

УДК 620.92

**Махотіло Костянтин Володимирович**, канд. техн. наук., старш. наук. співроб., професор

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707-65-45, email: mahotilo@yandex.ua, (ORCID iD: 0000-0001-7081-071X)

**Косатий Дмитро Михайлович**, директор

ТОВ «БУРЕНЕРГО», м. Харків, Україна, пер. Комсомольський, 6, сел. Солоницевка, Харківська обл., Україна, 62304, тел: +38 (0576) 37-34-69

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ХМАРНСТІ  
НА КОЛИВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ**

*Проаналізовано архівні дані про роботу дослідної фотоелектричної системи в м. Харків та досліджено вплив хмарності на продуктивність фотоелектричної системи. Отримано оцінки впливу хмарності на добове вироблення електроенергії та на коливання потужності фотоелектричної системи.*

**Ключові слова:** фотоелектрична система, хмарність, коливання потужності

**Махотило Константин Владимирович**, канд. техн. наук., ст. науч. сотр., профессор

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (057) 707-65-45, email: mahotilo@yandex.ua, (ORCID iD: 0000-0001-7081-071X)

**Косатый Дмитрий Михайлович**, директор

ТОВ «БУРЕНЕРГО», м. Харьков, Украина, пер. Комсомольский, 6, пос. Солоницевка, Харьковская обл., Украина, 62304, тел: +38 (0576) 37-34-69

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОБЛАЧНОСТИ  
НА КОЛЕБАНИЯ МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

*Проанализированы архивные данные о работе исследовательской фотоэлектрической системы в г. Харьков и исследовано влияние облачности на производительность фотоэлектрической системы. Получены оценки влияния облачности на суточную выработку электроэнергии и на колебания мощности фотоэлектрической системы.*

**Ключевые слова:** фотоэлектрическая система, облачность, колебания мощности

**Makhotilo Konstantin**, PhD, SRF, Prof.

National Technical University «Kharkiv Polytechnic University», Kharkiv, Ukraine, Frunze St., 21, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707-65-45, email: mahotilo@yandex.ua, (ORCID iD: 0000-0001-7081-071X)

**Kosatiy Dmytro**, director

BURENERGO Ltd., Kharkiv, Ukraine, Komsomol allay, 6, Solonitsevka village, Kharkiv region, Ukraine, 62304, tel: +38 (0576) 37-34-69

**EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE IMPACT OF CLOUDINESS  
ON PHOTOVOLTAIC SYSTEM POWER FLUCTUATIONS**

*Historical data on research photovoltaic system operation in Kharkiv are analyzed and the impact of cloudiness on the photovoltaic system performance is researched. The estimates of the impact of clouds on the daily power generation and power fluctuations of photovoltaic system are obtained.*

**Keywords:** photovoltaic system, cloudiness, power fluctuations

**Вступ**

Зараз в усьому світі вітроелектрогенератори та фотоелектричні системи (ФЕС) є найбільш швидко зростаючими за кількістю та загальною потужністю джерелами відновлюваної енергії. Собівартість виробництва енергії на них вже сягнула рівня, нижчого ніж на теплових електростанціях [1]. Проте чи не найголовнішим їх недоліком лишається нестабільність генерації під впливом сезонних та метеорологічних факторів. Останні є джерелами коливань потужності тривалістю від кількох діб до кількох хвилин, що негативно впливають на роботу енергосистем. Для ФЕС головним чинником швидких коливань потужності, що розвиваються з темпом в 5–10 хвилин та менше, є хмарність.

В деяких країнах ЄС частка електроенергії, що виробляється на ФЕС, зараз сягає 5–10 %

від загального обсягу електроспоживання, і часті коливання потужності ФЕС в хмарні дні компенсуються маневреними станціями – ТЕС з ГТУ, ГЕС або ГАЕС. Але існуючих їх потужностей вже замало (особливо враховуючи, що інше потужне джерело відновлюваної енергії – ВЕС, також не відрізняється стабільністю генерації). Для планування будівництва маневрених станцій, зокрема найбільш перспективних з них – ГАЕС, потрібні масштабні оцінки коливальності потужності ФЕС в реальних умовах експлуатації.

Ці оцінки потрібні і при проектуванні ФЕС, зокрема при виборі інверторів. Зазвичай при цьому використовують середні за місяць або добу величини інтенсивності сонячного випромінювання. Але такі дані не дають інформації про частоту та величину відхилень від середніх значень. Це призводить до недооцінки максимальної потужності фотоелектричних панелей і, як наслідок, захисних відключень інших компонентів ФЕС. В масштабах енергосистеми це може призводити до втрати до 3 % від потенціалу вироблення енергії на ФЕС [2].

