

КОВАЛЬ Вадим

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
ORCID ID: 0000-0002-7427-6507
e-mail: kovalvp1982@gmail.com

ОРОБЧУК Богдан

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
ORCID ID: 0000-0002-6375-2440
e-mail: orobchuk@tu.edu.te.ua

ОСАДЦА Ярослав

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
ORCID ID: 0000-0002-0831-8561
e-mail: osadtca@ukr.net

КОСТИК Любо

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
ORCID ID: 0000-0003-3702-8210
e-mail: kostyklm1968@gmail.com

АВТОМАТИЗОВАНА ВИМІРЮВАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

В роботі описано розроблену та виготовлену вимірювальну установку для вимірювання електричних характеристик фотоелектричних модулів в залежності від їх температури та спектру випромінювання. З використанням вимірювальної установки досліджено вольт-амперні та вольт-ватні характеристики фотоелектричного модуля в залежності від його температури та спектру випромінювання. Зроблено висновки щодо чутливості фотоелектричного модуля до спектру випромінювання видимого діапазону та спаду енергоефективності із ростом температури.

Ключові слова: вимірювальна установка, фотоелектричний модуль, спектр випромінювання, температура.

KOVAL Vadym, OROBCHUK Bogdan, OSADTSA Yaroslav, KOSTYK Liubov
Ternopil National Ivan Puluj Technical University

AUTOMATIC MEASURING DEVICE FOR RESEARCHING THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF PHOTOELECTRIC MODULES

The article describes the developed and manufactured measuring device for measuring the electrical characteristics of photovoltaic modules depending on their temperature and radiation spectrum. The measuring device consists of a hardware and a software part. The basis for the hardware part is a personal computer with a built-in measuring board of a 16-bit analog-to-digital converter. The analog-to-digital converter processes signals from measuring current, voltage and temperature converters. As measuring current converters, shunts made of high-precision non-inductive resistance resistors were used. To measure a voltage greater than 5 V, dividers of the HP-9258 and HP-9251 type with conversion factors of 1:100 and 1:10, respectively, were used. The measuring device controls the load made of non-inductive active elements.

In order to change the spectral composition of radiation, four light filters are used, which transmit light with wavelengths in the red, yellow, green and blue region of the spectrum. After replacing them on the radiation source, the energy of the incident radiation must be set at the level of 1000 W/m².

The software that provides the measurement process is written in the Delphi programming language and works, according to the algorithm, in automatic and manual modes. Using the measuring device the volt-ampere and volt-watt characteristics of the photovoltaic module were obtained depending on its temperature and radiation spectrum. The measuring device works in manual and automatic modes. In manual mode you can measure at least one volt-ampere characteristic, and if necessary, any number of them. In automatic mode, measurements of the current-voltage characteristics of the photovoltaic module are performed as many times as necessary to complete the transition process of heating the photovoltaic module to a certain temperature.

The developed measuring device was used to study the monocrystalline photovoltaic module. The volt-ampere and volt-watt dependences of the photovoltaic module were obtained, depending on its temperature and radiation spectrum. Conclusions were made regarding the sensitivity of the photovoltaic module to the spectrum of radiation in the visible range and the decrease in energy efficiency with increasing temperature.

Keywords: measuring device, photovoltaic module, radiation spectrum, temperature.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Основною перешкодою до глобального впровадження фотоелектричних модулів на сьогодні є їх висока ціна та низька ефективність, яка залежить від багатьох експлуатаційних факторів, серед яких не останнє місце займають температура фотоелектричного модуля та спектр випромінювання Сонця. Вплив спектру випромінювання Сонця на енергоефективність фотоелектричних модулів особливо відчутний у ранковий та вечірній час та при наявності хмарності, та високої температури – у полудневий час.

У світі постійно ведуться роботи по дослідженню та підвищенню ефективності фотоелектричних перетворювачів та систем живлення на їх основі. Для розрахунку таких систем використовують вольт-амперні та спектральні характеристики фотоелектричних модулів, які надаються виробником в технічній документації. Проте при виготовленні фотоелектричної панелі постає питання енергетичної ефективності не

лише фотоелектричного модуля, але й цілої фотоелектричної панелі з захисним лакованим покриттям чи склінням, яке чинить вплив на оптичні характеристики та температурний режим.

