

## Електронні системи

УДК 621.314

# Визначення віртуальної щільності хмар із застосуванням методу зворотного перетворення

Осипенко К. С., к.т.н., ORCID [0000-0002-6674-8332](https://orcid.org/0000-0002-6674-8332)e-mail [ekateryna.osypenko@gmail.com](mailto:ekateryna.osypenko@gmail.com)

Факультет електроніки, кафедра промислової електроніки

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» [kpi.ua](http://kpi.ua)

Київ, Україна

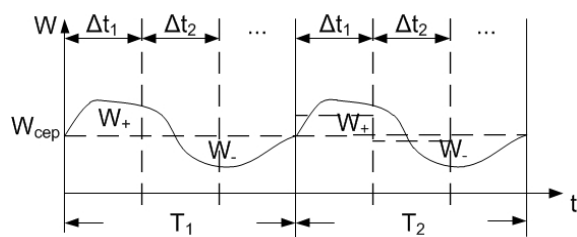
**Реферат**—В наведеній статті запропоновано методику визначення віртуальної щільності хмар на основі застосування зворотного перетворення для підвищення величини середнього рівня енергії, що генерується сонячною електростанцією, на деякому базовому інтервалі. Наведено формулу закону Бера, який описує зменшення інтенсивності випромінювання при проходженні через хмари, та формулу для визначення проєкції хмар. Розглянуто три випадки співвідношення лінійної швидкості руху хмар та швидкості Сонця, яка визначається його кутовим переміщенням. Для кожного з випадків наведено схему розрахунку віртуальної щільності та формули для розрахунку інтенсивності сонячного випромінювання, проєкції хмари на сонячну панель, а також коефіцієнта лінійного поглинання, значення якого корелюють зі значеннями щільності хмари.

Бібл. 13, рис. 4.

**Ключові слова** — сонячна електростанція; віртуальна щільність хмар; відбір максимальної енергії; метод зворотного перетворення; перетворення Фур'є.

### I. ВСТУП

В останні десятиліття в енергосистемах світу та України широко використовуються електростанції на основі відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячні електростанції (СЕС) [1], встановлена пікова потужність яких в Україні у 2016 році перевищила 450 МВт [2]. Однією з найпотужніших сонячних електростанцій в Україні є електростанція Стар Південь Енерго (Star UA) потужністю 120 МВт [3].

Рис. 25 Приклад графіку зміни рівнів енергії  $W_+$  та  $W_-$ 

Згідно з принципом невизначеності Гейзенберга для підвищення ефективності роботи системи керування потоками енергії в таких системах має здійснюватись по двом каналам – за базовим інтервалом для забезпечення необхідного рівня енергії для заряду накопичувача та за мінімальною тривалістю інтервалу спостереження для забезпечення необхідного рівня максимально можливої енергії сонячних панелей [4].

Якщо за базовий інтервал  $T$  взяти добу, можна визначити середнє значення енергії  $W_{сер}$ , яку можна отримати від сонячної електростанції, а також рівень енергії  $W_+$ , що перевищує середнє значення і використовується для заряду накопичувача, та рівень енергії  $W_-$ , що менший за середнє значення і повертається в мережу від накопичувача (рис. 1). Знання цих рівнів енергії дозволяє реалізувати прогнозне керування системою на наступному базовому інтервалі. Однак таке керування є неточним, а одним з підходів підвищення точності є прогнозування на деякий інтервал  $\Delta t$  з подальшою корекцією та покроковим зміщенням до кінця базового інтервалу.

Першим кроком при використанні сонячних електростанцій є опис параметрів навколишнього середовища, наприклад, інтенсивності сонячного випромінювання, тиску, температури повітря, вологості тощо, а також кореляції між ними. Ці параметри є необхідними для визначення максимального рівня енергії, яка може бути отримана від СЕС.

Величина енергії, яку можна отримати від сонячної електростанції, визначається загальною площею сонячних панелей, коефіцієнтом корисної дії та середньомісячною питомою інтенсивністю сонячного випромінювання, що потрапляє на горизонтальну поверхню. Інтенсивність, в свою чергу, суттєво залежить від географічної широти місцевості, пори року та часу доби, прозорості атмосфери, наявності хмар, характеру підстилаючої поверхні та інших факторів [5, 6].

