

# Прогнозування потужності на виході сонячної панелі

Мірошниченко<sup>f</sup> М. В., ORCID [0000-0002-6082-7187](https://orcid.org/0000-0002-6082-7187)

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

Кафедра електронних пристроїв та систем, Факультет електроніки  
Національний технічний університет України

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

Київ, Україна

**Анотація**—У статті наведено результати прогнозування потужності на виході сонячної панелі методом поліномів різного степеня. Прогнозування кількості електроенергії, що виробляється сонячною електростанцією, є насамперед передбаченням кількості сонячного випромінювання, отриманого сонячною панеллю, що в свою чергу залежить від умов та параметрів навколишнього середовища. Розрахунок проводився на основі даних сонячної інсоляції з лабораторії LARES, що знаходиться в місті Загреб. Дані були взяті за 04.05.2019 – 05.05.2019 з дискретністю 1 хвилина. Для того, щоб виконати прогноз, значення сонячної інсоляції були переведені в потужність на виході сонячної панелі. Для прогнозування обрано горизонт прогнозу в 1 годину та 1 добу. Проведено апроксимацію даних за допомогою поліномів різних степенів. Представлені криві зміни реальних та прогнозованих значень потужності на виході сонячної панелі. Точність прогнозування оцінювалось за допомогою середньої відносної похибки. Наведено результати корекції прогнозованих значень потужності методом Хойна.

**Ключові слова** — сонячна енергія; сонячні панелі; генерування сонячної енергії; методи прогнозування.

## I. Вступ

Сонячна енергетика — одна з галузей відновлюваної енергетики, що найбільш динамічно розвивається. Всього за двадцять років частка сонячної енергетики в світовій енергетиці зростає більше ніж 7%. Для стимулювання виробництва електроенергії відновлюваних джерел в Україні запроваджено зелений тариф, за яким вартість такої електроенергії вища ринкової<sup>1</sup>. Початкові умови тарифу дозволяли виробляти необмежену кількість енергії, що призвело до негативного впливу на збалансованість енергосистеми України<sup>2</sup>. Для уникнення критичної ситуації між державою та виробниками електроенергії був підписаний «Меморандум про взаєморозуміння стосовно врегулювання проблемних питань у сфері відновлюваної енергетики»<sup>3</sup> та прийнято закон про зниження зеленого тарифу<sup>4</sup>, що передбачає введення штрафів за небалансне постачання електроенергії за

зеленим

тарифом. За законом постачальники зобов'язуються надавати прогнози виробленої енергії та дотримуватись цих значень для підтримання балансу енергосистеми країни. У разі відхилення показників реально виробленої енергії для сонячних панелей на більше ніж 5%, виробник має заплатити штраф [1].

Тому, актуальною є задача прогнозування потужності сонячних панелей з максимальною точністю (мінімальною похибкою прогнозування).

## II. МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ІНСОЛЯЦІЇ ТА ФАКТОРИ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ПРОГНОЗ

На сьогодні точність короткострокового прогнозування сонячної енергії на годину або декілька годин сягає 60-65%. Для підвищення точності прогнозування необхідно або збільшувати горизонт прогнозу,

<sup>1</sup> Закон України «Про внесення змін до статті 9-1 Закону України "Про альтернативні джерела енергії" щодо врегулювання питання генерації електричної енергії приватними домогосподарствами» URL:

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-19#Text>

<sup>2</sup> Справа № 910/16664/20 за позовом Державного підприємства "Гарантований покупець" URL:

<https://reyestr.court.gov.ua/Review/93623291>

<sup>3</sup> Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 17.06.2020 № 1141 «Про схвалення Меморандуму про взаєморозуміння щодо врегулювання проблемних питань у сфері відновлюваної енергетики в Україні» URL:

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v1141874-20#Text>

<sup>4</sup> Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо удосконалення умов підтримки виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/810-20#Text>



або використовувати більш складні прогнози математичні моделі. Для отримання мінімальної похибки прогнозування, прогнози моделі повинні бути адаптовані до конкретних кліматичних умов регіону протягом певного періоду часу [2] та [3]. Прогнозування кількості електроенергії, що виробляється сонячною електростанцією, це насамперед передбачення кількості сонячного випромінювання, отриманого сонячною панеллю, що в свою чергу залежить від умов та параметрів навколишнього середовища [4], [5] та [6].

