

С.М. БОЙКО, О.А. ЖУКОВ  
Криворізький національний університет  
С.Я. ВИШНЕВСЬКИЙ, І.В. КАСАТКІНА  
Вінницький національний технічний університет  
Я.С. ДОЛУДАРЄВА  
Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

## МОДЕРНІЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ

*В останні роки у світі та в Україні спостерігається стійке зацікавлення проблемами використання відновлювальних джерел енергії, серед яких значна увага приділяється сонячним фотоелектричним установкам. Такий стан справ обумовлений світовою тенденцією до зниження негативного впливу енергетичної галузі на навколишнє середовище та сприятливого інвестиційного клімату. В енергобалансі всіх розвинених країн світу зростає частка відновлювальних джерел електроенергії, у тому числі частка енергії, що генерується сонячною енергетикою. Між тим, для покращення ефективності функціонування, і як результат прискорення терміну окупності сонячних фотоелектричних установок, актуальним питанням є вдосконалення систем управління ними. Актуальність цього питання зростає, враховуючи той факт, що за умови експлуатації сонячних фотоелектричних установок поблизу розробки деяких родовищ, треба враховувати, що в атмосферу можуть виділятися газоподібні речовини, основним із яких є радон, утворень при розпаді радія та пил, що осідає на поверхні. У статті запропонована модернізована система керування сонячної фотоелектричної установки. Результати моделювання показали, що запропонована система керування сонячної фотоелектричної установки підвищить її енергетичні характеристики на 10-15%.*

*Ключові слова: розосереджена генерація, сонячна фотоелектрична установка, система керування, модернізація.*

S.M. BOIKO, O.A. ZHUKOV  
Kryvyi Rih National University  
S.Y. VISHNEVSKY, I.V. KASATKINA  
Vinnytsia National Technical University  
Y.S. DOLUDARIEVA  
Kremenchug Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs

## MODERNIZED CONTROL SYSTEM OF SOLAR PHOTOELECTRIC INSTALLATION

*The last years in the world and in Ukraine there is the proof personal interest by the problems of the use of obnvytel'nykh energy sources which considerable attention to suns photo-electric options is spared among. Such state of businesses is conditioned by a world tendency to the decline of negative environmental impact of power industry and favourable investment climate. The part of obnvytel'nykh sources of electric power, including part of energy, grows in energobalans of the entire developed countries of world, that is generated by sun energy. Meantime, for poktaschennya efficiency of functioning, and as a result of acceleration of term of recoupment of suns fotoelektrychnyykh options, perfection of the control systems is an actual question by them. Actuality of this question grows, taking into account circumstance that on condition of exploitation of suns photo-electric options near-by development of some deposits, it is needed to take into account that the gaseous matters can be secreted in an atmosphere, from which a radon is basic, educations at disintegration of radium and dust, that settles on-the-spot. In the article the offered modernized control system of the sun photo-electric setting. The results of design rotined that the offered control system of the sun photo-electric setting would promote its power descriptions on 10-15%.*

*Key words: dispersed generation, sun photo-electric setting, control system, modernization.*

**Постановка проблеми.** В останні роки у світі та в Україні спостерігається стійке зацікавлення проблемами використання відновлювальних джерел енергії, серед яких приділяється значна увага сонячним фотоелектричним установкам. Такий стан справ обумовлений світовою тенденцією до зниження негативного впливу енергетичної галузі на навколишнє середовище та сприятливого інвестиційного клімату [1, 4].

В енергобалансі всіх розвинених країн світу зростає частка відновлювальних джерел електроенергії, у тому числі частка енергії, що генерується сонячною енергетикою [2, 5].

Між тим, для покращення ефективності функціонування, і як результат прискорення терміну окупності сонячних фотоелектричних установок (СФУ), актуальним питанням є вдосконалення систем управління ними [3].

**Актуальність цього питання** зростає, враховуючи той факт, що за умови експлуатації сонячних фотоелектричних установок поблизу розробки деяких родовищ, треба враховувати, що в атмосферу можуть виділятися газоподібні речовини, основним із яких є радон, утворень при розпаді радія та пил, що осідає на поверхні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На енергетичні характеристики керування сонячної фотоелектричної установки впливає багато факторів, як природніх, від яких напряду залежать енергетичні характеристики установки, так і ті, що виникають в умовах де експлуатується установка. Результати попередніх досліджень показали, що значний вплив серед інших факторів, на енергетичні характеристики сонячної фотоелектричної установки мають інсоляція, температура та чистота поверхні установки [6-11].

У попередніх дослідженнях обґрунтовано позитивний ефект від впровадження системи очищення поверхні фотоелектричної установки та аспекти експлуатації у різних умовах [8, 9].

**Визначення раніше невирішених частин загальної проблеми.** Таким чином, актуальною науково-практичною задачею є модернізація системи керування сонячної фотоелектричної установки, враховуючи раніше проведені дослідження щодо технічного покращення її енергетичних характеристик.

**Мета статті.** Головною метою цієї роботи є модернізація системи керування сонячної фотоелектричної установки з метою покращення її енергетичних характеристик.

