

Імітаційне моделювання автономної системи електроживлення на основі сонячних панелей в режимі реального часу

Андрієнко^f Р. Є., ORCID [0000-0002-7751-0741](https://orcid.org/0000-0002-7751-0741)

Клен^s К. С., к.т.н. доц., ORCID [0000-0002-6674-8332](https://orcid.org/0000-0002-6674-8332)

Кафедра електронних пристроїв та систем <https://eds.kpi.ua/>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» ROR [00syn5v21](https://orcid.org/00syn5v21)

Київ, Україна

Анотація—В статті наведено результати імітаційного моделювання автономної системи електроживлення на основі сонячних панелей з використанням реальних даних в середовищі MATLAB Simulink за умови постійної зміни інсоляції і навантаження. Представлені результати моделювання з використанням даних з дискретністю в 1 хвилину. Описаний метод відбору максимальної потужності від сонячної панелі і методика його розрахунку. Проведено аналіз результатів моделювання.

Ключові слова — сонячні панелі; відбір максимальної потужності; система електроживлення; MATLAB Simulink.

I. Вступ

За останнє десятиліття об'єми світового видобутку енергії сонячними електростанціями зросли в рази. Так, лише в 2021 році вони збільшилися на 133 ГВт(19%), що є найвищим показником серед відновлюваних джерел енергії [1], та на 839 ГВт(714%) протягом 2012-2021 років [2] і подібний розвиток буде продовжуватися. За прогнозами, до 2026 року видобуток енергії сонячними електростанціями може збільшитися від 1991 ГВт до 2708 ГВт [3], що становитиме, відповідно, зростання на 112 і 188 відсотків.

Подібна перспективність даного напрямку призводить до збільшення інвестицій. Так, прогнозують, що до 2050 року вкладення в сонячну енергетику зростуть до 192 мільярдів доларів за рік, в порівнянні з 114 мільярдами в 2018 році. Завдяки цьому, а також технологічному розвитку, прогнозована вартість електроенергії видобутої з використанням сонячних панелей зменшиться до 0,014-0,05 доларів за кВт-год в порівнянні з 0,085 в 2018 році [4].

Все це, а також наявність зелених тарифів, за якими закупасться енергія видобута за допомогою відновлюваних джерел енергії [5]–[7] обумовлює зростання кількості встановлених сонячних панелей та побудови систем електроживлення на їх основі.

Але використання систем на основі відновлюваних джерел енергії потребує точного прогнозування, бо надлишок чи нестача генерованої енергії призводить до грошових втрат [8].

Одним із варіантів прогнозування потужностей в системах електроживлення є метод моделювання

електричних процесів [9]. Він дає змогу передбачати поведінку системи в режимі реального часу і є менш складним ніж математичні методи прогнозування [10]–[12].

Оскільки максимальний рівень енергії на виході сонячних електростанцій залежить від інсоляції [13], [14], яка в свою чергу залежить від географічного положення, часу доби, кліматичних умов [15], [16], тощо, задача прогнозування різниці потужностей в системах електроживлення на їх основі методом моделювання в реальному часі є актуальною.

II. СХЕМА СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

Структурна схема автономної системи електроживлення [17] на основі сонячних панелей наведена на рис. 1.

На рис.1 позначено:

- СП – сонячна панель, на яку поступає інсоляція;
- СК – сигнал керування перетворювачем, який в залежності від параметрів на виході сонячної панелі підтримує точку максимальної потужності [18];
- П – підвищувальний широтно-імпульсний перетворювач (ШІП) [19], [20], який виконує роль зарядно-розрядного пристрою акумулятору;
- Н – змінний резистор, який імітує зміну навантаження в часі;



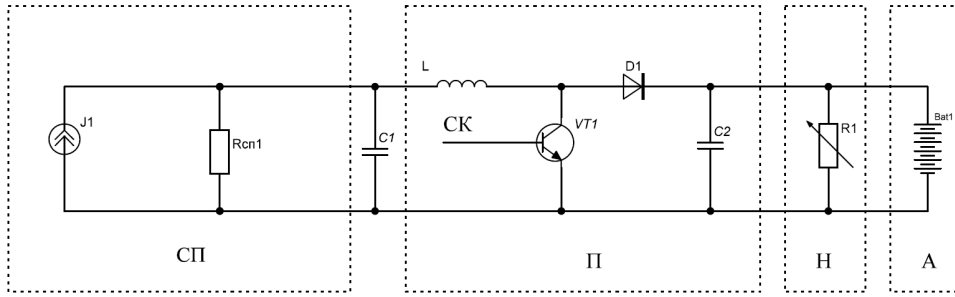


Рис. 1. Структурна схема системи електроживлення на основі сонячної панелі

- А — акумулятор [21], [22], який заряджається або розряджається в залежності від співвідношення потужностей на виході сонячної панелі та навантаженні.