Саме тому актуальним завданням при впровадженні нових матеріалів для створення фотоелектричного перетворювача та захисного покриття є розробка автоматизованих засобів вимірювання його електричних характеристик і встановлення залежності вольт-амперної характеристики від власної температури та спектрального складу падаючого випромінювання.

Аналіз досліджень та публікацій

Аналіз останніх досліджень та публікацій показав, що вивченню процесів у фотоелектричних модулях при їх нагріванні присвячена значна кількість публікацій, проте вимірювання їх електричних характеристик проводилося, в основному в ручному режимі [1, 2]. Не достатньо вивчена і чутливість фотоелектричних модулів до різного спектру випромінювання, оскільки автори опираються на їх технічні дані із паспортів [3]. Проте у цьому випадку не враховується світлотехнічні характеристики захисного покриття чи скління.

Авторами [4] розроблено вимірювально-обчислювальну систему для визначення в реальних умовах електричних характеристик фотоелектричних модулів методом змінного активного навантаження, яка по суті є портативною вимірювальною установкою і дозволяє оперативно на місці встановлення фотоелектричних панелей провести вимірювання їх вольт-амперних характеристик. При цьому використано метод змінного опору навантаження, коли в якості комутуючих елементів використано реле марки Songle SRD-05VDC-SL-C, які мають гірші за герконові реле дугогасильні властивості, що зменшує максимальну швидкість перемикання навантажувальних опорів. Також вимірювання проведені при енергії падаючого випромінювання, яке не відповідає рівню 1000 Вт/м^2 .

При імітації випромінювання Сонця дослідники можуть використовувати ксенонові [5] та світлодіодні лампи [6], проте їх спектр випромінювання суттєво відрізняється від сонячного. Лише галогенна лампа (лампа розжарення) має суцільний спектр, який повторює по своїй інтенсивності сонячне випромінювання.

Для нагрівання фотоелектричного модуля, як правило застосовують додаткове джерело теплової енергії. Так автор статті [7] використовує ТЕН. Проте більш зручніше сумістити джерело випромінювання та нагрівання.

В результаті проведеного аналізу літературних джерел виявлено недоліки в конструкції та методиках вимірювань і сформульовано мету даної роботи: розробити та виготовити автоматизовану вимірювальну установку для вимірювань електричних характеристик фотоелектричних модулів (панелей) в залежності від температури та спектрального складу падаючого випромінювання.

Виклад основного матеріалу

Для проведення автоматизованих вимірювань електричних характеристик фотоелектричних модулів виготовлено вимірювальну установку (рис.1). Вона виконана на базі персонального комп'ютера із вмонтованою платою 14 розрядного АЦП типу SDI-ADC14-32H [8], яка оцифровує дані від давачів струму, напруги та температури. Змінне активне навантаження, кероване персональним комп'ютером, забезпечує скорочення часу вимірювання та підвищує його точність. Джерелом випромінювання є лампа КГ 500, яка виконує функції як імітатора джерела сонячного випромінювання, так і засобу нагрівання фотоелектричного модуля шляхом теплового випромінювання. Температура фотоелектричного модуля додатково контролюється візуально на мультиметрі або з допомогою пірометра. Для зміни спектрального складу випромінювання використовуються світлофільтри на джерелі випромінювання. Після їх заміни, обов'язково встановлюється енергія падаючого випромінювання на рівні 1000 Вт/м^2 , як вимагається у державних стандартах. Даний показник контролюється приладом для вимірювання потужності сонячного випромінювання DT-1307.

У якості керованого навантаження використано цифровий (набірний) резистор, опір якого варіюється в широких межах з малим кроком у відповідності із заданим цифровим сигналом. У ньому використано високоточні безіндуктивні резистори, які забезпечують чисто активне навантаження без реактивної складової. Перемикання виконуються за допомогою контактів герконового реле, що забезпечує повну електричну ізоляцію керуючої (цифрової) частини пристрою.

Принцип роботи схеми не складний. У ній використовується набір послідовно включених резисторів, опір яких при переході від одного до іншого змінюється шляхом множення на 2, що відповідає зміні ваги розрядів двійкового керуючого сигналу. Паралельно виводам кожного резистора підключений нормально замкнутий контакт герконового реле, на обмотку якого подається цифровий сигнал відповідного розряду. У стані спокою загальний опір дорівнює нулю. Поява керуючого сигналу, відповідного одиниці молодшого розряду, замикає контакт, першого резистора. Число розрядів і найменший опір в наборі можуть задаватися з урахуванням конкретних вимог. Управління реле здійснюється за допомогою електронних ключів. Подібний варіант схеми можна використовувати в поєднанні з двійковим лічильником, який реалізує рахунок вперед або назад, або з мікроконтролером.