**Виклад основного матеріалу.** При розробці корисних копалин в атмосферу кар'єрів виділяється також пил, що представляє собою дрібні тверді частинки розміром менше 0,1 - 0,5 мм., що можуть бути ядовиті і не ядовиті. До не ядовитого пилу відносять кварцовий пил. Ядовитий та радіоактивний пил можуть призводити до ракових захворювань [5].

Фізика процесу поширення пилу дозволяє виявити три основних фактори, що визначають пилову обстановку на будь-якому об'єкті, – це: вміст пилу в повітрі, винос (викид) пилу потоками, що рухаються, і відкладення пилу на прилеглих до її джерел територіях. Цілком логічно досліджувати ці чинники у взаємному зв'язку, причому головним з них є вміст пилу в повітрі, а наступні два залежать від нього і від параметрів аерозольної системи, зокрема, від швидкості газоповітряного потоку, маси пилових частинок і параметрів показників, що характеризують дифузію цих частинок.

Враховуючи умови оточуючого середовища, є доцільним введення додаткового коефіцієнту запиленості поверхні скла –  $K_{зан}$ . Значення даного коефіцієнту залежить від ККД номінального сонячного елемента відносно ККД розрахункового.

$$\eta_{розр.(ФЕП)} \leq \eta_{ном.(ФЕП)}$$

тобто

$$K_{зан} = (0 \dots \eta_{розр.(ФЕП)})$$

При різних значеннях  $K_{зан}$  необхідно проводити певні дії, щодо обслуговування сонячних панелей, з метою підвищення їх віддачі:

якщо  $K_{зан} = 0$  то не потрібно проводити непланову очистку СФУ, або виконувати перевірку працездатності СФУ.

якщо  $K_{зан} = 0,25$  то рівень генерації електричної енергії знаходиться на низькому рівні, необхідно проводити додаткову очистку СФУ.

якщо  $K_{зан} = 0,5$  то для підтримки номінальної генерації, необхідно проводити планову очистку СФУ.

якщо  $K_{зан} = 1$  то необхідності в проведенні очистки СФУ не виникає оскільки в цьому діапазоні генерація є близькою до номіналу.

Враховуючи всі вище наведені коефіцієнти  $\tau_{пр}$  і  $\tau_{ногл}$ , дійсний коефіцієнт пропускання визначається за формулою:

$$\tau_{прон} = \tau_{пр} \cdot \tau_{ногл} \cdot K_{зан}$$

З урахуванням всіх вище наведених залежностей була складена математична модель СФУ, в загальному вигляді, яку можна представити системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} U_{СФЕ}(T, I, J) &= \frac{A \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \left[ \frac{(I \cdot z - J) e^{\frac{q}{A \cdot k \cdot T} \left[ U_{оХХ} - \left( \frac{I - I_0}{I_0} \right) J_{оКЗ} \cdot R_{II} + \kappa \cdot \lg \left( \frac{I}{I_0} \right) + U_{оХХ} \cdot \beta_U (T - T_0) \right] - 1}}{I \cdot z} + 1 \right] - J R_{II} \\ J_{КЗ}(I, T) &= J_{оКЗ} + \frac{I - I_0}{I_0} J_{оКЗ} + \beta_I \cdot J_{оКЗ} (T - T_0) \\ T(I, T_B, \nu) &= \frac{I' [\mu - \eta_0 (1 + \chi \cdot T_0)] + [(5,7 + 3,8\nu) + 4\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_B^3(n, t)] F \cdot T_B(n, t)}{[(5,7 + 3,8\nu) + 4\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_B^3(n, t)] F - I' \cdot \eta_0 \cdot \chi} \\ I(I_{II}, I_D, \rho, \Lambda, Y, \Omega, \tau_{прон}) &= \left[ I_{II} \frac{\cos \Lambda}{\cos \Omega} + I_D \frac{(1 + \cos Y)}{2} + \rho(n) [(I_{II} + I_D)] \frac{(1 - \cos Y)}{2} \right] \tau_{прон} \\ \tau_{прон}(\Lambda) &= (1 - \rho_{омр}(\Lambda)) \exp \left( -K \frac{B}{\cos \Lambda} \right) \\ U_{СФУ} &= N_{ПС} \cdot U_{СФЕ}(T, I, J) \\ J_{СФУ} &= N_{ПР} \cdot J \cdot S_{СФЕ} \\ P_{СФУ} &= U_{СФУ} \cdot J_{СФУ} \\ \tau_{прон} &= \tau_{пр} \cdot \tau_{ногл} \cdot K_{зан} \end{aligned} \right.$$