Використання будь-якої схеми в конструкції якої є імпульсний перетворювач першочергово потребує попереднього дослідження на здатність повертатися до сталого значення після пульсацій шляхом аналізу її стійкості[23], [24].

А. Розрахунок стійкості системи

Оскільки в системі окрім сонячної панелі є акумулятор, сонячна панель працює в режимі джерела струму. Отже, за умови, що еквівалентна схема ШПП відноситься до схем з постійною структурою і параметрами, процеси в системі (рис. 1) описуються системою диференційних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{di(t)}{dt} = -\frac{1}{L}u(t) + \frac{1}{L}U_{VT1} \\ \frac{du(t)}{dt} = -\frac{1}{R_1C_2}u(t) + \frac{1}{C_2}i(t) \end{cases}$$

де $\begin{pmatrix} u(t) \\ i(t) \end{pmatrix}$ – вектор змінних, а $\begin{pmatrix} -\frac{1}{L} & 0 \\ 1 & \frac{1}{C_2} \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix}$ –

матриці коефіцієнтів.

Тоді матрична форма має вигляд:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i(t) \\ u(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{L} & 0 \\ 1 & \frac{1}{C_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i(t) \\ u(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix} \cdot U_{VT}(t)$$

При переході в область зображень і вирішенні системи відносно $I(p)$ отримуємо:

$$I(p) = \frac{pC_2R_1 + 1}{p^2LC_2R_1 + pL + R_1} \cdot U(p)$$

Передавальна функція ШПП за струмом виглядає таким чином:

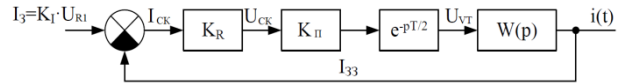


Рис. 2. Узагальнена структурна схема системи сонячна панель-ШПП

$$W(p) = \frac{I(p)}{U(p)} = \frac{pC_2R_1 + 1}{p^2LC_2R_1 + pL + R_1}$$

Керування транзистором VT1 відбувається за допомогою широтно-імпульсного модулятора(ШІМ) зі зворотнім зв'язком по струму, який можна описати системою рівнянь

$$\begin{cases} I_{CK}(t) = I_3(t) - I_{33}(t) = K_I \cdot U_{R1} - i(t) \\ U_{CK}(t) = K_R \cdot I_{CK}(t) \end{cases}$$

де K_R , K_I – коефіцієнти перетворення струму в напругу.

При переході від нелінійної системи з ШІМ до лінійної системи отримано передавальну функцію регулятора $K_{PI} = \frac{E_{СП} \cdot \gamma}{U_{VT}} = K_U \cdot \gamma$, де γ – шпаруватість імпульсів, а $E_{СП}$ – напруга сонячної панелі.

В випадку досить малого значення періоду комутації T відносно сталої часу, імпульсний ШІМ може бути представлений неперервною системою з часом

затримки $\frac{T}{2} : e^{-p\frac{T}{2}}$. Для спрощення розрахунків передавальна функція ланки запізнення розкладена в ряд Тейлора.

Нехтуючи складовими вищих порядків отримано:

$$e^{-p\frac{T}{2}} = 1 + \frac{-p\frac{T}{2}}{1!} = 1 - \frac{pT}{2}$$

Узагальнена структурна схема системи сонячна панель-ШПП зображена на рис. 2.

Передавальна функція замкненої системи з перетворювачем має вигляд:



$$W_3(p) = \frac{K_R K_{II} \cdot e^{-p \frac{T}{2}} (p C_2 R_1 + 1)}{(p^2 L C_2 R_1 + p L + R_1) + e^{-p \frac{T}{2}} (p C_2 R_1 \cdot K_R K_{II} + K_R K_{II})}$$