Дані, які збираються існуючими метеостанціями недостатні для досліджень впливу метеоумов на продуктивність ФЕС, тому в країнах, що активно розвивають відновлювану енергетику, формуються нові (зазвичай супутникові) системи метеорологічних спостережень з високою частотою вимірювання і високою щільністю покриття території. Одночасно дослідження впливу змінних метеоумов проводяться на базі самих ФЕС і даних систем моніторингу їх роботи [2].

В даній роботі представлені результати таких досліджень впливу хмарності на роботу експериментальної ФЕС в умовах м. Харкова. Метою роботи є оцінка амплітуди коливань потужності ФЕС в залежності від рівня хмарності.

### **1. Дослідна ФЕС**

Дослідження впливу метеоумов на продуктивність ФЕС проводились на базі дослідної системи, створеної на кафедрі електричних станцій НТУ «ХП» за допомогою ТОВ «Буренерго» (м. Харків) [3]. Це автономна стежача система, до складу якої входять:

- фотоелектрична панель JTM 190/195-72M (монокристалічний кремній, максимальна напруга 37,96 В, максимальний струм 5,27 А);
- система стеження за сонцем SunTracer SM3SPMOG+ (однокоординатна з годинниковим принципом стеження);
- контролер заряду EPsolar LS1024R (номінальна напруга 12/24 В, розрахунковий зарядний струм 10 А);
- акумуляторна батарея LogicPower LP – MG (номінальна напруга 12 В, максимальний струм заряду 4 А);
- освітлювальне навантаження (світлодіодна стрічка, загальна потужність 20 Вт);
- вимірювальний блок (максимальна частота вимірювання напруги та струму 5 с).

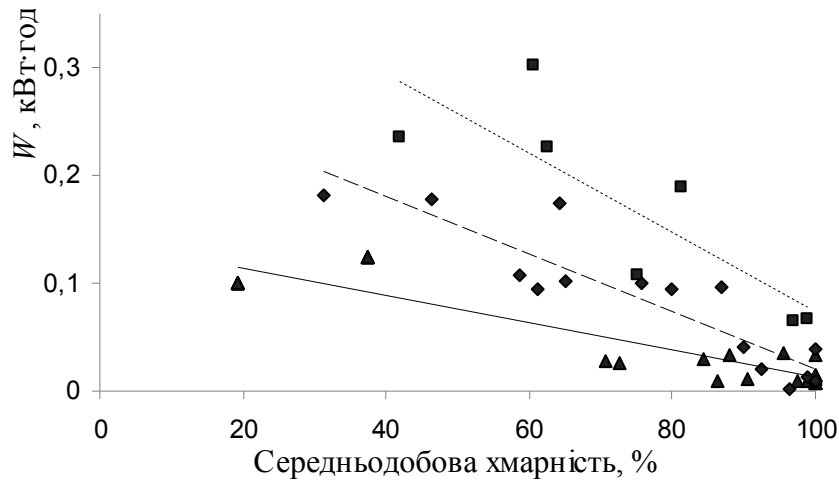
Розрахунки показників виконувались на основі бази даних параметрів роботи дослідної ФЕС за кожні 5 с, а також метеоданих з метеостанції Харків-Аеропорт [4] за кожні 3 год. Для аналізу використані близько 2 млн. записів даних, що відносяться до осені, зими та весни 2013–2014 рр. Ці сезони були обрані для дослідження як найбільш складні для роботи ФЕС.

### **2. Вироблення енергії ФЕС в залежності від хмарності**

Хмарність впливає на кількість сонячної енергії, що сягає панелей ФЕС, і відповідно, на потужність та обсяг вироблення електричної енергії ФЕС. Залежність добового вироблення енергії ФЕС  $W$  від середньої хмарності наведена на рис. 1. Дані розділені в залежності від тривалості світлого часу дня (СЧД).