де  $U_{\text{CFУ}}$  – напруга СФУ, В;  $k$  – безрозмірний параметр кривизни ВАХ;  $k$  – постійна Больцмана, Дж/°К;  $q$  – заряд електрона, Кл;  $T$  – температура СФУ, К;  $I, \Gamma$  – інтенсивність сонячного випромінювання, падаючого на поверхню СФУ і віднесена до одиниці поверхні СФУ, Вт/м<sup>2</sup>;  $z$  – коефіцієнт пропорційності густни фото потоку до інтенсивності сонячного випромінювання, А·м<sup>2</sup>/Вт·см<sup>2</sup>;  $J$  – густина струму, А/см<sup>2</sup>;  $U_0, J_0$  – напруга холодного ходу (В) і густина струму короткого замикання (А/см<sup>2</sup>) СФУ, зміни при стандартних умовах освітленості АМ1 ( $I_0=1000$  Вт/м<sup>2</sup>;  $T_0 =298,15$  °К);  $R_{\text{л}}$  – внутрішній електричний опір (последовне), Ом·см<sup>2</sup>;  $\kappa$  – безрозмірний коефіцієнт освітленості;  $\beta_I, \beta_U$  – температурні коефіцієнти струму і напруги, К<sup>-1</sup>;  $J_{\text{кз}}$  – густина струму короткого замикання, А/см<sup>2</sup>;  $\mu$  – інтегральний коефіцієнт поглинання сонячного випромінювання СФУ;  $\eta_0$  – коефіцієнт корисної дії (КПД) СФУ одержаний при стандартних умовах випробувань;  $\chi$  – температурний градієнт, залежний в основному від типу і конструкції СФУ, К<sup>-1</sup>;  $(5,7+3,8v)$  – розмірне співвідношення Мак–Адамса для розрахунку коефіцієнта конвекції, Вт/(м<sup>2</sup>·°К), де  $v$  – швидкість вітру, м/с;  $\epsilon$  – інтегральний коефіцієнт випромінювання СФБ;  $\sigma$  – постійна Стефана – Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·°К<sup>4</sup>);  $T_B$  – температура оточуючого повітря, °К;  $n$  – порядковий номер дня року, відлічуваний від 01 січня;  $t$  – час, год.;  $F$  – відношення площі плоскої СФУ (тильною і лицевою) до площі освітлювальної поверхні;  $I_{\text{п}}, I_{\text{д}}$  – інтенсивність прямого і дифузного (розсіяного) сонячного випромінювання на горизонтальну поверхню, Вт/м<sup>2</sup>;  $\Lambda, \Omega, \Upsilon$  – кути, визначаючу просторову орієнтацію наземних СФУ, град.;  $\rho$  – коефіцієнт відбивання сонячних поменів від земної поверхні (альbedo);  $\tau_{\text{проп}}, \rho_{\text{отр}}$  – коефіцієнт пропускання і відбивання сонячного випромінювання захисної поверхні СФБ;  $K$  – показник поглинання сонячного випромінювання захисною поверхнею СФБ, см<sup>-1</sup>;  $B$  – товщина захисної поверхні СФУ, см;  $U_{\text{CFУ}}$  – напруга СФУ, В;  $J_{\text{CFУ}}$  струм навантаження СФУ, А;  $N_{\text{ПС}}, N_{\text{ПР}}$  – число послідовно і паралельно з'єднаних СФЕ в СФБ;  $S_{\text{CFЕ}}$  – площа СФЕ, см<sup>2</sup>;  $P_{\text{CFЕ}}$  – потужність СФУ, Вт.

В розробленій математичній моделі, прийняті наступні припущення:

- послідовний опір СФУ не залежить від інтенсивності сонячного випромінювання і температури СФУ;
- величина фотоструму пропорційна інтенсивності сонячного випромінювання і не залежить від температури;
- спектральна чутливість СФУ і внутрішні втрати енергії, пов'язані з можливим затіненням СФЕ або їх частин не враховуються.
- розподіл сонячного випромінювання по поверхні СФУ рівномірний (враховується зміна площі видимості СФУ сонячними променями, але не враховується ступінь затінення);
- температура по всьому об'єму СФУ однакова, з відсутністю перепадів температур уздовж її поверхні;
- значення швидкості вітру для лицьової і тильної поверхні СФБ однакове, напрямок вітру не враховується.

Розроблена математична модель СФУ дозволяє оцінити вплив на вихідні енергетичні характеристики СФУ, як внутрішніх, так і зовнішніх чинників (інтенсивності сонячного випромінювання, температури повітря, швидкості вітру, ступеня орієнтації СФУ до Сонця залежно від пори року і доби) [20].

Представлена модель дозволяє моделювати продуктивність роботи фотоелектричного перетворювача. Моделювання впливу оточуючого середовища здійснюється шляхом зміни інтенсивності опромінення. Також при генерації враховується температура фотоелектричного перетворювача, що в свою чергу відображається на ефективності його роботи. Ефективність інвертора вважається фіксованою 97 відсотками. Значення було визначено з моделі examples solar converter. Модель представлена на рис.1.