Переходячи до амплітудно-фазової частотної характеристики (АФЧХ) отримано:

$$U(\omega) = \frac{K_R^2 K_{II}^2 \cdot R_1 \cdot \omega \cdot \frac{T}{2} (\omega C_2 R_1 (R_1 - \omega^2 L C_2 R_1) - \omega L)}{(R_1 - \omega^2 L C_2 R_1)^2 + \omega^2 L^2}$$

$$Z(\omega) = \frac{K_R K_{II} \cdot (\omega C_2 R_1 (R_1 - \omega^2 L C_2 R_1) - \omega L) - K_R \cdot K_{II} \cdot \omega R_1 \cdot \frac{T}{2}}{(R_1 - \omega^2 L C_2 R_1)^2 + \omega^2 L^2}$$

Після переходу до АФЧХ можливе дослідження стійкості системи. За критерієм Найквіста [25] умова стійкості лінійної системи з запізненням описується наступною нерівністю:

$$K_{II} < \frac{2L}{K_R(T - 2CR_1)} \tag{1}$$

У випадку, коли значення CR_1 значно менше T граничне значення коефіцієнту підсилення має вигляд $K_{IIгр} < \frac{2L}{K_R T}$.

Графік залежності коефіцієнту підсилення і граничного коефіцієнту підсилення від часу комутації зображено на рис.3.

Для стійкості системи сонячна панель-широкоімпульсний перетворювач значення коефіцієнту підсилення має обмежуватись значенням розрахованим за формулою (1).

Беручи до уваги що період комутації складає 2 кГц, індуктивність котушки L 50 мГн, опір навантажувального кола R_1 знаходиться в діапазоні від 10 Ом до 1000 Ом, а значення коефіцієнту підсилення не перевищує 2, можна зробити висновок, що система електроживлення відповідає умові стійкості.

Для того щоб промоделювати електромагнітні процеси, які відбуваються в системі електроживлення на основі сонячних панелей перш за все необхідно розробити модель, яка в режимі реального часу відслідковує співвідношення потужностей генерації і споживання, а також імітує процеси, які відбуваються в системі керування.

III. АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Відбір максимальної потужності від сонячної панелі відбувається за алгоритмом, блок-схема якого зображена на рис.4.

Для його реалізації проведено попереднє моделювання сонячної панелі з підключеним змінним резистором, щоб отримати параметри залежності сили струму і напруги на виході сонячної панелі від інсоляції у точці максимальної потужності з дискретністю в $50 \frac{Вт}{м^2}$ (табл.1).

Використовуючи отримані значення проведено розрахунок функції залежності сили струму від інсоляції шляхом інтерполяції методом кубічної апроксимації:

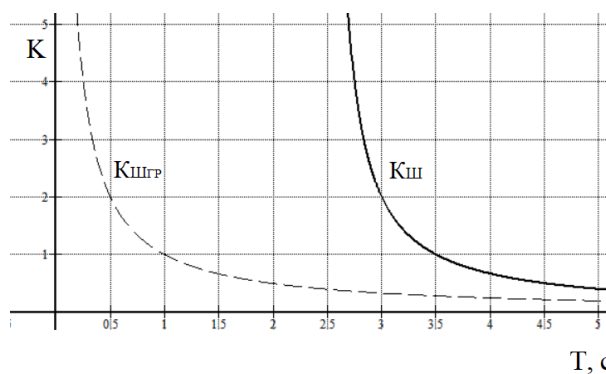


Рис. 3. Графік залежності граничного і еквівалентного коефіцієнтів підсилення від значення запізнення $T/2$