Для оцінки рівня енергії, що потрапляє на поверхню сонячних панелей, існує декілька методів, серед яких: 1) використання датчиків освітлення; 2) фіксація положення робочої точки для забезпечення роботи в околі точки відбору максимальної потужності; 3) використання алгоритмів пошуку точки максимальної потужності. Розглядаючи струм на виході сонячних панелей як кінцевий результат проходження сонячного випромінювання через зовнішнє середовище над сонячними панелями, доцільно оцінити вплив цього середовища на величину енергії генерації.

Одним з кроків такої ідентифікації є визначення щільності хмар, від величини якої залежить величина енергії, що потрапляє на поверхню сонячних панелей, що і є метою даної роботи.

## II. ВІРТУАЛЬНА ЩІЛЬНІСТЬ ХМАР

Сонячна електростанція є набором сонячних панелей – дискретних комірок, кількість яких залежить від потужності електростанції, тому доцільно було б проводити розрахунки для дискретної моделі. Однак коли розглядаються великі електростанції, такі, як, наприклад, електростанція Ivanpah Solar Electric Generating System [7], яка складається з 300000 сонячних панелей площею 14 м<sup>2</sup> кожна, враховуючи, що площа проекції хмари (наприклад, купчастої) в середньому сягає 100000 м<sup>2</sup>, можна використовувати неперервну модель. Під площею проекції хмари в загальному випадку розуміється кількість затінених хмарою комірок.

Оскільки поперечні розміри сонячного променя значно менші за повздовжні, промінь характеризується інтенсивністю  $I(z)$  в кожній конкретній точці на промені. При проходженні квантів сонячного випромінювання через хмару сумарна інтенсивність випромінювання  $I$ , що розраховується на одиницю площі поверхні, перпендикулярної напрямку розповсюдження випромінювання, зменшується за законом Бера [8]:

$$I(z) = I_0 e^{-\int_0^z \mu(\vec{z}) dz}, \quad (1)$$

де  $z$  – координата точки на прямій, вздовж якої розповсюджується випромінювання;  $I_0$  – початкове значення інтенсивності, тобто інтенсивність випромінювання, що потрапляє в атмосферу Землі;  $\mu(\vec{z})$  – коефіцієнт лінійного поглинання, що є функцією трьох просторових координат  $(x, y, z)$ , які утворюють радіус-вектор  $\vec{z}$ . Значення коефіцієнта  $\mu(\vec{z})$  розраховуються в точках на прямій, паралельній осі  $Oz$  і корелюють зі значеннями щільності хмари в точках вектора  $\vec{z}$ . Величина амплітуди інтенсивності сонячного випромінювання, що пройшло крізь хмару, обернено пропорційна щільності хмари.

Логарифм відношення інтенсивності випромінювання, що потрапляє на сонячну панель, до початкової інтенсивності будемо називати проекцією хмари вздовж лінії розповсюдження випромінювання:

$$p(z) = -\ln \frac{I(z)}{I_0},$$

або, враховуючи формулу (1):

$$p(z) = \int_0^z \mu(\vec{z}) dx.$$

Для знаходження щільності хмари необхідно мати набір її проекцій для всіх можливих положень хмари в координатах  $x, y, z$ .

Підключення перетворювача (в загальному випадку – імпульсного регулятора) до кожної елементарної комірки сонячної електростанції (під елементарною коміркою будемо розуміти окрему сонячну панель) забезпечує реалізацію 2-го та 3-го методів оцінки рівня енергії, що потрапляє на поверхню сонячних панелей з подальшим підсумовуванням енергії в загальному вузлі [9, 10]. При проходженні хмари над сонячною електростанцією частина панелей затіняється, і загальний рівень енергії зменшується. В залежності від співвідношення лінійної швидкості руху хмар  $V_{xm}$  та швидкості Сонця, яка визначається його кутовим переміщенням  $V_c$ , можливі такі випадки:

- 1) лінійна швидкість руху хмари значно більша за швидкість Сонця, яка визначається його кутовим переміщенням:  $V_{xm} \gg V_c$ . Тоді на деякому інтервалі спостереження (наприклад, 1 год) положення Сонця вважається фіксованим (рис. 2, а), тобто лінії променів  $A - A, A' - A', A'' - A''$  зберігають свою колінеарність, тоді як проекція хмари переміщується на відстань  $h$ ;
- 2) лінійна швидкість руху хмари значно менша за швидкість Сонця, яка визначається його кутовим переміщенням:  $V_{xm} \ll V_c$ . Тоді лінії променів змінюються з  $A - A$  на  $B - B$  з кутом зміщення Сонця  $\theta$ , який змінюється в заздалегідь визначених межах  $\theta_{\min} < \theta < \theta_{\max}$  (рис. 2, б);

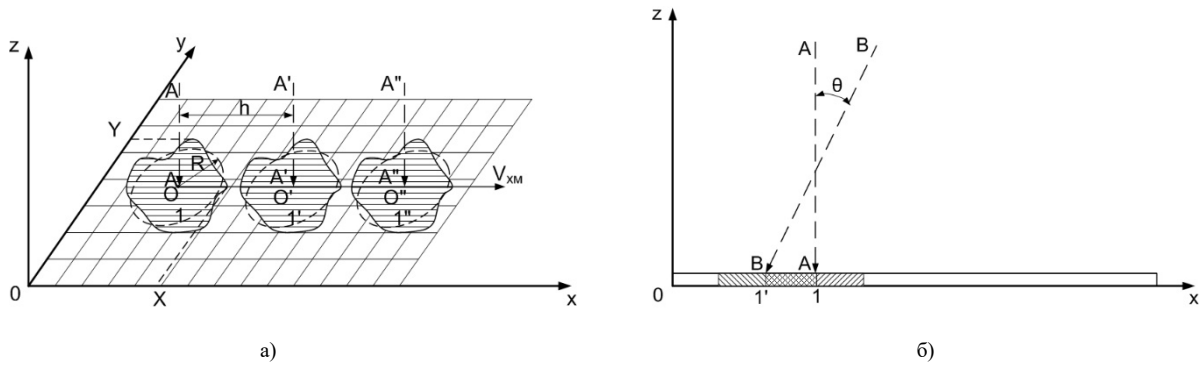


Рис. 26 Проекції хмари на сонячну панель: а) за умови  $V_{xm} \gg V_c$ ; б) за умови  $V_{xm} \ll V_c$

- 3) лінійна швидкість руху хмар та швидкість Сонця, яка визначається його кутовим переміщенням, є величинами одного порядку:  $V_{xm} \approx V_c$ . Цей випадок поєднує в собі особливості попередніх двох випадків.

Хоча визначення форми проекції хмари є важливою задачею, в наведеній статті для спрощення розрахунків форму проекції хмари апроксимуємо колом деякого радіусу  $R$  з центром в точці  $O$ .

Оскільки сумарна інтенсивність сонячного випромінювання визначається потоком прямого сонячного випромінювання, що проходить через хмару; поглиненням потоком; потоком, відбитим поверхнею Землі; потоком, перевідбитим від поверхні хмари, а також наведеним потоком від інших об'єктів на поверхні [11], то для спрощення розрахунків будемо використовувати деяку еквівалентну віртуальну щільність хмар, яка буде враховувати як величину прямого, так і величину відбитого випромінювання. Також для наочності розрахуємо щільність однієї хмари. Хоча за добу над сонячною електростанцією проходять десятки хмар різних розмірів, форм та щільностей, методика розрахунку для кожної з хмар буде однаковою. Для визначення віртуальної щільності існує декілька методів, одним з яких є метод зворотного перетворення, який дозволяє визначити щільність об'єкту за набором його проекцій на деяку площину [12].

### III. АДАПТАЦІЯ МЕТОДУ ЗВОТНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ

За умови, що лінійна швидкість руху хмари значно більша за швидкість Сонця, яка визначається його кутовим переміщенням, схема розрахунку віртуальної щільності хмари за набором її проекцій при застосуванні методу зворотного перетворення полягає у наступному.