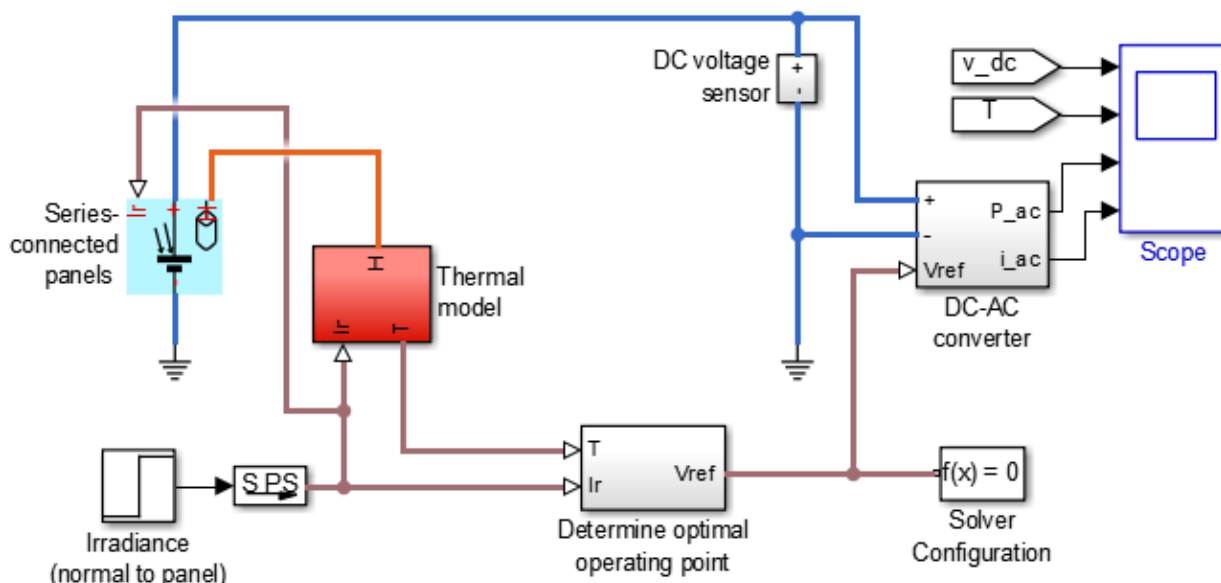


Рис. 1. Загальний вигляд моделі фотоелектричного перетворювача

Розглянемо блоки модельованої схеми:  
 - блок сонячної панелі

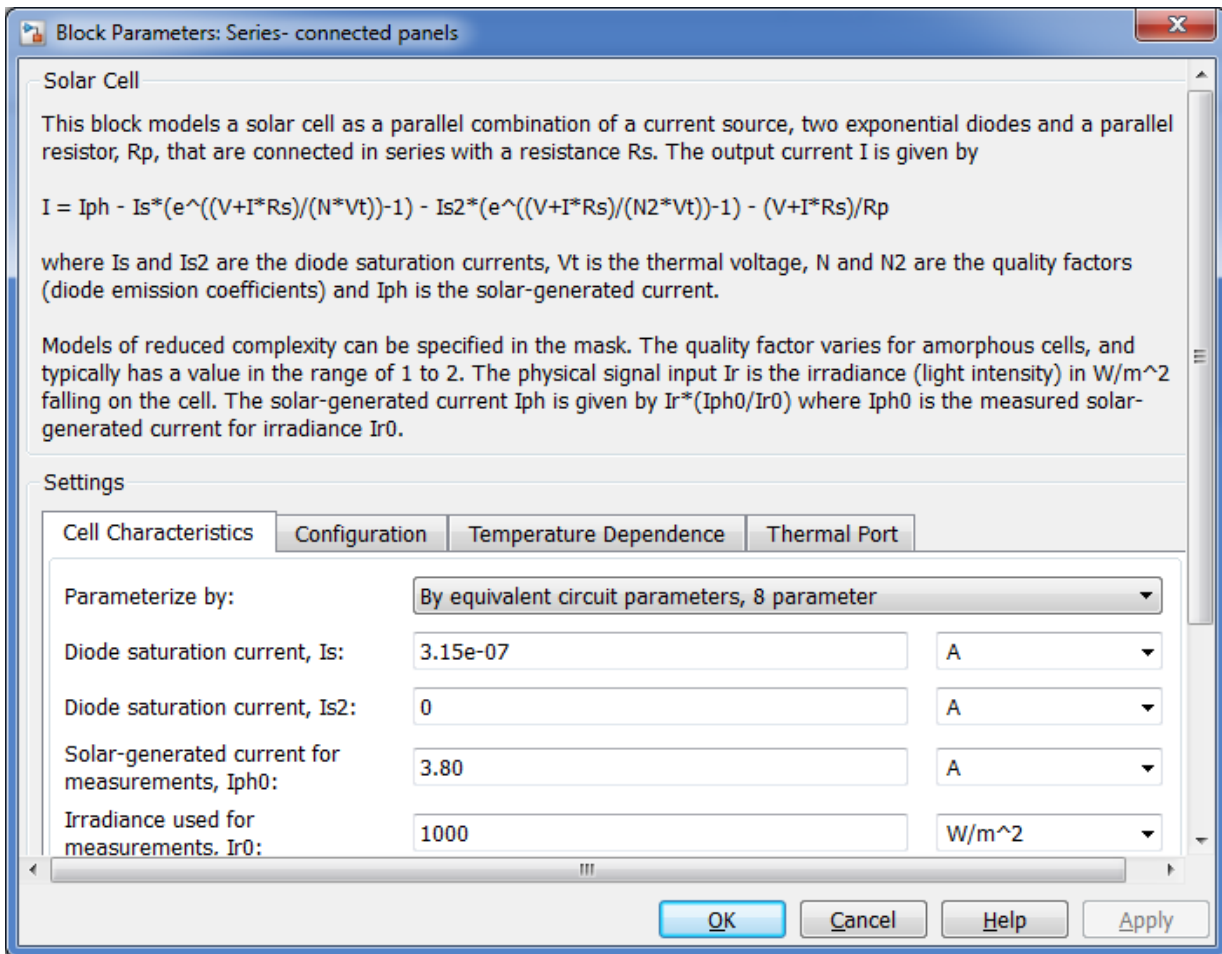


Рис . 2. Блок сонячної панелі

Цей блок моделює сонячну батарею як паралельну комбінацію джерела струму, експонентного діоду та паралельного резистора  $R_p$ , які послідовно з'єднані з опором  $R_s$ . Вихідний струм  $I$  заданий

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left( e^{\left( \frac{(V + I \cdot R_s)}{(N \cdot V_t)} \right)} - 1 \right) - I_{s2} \cdot \left( e^{\left( \frac{(V + I \cdot R_s)}{(N_2 \cdot V_t)} \right)} - 1 \right) - \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_p}$$

де  $I_s$  та  $I_{s2}$  – струми насичення діода,  $V_t$  – теплова напруга,  $N$  і  $N_2$  – коефіцієнти якості (коефіцієнти діодних емісій), а  $I_{ph}$  – струм, що генерується сонячним випромінюванням.

Моделі зменшеної складності можна вказати в маску. Коефіцієнт якості змінюється для аморфних клітин, і зазвичай має значення в діапазоні від 1 до 2. Вхід фізичного сигналу  $I_r$  – це освітлення (інтенсивність світла) в  $Вт / м^2$ , що падає на клітину. Течія  $I_{ph}$ , що генерується сонячним випромінюванням, дається  $I_r \cdot \left( \frac{I_{ph0}}{I_{r0}} \right)$  де  $I_{ph0}$  – це вимірний струм, що генерується сонячним випромінюванням для випромінювання  $I_{r0}$ .