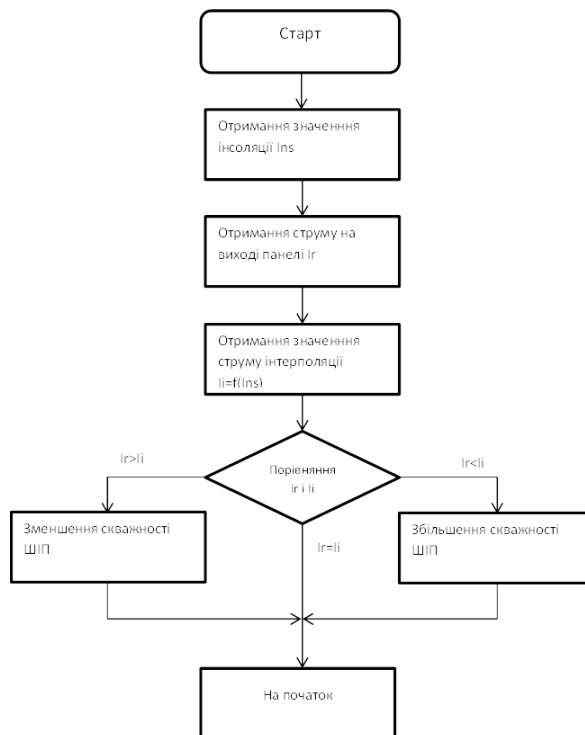


Рис. 4. Блок-схема алгоритму



Таблиця 1 Координати точки максимальної потужності сонячної панелі

Значення інсоляції	Координати точки максимальної потужності	
	Напруга, В	Сила струму, А
25	41,27	0,095
50	45,12	0,231
100	47,804	0,508
150	49,18	0,788
200	50,1	1,068
250	50,79	1,349
300	51,35	1,63
350	51,8	1,911
400	52,2	2,193
450	52,53	2,475
500	52,84	2,756
550	53,1	3,038
600	53,34	3,321
650	53,57	3,602
700	53,76	3,885
750	53,96	4,166
800	54,14	4,448
850	54,28	4,732
900	54,44	5,013
950	54,57	5,297
1000	54,7	5,579

Таблиця 2 Результати інтерполяції

Значення інсоляції	Сила струму, А	
	На виході панелі	Розрахований
25	0,095	0,092
50	0,231	0,231
100	0,508	0,510
150	0,788	0,789
200	1,068	1,069
250	1,349	1,349
300	1,630	1,630
350	1,911	1,911
400	2,193	2,192
450	2,475	2,474
500	2,756	2,756
550	3,038	3,038
600	3,321	3,320
650	3,602	3,602
700	3,885	3,885
750	4,166	4,167
800	4,448	4,449
850	4,732	4,732
900	5,013	5,014
950	5,297	5,296
1000	5,579	5,578

Загальний вигляд рівняння:

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d. \quad (2)$$

Система рівнянь для розрахунку коефіцієнтів:

$$\begin{cases} a \sum x_i^3 + b \sum x_i^2 + c \sum x_i + nd = \sum y_i \\ a \sum x_i^4 + b \sum x_i^3 + c \sum x_i^2 + d \sum x_i = \sum x_i y_i \\ a \sum x_i^5 + b \sum x_i^4 + c \sum x_i^3 + d \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i \\ a \sum x_i^6 + b \sum x_i^5 + c \sum x_i^4 + d \sum x_i^3 = \sum x_i^3 y_i \end{cases}$$

$$\begin{cases} 5,5 \cdot 10^9 a + 7,2 \cdot 10^6 b + 10525c + 21d = 58,085 \\ 4,5 \cdot 10^{12} a + 5,5 \cdot 10^9 b + 7,2 \cdot 10^6 c + 10525d = 39812 \\ 3,9 \cdot 10^{15} a + 4,5 \cdot 10^{12} b + 5,5 \cdot 10^9 c + 7,2 \cdot 10^6 d = 3,1 \cdot 10^7 \\ 3,4 \cdot 10^{18} a + 3,9 \cdot 10^{15} b + 4,5 \cdot 10^{12} c + 5,5 \cdot 10^9 d = 2,5 \cdot 10^{10} \end{cases} \quad (3)$$

З цієї системи рівнянь отримано значення коефіцієнтів:

$$a = -5,85 \cdot 10^{-11} \quad b = 1,2 \cdot 10^{-7} \\ c = 5,6 \cdot 10^{-3} \quad d = -0,047$$

Підставивши значення розрахованих коефіцієнтів в рівняння (2):

$$y = -5,85 \cdot 10^{-11} x^3 + 1,2 \cdot 10^{-7} x^2 + 5,6 \cdot 10^{-3} x - 0,047 \quad (4)$$

Для порівняння з початковими даними проведена підстановка значень інсоляції в рівняння (4) (табл.2).

Використовуючи отримані значення розрахована середня похибка результатів інтерполяції:

$$y = \frac{1}{N} \sum \frac{|I_r - I_i|}{I_r} = \frac{0,039915}{21} \cdot 100\% = 0,19\%. \quad (5)$$

Оскільки похибка даного алгоритму складає 0,19 відсотків, отриману функцію можна використовувати для розрахунку значення сили струму на виході сонячної панелі, за яким має підтримуватися максимальна потужність.