На сонячній панелі обираємо початкову декартову систему координат  $Oxyz$  з центром  $O$ . Сонячне випромінювання розповсюджується вздовж вісі  $Oz$ . При  $z = 0$  початкова проекція хмари  $1$  знаходиться в площині  $Oxy$ , при чому центр координат співпадає з центром проекції (рис. 3). Оскільки положення Сонця вважається фіксованим, тобто розглядається пучок колінарних променів і кут зміщення Сонця  $\theta = 0$ ,

наступна проекція хмари  $1'$  розраховується у системі координат  $O\chi\gamma$ , центр якої переноситься у точку  $O'$  з координатами  $(a, b)$ , напрям вісі  $O\chi$  співпадає з напрямом вісі  $Ox$ , напрям вісі  $O\gamma$  співпадає з напрямом вісі  $Oy$ . Положення нової системи відносно початкової визначається наступними рівняннями:

$$\begin{cases} \chi = x - a \\ \gamma = y - b \end{cases}$$

Відповідно до формули (1), інтенсивність сонячного випромінювання на площині сонячної панелі при  $z = 0$  визначається наступним чином:

$$I(x, y) = I_0 e^{-\int_0^x \int_0^y \mu(x-\chi, y-\gamma) d\chi d\gamma} \quad (2)$$

При подальших розрахунках приймемо, що поза хмарою  $\mu = 0$ , і інтеграл у формулі (2) розраховується лише по відрізку, що розташований всередині площини кола.

Запишемо вираз для проекції хмари на сонячну панель наступним чином:

$$p(x, y) = \int_0^x \int_0^y \mu(x-\chi, y-\gamma) d\chi d\gamma$$

Враховуючи, що зміна функції  $\mu(x, y, z)$  на одиницю відстані по осі  $Oz$  визначається оператором  $p_z = \frac{d}{dz}$ , і застосовуючи зворотне перетворення [13], отримаємо наступний вираз для коефіцієнта лінійного поглинання хмари:

$$\mu(x, y, z) = \int_0^\infty p(x, y) e^{j(p_z x + p_z y)} dp_z$$

який і визначає її щільність.

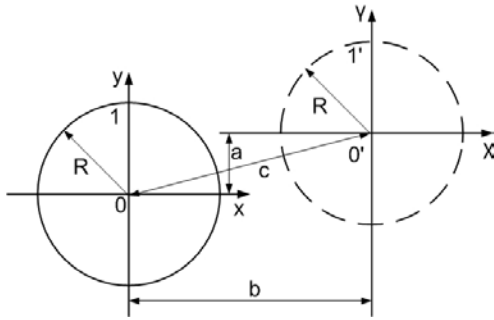


Рис. 27 Схема розрахунку віртуальної щільності хмари за умови, що  $V_{хм} \gg V_c$

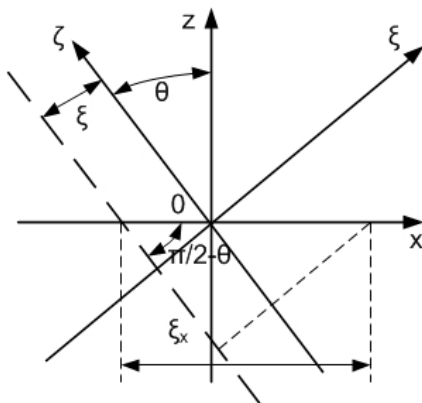


Рис. 28 Схема розрахунку віртуальної щільності хмари за умови, що  $V_{хм} \ll V_c$

Середнє значення коефіцієнта лінійного поглинання на інтервалах  $0 \div X$ ,  $0 \div Y$ , де  $X$  та  $Y$  – граничні розміри проекції хмари, визначається наступним чином:

$$\bar{\mu}(x, y, z) = \frac{1}{X} \frac{1}{Y} \int_0^X \int_0^Y \int_0^\infty p(x, y) e^{j(p_z x + p_z y)} dx dy dp_z .$$

Для знаходження тренду зміни віртуальної щільності хмари на базовому інтервалі необхідно розраховувати математичне очікування величини віртуальної щільності та його відхилення на кожному з обраних інтервалів фіксації положення хмари.