Як і очікується, головний вплив на продуктивність ФЕС має тривалість СЧД, що пов'язана з кутом підняття Сонця над горизонтом та обсягом сонячного випромінювання. Проте вплив хмарності також є значним. Це пов'язано з особливістю монокристалічних фотоелектричних елементів, спектральна чутливість яких найбільша в діапазоні інфрачервоного випромінювання. Враховуючи, що саме ця складова сонячного випромінювання найбільше фільтрується хмарами, при 100 % хмарності обсяги добового вироблення енергії ФЕС майже однаково малі незалежно від тривалості СЧД. Проте якщо

хмарність не є суцільною, вирішальний вплив має інтенсивність сонячного випромінювання. Так, згідно дослідженням в травні (СЧД  $\approx 14$  год.) навіть при 90 % хмарності вироблення енергії ФЕС більше ніж в січні (СЧД  $\approx 8$  год.) при 10–20 % хмарності.



Тривалість СЧД, год.: ▲ – 8–10; ◆ – 10–12; ■ – 12–14

Рис. 1. Добове вироблення енергії дослідної ФЕС при різній тривалості СЧД та хмарності

### 3. Коливання потужності ФЕС в залежності від хмарності

Теоретично, на широті м. Харків в ясні дні графік інтенсивності сонячного випромінювання, що падає на панель ФЕС з системою стеження, в залежності від часу доби має вигляд як на рис. 2. Відповідним має бути і графік потужності ФЕС, але в реальності він має не такий гладкий характер, а виразно коливальний. Це пов'язано з нестабільністю повітряних мас атмосфери, забрудненістю повітря і головне з рухом хмар.



Рис. 2. Інтенсивність сонячного випромінювання для ФЕС з системою стеження на  $50^\circ$  пн. ш.

Приклади реальних добових графіків потужності дослідної ФЕС  $P$  при різній середній за СЧД хмарності приведено на рис. 3. Як видно, вони сильно коливальні як при низькому, так і при високому рівні хмарності. Тут 0 % середньої хмарності означає, що продовж СЧД або

було ясным, а 100 % середньої хмарності – що продовж СЧД небо було щільно закрито хмарами. Темний час доби при оцінюванні середньої хмарності не враховувався.

Проте графіки містять особливості, пов'язані з характером навантаження дослідної ФЕС. На рис. 3,а можна побачити, що при низькій хмарності після 10:00 характер коливань потужності ФЕС різко змінюється: з'являються провали потужності до нуля, стрибки стають частішими. Це пов'язано з тим, що основним навантаженням дослідної ФЕС є акумуляторна батарея (АКБ), яка накопичує енергію для роботи світлодіодної стрічки вночі.

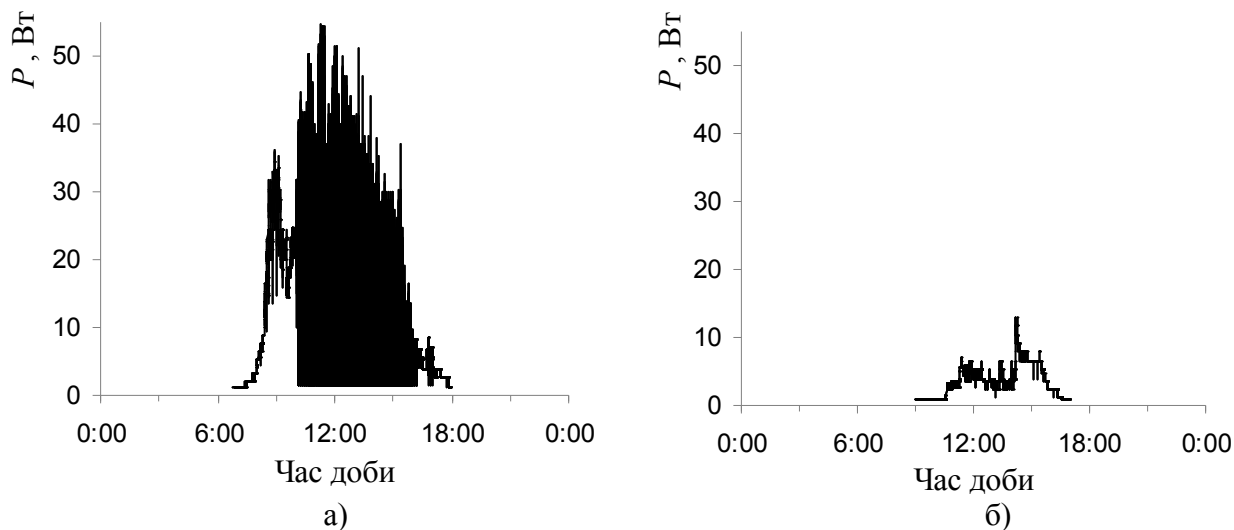


Рис. 3. Потужність дослідної ФЕС при середній хмарності 25 % (а) та 70 % (б)