Існує багато методів прогнозування потужності на виході сонячної панелі, серед яких найпоширенішими є:

- метод Total Sky Image. Для знаходження прогнозованих значень сонячної енергії цим методом необхідно отримати фото неба з земної поверхні в тій місцевості, де розташована сонячна панель, визначити товщину хмар по фотографії, оцінити вектор напрямку руху хмар, зробити розрахунки. Цей метод дає можливість спрогнозувати сонячну енергію на півгодини вперед;
- метод вивчення знімків з космосу [7]. Алгоритм цього методу відрізняється від попереднього тим, що замість знімків неба та хмарного покриву, отриманих із земної поверхні, використовуються фотографії, зроблені зі супутників, встановлених у космосі. Ця інформація може бути передана шляхом оптичної зйомки або ж із застосуванням інфрачервоних датчиків. Головною перевагою цього методу є те, що можна охопити більшу площу.

Однак точність розглянутих методів прогнозування залежить від роздільної здатності отриманих знімків, і може знижуватись через нашарування хмар, які можуть розташовуватись під або над іншими.

На відміну від описаних методів, метод інтерполяції не потребує знімків неба, як із земної поверхні, так і з космосу. Для даного методу необхідні лише значення сонячної інсоляції, отримані з давачів, які можна розташовувати поряд з сонячними панелями, або безпосередньо на них.

### III. ПОБУДОВА ПРОГНОЗНОЇ МОДЕЛІ

Розрахунок проводився на основі даних сонячної інсоляції, які були отримані в результаті співпраці з лабораторією LARES (Загребський технічний університет, м. Загреб, Хорватія). Дані були взяті з дискретністю 1 хвилина. Для того, щоб розрахувати прогнозовані значення потужності на виході сонячної панелі, значення сонячної інсоляції переводяться в потужність [8] та [9] за формулою:

$$P = I \cdot k \cdot S, \quad (1)$$

де  $P$  – потужність на виході сонячної панелі, Вт;  $S$  – площа сонячної панелі, м<sup>2</sup>;  $I$  – значення сонячної інсоляції, Вт/м<sup>2</sup>;  $k$  – коефіцієнт, який враховує кут падіння сонячних променів та нагрівання сонячної панелі. Влітку  $k = 0,75$ , взимку  $k = 0,95$  (оскільки дані беруться за весняний місяць, то для розрахунків береться  $k = 0,85$  [10]). Розрахунки виконані для

фотоустановки, що складається з чотирьох послідовно підключених сонячних панелей Solvis SV48-190, потужністю 190 Вт, які встановлені на даху будівлі факультету електротехніки. В табл. 1 наведено частину даних для 04.05.2019.

Для побудови прогнози моделі потужності на виході сонячної панелі обрано поліноми Лагранжа 3-го та 5-го степеня [11], [12], [13], [14], [15], [16] та [17] з інструментів прогнозування середовища Microsoft Excel. Рівняння для поліномів для даних з різною дискретністю наведені у табл. 2.

В даній статті прогнозування проводилось для двох значень горизонту прогнозу: 1 година та 24 години.

На рис. 1, а зображено результати апроксимації та прогнозування кривої зміни потужності на виході сонячної панелі наведеними поліномами для даних з дискретністю в 1 хвилину. На рис. 1, б – результати апроксимації та прогнозування для даних з дискретністю в 10 хвилин; на рис. 1, в – з дискретністю в 1 годину. Дані отримано методом усереднення даних з дискретністю в 1 хвилину [18] та [19].

Таблиця 1. Значення сонячної інсоляції та потужності на виході сонячної панелі

Час	Інсоляція, Вт/м <sup>2</sup>	Потужність, Вт
6:00	332	283
6:01	337	287
6:02	347	295
6:03	344	293
6:04	340	289
6:05	332	283
6:06	322	274

Таблиця 2. Рівняння для поліномів для даних з різною дискретністю

Ступінь полінома	Дискретність даних	Прогнозне рівняння
3	1 хвилина	$y = 0,0124x^3 - 1,0161x^2 + 24,024x + 505,81$
5	1 хвилина	$y = -0,000098x^5 + 0,01493x^4 - 0,79747x^3 + 7,539x^2 - 136,825x + 810,952$
3	10 хвилин	$y = 1,214x^3 - 226,78x^2 + 14043x - 287567$
5	10 хвилин	$y = -0,252x^5 + 75,355x^4 - 8999,534x^3 + 536722,834x^2 - 15984457,408x + 190172156$
3	1 година	$y = 1,281x^3 - 57,526x^2 + 740,24x - 2185,4$
5	1 година	$y = -0,1543x^5 + 7,7867x^4 - 148,96x^3 + 1317,9x^2 - 5189,2x + 7375,7$