- блок інсоляції

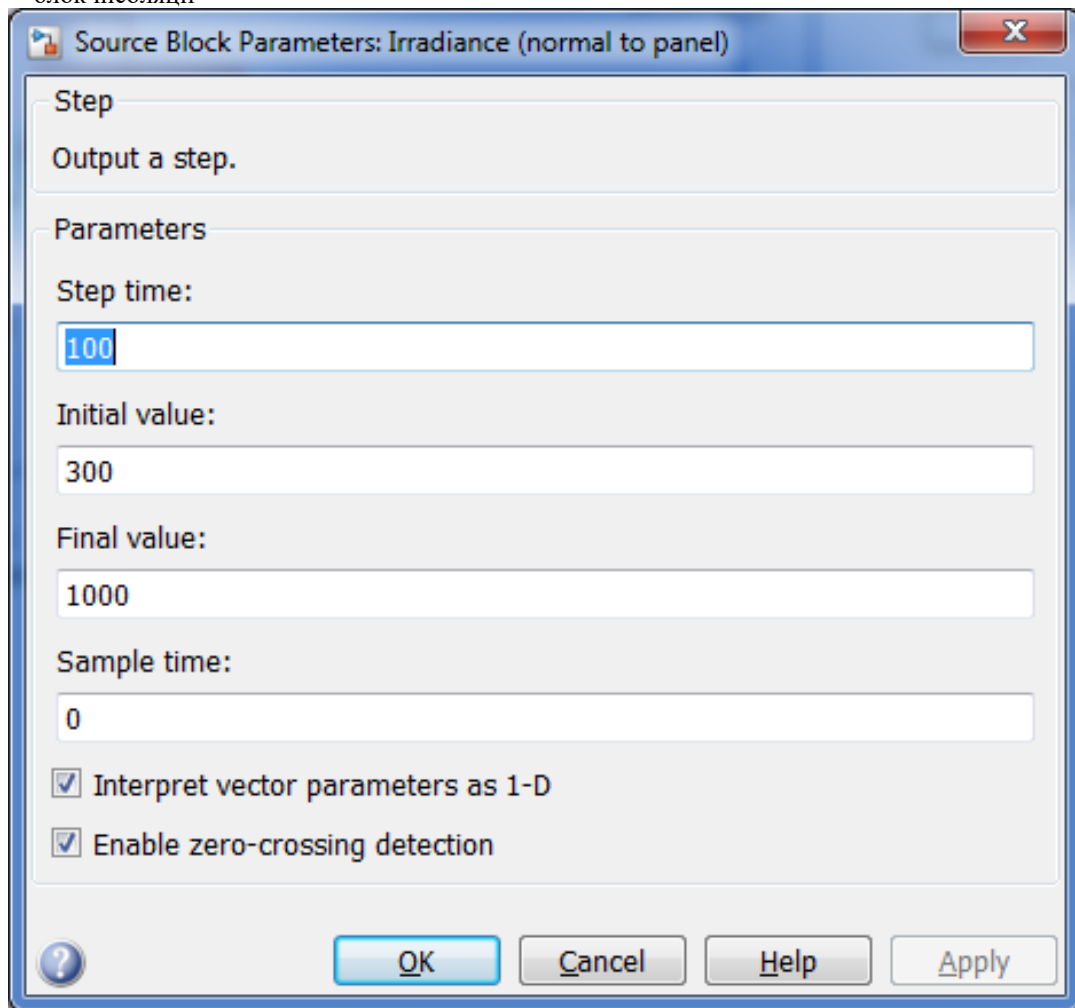


Рис. 3. Блок інсоляції

В даному блоці виставляємо стандартні значення.

Параметр одиниці вимірювання в блоці "Вхідний сигнал блоку" пов'язаний з бездисковим вхідним сигналом Simulink та визначає одиницю, яка призначена для фізичного сигналу.

Прапорець «Застосувати афінну конверсію» є відповідним лише для одиниць із зміщенням (наприклад, одиниць температури).

