

Розрахунок віртуальної щільності хмари на основі перетворення Фур'є

Збронський^f О. Г., ORCID [0000-0002-2994-2048](https://orcid.org/0000-0002-2994-2048)

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

Жуйков^s В. Я., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-3338-2426](https://orcid.org/0000-0002-3338-2426)

Національний технічний університет України

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

Київ, Україна

Анотація—В наведеній статті запропоновано методику визначення віртуальної щільності хмари з метою прогнозування потужності на виході сонячних панелей на певному інтервалі часу. Розглядається випадок, коли лінійна швидкість руху хмари значно більша за швидкість Сонця, яка визначається його кутовим переміщенням. Для розрахунку віртуальної щільності хмари застосовується метод прямого та зворотного дискретного перетворення Фур'є. Побудовано тривимірну модель хмари за даними її віртуальної щільності.

Ключові слова — сонячна електростанція; відбір максимальної потужності; перетворення Фур'є; віртуальна щільність.

I. ВСТУП

В останні роки спостерігаються швидкі темпи розвитку та впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в енергосистемах України та світу. Потужність сонячних електростанцій (СЕС) в Україні в 2018 році досягла рівня 1380 МВт, що майже вдвічі більше за показники 2017 року, і відображає всесвітні тенденції по збільшенню частки енергії відновлюваних джерел в загальній кількості виробленої енергії [1].

Величина енергії, яку можна отримати від сонячної електростанції, визначається середньомісячною питомою інтенсивністю сонячного випромінювання, що потрапляє на горизонтальну поверхню, загальною площею сонячних панелей та коефіцієнтом корисної дії. Крім того, для визначення максимального рівня енергії, яка може бути отримана від сонячної електростанції, необхідно визначити наступні параметри навколишнього середовища: тиск, температура повітря, вологість та ін., а також кореляційні залежності між ними [2].

Розглядаючи струм на виході сонячної електростанції, як кінцевий результат проходження сонячного випромінювання через зовнішнє середовище над сонячними панелями [3], доцільно оцінити вплив цього середовища на величину енергії генерації.

Тому, актуальною є задача визначення віртуальної щільності хмари, від величини якої залежить величина енергії генерації сонячної електростанції.

II. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЩІЛЬНОСТІ ХМАРИ

В залежності від співвідношення лінійної швидкості руху хмар та швидкості Сонця, яка визначається

її кутовим переміщенням, можливі наступні три випадки:

- 1) лінійна швидкість руху хмари значно більша за швидкість Сонця. Тоді на деякому інтервалі спостереження положення Сонця приймається фіксованим, у той час як хмари та їх проекції переміщуються на деяку відстань;
- 2) лінійна швидкість руху хмари значно менша за швидкість Сонця;
- 3) лінійна швидкість руху хмар та швидкість Сонця є величинами одного порядку.

У статті розглядається перший випадок, коли швидкість руху хмари значно більша за швидкість Сонця, яка визначається його кутовим переміщенням [4].

Для спрощення розрахунків вважатимемо, що проекція хмари являє собою коло з радіусом R , хоча розроблена математична модель дозволяє проводити розрахунки для хмар будь-яких форм та розмірів. Фіксація зменшення величини інтенсивності сонячного випромінювання визначається давачами освітленості, встановленими у шаховому порядку з деяким кроком Δl (рис. 1). Нехай проекція хмари O затіняє деяку частину поверхні сонячних панелей. На давачах освітленості 11, 21, 22, 31, 32, 33, 41, 42, 51 спостерігаються зменшення значення інтенсивності сонячного випромінювання, пропорційні щільності хмари [5]. Якщо швидкість вітру V_{xm} відома, можна обчислити час переміщення T хмари над площиною сонячної електростанції і відповідно визначити кількість давачів розташованих вздовж вектора \vec{z} її переміщення, які необхідні для розра-



хунку щільності хмари [6]. Припустимо, що напрям вітру відомий, і через деякий час Δt ті ж самі значення інтенсивності сонячного випромінювання з'являться на наступній групі давачів, позначених на рис. 1 червоним кольором. Це дає змогу спрогнозувати можливий рівень енергії генерації сонячної електростанції та сформулювати відповідні сигнали керування перетворювачами, які забезпечують роботу сонячних панелей в режимі відбору максимальної енергії. Одночасно виконується корекція розрахунку віртуальної щільності хмари на даному кроці [7].