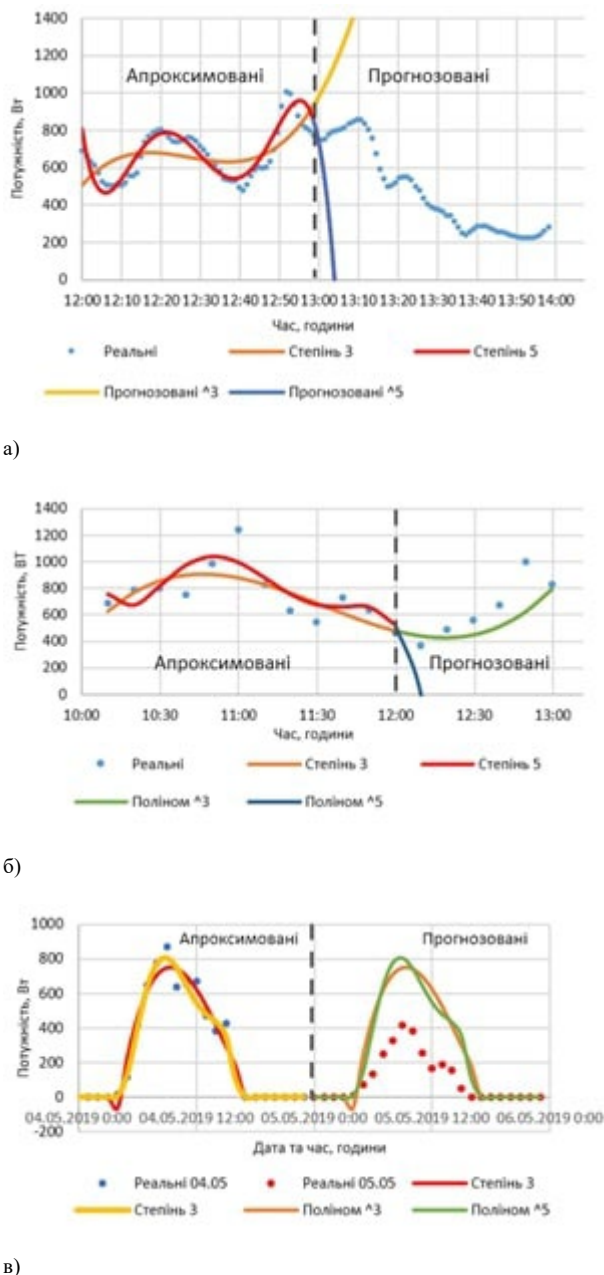


Рис. 1. Результати апроксимації та прогнозування потужності сонячної панелі для даних з дискретністю: а) 1 хвилину; б) 10 хвилин; в) 1 година

Таблиця 3. Похибка прогнозування потужності

Метод прогнозування	Дискретність даних	Горизонт прогнозу	Похибка, %
Поліном 3-го ступеня	1 хвилину	1 година	1283,76
	10 хвилин	1 година	608,69
	1 година	24 години	21,29
Поліном 5-го ступеня	1 хвилину	1 година	41245,37
	10 хвилин	1 година	1425,82
	1 година	24 години	395,57

Для розрахунку точності прогнозування використано середню відносну похибку Mean Absolute Percentage Error MAPE [20]:

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - \hat{P}_i|}{P_i}$$

де  $\hat{P}_i$  – прогнозоване значення потужності на виході сонячної панелі,  $P_i$  – реальне значення потужності на виході сонячної панелі.

Результати розрахунку похибки для даних з різною дискретністю наведені в табл. 3.

Як видно з табл. 3, найбільша похибка виходить при дискретності даних в 1 хвилину. Це обумовлено високою швидкістю зміни даних сонячної інсоляції, а отже і потужності на виході сонячної панелі. А найбільшу точність прогнозування забезпечує використання полінома 3-го ступеня для даних з дискретністю 1 година з горизонтом прогнозу 24 години.

#### IV. КОРЕКЦІЯ ПРОГНОЗУВАННЯ МЕТОДОМ ХОЙНА

Для підвищення точності прогнозування потужності на виході сонячної панелі необхідно проводити корекцію отриманих прогнозних значень методом предиктора-коректора [21], [22], [23], [24] [25]:

$$\hat{P}_{i+1}^k = P_i + \frac{1}{2} \Delta t ((P_i - P_{i-1}) + (\hat{P}_{i+1} - P_i))$$

де  $\hat{P}_{i+1}^k$  – скоректоване значення,  $\Delta t$  – різниця часу, з якою беруться дані  $P_i$  – останнє реальне значення,  $P_{i-1}$  – передостаннє реальне значення,  $\hat{P}_{i+1}$  – прогнозоване значення. Аналогічним чином далі відбувається прогнозування на інтервалі  $i+1 - i+n$ .