Для випадку, коли лінійна швидкість руху хмари значно менша за швидкість Сонця, яка визначається його кутовим переміщенням, прийемо, що зміщення Сонця вздовж вісі  $Oy$  є незначним. Тоді відносно нерухомої системи координат  $Oxz$  введемо рухоми систему  $O\xi\xi$ , вісь  $O\xi$  якої направлена, як показано на рис. 4.

Положення рухомої системи відносно нерухомої визначається кутом  $\theta$ :

$$\begin{cases} \zeta = z \cos \theta + x \sin \theta \\ \xi = -z \sin \theta + x \cos \theta \end{cases}$$

Інтенсивність сонячного випромінювання для деякого значення координати у проекції хмари визначається кутом зміщення  $\theta$  поточного променя відносно початкового:

$$I(\xi, y, \theta) = I_0 \exp \left( - \int_0^Z \mu(x, y, z) dz \right),$$

де  $Z$  – верхня границя хмари.

Кут повороту системи координат  $\theta$  залежить від кутового положення Сонця (часу доби), кута нахилу сонячної панелі та від географічних координат сонячної електростанції, адже атмосфера Землі краще відбиває косі сонячні промені, тому годинна інсоляція на екваторі і в середніх широтах набагато більша ніж в високих, і тому в екваторіальних регіонах кут нахилу панелей буде значно меншим, ніж у регіонах, ближчих до полюсів.

Набір проекцій хмари на вісь  $O\xi$  визначається наступним чином:

$$p(\xi, y, \theta) = \int_0^Z \mu(x, y, z) dz .$$

Враховуючи, що вісь  $O\xi$  повернена відносно вісі  $Ox$  на кут  $\frac{\pi}{2} - \theta$ , рівняння проекції  $\xi_x$  вісі  $O\xi$  на вісь  $Ox$  записується наступним чином:

$$\xi_x = -z + x \operatorname{ctg} \theta .$$

Тоді, позначивши набір проекцій хмари через  $p(\xi_x, y, \theta)$  і враховуючи, що  $\frac{d\theta}{dx} = \omega_x$  – зміна кута повороту системи координат на одиницю відстані по осі  $Ox$ , отримаємо наступний вираз для розрахунку коефіцієнта лінійного поглинання:

$$\mu(x, y, z) = \int_0^\infty p(\xi_x, y, \theta) e^{j\omega_x \xi_x} d\omega_x ,$$

який як і у попередньому випадку визначає віртуальну щільність хмари.

У випадку, коли лінійна швидкість руху хмари та швидкість Сонця, яка визначається його кутовим переміщенням, є величинами одного порядку, необхідно враховувати особливості, притаманні попереднім двом випадкам. За умови, що зміщення Сонця вздовж вісі  $Oy$  є незначним, аналогічні розрахунки доцільно проводити у новій системі координат:

$$\begin{cases} \zeta = z \cos \theta + x \sin \theta \\ \xi = -z \sin \theta + x \cos \theta \\ \gamma = y - b \end{cases}$$

з використанням операторів  $\frac{d}{dz}$  та  $\frac{d}{dx}$ .