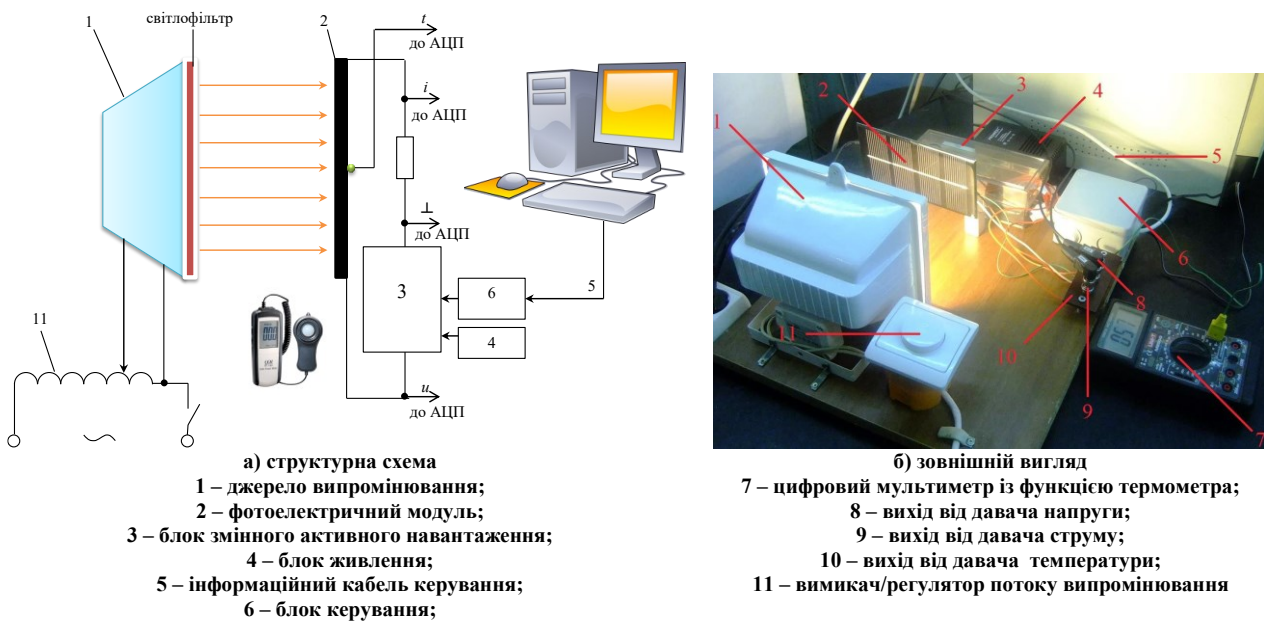


Рис. 1. Вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричного модуля

Вимірювальні перетворювачі струму та напруги. Для вимірювання часових характеристик фізичних величин в електричних колах з фотоелектричними модулями застосовано вимірювальні перетворювачі струму та напруги. В якості вимірювальних перетворювачів струму використано шунти із високоточних безіндуктивних резисторів (допустиме відхилення величини опору від номіналу 0,1 %) опором $0,1 \pm 0,0003 \text{ Ом}$ і $1 \pm 0,008 \text{ Ом}$, на яких вимірюється спад напруги. Таке значення опорів вибрано згідно наступних міркувань. Опір резистора повинен якнайменше впливати на струм досліджуваного електричного кола і разом з тим забезпечити спад напруги на ньому не більше 5 В (згідно вимог щодо вхідної напруги каналів аналого-цифрового перетворювача $U_{вх} < \pm 5 \text{ В}$). Ці шунти пройшли перевірку в Тернопільському науково-виробничому центрі стандартизації, метрології та сертифікації, що підтверджено свідоцтвами про перевірку № 60 і 61. Таким чином коефіцієнти перетворення вимірювальних перетворювачів струму становлять 1:10 та 1:1.

Так як аналого-цифровий перетворювач може вимірювати значення напруги в межах від -5 В до +5 В, то для вимірювання напруг більших значень використано серійні подільники у вигляді щупів до осцилографа типу НР-9258 та НР-9251 із коефіцієнтами перетворення 1:100 та 1:10 відповідно.