Контролер заряду АКБ побудовано за принципом широтно-імпульсної модуляції. Коли акумулятори розряджені, контролер заряду використовує всю потужність фотоелектричної панелі для їх заряду. Але коли по мірі заряду напруга на АКБ сягає певного рівня, контролер заряду переходить у імпульсний режим роботи, періодично відмикаючи панель від акумуляторів. Чим повніший заряд АКБ, тим коротші стають періоди підключення до панелі. Це створює коливання потужності ФЕС, які не слід приймати до уваги в даному дослідженні впливу зовнішніх чинників. В хмарні дні, коли потужності ФЕС ледь вистачає для заряджання акумуляторів (див рис. 3 б) контролер заряду не обмежує потужність ФЕС і не впливає на форму графіка навантаження.

Тому, щоб дослідити вплив хмарності на коливання моментальної потужності ФЕС, в роботі проаналізовані дані лише про періоди, коли заряд акумуляторів відбувається безперервно, тобто при роботі ФЕС з постійним навантаженням. Для отримання більш повних та точних оцінок в подальшому планується замінити змінне навантаження у вигляді контролера заряду і АКБ на постійне резистивне навантаження, здатне спожити всю енергію, яку виробляє ФЕС.

Для оцінки коливань потужності ФЕС в роботі запропоновано використовувати такий показник як приведені до середньої потужності стандартне відхилення різниці між моментальною потужністю ФЕС та її ковзним середнім:

$$\sigma^* = \frac{\sigma_{\Delta P}}{P_{СВЗ}} 100\%; \quad (1)$$

$$\Delta P = P - P_{КС}, \quad (2)$$

де  $\sigma^*$  – приведені стандартне відхилення, %;

$\sigma_{\Delta P}$  – стандартне відхилення  $\Delta P$ ;

$P_{СВЗ}$  – середнє значення потужності за період безперервного заряду АКБ.

$\Delta P$  – різниця між моментальною потужністю ФЕС та ковзним середнім;

$P$  – моментальна потужність ФЕС;

$P_{\text{КС}}$  – ковзне середнє значення потужності ФЕС.

Чим вище значення  $\sigma^*$ , тим більший розмах швидких коливань потужності ФЕС відносно середнього значення. При  $\sigma^* = 0$  графік потужності є монотонним та лінійним на інтервалі усереднення. Експериментальним шляхом для розрахунку  $P_{\text{КС}}$  було підібрано інтервал усереднення в 20 хв., відцентрований відносно поточного часу, тобто  $\pm 10$  хв. від моменту вимірювання потужності  $P$ . Враховуючи частоту вимірювання показників ФЕС, усереднення здійснювалось по 240 значенням потужності.

На рис. 4 представлені розраховані по експериментальним даним роботи ФЕС за весь період досліджень величини приведенного стандартного відхилення  $\sigma^*$  в залежності від середньої хмарності за СЧД, а також оцінки верхньої та нижньої меж діапазону значень. Як видно, коливання потужності присутні навіть при мінімальній хмарності, значення  $\sigma^*$  при цьому лежать в діапазоні 0–5 %. Із ростом хмарності збільшуються і коливання потужності. Максимальні коливання спостерігаються при середній хмарності 70–80 %, значення  $\sigma^*$  при цьому лежать в діапазоні 10–60 %. Далі, з ростом хмарності, як і слід очікувати, коливання йдуть на спад одночасно зі зменшенням добового вироблення енергії. При хмарності 100 % значення  $\sigma^*$  лежать в діапазоні 0–40 %.