## ВИСНОВКИ

Запропонована в статті методика дозволяє на основі застосування методу зворотного перетворення визначити коефіцієнт лінійного поглинання і, відповідно, віртуальну щільність хмари за даними інтенсивності сонячного випромінювання, що потрапляє на поверхню сонячних панелей.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Baziuk, T. M., et al., *Intelektualni elektrichni merezhi: elementy ta rezhimi*, O. V. Kyrylenko, Ред., Kyiv: Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine, 2016, p. 399. ISBN: 978-966-02-7913-1
- [2] V. Karpus, «V 2016 godu proizvodstvo «zelenoy» elektroenergii v Ukraine prevyisilo 1,7 mlrd kVt [In 2016 year the production of “green” electricity in Ukraine exceeded 1.7 billion kWh],» 06 February 2017. [Online]. Available: <http://itc.ua/news/v-2016-godu-proizvodstvo-zelenoy-elektroenergii-v-ukraine-prevyisilo-1-7-mlrd-kvt-ch/>.
- [3] «V Novoy Kahovke slovaki nachali stroit geliyelektrostantsiyu moschnostyu 120 MVt [In New Kakhovka, Slovaks began to build a solar power plant with a capacity of 120 MW],» 28 December 2012. [Online]. Available: <http://khersonline.net/novosti/ekonomika/9294-v-novoy-kahovke-slovaki-nachalai-stroit-geliyelektrostantsiyu-moschnostyu-120-mvt.html>.
- [4] K. S. Osypenko; V. Ya. Zhuikov, «Printsyпы nevyznachenosti Geizenberga pry otsintsі rіvnia energii, shcho generuietsia vіdnovliuvanyimi dzherelamy [Heisenberg's uncertainty principle in evaluating the renewable sources power level],» *Technical Electrodynamics*, № 1, pp. 10-16, 2017. URL: [http://techned.org.ua/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1123&Itemid=77](http://techned.org.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=1123&Itemid=77)
- [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*, т. 328, № 6, pp. 28-37, 2017. URL: <http://izvestiya.tpu.ru/ru/archive/new/article.html?id=359864&journalId=>
- [6] V. N. Dmitrienko; B. V. Lukutin, «Metodika otsenki energii solnechnogo izlucheniya dlya fotoelektrostantsii [Method for estimating solar radiation energy for photovoltaic plants],» *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, т. 328, № 5, pp. 49-55, 2017.
- [7] "Abengoa closes \$1.2 billion financing for the Mojave Solar Project and starts construction," 09 April 2012. [Online]. Available: <http://csp-world.com/news/20110914/0057/abengoa-closes-12-billion-financing-mojave-solar-project-and-starts-construction>.
- [8] D. V. Sivukhin, *Obschiy kurs fiziki. Tom IV. Optika* [General course of physics. Volume IV. Optics], 3rd ed. ред., vol. 4, Moscow: Fizmatlit, 2006, p. 792. ISBN: 5-9221-0228-1
- [9] J. Surya Kumari; Dr. Ch. Sai Babu; A. Kamalakar Babu, "Design and Analysis of P&O and IP&O MPPT Techniques for Photovoltaic System," *International Journal of Modern Engineering Research*, vol. 2, no. 4, pp. 2174-2180, 2012. URL: <http://www.ijmer.com/pages/vol2-issue4.html>
- [10] Florent Boico; Brad Lehman, "Study of Different Implementation Approaches for a Maximum Power Point Tracker," in *IEEE Workshops on Computers in Power Electronics, COMPEL '06*, Troy, NY, USA, 2006. DOI: [10.1109/COMPEL.2006.305646](https://doi.org/10.1109/COMPEL.2006.305646)
- [11] G. B. Osadchyy, *Solnechnaya energiya, eYo proizvodnyie i tehnologii ih ispolzovaniya (Vvedenie v energetiku VIE)* [Solar energy, its derivatives and technologies for their use (Introduction to renewable energy)], Omsk: E.A. Maksheeva IPK, 2010. ISBN: 978-5-904154-11-0
- [12] A. S. Kravchuk, *Osnovy kompyuternoy tomografii. Posobie dlya studentov vuzov* [Foundations of computer tomography. A manual for university students], Moscow: Drofa, 2001. ISBN: 5-7107-4120-5
- [13] I. S. Gruzman; V. S. Kirichuk; V. P. Kosykh; G. I. Peretyagin; A. A. Spektor, *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v informatsionnykh sistemah. Uchebnoe posobie* [Digital image processing in information systems. Textbook], Novosibirsk: NSTU publishing house, 2002, p. 352. ISBN: 5-7782-0330-6

Надійшла до редакції 09 червня 2017 р.