Програмне забезпечення. Використання розробленої вимірювальної установки, як автоматизованого вимірювального засобу, в основному базується на використанні спеціалізованого та стандартного програмного забезпечення. Спеціалізованим програмним забезпеченням задається алгоритм вимірювання, згідно з методикою проведення експериментальних досліджень, та обробляються отримані результати. Для проведення власне вимірювань та обробки їх результатів написано спеціалізоване програмне забезпечення. Для графічної та математичної обробки результатів вимірювань використано пакети прикладних програм Microsoft Excel, MathCAD і Advanced Grapher.

Реалізація алгоритму проведення експериментальних досліджень здійснена на основі алгоритмічної мови програмування Delphi. Це обумовлено тим, що вона має набір команд, використання яких дозволяє напряму звертатися до портів персонального комп'ютера. Саме цей факт дуже важливий, оскільки спеціалізоване програмне забезпечення, крім обробки результатів експерименту, передбачає запис і зчитування даних з послідовних та паралельних портів, до яких під'єднано аналого-цифровий перетворювач та електронні комутуючі пристрої.

Алгоритм роботи програмного забезпечення вимірювальної установки. Вимірювальна установка може працювати у двох режимах: ручному та автоматичному (рис. 2). Перехід між ними здійснюється після увімкнення живлення схеми вимірювання.

В кожному із режимів здійснюється вимірювання температури фотоелектричного модуля ($T_{фм}$), максимального струму (I_{max}) при навантаженні 0 Ом ($R_n = 0$). Воно приймається програмою як базове, відносно якого проводиться відлік величини струму, який генерує фотоелектричний модуль. В кожному із циклів вимірювання здійснюється приріст опору навантаження на 1 Ом, що призводить до зменшення струму та підвищення напруги на навантаженні (фотоелектричному модулі), які також вимірюються в циклі вимірювання. Цей процес здійснюється до того моменту, коли струм навантаження не буде менший чи рівний максимальному струму ($I_n \geq 0,1 \cdot I_{max}$). Така умова прийнята на основі аналізу вольт-амперних характеристик фотоелектричного модуля. Тобто струм, при якому із фотоелектричного модуля знімається максимальна потужність, знаходиться в межах від I_{max} до $0,1 \cdot I_{max}$. Таким чином знімається одна вольт-амперна характеристика.

