення I_s на декілька порядків менший за фотострум I_L [5]. В результаті цього другим доданком у рівнянні (2) можна знехтувати у порівнянні з фотострумом:

$$I_{SC} \approx I_L - \frac{I_{SC} R_s}{R_p}. \quad (3)$$

Подальше спрощення рівняння (3) здійснюється, приймаючи до уваги той факт, що послідовний опір ФЕП R_s на декілька порядків менший, ніж шунтуючий R_p . Отже, з достатньою для практичних застосувань точністю можна вважати, що струм короткого замикання приблизно дорівнює фотоструму:

$$I_{SC} \approx I_L. \quad (4)$$

В свою чергу, фотострум лінійно залежить від інтенсивності потоку сонячного випромінювання p_0 . Тому, враховуючи рівняння (4), з достатньою для практичного використання точністю можна записати:

$$I_{SC} = C_L \cdot p_0, \quad (5)$$

де C_L – коефіцієнт пропорційності.

Лінійна залежність (5) виглядає зручною для визначення інтенсивності сонячного випромінювання з вимірювань значень струму короткого замикання. Втім, величина фотоструму, а отже і струм короткого замикання ФЕП, визначається спектром поглинання сонячного випромінювання напівпровідниковим матеріалом, що залежить від ширини забороненої зони напівпровідника. Причому, зі збільшенням температури ширина забороненої зони напівпровідника зменшується, що призводить до збільшення фотоструму завдяки розширенню спектра поглинання в довгохвильову ділянку сонячного спектру. Таким чином, навіть при сталій інтенсивності сонячного випромінювання, що надходить на фотоприймальну поверхню, зміна температури ФЕП призводить до відповідної зміни струму короткого замикання. Отже, температурна залежність струму короткого замикання має бути врахована у виразі (5).

Відношення струмів короткого замикання I_{SC2} та I_{SC1} , що відповідають двом значенням інтенсивності сонячного випромінювання p_{02} та p_{01} , за умов незмінності температури ФЕП можна представити у вигляді:

$$\frac{I_{SC2}}{I_{SC1}} = \frac{p_{02}}{p_{01}}. \quad (6)$$

Переписуючи співвідношення (6) відносно I_{SC2} та вважаючи, що струм I_{SC1} є відомим і відповідає струму короткого замикання ФЕП, вимірюваному в умовах STC, маємо:

$$I_{SC\ 25} = I_{SC\ STC} \frac{p_0}{p_{0\ STC}}, \quad (7)$$

де $I_{SC\ 25}$ – струм короткого замикання при інтенсивності сонячного потоку p_0 та температурі 25 °C;

$I_{SC\ STC}$ – струм короткого замикання в умовах STC;

$p_{0\ STC}$ – інтенсивність випромінювання в умовах STC.

Враховуючи, що $p_{0\ STC} = 1000 \text{ Вт/м}^2$, з виразу (7) можна визначити інтенсивність сонячного випромінювання p_0 , Вт/м², що відповідає значенню струму короткого замикання $I_{SC\ 25}$:

$$p_0 = 1000 \frac{I_{SC25}}{I_{SCSTC}} \quad (8)$$

Для врахування температурної залежності струму короткого замикання ФЕП скористаємось рівнянням [5]:

$$I_{SC T_2} = I_{SC T_1} [1 + \alpha_I (T_2 - T_1)], \quad (9)$$

де $I_{SC T_1}$ – струм короткого замикання при температурі T_1 ;
 $I_{SC T_2}$ – струм короткого замикання при температурі T_2 ;
 α_I – температурний коефіцієнт струму.

Взявши в якості температури T_1 температуру, що відповідає умовам STC, тобто $T_1 = 25$ °C, переписуємо вираз (9) у вигляді:

$$I_{SC T} = I_{SC25} [1 + \alpha_I (T - 25)], \quad (10)$$

де $I_{SC T}$ – струм короткого замикання при поточній температурі T .

Виразивши з рівняння (10) струм I_{SC25} та підставивши його в (8) отримуємо наступний вираз, що пов'язує інтенсивність потоку сонячного випромінювання зі струмом короткого замикання та температурою ФЕП:

$$p_0 = 1000 \frac{I_{SC T}}{I_{SCSTC} [1 + \alpha_I (T - 25)]}, \text{ Вт/м}^2 \quad (11)$$

Отже, знаючи такі паспортні параметри ФЕП або фотоелектричного модуля, як струм короткого замикання в умовах STC I_{SCSTC} , температурний коефіцієнт струму α_I , а також здійснивши вимірювання струму короткого замикання $I_{SC T}$ та температури ФЕП T , за виразом (11) можна визначити поточне значення інтенсивності потоку сонячного випромінювання p_0 , що надходить на фотоприймальну поверхню.