В табл. 4 наведені значення похибок прогнозування потужності для даних з різною дискретністю після проведення корекції.

Як видно з табл. 4, після застосування корекції похибка прогнозування значень потужності зменшується для поліномів 3-го та 5-го ступеня майже в 3 рази, а найменша похибка прогнозування забезпечується використання полінома 3-го ступеня для даних з дискретністю 1 година з горизонтом прогнозу 24 години.

Таблиця 4. Значення похибки прогнозування після корекції

Метод прогнозування	Дискретність даних	Горизонт прогнозу	Похибка з коректором, %
Поліном 3-го ступеня	1 хвилину	1 година	412,84
	10 хвилин	1 година	246,95
	1 година	24 години	19,51
Поліном 5-го ступеня	1 хвилину	1 година	25381,25
	10 хвилин	1 година	124,16
	1 година	24 години	140,39



## ВИСНОВКИ

Застосування корекції методом Хойна при прогнозуванні потужності на виході сонячної панелі поліномами 3-го та 5-го ступенів дозволяє підвищити точність прогнозування майже в 3 рази. При цьому, найменша похибка прогнозування забезпечується використання полінома 3-го ступеня для даних з дискретністю 1 година з горизонтом прогнозу 24 години.

## ВНЕСОК АВТОРІВ

Мірошніченко М. В. — вступ, обробка експериментальних даних; проведення розрахунків.

Клен К. С. — оформлення роботи, загальне керівництво, співпраця з лабораторією LARES даних.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] M. Hritsyshyna, "Pravyla vrehulyuvannya nebalansiv na rynku elektrychnoyi enerhiyi: shcho zminylosya [Rules for settlement of imbalances in the electricity market: what has changed]," *Yurydychna Hazeta*, no. 4 (734), 11 February 2021. URL: <https://yur-gazeta.com/publications/practice/energetichne-pravo/pravila-vregulyuvannya-nebalansiv-na-rinku-elektrichnoyi-energiyi-shcho-zminylosya.html>
- [2] "Principles of studying the weather," [Online]. Available: <http://www.bigpi.biysk.ru/encicl/articles/>.
- [3] S. P. Khromov and M. A. Petrosyants, *Meteorologiya i klimatologiya* [Meteorology and climatology], 7 ed., Nauka, 2006, p. 582. ISBN 5-02-035762-6
- [4] K. S. Klen and V. Y. Zhuikov, "Influence of stochastic nature of energy in distributed generation systems on their stability," *Technical electrodynamics*, no. 3, pp. 62-68, 2020. URL: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/280> DOI: [10.15407/techned2020.03.062](https://doi.org/10.15407/techned2020.03.062)
- [5] M. K. Yaremenko and K. S. Klen, "Estimation of the energy level of the wind stream for the accompanying data," *Microsystems, Electronics and Acoustics*, vol. 24, no. 2, p. 56-63, 2019. DOI: [10.20535/2523-4455.2019.24.2.160751](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2019.24.2.160751)
- [6] C. J. Smith, J. M. Bright та R. Crook, «Cloud cover effect of clear-sky index distributions and differences between human and automatic cloud observations,» *Solar Energy*, vol. 144, pp. 10-21, 1 March 2017. DOI: [10.1016/j.solener.2016.12.055](https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.055)
- [7] D. V. Bakharev, *Methods of calculation and regulation of solar radiation in urban planning*, Moscow: NIISF, 1968, p. 218.
- [8] L. N. Orlova, *Method of energy assessment and regulation of insolation in residential areas*, Moscow: MISS, 1985, p. 188.
- [9] N. V. Obolensky, *Architecture and the Sun*, Moscow: Stroyizdat, 1988, p. 208.
- [10] SUNSAY ENERGY, "Rozrahunok potuzhnosti sonyachnoyi batareyi [Calculation of the power of the solar battery]," 16 November 2020. [Online]. Available: <https://sunsayenergy.com/technology/rozrahunok-potuzhnosti-sonyachnoyi-batareyi>.
- [11] L. I. Turchak, *Fundamentals of numerical methods*, Moscow: Nauka, 1987, p. 320.
- [12] S. M. Ustinov and V. A. Zimnitsky, *Cleaning mathematics*, St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2009, p. 336.
- [13] N. I. Danilina, N. S. Dubrovskaya, O. P. Kvasha and etc., *Numerical methods*, Moscow: Higher school, 1976, p. 368.
- [14] G. G. Tsegelik, *Chiselny methods*, Lviv: LNU Vidavnychy Center IM. Ivana Franka, 2004, p. 409.
- [15] V. M. Zadachin and I. G. Konyushenko, *Chiselny methods*, Kharkiv: View. KhNEU im. S. Kuznetsya, 2014, p. 180.
- [16] Bakhvalov, *Numerical methods*, Moscow: Science, 1975, p. 631.
- [17] O. O. Abakumova, "Computational mathematics. Computer workshop," Igor Sikorsky KPI, Kyiv, 2018. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/28367>
- [18] M. O. Izmailova and I. S. Rakhmankulov, *The category "average" and its methodological significance in scientific research*, Kazan: Kazan University Publishing House, 1982.
- [19] M. R. Efimova, E. V. Petrova and V. N. Romyantsev, *General theory of statistics: Textbook*, Moscow: INFRA-M, 1966.
- [20] "MAPE – srednyaya absolyutnaya pokhybka [MAPE is the average absolute error]," [Online]. Available: <https://4analytics.ru/metodi-analiza/mape-srednyaya-absolyutnaya-oshibka-praktika-primeniya.html>. [Accessed 28 March 2021].
- [21] K. S. Klen, M. K. Yaremenko and V. Y. Zhuikov, "The Influence of the Wind Speed Prediction Error on the Size of the Storage Controlled Operation Zone in the System with the Wind Generator," *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*, no. 57, p. 35-41, 2020. DOI: [10.15407/publishing2020.57.035](https://doi.org/10.15407/publishing2020.57.035)
- [22] W. Chen and D. D. Key, *Advanced Mathematics for Engineering and Science*, Massachusetts: World Scientific, 2003.
- [23] San Joaquin Delta College, *Numerical methods for solving differential equations*, 2009.
- [24] J. J. Leader, *Numerical Analysis and Scientific Computing*, Boston: Addison-Wesley, 2004.
- [25] E. Süli and D. F. Mayers, *Introduction to numerical methods*, 1st ed., Cambridge University Press, 2003.