IV. МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В АВТОНОМНІЙ СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

Маючи схему системи і алгоритм відбору максимальної потужності зібрано модель системи електроживлення на основі сонячних панелей в середовищі MATLAB Simulink (рис. 5)

Модель складається з:

- MPPT — контролер, який реалізує логіку керування перетворювачем за допомогою розрахованої раніше функції струму;
- R2 — модель змінного резистора [26], який імітує зміну навантаження (рис. 6);
- PV Array — модель сонячної панелі SunPower SPR-305-WHT [27], яка має структуру 3 на 4 блоки;
- Power — контролер, який керує змінним резистором для підтримання вказаного значення потужності на навантаженні;
- inputdata.mat, powerdata.mat — блоки From File [28], які використовуються для передачі вхідних даних.

Позначення на рис 5:

- Resistor voltage — вольтметр, який вимірює напругу в навантажувальному колі.
- R — вхід сигналу який надходить від контролеру.



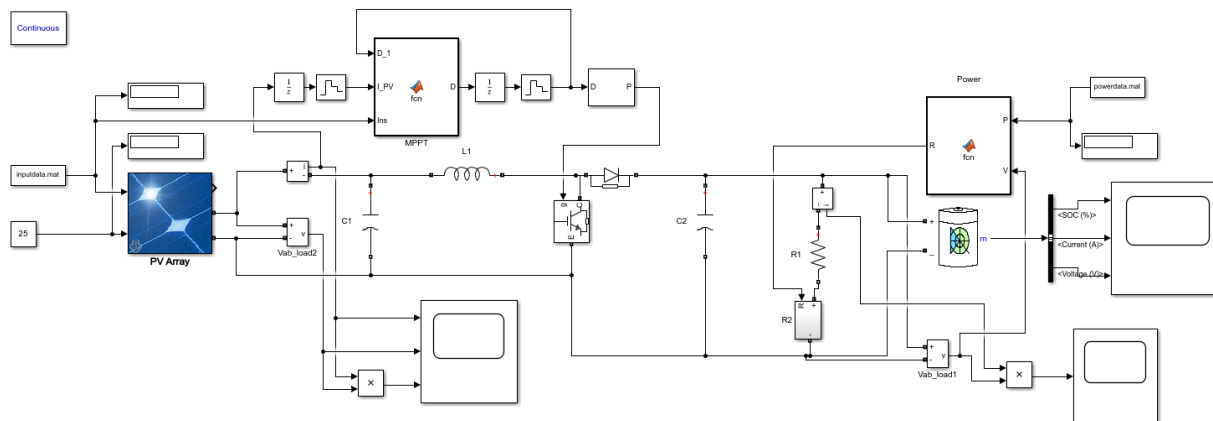


Рис. 5. Модель системи електроживлення на основі сонячних панелей в середовищі MATLAB Simulink

- I — розрахунок струму в навантажувальному колі.
- Current — блок, який імітує зміну навантаження.
- 1 і 2 — клеми блока.

В ході моделювання на вхід панелі подавались дані інсоляції із лабораторії LARES [29] в Загребі за 18 квітня 2018 року і дані споживання протягом дня з реального домогосподарства [30] на навантаження з дискретністю в 1 хв (табл.3), час моделювання взятий як 1 хв=0,1 с в зв'язку з технічними обмеженнями.

Після моделювання отримано осцилограми потужностей на виході сонячної панелі (рис. 7), споживання в навантажувальному колі (рис. 8) та стану заряду на акумуляторі (рис. 9) протягом часу моделювання.

З осцилограм видно, що розроблена модель відпрацьовує постійну зміну освітленості і навантаження в системі. Протягом дня потужність на виході сонячної панелі досягала 3500 Вт, а потужність навантаження 5000 Вт, постійно змінюючи стан заряду акумулятора.

Ці дані дають приблизне уявлення про те, що буде відбуватися з системою протягом дня. Так в проміжку часу від 00:00 до 05:00 при даному рівні споживання буде нестача енергії, яка буде компенсуватися з акумулятора, тому, якщо наявний стан заряду буде недостатнім для підтримання системи, бажано зменшити споживання, в той час, як протягом часу від 06:40 до 13:20, навпаки, панель буде виробляти більше ніж буде споживатись, тому можливо, як перенести ранкову частину споживання на цей проміжок часу, так і використати цю можливість для заряджання акумулятора і в проміжку від 16:00 до 24:00 споживання знову перевищуватиме генерацію.