УДК 621.314

## Определение виртуальной плотности облаков с применением метода обратного преобразования

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

e-mail [ekateryna.osypenko@gmail.com](mailto:ekateryna.osypenko@gmail.com)

Факультет електроніки, кафедра промислової електроніки

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сикорського» [kpi.ua](http://kpi.ua)

Київ, Україна





*Реферат*—В приведенной статье предложена методика определения виртуальной плотности облаков на основе применения обратного преобразования для повышения величины среднего уровня энергии, генерируемой солнечной электростанцией, на некотором базовом интервале. Приведена формула закона Бэра, описывающего уменьшение интенсивности излучения при прохождении через облака, и формула для определения проекций облаков. Рассмотрены три случая соотношения линейной скорости движения облаков и скорости Солнца, определяющей его угловым перемещением. Для каждого из случаев приведена схема расчета виртуальной плотности и формулы для расчета интенсивности солнечного излучения, проекции облака на солнечную панель, а также коэффициента линейного поглощения, значения которого коррелируют со значениями плотности облака.

Библ. 13, рис. 4.

*Ключевые слова* — солнечная электростанция; виртуальная плотность туч; отбор максимальной энергии; метод обратного преобразования; преобразование Фурье.

UDC 621.314

## The determination of virtual cloud density with the application of inverse transformation method

K. S. Osypenko, PhD, ORCID [0000-0002-6674-8332](https://orcid.org/0000-0002-6674-8332)

e-mail [ekateryna.osypenko@gmail.com](mailto:ekateryna.osypenko@gmail.com)

Faculty of electronics, Department of Industrial Electronics

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” [kpi.ua](http://kpi.ua)

Kyiv, Ukraine

*Abstract*—In the presented paper data on solar power stations power in the world and Ukraine are given. Also data on the installed peak power of solar power stations in Ukraine in 2016 are given. It is shown that the efficiency of such power stations is provided by maximum energy selection from solar panels at each specific moment in time and efficient operation of the storage on some basic interval. The necessity of implementation of two-channel control in distributed generation systems due to Heisenberg uncertainty principle is shown. It should control the basic interval to ensure the necessary level of energy to charge the storage duration and the minimal duration of observation interval to ensure the maximum level of energy, taken from solar panels. The maximum value of the energy generated by solar panels depends on the existence of clouds and their density, because when the cloud passes over solar panels, part of them is shaded and the level of output energy decreases. Knowing the average level of energy that can be obtained from solar power station and energy levels that excess and is less than average, allows implementing the predictive control on the next basic interval. However, such control is inaccurate. One of the approaches to improve the accuracy is a prediction on a certain small interval with subsequent correction and step-by-step displacement until the end of the basic interval. Considering the solar panels output current as a final result of solar radiation passage through the external environment it is advisable to assess the impact of this environment on the magnitude of generated energy. One of the steps of this identification is to determine the clouds density, on the magnitude of which the amount of energy that falls on the solar panels surface depends. The Beer law is presented. It describes the reduction of the total irradiation intensity, calculated per unit of surface area perpendicular to the direction of irradiation propagation. The method for determination of the virtual cloud density, which takes into account both the values of direct and reflected solar radiation, with reverse transformation is given. It enhances the value of the average level of energy, generated by solar power station on some basic interval. It is shown that in order to find the cloud density it is necessary to have a set of projections for all possible positions of the cloud. It is proposed to approximate the form of the cloud projection with a circle of defined radius to simplify the calculations. Three cases of the ratio between the linear velocity of the clouds and the velocity of the sun, which is defined by its angular displacement, are considered: first is when the linear velocity of the clouds is much greater than the velocity of the sun, which is defined by its angular displacement, then at some observation interval the position of the sun is fixed; second is when the velocity of the clouds is much less than the velocity of the sun; and third is when the velocity of clouds and the velocity of the sun are the values of the same order. This case combines the features of the previous two cases. For each case the scheme for virtual cloud density calculation, formulas for calculation of solar irradiation intensity, cloud projections on the solar panels and the linear absorption coefficient, which values are correlated with the density of the cloud are given.

Ref. 13, fig. 4.

*Key words* — solar power station; virtual cloud density; maximum power point tracking; inverse transformation method; Fourier transform.