Коректність запропонованої методики з визначення потоку сонячного випромінювання перевірялась на прикладі фотоелектричних модулів JAP6-60-260/4BB/RE, AS-6P30-250W та LG290N1C шляхом розрахунку за виразом (11) їх струму короткого замикання $I_{SC T}$ в умовах номінальної робочої температури (NOCT) та порівняння отриманих значень з відповідними даними з технічного паспорту. Застосування умов тестування NOCT дозволяє отримати параметри фотоелектричних модулів, наближені до тих, що демонструються в реальних умовах експлуатації. Приймається, що в цих умовах освітленість складає 800 Вт/м^2 , спектр сонячного випромінювання AM1,5g, а температура оточуючого середовища становить 20 °C. Швидкість вітру є такою, що дорівнює 1 м/с . За цих умов проводиться вимірювання температури модуля, яка вказується в його технічному паспорті.

В табл. 1 наведено паспортні параметри модулів JAP6-60-260/4BB/RE, AS-6P30-250W та LG290N1C в умовах STC та NOCT [6-8], що використовувались для розрахунку струму короткого замикання та порівняння отриманих значень під час перевірки коректності методики.

Таблиця 1

Паспортні параметри фотоелектричних модулів

Параметр	Значення параметрів					
	JAP6-60-260/4BB/RE		AS-6P30-250W		LG290N1C	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
I_{SC} , А	9,04	7,28	8,75	7,09	9,80	7,89
T , °C	25	45	25	45	25	45
α_I , %/°C	+ 0,058		+ 0,05		+ 0,03	

Розрахунок струму короткого замикання фотоелектричних модулів в умовах NOCT відбувався у відповідності до виразу (11), переписаного у вигляді:

$$I_{SC T} = I_{SCSTC} [1 + \alpha_I (T - 25)] \frac{p_0}{1000}. \quad (12)$$

Під час розрахунку приймалась інтенсивність потоку сонячного випромінювання $p_0 = 800 \text{ Вт/м}^2$, температура ФЕП $T = 45 \text{ }^\circ\text{C}$, струм короткого замикання в умовах STC $I_{SC \text{ STC}}$ та температурний коефіцієнт струму α_I – у відповідності з даними табл. 1.

Оцінювалось відносне відхилення отриманих розрахункових значень струму короткого замикання для умов NOCT $I_{SC \text{ 45}}$ від зазначених у технічному паспорті $I_{SC \text{ NOCT}}$:

$$\delta = \frac{I_{SC \text{ 45}} - I_{SC \text{ NOCT}}}{I_{SC \text{ NOCT}}} 100\% . \quad (13)$$

Результати розрахунку представлено в табл. 2.

Таблиця 2

Порівняння розрахункових та паспортних значень струму короткого замикання модулів в умовах NOCT

Модуль	$I_{SC \text{ 45}}, \text{ A}$	$I_{SC \text{ NOCT}}, \text{ A}$	$\delta, \%$
JAP6-60-260/4BB/RE	7,312	7,28	0,44
AS-6P30-250W	7,07	7,09	-0,28
LG290N1C	7,887	7,89	-0,04

Як видно з аналізу даних табл. 2, відхилення розрахункових значень струму короткого замикання в умовах NOCT від паспортних для всіх трьох модулів становить менше 1%, що не перевищує допустимих відхилень параметрів, заявлених виробниками на рівні 3%. Отже, запропонована методика визначення потоку сонячного випромінювання є коректною і може бути застосованою на практиці.

Експериментальна апробація даної методики здійснювалась на прикладі фотоелектричного модуля 120P/12 на основі ФЕП із полікристалічного кремнію, що входить до складу автономної фотоелектричної системи лабораторії кафедри енергетики, електротехніки і фізики Херсонського національного технічного університету. Для модуля 120P/12 в температурному діапазоні від 0 до 60 $^\circ\text{C}$ отримано аналітичні залежності вигляду:

$$p_0 = C_I \cdot I_{SC \text{ T}} , \quad (14)$$

де C_I – коефіцієнт пропорційності, залежний від температури фотоелектричного модуля та його електрофізичних параметрів:

$$C_I = \frac{1000}{I_{SC \text{ STC}} [1 + \alpha_I(T - 25)]} . \quad (15)$$

Значення коефіцієнтів пропорційності C_I для модуля 120P/12, що у відповідності до паспортних параметрів має в умовах STC струм короткого замикання $I_{SC \text{ STC}} = 6,98 \text{ A}$ та характеризується типовим для полікристалічних кремнієвих ФЕП температурним коефіцієнтом струму $\alpha_I = +0,052 \text{ } \%/^\circ\text{C}$, представлені в табл. 3.