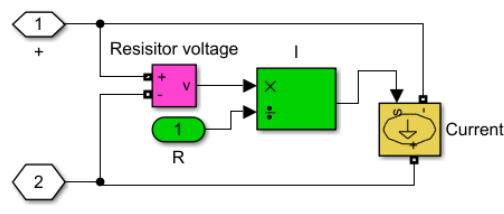


Рис. 6. Схема змінного резистору

ТАБЛИЦЯ 3 ПАРАМЕТРИ МОДЕЛЮВАННЯ

Час	Параметри моделі		
	Інсоляція, Вт/м ²	Потужність навантаження, Вт	Час моделі, с
11:55	845	773,59	71,5
11:56	845	777,47	71,6
11:57	853	771,15	71,7
11:58	866	762,27	71,8
11:59	885	761,6	71,9
12:00	895	699,73	72
12:01	686	667,08	72,1
12:02	287	582,15	72,2
12:03	268	558	72,3
12:04	243	562	72,4
12:05	688	558	72,5

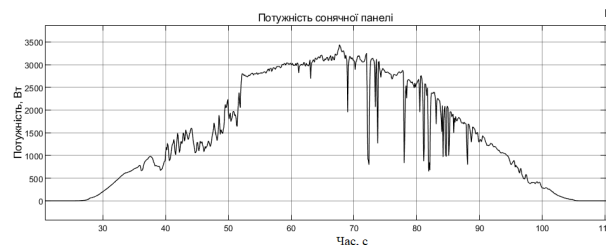


Рис. 7. Осцилограма потужності на виході сонячної панелі



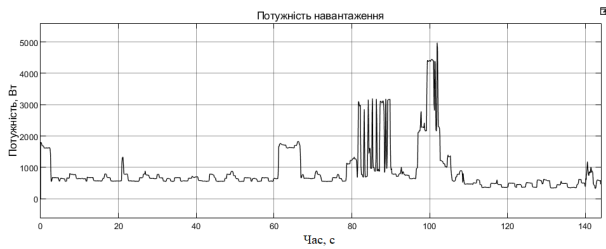


Рис. 8. Осцилограма споживання потужності на навантаженні

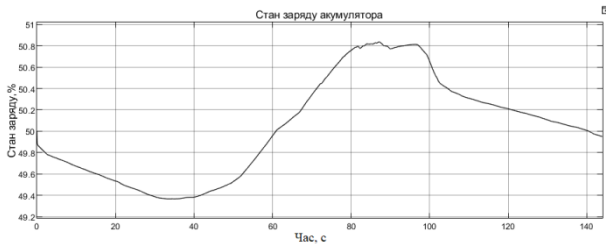


Рис. 9. Осцилограма стану заряду акумулятора

ВИСНОВКИ

Запропонована в статті модель автономної системи електроживлення на основі сонячних панелей дає змогу оцінювати співвідношення генерації на сонячній панелі і споживання в навантажувальному колі і їх вплив на стан заряду акумулятора.

Для побудови моделі потрібно мати схему системи електроживлення, яка відповідає умовам стійкості, знати алгоритм, який використовується для відбору максимальної потужності, а також параметри сонячної панелі.