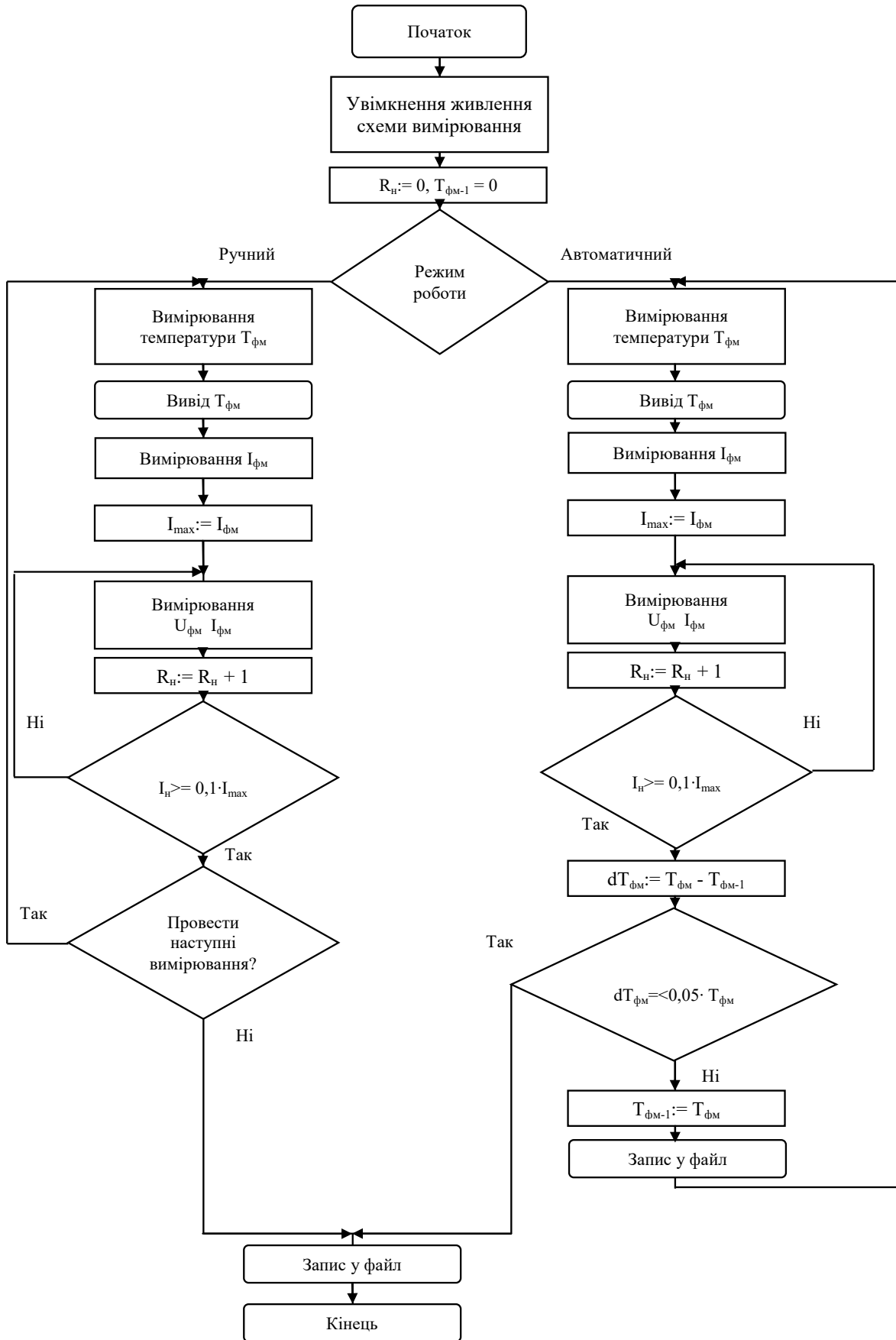


Рис. 2. Алгоритм роботи програмного забезпечення

У ручному режимі можна обмежитися однією вольт-амперною характеристикою, а можна зняти ще довільну їх кількість. Цю можливість дає оператор вибору «Провести наступні вимірювання?».

В автоматичному режимі вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричного модуля виконуються стільки разів скільки необхідно для того щоб закінчився перехідний процес нагрівання

фотоелектричного модуля. Цю функцію виконує оператор « $dT_{\text{фм}} \leq 0,05 \cdot T_{\text{фм}}$ ». Тобто коли різниця температур між вимірюваннями буде меншою чи рівною 5 % від початкової температури, вимірювання припиняться. Кількість вимірювань можна регулювати встановивши часову затримку після оператора циклу.

Після закінчення всіх необхідних вимірювань, їх результати записуються у файл для подальшої обробки в математичних та табличних редакторах.

Розроблену вимірювальну установку використано для дослідження монокристалічного фотоелектричного модуля, який зображено на рис. 1. Отримано залежності струму та потужності, які генерує фотоелектричний модуль, від напруги при різній його температурі (рис. 3) та спектрі випромінювання (рис. 4). При проведенні вимірювань потужність випромінювання на поверхні фотоелектричного модуля контролювалася на рівні 1000 Вт/м^2 . Спектр випромінювання змінювався шляхом зміни світлофільтрів. Температура фіксувалася за допомогою термометра та контролювалася пірометром.