Приведені нижче графіки показують характеристики сончної панелі без системи очистки.

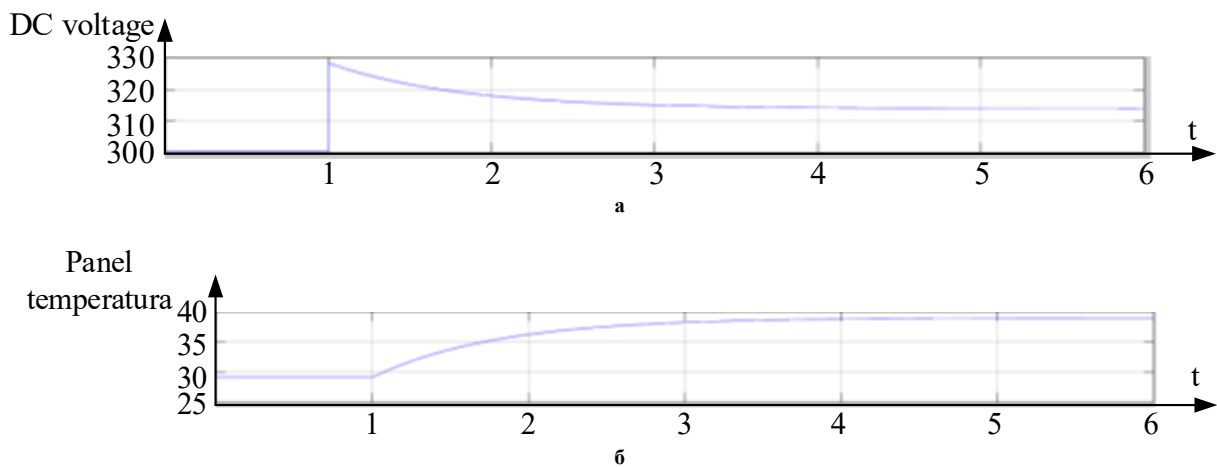


Рис. 4. Енергетичні характеристики представленої моделі:  
а – характеристика напруги постійного характеру; б – Температура фотоелектричного перетворювача

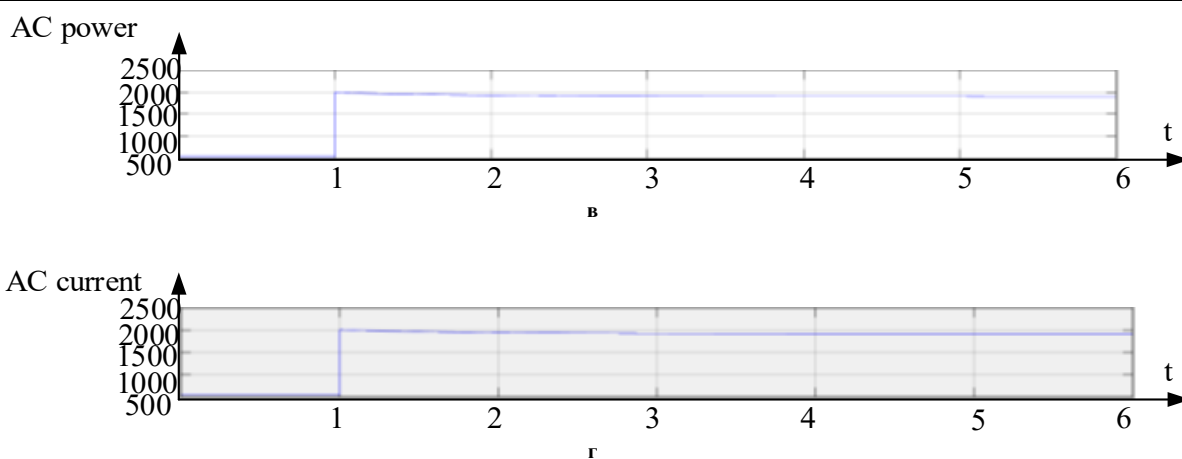


Рис. 4 (продовження). Енергетичні характеристики представленої моделі:  
в – змінна потужність фотоелектричного перетворювача; г – графік змінного струму.