Наведений в роботі метод розрахунку положення точки максимальної потужності дає змогу підтримувати її з похибкою в 0,19 відсотків, а отримана модель може використовуватись власниками автономної системи електроживлення, наведеної в статті, для більш ефективного керування енергоспоживанням оселі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] IRENA, "Renewable Energy Capacity Highlights," Int. Renew. Energy Agency, vol. 00, no. April 2022. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_RE_Capacity_Highlights_2022.pdf.
- [2] IRENA, "Renewable Capacity Statistics 2022," Int. Renew. Energy Agency, 2022, URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2022.pdf
- [3] S. P. Europe, "Global Market Outlook For Solar Power 2022-2026," Sol. Power Eur., 2022, URL: https://api.solarpowereurope.org/uploads/Solar_Power_Europe_Global_Market_Outlook_report_2022_2022_V2_07aa98200a.pdf
- [4] IRENA, "Future of solar photovoltaic," 2019, URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_2019.pdf
- [5] "ZAKON UKRAYINY Pro al'ternatyvni dzherela enerhiyi [LAW OF UKRAINE On Alternative Energy Sources].", URL: https://www.gpcc.com.ua/get_document/72
- [6] I. Prahastono, N. I. Sinisuka, M. Nurdin, and H. Nugraha, "A Review of Feed-In Tariff Model (FIT) for Photovoltaic (PV)," in 2019 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), 2019, pp. 076–079, DOI: [10.1109/ICHVEPS47643.2019.9011131](https://doi.org/10.1109/ICHVEPS47643.2019.9011131).
- [7] M. Y. Almahmeed, W. Koh, and E. A. Al-Ammar, "K.S.A Feed in Tariff," in 2018 1st International Conference on Advanced Research in Engineering Sciences (ARES), 2018, pp. 1–4, DOI: [10.1109/ARESX.2018.8723284](https://doi.org/10.1109/ARESX.2018.8723284).
- [8] "Prohnozuvannya elektropostachannya na bazi veyvletiv [Forecasting of electricity supply based on wavelets].", URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28917/1/Kramarenko_bakalavr.pdf.
- [9] Chornyy O.P., MODELUVANNYA ELEKTROMECHANICHNYKH SYSTEM[MODELING OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS]. Kremenchuk, 2001, URL: https://elprivod.nmu.org.ua/files/modeling/Чорний_Моделювання%20ЕМС.pdf.
- [10] J. Wang, "Power system short-term load forecasting," in Proceedings of the 2017 5th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology (ICMMCT 2017), Beijing, China, 2017. DOI: [10.2991/icmmct-17.2017.49](https://doi.org/10.2991/icmmct-17.2017.49).
- [11] M. V. Myroshnichenko and K. S. Klen, "Prediction of the Power of the Solar Panel," Microsystems, Electron. Acoust., vol. 27, no. 2, pp. 237737-1-237737-5, Jul. 2022, DOI: [10.20535/2523-4455.me.237737](https://doi.org/10.20535/2523-4455.me.237737).
- [12] R. S. Marchenko and K. S. Klen, "Prediction of Load Capacity in Microgrid by Multiple Regression Method," Microsystems, Electron. Acoust., vol. 27, no. 1, pp. 236697-1-236697-7, Apr. 2022, DOI: [10.20535/2523-4455.me.236697](https://doi.org/10.20535/2523-4455.me.236697).
- [13] U. Helman, "Economic and Reliability Benefits of Large-Scale Solar Plants," in Renewable Energy Integration, Elsevier, 2014, pp. 327–345, URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780124079106000260> DOI: [10.1016/B978-0-12-407910-6.00026-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407910-6.00026-0)
- [14] I. Dincer and A. Abu-Rayash, "Energy systems," in Energy Sustainability, Elsevier, 2020, pp. 59–92, URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128195567000036>. DOI: [10.1016/B978-0-12-819556-7.00003-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819556-7.00003-6)
- [15] N. Kurti et al., "INTRODUCTION TO THERMOCHEMICAL AND THERMAL ENERGY STORAGE PANEL," in Energy Storage, Elsevier, 1980, pp. 243–258, URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080254715500269> DOI: [10.1016/B978-0-08-025471-5.50026-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-025471-5.50026-9)
- [16] S. R. Pendem and S. Mikkili, "Performance evaluation of series, series-parallel and honey-comb PV array configurations under partial shading conditions," in 2017 7th International Conference on Power Systems (ICPS), 2017, pp. 749–754, DOI: [10.1109/ICPS.2017.8387389](https://doi.org/10.1109/ICPS.2017.8387389).
- [17] H. Wang and D. Zhang, "The Stand-alone PV Generation System with Parallel Battery Charger," in 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering, 2010, pp. 4450–4453, DOI: [10.1109/ICECE.2010.1083](https://doi.org/10.1109/ICECE.2010.1083).
- [18] T. Esram and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 22, no. 2, 2007, DOI: [10.1109/TEC.2006.874230](https://doi.org/10.1109/TEC.2006.874230).
- [19] P. Sahu, D. Verma, and S. Nema, "Physical design and modelling of boost converter for maximum power point tracking in solar PV systems," in 2016 International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES), 2016, pp. 10–15, DOI: [10.1109/ICEPES.2016.7915898](https://doi.org/10.1109/ICEPES.2016.7915898).
- [20] S. Singh, S. Manna, M. I. Hasan Mansoori, and A. K. Akella, "Implementation of Perturb & Observe MPPT Technique using Boost converter in PV System," in 2020 International Conference on Computational Intelligence for Smart Power System and Sustainable Energy (CISPSSE), 2020, pp. 1–4, DOI: [10.1109/CISPSSE49931.2020.9212203](https://doi.org/10.1109/CISPSSE49931.2020.9212203).