При розрахунку віртуальної щільності хмари представимо хмару як фільтр, через який проходить сонячне випромінювання. Тоді функція зміни інтенсивності випромінювання на кожному з n давачів $f_n(t)$ задається формулою:

$$f_n(t) = \int_0^t h_n(t-\tau) \cdot s_n(\tau) d\tau, \quad (1)$$

де $h_n(t-\tau)$ – функція зміни щільності хмари, що чисельно дорівнює кількості сонячного випромінювання, що пройшло крізь хмару; $s_n(\tau)$ – функція зміни величини сонячного випромінювання. Для знаходження зображення $F(k)$ функції $f_n(t)$ застосовується дискретне перетворення Фур'є [8]:

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f_n(t) e^{-j \frac{2\pi nk}{N}}, \quad (2)$$

де k – номер вимірювання значення інтенсивності сонячного випромінювання ($k \in [0, N-1]$); N – кількість давачів, розташованих вздовж вектора \vec{z} .

В області зображень формула (1) представляється наступним чином:

$$F(k) = H(k) \cdot S(k),$$

де $H(k)$ та $S(k)$ – зображення функцій зміни щільності хмари та сонячного випромінювання відповідно. Тоді зображення функції зміни щільності хмари $H(k)$ обчислюється наступним чином:

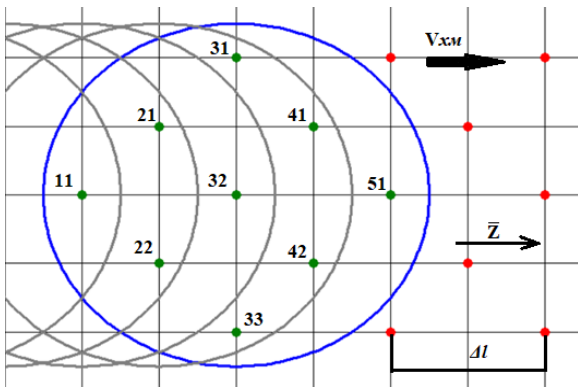


Рис. 1. Схема положення давачів освітленості відносно хмари на площині сонячної електростанції

$$H(k) = \frac{F(k)}{S(k)}. \quad (3)$$

Для визначення оригіналу функції щільності хмари використаємо зворотне перетворення Фур'є:

$$h(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H(k) e^{\frac{j2\pi kn}{N}}. \quad (4)$$

Таким чином, застосування прямого та зворотного дискретного перетворення Фур'є дозволяє визначити зображення та оригінал функції зміни щільності хмари.

III. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ВІРТУАЛЬНОЇ ЩІЛЬНОСТІ ХМАРИ

Для розрахунків використовуються дані інтенсивності сонячного випромінювання, що отримуються щохвилини з давачів, розташованих у місті Загреб, Хорватія [9]. На рис. 2 наведено графік зміни інтенсивності сонячного випромінювання на одному давачі освітленості 02 липня 2019 року. В період часу з 8:43 до 9:07 (25 хвилин) спостерігається різке зменшення інтенсивності випромінювання – затінення давача освітленості хмарою.

Нехай в початковий момент часу проекція хмари затіняє давач 11, як показано на рис. 1. Знаючи відстань між давачами $\Delta l = 100$ м та швидкість вітру $V_{хм} = 0,17$ м/с, розрахуємо час Δt , за який проекція хмари перейде з давача 11 на давач 32:

$$\Delta t = \frac{100}{0,17} = 600 \text{ с.}$$

Оскільки давачі розташовані в шаховому порядку, наступні будуть отримані через 300 с, бо відстань до лінії давачів 21-22 становить $\frac{\Delta l}{2}$. Знаючи час Δt та приймаючи, що радіус проекції хмари $R = 250$ м, отримуємо, що кількість давачів, розташованих вздовж вектора \vec{z} , $N = 5$. Знаючи кількість вимірювань значень інтенсивності, запишемо вираз для прямого дискретного перетворення Фур'є функції зміни інтенсивності сонячного випромінювання на давачах, скориставшись формулою Ейлера для (2), отримуємо:

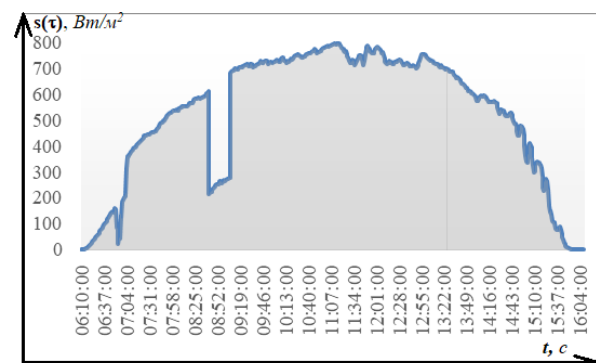


Рис. 2. Графік залежності інтенсивності сонячного випромінювання від часу



$$F(k) = x_{11} \left[\cos(0) - j \sin(0) \right] + x_2 \left[\cos\left(\frac{2\pi k}{5}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi k}{5}\right) \right] + x_3 \left[\cos\left(\frac{4\pi k}{5}\right) - j \sin\left(\frac{4\pi k}{5}\right) \right] + x_4 \left[\cos\left(\frac{6\pi k}{5}\right) - j \sin\left(\frac{6\pi k}{5}\right) \right] + x_{51} \left[\cos\left(\frac{8\pi k}{5}\right) - j \sin\left(\frac{8\pi k}{5}\right) \right],$$

де x_{11} , x_{51} – значення функції зміни інтенсивності на давачах 11 та 51; x_2 , x_3 та x_4 – середні значення груп давачів (21-22), (31-32-33) і (41-42) відповідно.