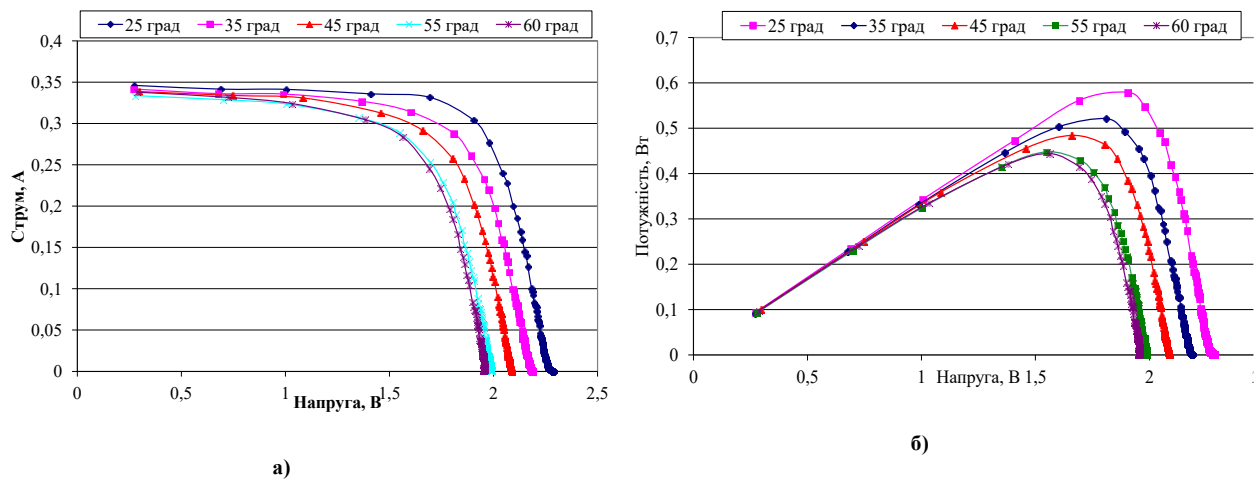


Рис. 3. Залежність струму (а) та потужності (б), які генерує фотоелектричний модуль, від напруги при зміні температури від 25 до 60 °С

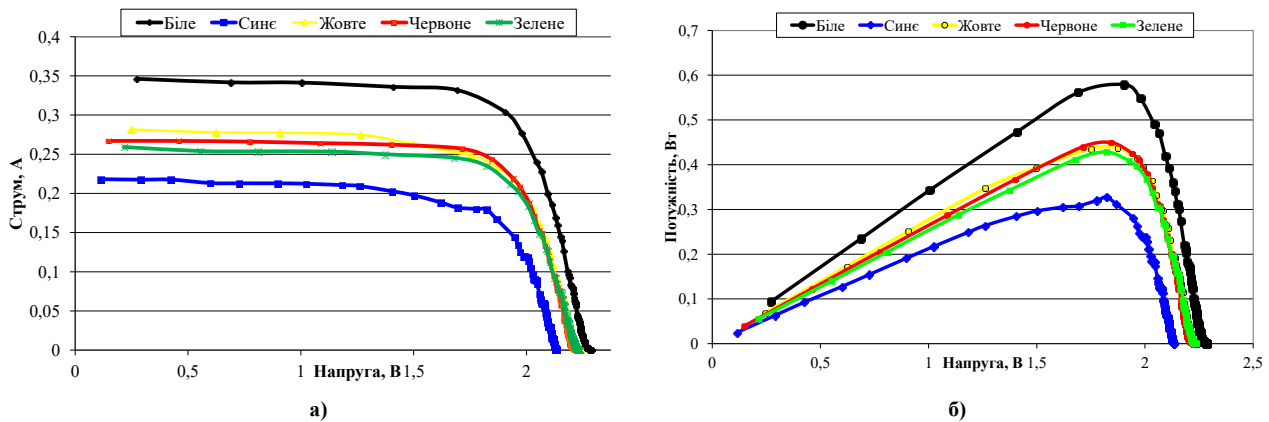


Рис. 4. Залежність струму (а) та потужності (б), які генерує фотоелектричний модуль, від напруги при зміні спектру випромінювання

Висновки

1. Розроблено та виготовлено вимірювальну установку на основі персонального комп'ютера із використанням 16-ти розрядного модуля аналого-цифрового перетворювача, яка здійснює вимірювання електричних характеристик фотоелектричних модулів як в автоматичному так і в ручному режимах.

2. Вимірювальна установка дозволяє проводити дослідження при наявності додаткового скління фотоелектричних модулів, лакових покриттів та інших оптично прозорих захисних середовищ.

3. Так як у розробленій вимірювальній установці для зміни спектрального складу випромінювання використовуються світлофільтри, то вимірювання спектральної чутливості фотоелектричного модуля і захисного скла здійснюється лише для декількох довжин хвиль.

4. Для керування роботою вимірювальної установки та обробки експериментальних даних написано програмне забезпечення, яке дало змогу автоматизувати процес вимірювань і має гнучку структуру для переорієнтації алгоритму відповідно зміни методики вимірювання, а також дозволяє відобразити і зберігати великі масиви цифрових даних.

5. Перевагою розробленої установки є відсутність додаткових джерел нагрівання фотоелектричного модуля. Його температура змінюється шляхом нагрівання від випромінювання джерела, що імітує випромінювання Сонця.