Таблиця 3

Значення коефіцієнтів пропорційності C_I для модуля 120P/12 при різних температурах

$T, \text{ }^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60
$C_I, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{A})$	145,15	144,39	143,64	142,89	142,16	141,43	140,71

Температурну залежність коефіцієнтів C_I для модуля 120P/12 наведено на рис. 1.

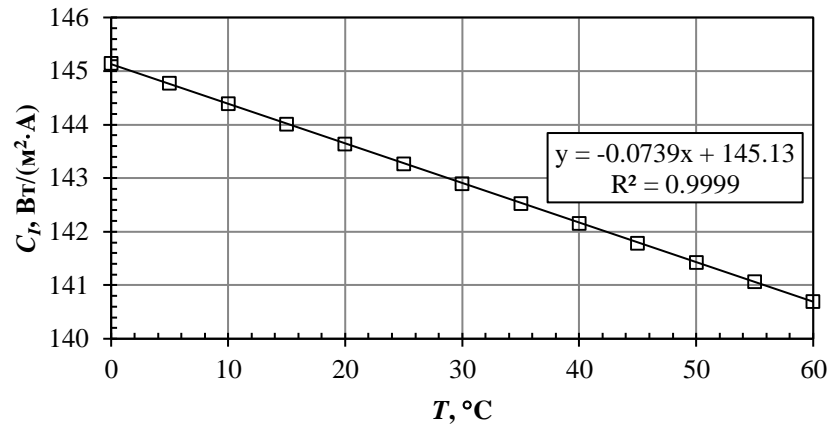


Рис. 1. Температурна залежність коефіцієнтів C_I для фотоелектричного модуля 120P/12

З рис. 1 видно, що лінійна апроксимація вигляду $C_I = 145,13 - 0,0739 T$ доволі точно з достовірністю $R^2 = 0,9999$ описує хід залежності коефіцієнту пропорційності C_I від температури. Це дозволяє замінити рівняння (15) отриманою апроксимацією і записати залежність (14) для модуля 120P/12 у зручному для практичного застосування вигляді:

$$p_0 = (145,13 - 0,0739 T) I_{SC T}, \text{ Вт/м}^2, \quad (16)$$

де температура фотоелектричного модуля має виражатися в градусах Цельсія, а значення струму короткого замикання – в Амперах.

Таким чином, вимірявши температуру модуля 120P/12 та його струм короткого замикання, за аналітичним виразом (16) розраховується потік сонячного випромінювання, що надходить на фотоприймальну поверхню.

Експериментальна апробація методики проводилась 10.11.2020 р. в період часу з 10.30 до 11.30 в умовах суцільної хмарності при температурі зовнішнього повітря 11 °C та швидкості північно-східного вітру від 2 м/с до 3 м/с. Температура модуля, що вимірювалась контактним способом за допомогою термопарного датчика, протягом експерименту була незмінною і не відрізнялась від температури оточуючого середовища, що пояснюється низькою інтенсивністю сонячного випромінювання, яке надходило на поверхню модуля лише у вигляді розсіяної складової, а також інтенсивним тепловідведенням за рахунок природного руху повітряних мас.

Часова залежність струму короткого замикання показала наявність флуктуацій в діапазоні сил струмів від 0,73 А до 0,76 А з загальною тенденцією до поступового зростання середнього значення (рис. 2), що не може бути поясненим випадковою зміною вимірювальної величини, а отже, пов'язується з флуктуаціями надходження сонячної радіації на приймальну поверхню фотоелектричного модуля. Застосування рівняння (16) дозволило встановити, що флуктуації струму короткого замикання відповідають зміні потоку сонячного випромінювання на фотоприймальній поверхні модуля в діапазоні від 105 Вт/м² до 110 Вт/м².

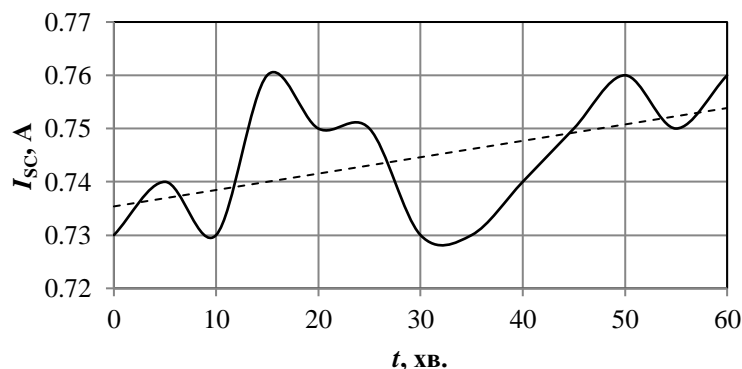


Рис. 2. Часова залежність струму короткого замикання фотоелектричного модуля 120P/12

Висновки

Запропоновано методику визначення потоку сонячного випромінювання, що надходить на приймальну поверхню фотоелектричного модуля, яка базується на вимірюванні поточного значення струму короткого замикання модуля, його температури та використовує в якості вхідних параметрів паспортні значення струму короткого замикання в умовах STC та температурний коефіцієнт струму. Коректність запропонованої методики підтверджується узгодженням значень струмів короткого замикання в умовах NOCT, визначених за даною методикою, та відповідних паспортних значень для низки фотоелектричних модулів, представлених на українському ринку фотоелектричної продукції.