Підставивши в даний вираз $k \in [0, 4]$, отримуємо таблицю значень функції $F(k)$. У табл. 1 наведено перші 5 значень функції $F(k)$.

На інтервалі проходження хмари над площиною сонячної електростанції значення функції зміни інтенсивності сонячного випромінювання $s(\tau)$ приймаємо постійним і рівним середньому значенню інтенсивності на даному інтервалі, $s(\tau) = 690 \text{ Вт/м}^2$. В області зображень $S(k) = 690$.

В таблиці 2 наведено значення функції зміни щільності хмари $H(k)$.

Застосовуючи зворотне дискретне перетворення Фур'є, знайдемо оригінал функції зміни щільності хмари $h(t)$ за формулою (4):

$$h(t) = \frac{1}{5} \sum_0^4 H(k) e^{j2\pi kn/5}.$$

Отримані значення заносимо до табл. 3.

На рис. 3 зображено 3D модель віртуальної щільності хмари відповідно до площі її проекції на давачі сонячної електростанції. Різним відтінком синього кольору показані кожні 10% щільності, які на самому рисунку позначені десятковим дробом.

ТАБЛИЦЯ 1

k	F(k)				
0	1217	1233	1250	1271	1278
1	-39,9	-33	-40,7	-48,4	-36,5
2	-7,69	-9,09	-8,54	-12,83	-9,12
3	-16,9	-10,5	-5,23	-2,81	-7,13
4	-82,3	-80	-80,3	-81,7	-69,7

ТАБЛИЦЯ 2

№ з/п	H(k)
1	1,55
2	1,59
3	1,62
4	1,63
5	1,67

ТАБЛИЦЯ 3

№ з/п	h(t)
1	0,31
2	0,32
3	0,32
4	0,33
5	0,33

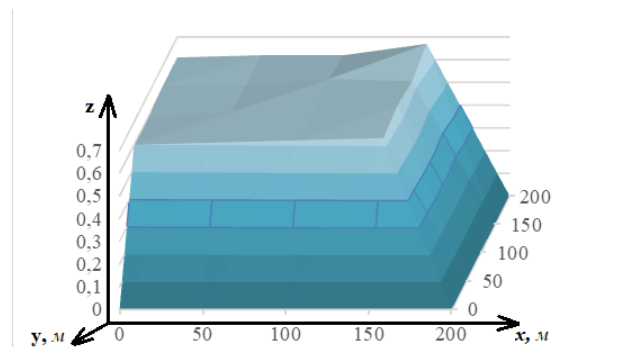


Рис 3. Віртуальна щільність хмари відносно її розмірів

Як видно з рис. 3, щільність хмари змінюється в межах від 0,6 до 0,7, що при більш точних розрахунках складає від 59% до 68%. Оскільки функцію зміни інтенсивності випромінювання вважаємо періодичною, то функція зміни щільності хмари на наступній частині поверхні сонячних панелей буде приймати значення, наведені у табл. 3. Це передбачення функції зміни щільності хмари дозволяє спрогнозувати потужність на виході сонячної електростанції та виробити відповідні сигнали керування перетворювачами, що забезпечують роботу сонячних панелей в режимі відбору максимальної енергії, залежно від умов навколишнього середовища [10].

ВИСНОВКИ

Таким чином, запропонована методика дозволяє за допомогою методу зворотного дискретного перетворення Фур'є визначати віртуальну щільність хмари за даними величини сонячного випромінювання, яке потрапляє на сонячні панелі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] "Rozvytok vidnovlyuvanyh dzherel enerhiyi v Ukraini [Development of renewable energy sources in Ukraine]." [Online]. Available: <http://energymagazine.com.ua/wpcontent/uploads/2017/03/Rozvytok-VDE-v-Ukraini.pdf>. [Accessed 07 february 2019].
- [2] V. J. Zhuikov, L. M. Lukianenko, D. A. Mykolaiets, K. S. Osypenko, A. O. Steliuk, T. O. Tereshchenko and J. S. Yamnenko, Pidvyshchennya efektyvnosti system z vidnovlyuvanyh dzherelamy enerhiyi [Increasing the efficiency of systems with renewable energy sources], Kyiv: Igor Sikorsky KPI, 2018, p. 365.
- [3] B. Zhalnin, M. Kagan and A. Naumov, "Vidchiznyana kosmichna energetika: vchora, soganodni, zavtra [Domestic space energy: yesterday, today, tomorrow]," *Electronics Science Technology Business*, vol. 2, 2016.
- [4] K. S. Osypenko, "Vyznachennya virtualnoyi shchilnosti khmar iz zastosuvannyam metodu zvorotnoho peretvorennya [Determination of virtual density of clouds with the use of the method of inverse transformation]," *Electronics and communication*, vol. 22, no. 3 (98), pp. 55 - 60, 2017. DOI: [10.20535/2312-1807.2017.22.3.103844](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2017.22.3.103844)