Надійшла до редакції 23 липня 2021 року

Прийнята до друку 18 липня 2022 року



# Prediction of the Power of the Solar Panel

M. V. Myroshnichenko<sup>f</sup>, ORCID [0000-0002-6082-7187](https://orcid.org/0000-0002-6082-7187)

K.S. Klen<sup>s</sup>, Ph.D. Assoc.Prof., ORCID [0000-0002-6674-8332](https://orcid.org/0000-0002-6674-8332)

Department of Electronic Attachments and Systems, Faculty of Electronics

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

Kyiv, Ukraine

**Abstract**—The article presents the results of predicting the power at the output of the solar panel by polynomials of different degrees. The article indicates the need for solar power forecast. The article describes what factors affect the forecast of solar power at the output of the solar panel. Forecasting the amount of electricity generated by a solar power plant is primarily a prediction of the amount of solar radiation received by the solar panel, which in turn depends on environmental conditions and parameters. Data were taken from 04.05.2019 – 05.05.2019 with a discreteness of 1 minute. In order to calculate the forecast, the values of solar insolation were converted to power. The hourly curve of change of solar power with a discreteness in 1 minute is presented. A two-hour curve of the change in solar power with a resolution of 10 minutes is presented. The daily curve of change of solar power with a discreteness in 1 hour is presented. The horizon at 1 hour and 1 day was chosen for forecasting. Approximation of data by means of polynomials of various degrees is checked. The article shows graphs of changes in real and predicted values of solar power at the output of the solar panel. The graphs clearly show which method of forecasting is more accurate. The accuracy of the predicted values was assessed using the average relative error. Of all the considered methods of calculating the predicted value of the power of the solar panel, the smallest error is obtained when the data are selected for 2 hours, differ by no more than 2 times and have a discreteness of 10 minutes. The benefit of using the correction of the predicted data by the Hoyne method is checked. To predict the power of the solar panel by approximation, it is advisable to adjust the predicted data. To correct the data, it is advisable to use the method of predictor-corrector. Predictor - is the predicted value, and the corrector - is the adjusted value. After calculating the power forecast at the output of solar power, an algorithm was developed with which you can calculate the predicted value of power. The developed algorithm for calculating the forecast uses the following parameters: data discreteness, the period for which the data are taken for analysis, the degree of the polynomial. First, the algorithm selects data for the selected period, selects discreteness. If you want to increase the discreteness, it averages the value. But on the basis of the selected values calculates the polynomial of the selected degree. Then, based on the calculated equation, the forecast is calculated and the predicted values are displayed in the form of a graph.

**Keywords** — solar energy; solar panels; solar power generation; prediction methods.