6. На основі одержаних результатів вимірювань характеристик монокристалічного фотоелектричного модуля можна стверджувати, що при зростанні його температури від 25 до 60 °C спостерігається зменшення максимуму потужності на 25 %, а сині лінії спектру поглинаються в меншій мірі ніж жовті, зелені та червоні.

7. На основі аналізу результатів експериментальних досліджень із використанням розробленої вимірювальної установки встановлено перспективні напрями подальшої роботи з метою підвищення точності та якості її роботи. Отож, слід розробити джерело живлення стабілізованої постійної напруги для джерела випромінювання, щоб уникнути пульсації потоку випромінювання. Також планується провести роботу в напрямку дослідження впливу світлопрозорих захисних покриттів при різному куті падіння випромінювання на енергоефективність фотоелектричної панелі.

Література

1. Priyanka Singh. Temperature dependence of I–V characteristics and performance parameters of silicon solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2008. Vol. 92. P. 1611–1616.
2. Cuce E., Cuce P.M. An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters. *Applied Energy*. 2013. Vol. 111. P. 374–382.
3. Libra M., Poulek V., Kouřim P. Temperature changes of I-V characteristics of photovoltaic cells as a consequence of the Fermi energy level shift. *Res. Agr. Eng.* 2017. Vol. 63. P. 10–15.
4. Гаєвський О. Ю. Система вимірювання параметрів фотоелектричних модулів в реальних умовах експлуатації / О. Ю. Гаєвський, В. Ю. Іванчук, І. О. Корнієнко // *Відновлювана енергетика*. - 2019. - № 2. - С. 32-39.
5. Андрійчук В. А. Система автономного живлення зовнішнього освітлення / В. А. Андрійчук, Я. О. Філюк // *Світлотехніка та електроенергетика*. - 2017. - № 1. - С. 17-22.
6. Іванов В.С. Визначення параметрів сонячної комірки при освітленні штучним джерелом світла / В.С.Іванов, А.Ф. Дяденчук // *Наукові записки молодих учених*. – 2021. – № 7. – С. 64-68.
7. Gedik E. Experimental investigation of module temperature effect on photovoltaic panels efficiency. *J. Polytech*. 2016. Vol. 19(194). P. 569-576.
8. Тарасенко М.Г. Віртуальний вимірювальний комплекс для дослідження перехідних процесів в електричних колах довільної конфігурації / М.Г. Тарасенко, В.П. Коваль // *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. – 2006. – Т. 8, № 1. – С. 84–91.

References

1. Priyanka Singh. Temperature dependence of I–V characteristics and performance parameters of silicon solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2008. Vol. 92. P. 1611–1616.
2. Cuce E., Cuce P.M. An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters. *Applied Energy*. 2013. Vol. 111. P. 374–382.
3. Libra M., Poulek V., Kouřim P. Temperature changes of I-V characteristics of photovoltaic cells as a consequence of the Fermi energy level shift. *Res. Agr. Eng.* 2017. Vol. 63. P. 10–15.
4. Haievskiy O. Yu. Systema vymiriuvannya parametriv fotoelektrychnykh moduliv v realnykh umovakh ekspluatatsii / O. Yu. Haievskiy, V. Yu. Ivanchuk, I. O. Kornienko // *Vidnovliuvana enerhetyka*. - 2019. - № 2. - S. 32-39.
5. Andriichuk V. A. Systema avtonomnoho zhyvlenня zovnishnoho osvittlenня / V. A. Andriichuk, Ya. O. Filiuk // *Svitlotekhnika ta elektroenerhetyka*. - 2017. - № 1. - S. 17-22.
6. Ivanov V.S. Vyznachennia parametriv soniachnoi komirky pry osvittleni shtuchnym dzhерelom svitla / V.S.Ivanov, A.F. Diadenchuk // *Naukovi zapysky molodykh uchenykh*. – 2021. – № 7. – S. 64-68.
7. Gedik E. Experimental investigation of module temperature effect on photovoltaic panels efficiency. *J. Polytech*. 2016. Vol. 19(194). P. 569-576.
8. Tarasenko M.H. Virtualnyi vymiriuvalniy kompleks dlia doslidzhennia perekhidnykh protsesiv v elektrychnykh kolakh dovilnoi konfihuratsii / M.H. Tarasenko, V.P. Koval // *Reiestratsiia, zberihannia i obrobka danykh*. – 2006. – Т. 8, № 1. – S. 84–91.

Надійшла/Paper received : 19.08.2022 р. Надрукована/Printed :01.11.2022 р.