- [5] D. N. Karamov, "Matematicheskoe modelirovanie solnechnoy radiatsii s ispolzovaniem mnogoletnih meteorologicheskikh ryadov, nahodyaschihsya v otkryitom dostupe," *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, vol. 328, no. 6, pp. 28 - 37, 2017.
- [6] Pyrometer, "Wikipedia," [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Pyrometer>. [Accessed 17 April 2020].
- [7] O. G. Zbronskyi, *Modeling the virtual density of clouds*, Kyiv, 2020, p. 75.
- [8] R. J. Marks II, *Handbook of Fourier Analysis & Its Applications*, Oxford: Oxford University Press, 2009, p. 744. ISBN: 978-0195335927
- [9] "Laboratory for Renewable Energy Systems (LARES) of University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing," [Online]. Available: <https://www.lares.fer.hr>.
- [10] M. I. Stadnyk, O. O. Rubanenko and S. V. Bondarenko, "Viznachennya rivnya generatsiyi elektroenergiyi na sonyachniy elektrostantsiyi vldnosno yiyi vstanovlenoyi potuzhnosti [Determining the level of electricity generation at a solar power plant relative to its installed capacity]," *Technology, energy, transport agro-industrial complex*, no. 3 (95), pp. 213 - 220, 2016.

[Accessed 19 May 2019].

Надійшла до редакції 11 липня 2020 року

DOI: [10.20535/2523-4455.меа.207787](https://doi.org/10.20535/2523-4455.меа.207787)



Virtual Cloud Density Calculation Based on Fourier Transform

O. H. Zbronskyi^f, ORCID [0000-0002-2994-2048](https://orcid.org/0000-0002-2994-2048)

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

V. Ya. Zhuikov^s, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0002-3338-2426](https://orcid.org/0000-0002-3338-2426)

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

Abstract—In recent decades, more and more humanity is paying attention to the use of alternative energy sources, including solar. The production and introduction of photovoltaic cells into everyday life is becoming cheaper and more accessible to a larger population. Therefore, the topic we have chosen is quite relevant, as it is directly related to the operation of solar power plants.

The task was to verify the theoretical material by introducing existing data and modeling the actual operating conditions of solar panels.

Depending on the ratio of the linear velocity of clouds and the speed of the Sun, which is determined by its angular motion, the following three cases are possible:

the linear velocity of the cloud is much greater than the speed of the Sun, which is determined by its angular movement. Then, at some observation interval, the position of the Sun is assumed to be fixed, while the clouds and their projections move some distance;

the linear velocity of the cloud is much less than the speed of the Sun, which is determined by its angular movement;

the linear velocity of clouds and the speed of the Sun, which is determined by its angular movement, are values of the same order.

The article considers the first case when the speed of a cloud is much higher than the speed of the Sun.

To simplify the calculations, we assume that the cloud projection is a circle with some radius, although the developed mathematical model allows calculations for clouds of any shape and size. Fixation of the decrease in the magnitude of the intensity of solar radiation is determined by the light sensors installed in a checkerboard pattern with some step.

When calculating the virtual density of the cloud, we present the cloud as a filter and solar radiation passes through it. The first step to determine the density of the cloud will be to determine the image of the function of the change in the intensity of solar radiation. This is possible due to the direct discrete Fourier transform. After some transformations we will receive an expression from which it is possible to define the image of function of change of density of a cloud. For the function of the intensity of solar radiation, we choose a fixed value. This is due to the small period of time in which the density of the cloud is determined. The next task is to find the original function of the cloud density change. This is the purpose of all calculations. The inverse Fourier transform was used for the calculations. At last we could see the 3D model of the virtual density of the cloud according to the area of its projection on the sensor of a solar power plant. It is shown in a different shade of color every 10% of the density. Solar radiation intensity data obtained every minute from sensors located in Zagreb, Croatia are used for calculations.

The proposed technique allows using the inverse discrete Fourier transform method to determine the virtual density of the cloud according to the magnitude of solar radiation falling on solar panels, and extrapolate the obtained values to predict the amount of energy at the output of a solar power plant.

Keywords — solar power plant; maximum power selection; Fourier transform; virtual density.