Після впровадження системи очистки було повторено експеримент і отримані такі графіки:

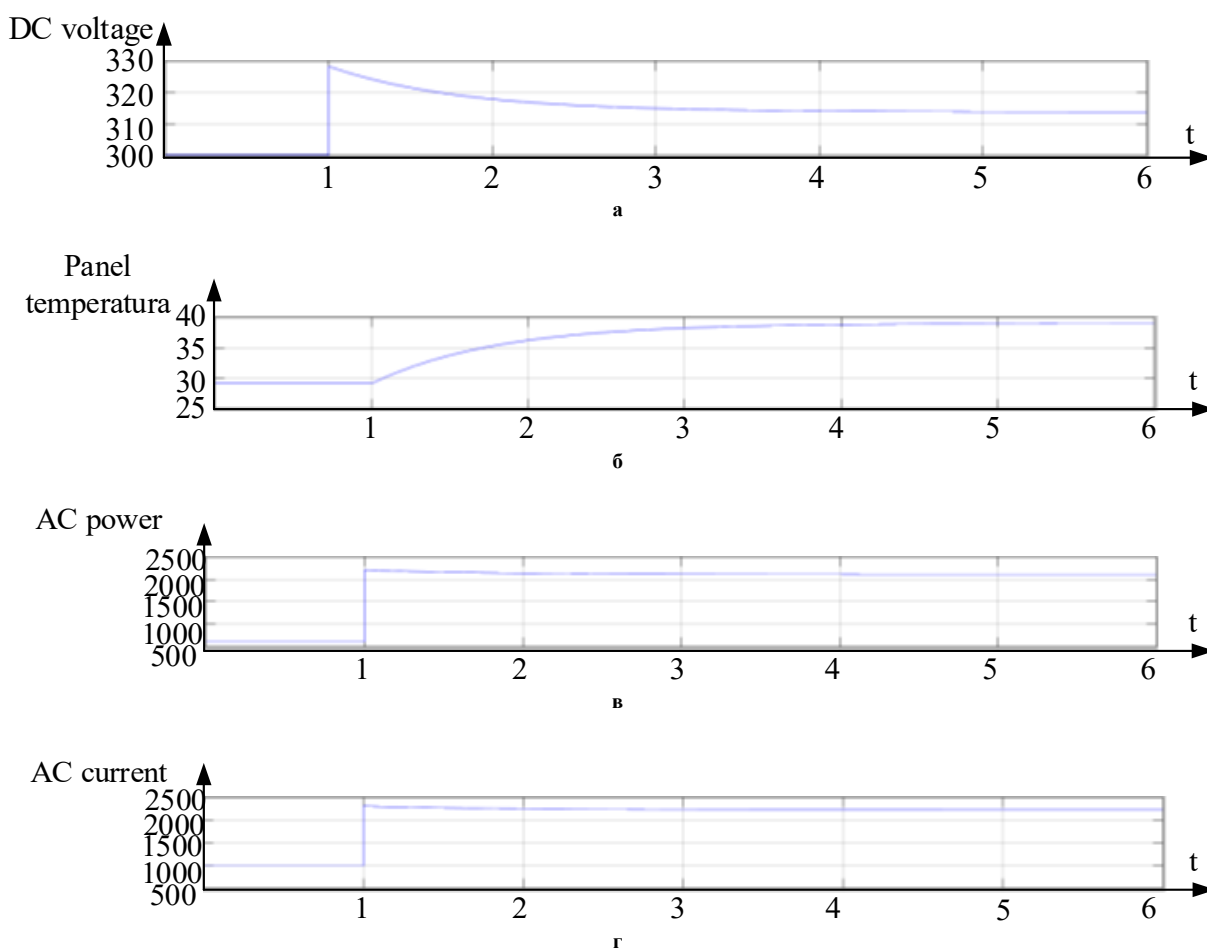


Рис. 5. Енергетичні характеристики представленої моделі після впровадження системи очистки:  
а – характеристика напруги постійного характеру; б – Температура фотоелектричного перетворювача;  
в – змінна потужність фотоелектричного перетворювача; г – графік змінного струму.

Як бачимо з графіків можна зробити висновки, що до використання системи очистки генерована потужність становила 2000 кВт, при використанні системи очистки генерована потужність зростає до 2300 кВт. Тобто можна зробити висновок і сказати що застосування системи очистки має кращий ефект на роботу СЕС.

**Висновки і пропозиції.** 1. У статті запропонована модернізована система керування сонячної фотоелектричної установкою.

2. Результати моделювання показали, що запропонована система керування сонячної фотоелектричної установкою підвищить її енергетичні характеристики на 10-15%.