- [21] IEEE-SA-Standards-Board, "IEEE Guide for Selecting, Charging, Testing, and Evaluating Lead-Acid Batteries Used in Stand-Alone Photovoltaic (PV) Systems," 2014, URL: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=6758444>
- [22] A. Sangwongwanich et al., "Reliability Assessment of PV Inverters with Battery Systems Considering PV Self-Consumption and Battery Sizing," in 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2018, pp. 7284–7291, DOI: [10.1109/ECCE.2018.8557479](https://doi.org/10.1109/ECCE.2018.8557479).
- [23] A. K. Ablesimov and V. S. Yatskovsky, "Stability of automatic control systems," Electron. Control Syst., vol. 4, no. 38, Dec. 2013, DOI: [10.18372/1990-5548.38.7278](https://doi.org/10.18372/1990-5548.38.7278).
- [24] L. C. Westphal, Handbook of Control Systems Engineering. Boston, MA: Springer US, 2001, ISBN: 978-1-4613-5601-1.
- [25] J. Jugo, "On the stability of time-delay systems using Nyquist criterion," in 2001 European Control Conference (ECC), 2001, pp. 2717–2722, DOI: [10.23919/ECC.2001.7076341](https://doi.org/10.23919/ECC.2001.7076341).
- [26] "Variable Resistor in DC.," URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/61022-variable-resistor-in-dc>
- [27] "SunPower 305 Solar Panel," URL: https://www.pocosolar.com/wp-content/themes/twentyfifteen/pdfs/Sunpower_Solar_Panels/sun-power_305wht_spec_sheet.pdf
- [28] "Matlab and Simulink Basics," in Problem-Based Learning in Communication Systems Using Matlab and Simulink, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2016, pp. 1–15, DOI: [10.1002/9781119060239.ch1](https://doi.org/10.1002/9781119060239.ch1)
- [29] "Laboratory for Renewable Energy Systems (LARES) of University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing." URL: <https://www.lares.fer.hr/#>
- [30] "Household Electric Power Consumption.," URL: <https://www.kaggle.com/datasets/uciml/electric-power-consumption-data-set?resource=download>

Надійшла до редакції 10 вересня 2022 року

Прийнята до друку 22 грудня 2022 року

UDC 621.314

Simulation Modeling of an Autonomous Power Supply System Based on Solar Panels in Real Time

R. Ie. Andriienko^f, ORCID [0000-0002-7751-0741](https://orcid.org/0000-0002-7751-0741)

K. S. Klen^s, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0002-6674-8332](https://orcid.org/0000-0002-6674-8332)

Department of Electronic Devices and Systems <https://eds.kpi.ua/>

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)

Kyiv, Ukraine

Abstract—During the last decade, solar energy showed rapid development. So, in 2021, production volumes increased by 19 percent, which is the highest rate among renewable energy sources, and in the last ten years, by 714. And this growth will continue. And according to forecasts, similar development will continue in the coming years, the projected growth of total capacity over the next five years is from 112 to 188 percent, and the growth of investments until 2050 will be 68 percent. This, as well as the introduction of green tariffs, which encourage the use of renewable energy sources by purchasing surplus energy obtained with their help, increases the number of installed solar power plants and power supply systems based on them. But the use of renewable energy sources obliges users to report on the projected level of production. Computer modeling is one of the methods of analyzing processes in electrical systems in real time and is less complicated than mathematical calculation methods.

The work presents a structural diagram of an autonomous power supply system based on solar panels, as well as a description of its main elements. The stability of the solar panel-boosting pulse-width converter system was investigated using the Nyquist criterion. A block diagram of the method of selecting the maximum power from the solar panel based on the current at the output of the solar panel, which is used in the simulation, was also given, a set of positions of the maximum power points depending on the insolation with a discreteness of 50 W/m² is shown, the function of the dependence of the current on insolation using the cubic interpolation method, compared the results obtained using this dependence with previous data, estimated the average absolute error of the method. A model of the stand-alone power system is assembled in MATLAB Simulink, which can be used for real-time forecasting. Simulations were carried out using data for a day from a real household and insolation data from the LARES laboratory in Zagreb with a discreteness of 1 min, oscillograms of the output power of the solar panel, power consumption, as well as an oscillogram of the change in the state of battery charge during the day with such data are given. The simulation results were analyzed and recommendations were given regarding the behavior of users of such an autonomous power supply system during certain periods of the day when the generation capacity exceeds consumption or vice versa, affecting the state of battery charge.

Keywords — solar panels; maximum power selection; power supply system; MATLAB Simulink