Для актуального діапазону температур фотоелектричного модуля 120P/12 отримано зручний з точки зору практичного використання аналітичний вираз, що пов'язує потік сонячного випромінювання, який надходить на приймальну поверхню, з відповідними значеннями струму короткого замикання та температури модуля.

Експериментальна апробація розробленої методики з використанням модуля 120P/12 в умовах щільної хмарності дозволила встановити кореляцію між флуктуаціями струму короткого замикання та змінами у надходженні сонячної радіації до фотоприймальної поверхні. Показано, що флуктуації струму короткого замикання від 0,73 А до 0,76 А, які спостерігалися протягом вимірювань, відповідають змінам у надходженні потоку сонячного випромінювання в діапазоні від 105 Вт/м² до 110 Вт/м².

Список використаної літератури

1. Андронova О.В. Оптимізація розміщення приймачів сонячної енергії рядами для кліматичних умов півдня України / О.В. Андронova, В.В. Курак // Відновлювана енергетика. – 2020. – №2. – С. 45-53. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.2\(61\).45-53](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.2(61).45-53)
2. Паламарчук Л.В. Метеорологічні прилади та вимірювання / Паламарчук Л.В., Шевченко О.Г. – К.: Видавництво «Інтерконтиненталь-Україна», 2012. – 123 с.
3. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов / М.М. Колтун. – М.: Наука, 1985. – 280 с.
4. Градуировка эталонных солнечных элементов [Электронный ресурс] / BankSolar [Сайт]. – Режим доступа: <http://banksolar.ru/?p=6183> (дата обращения: 17.10.20). – Название с экрана.
5. Фолькер К. Системы возобновляемых источников энергии / К. Фолькер. – Астана: Фолиант, 2013. – 432 с.
6. Дополнительные технические данные панели Ja Solar JAP6 60-270 4BB [Электронный ресурс] / АксиомПлюс [Сайт]. – Режим доступа: <https://axiomplus.com.ua/solnechnye-paneli/product-75901/> (дата обращения: 2.11.20). – Название с экрана.
7. Технический паспорт Amerisolar AS-6P30-250W [Электронный ресурс] / АксиомПлюс [Сайт]. – Режим доступа: <https://axiomplus.com.ua/solnechnye-paneli/product-74670/> (дата обращения: 3.11.20). – Название с экрана.
8. LG290N1C-G3. Product Specifications [Electronic resource]. – Режим доступа: <https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TMC384/2019-2020/MonoX-Neon-LG290N1C-G3-20140915.pdf/> (дата обращения: 4.11.20). – Название с экрана.

References

1. Andronova O.V., Kurak V.V. Optimization of row placement of solar energy collectors for the climatic conditions of the south of Ukraine. Vidnovluvana energetika, 2020, no.2, pp. 45-53. doi: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.2\(61\).45-53](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.2(61).45-53)
2. Palamarchuk L.V. Meteorologichni prylady ta vymirjuvannja [Meteorological instruments and measurements]. Kyiv, Interkontinental'-Ukraina Publ., 2012, 123 p.
3. Koltun M.M. Optika i metrologia solnechnyh elementov [Optics and metrology of solar cells]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 280 p.
4. Graduivorka etalonnih solnechnyh elementov [Calibration of reference solar cells] Available at: <http://banksolar.ru/?p=6183> (accessed 17 October 2020).
5. Folker K. Sistemy vozobnovljaemyh istochnikov energii [Renewable energy systems]. Astana, Foliant Publ., 2013, 432 p.
6. Dopolnitel'nye tehnicheskie dannye paneli Ja Solar JAP6 60-270 4BB [Additional technical data for the Ja Solar JAP6 60-270 4BB panel] Available at: <https://axiomplus.com.ua/solnechnye-paneli/product-75901/> (accessed 2 November 2020).
7. Tehnicheskiy pasport Amerisolar AS-6P30-250W [Amerisolar AS-6P30-250W Datasheet] Available at: <https://axiomplus.com.ua/solnechnye-paneli/product-74670/> (accessed 3 November 2020).
8. LG290N1C-G3. Product Specifications. Available at: <https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TMC384/2019-2020/MonoX-Neon-LG290N1C-G3-20140915.pdf/> (accessed 4 November 2020).