## Література

1. Vick Alan J. Air Base Attacks and Defensive Counters Historical Lessons and Future Challenges [Research Report] / Alan J. Vick. – RAND Corporation, Santa Monica, Calif., 2015
2. Unated States Air Force. Air Force Basic Doctrine, Organization, and Command. Air Force Doctrine Document 1.14 October 2011
3. O. M. Sinchuk, S. M. Boiko, F. I. Karamanyts, I. A. Kozakevych, M. L. Baranovska, and A. M. Yalova, Aspects of the problem of applying distributed energy in iron ore enterprises electricity supple systems. Warsaw, Poland: IsIENCT, 2018.
4. World Energy Outlook –2019, OECD/IEA, Paris.
5. Енергетична стратегія України на період до 2035 р. // Сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України: [Електронний ресурс]: <http://mpe.kmu.gov.ua>.
6. Основні результати та завдання впровадження нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії в Україні / Шульга В. Г., Коробко Б. П., Жовмір М. М. // Энергетика и электрификация. – 1995. – №2. – С. 39–42.
7. Мала енергетика та її значення в регіональних системах майбутнього / В.Д. Білолід, К.В. Таранець // Проблеми загальної енергетики. – 2008. – №18. – С. 40–47.
8. Сінчук О. М. Аспекти впровадження сонячних електростанцій в умовах гірничорудних підприємств / О. М. Сінчук, С.М. Бойко, О.М. Городній, А.В. Некрасов, А.О. Онищенко, М.О. Ножнова // Технічні науки та технології. Чернігів: ЧНТУ, – 2020. – № 1 (19). – С. 152-160.
9. Бойко, С.М., Демків В. С., Дозоренко О. В., Вирвикишка С. В. Особливості побудови систем очистки сонячних панелей в умовах підприємств гірничо-видобувної галузі Materials of the XIII International scientific and practical conference, CUTTING-EDGE SCIENCE – 2017. – Volume 15. Sheffield. Science and education LTP –P. 34-36.
10. Вісаріонов В.І., Дерюгіна Г.В., Кузнецова В.А., Малінін Н.К. «Сонячна енергетика» – Москва: Издательский дом МЭИ 2008 – 277 с.
11. Праховник А.В. Мала енергетика: распределенная генерация в системах энергоснабжения – К. : «Освіта України», 2007. – 464с.

## References

1. Vick Alan J. Air Base Attacks and Defensive Counters Historical Lessons and Future Challenges [Research Report] / Alan J. Vick. – RAND Corporation, Santa Monica, Calif., 2015
2. Unated States Air Force. Air Force Basic Doctrine, Organization, and Command. Air Force Doctrine Document 1.14 October 2011
3. O. M. Sinchuk, S. M. Boiko, F. I. Karamanyts, I. A. Kozakevych, M. L. Baranovska, and A. M. Yalova, Aspects of the problem of applying distributed energy in iron ore enterprises electricity supple systems. Warsaw, Poland: IsIENCT, 2018.
4. World Energy Outlook –2019, OECD/IEA, Paris.
5. Energetichna strategija Ukraїni na period do 2035 r. // Sajt Ministerstva energetiki ta vugil'noї promislivosti Ukraїni: [Elektronnij resurs]: <http://mpe.kmu.gov.ua>.
6. Osnovni rezul'tati ta zavdannja vprovadzhenja netradicijnih ta vidnovljuvanih dzherel energії v Ukraїni / Shul'ga V. G., Korobko B. P., Zhovmir M. M. // Jenergetika i jelektifikacija. – 1995. – №2. – S. 39–42.
7. Mala energetika ta її znachennja v regional'nih sistemah majbutn'ogo / V.D. Bilolid, K.V. Taranec' // Problemi zagal'noї energetiki. – 2008. – №18. – S. 40–47.
8. Sinchuk O. M. Aspekti vprovadzhenja sonjachnih elektrostancij v umovah girnichorudnih pidpriemstv / O. M. Sinchuk, S.M. Bojko, O.M. Gorodnij, A.V. Nekrasov, A.O. Onishhenko, M.O. Nozhnova // Tehnichni nauki ta tehnologii. Chernigiv: ChNTU, – 2020. – № 1 (19). – S. 152-160.
9. Bojko, S.M., Demkiv V. S., Dozorenko O. V., Virvikishka S. V. Osoblivosti pobudovi sistem ochistki sonjachnih panelej v umovah pidpriemstv girnicho-vidobuvnoї galuzi Materials of the XIII International scientific and practical conference, CUTTING-EDGE SCIENCE – 2017. – Volume 15. Sheffield. Science and education LTP –R. 34-36.
10. Visarionov V.I., Derjugina G.V., Kuznecova V.A., Malinin N.K. «Sonjachna energetika» – Moskva: Izdatel'skij dom MJEI 2008 – 277 s.
11. Prahovnik A.V. Malaja jenergetika: raspredelennaja generacija v sistemah jenergosnabzhenija – K. : «Osvita Ukraїni», 2007. – 464s.

Рецензія/Peer review : 13.02.2021 р.

Надрукована/Printed : 10.03.2021 р.