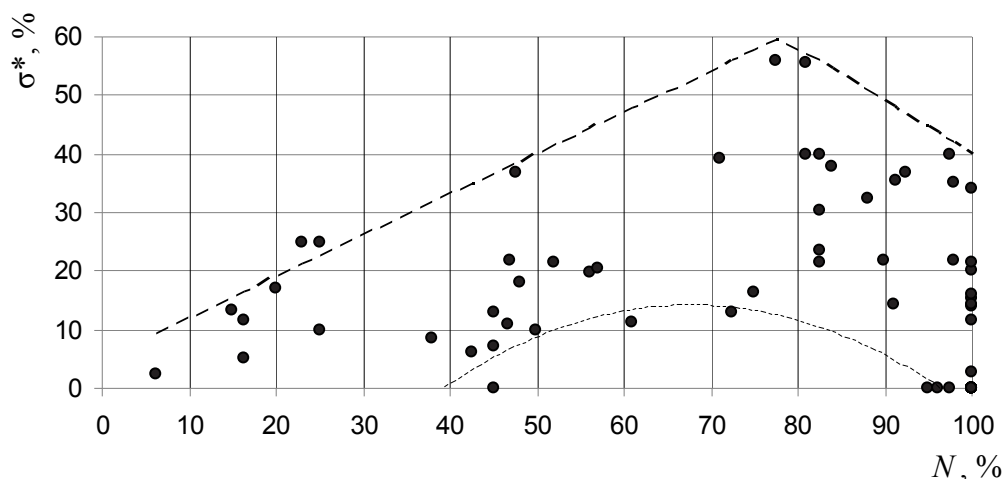


Рис. 4. Залежність коливань потужності ФЕС від середньої хмарності

Такий широкий діапазон можливих значень  $\sigma^*$  пояснюється тим, що традиційний метеорологічний показник «хмарність» не враховує щільність хмар та їх тип (перісті, шаруваті і т.д). Наприклад, при 100 % хмарності можлива ситуація, коли хмари не щільні і пропускають якусь частку прямого світла, а також ситуація, коли хмари суцільні і пропускають лише розсіяне світло. Враховуючи, що монокристалічні кремнієві фотоелементи ефективні лише при прямому світлі, потужність ФЕС в цих ситуаціях буде суттєво відрізнятись.

За результатами аналізу можна зробити висновки, що при будь-якій тривалості СЧД найбільші коливання потужності відбуваються при хмарності 70–80 %, а найменші – при хмарності 0–15 %. Щоб оцінити наскільки частими є такі рівні хмарності, були проаналізовані метеодані по м. Харкову за останні 3 роки.

На рис. 5 приведено відносну частку  $\nu$  днів з низькою та високою хмарністю для різних сезонів року:

$$\nu = \frac{n_{\text{хм}}(C)}{n_{\text{сез}}} 100 \% , \quad (3)$$



де  $n_{\text{хм}}$  – кількість днів з певною хмарністю в сезоні;

$n_{\text{сез}}$  – тривалість сезону;

$C$  – середня хмарність за СЧД, %.

Як видно, в м. Харкові частка днів з найменшим і найбільшим коливанням потужності ФЕС в різні сезони не перевищує 8–13 %, тобто вони не є домінуючими. Проте вона достатня, щоб створювати перешкоди сталій роботі енергосистеми.

Частка днів з хмарністю 70–80 % за рік складає близько 10 %, і найбільша їх кількість припадає на літо та осінь. Влітку, при високій інтенсивності сонячного випромінювання, амплітуда коливань потужності ФЕС через хмарність буде найбільшою. В інші сезони року, зі зниженням інтенсивності випромінювання, буде знижуватись добове вироблення енергії і амплітуда коливань потужності, але нестабільність роботи ФЕС все ж буде відчутно впливати на енергосистему.

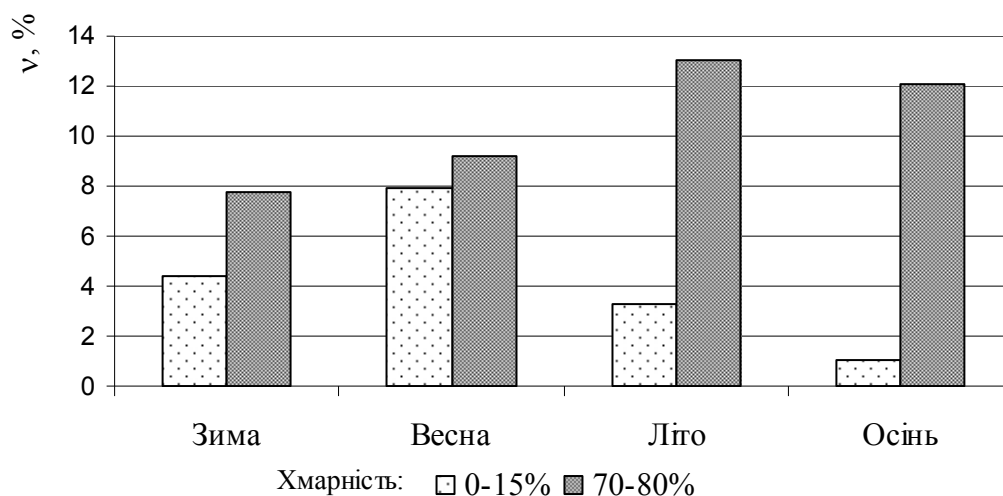


Рис. 5. Частка днів сезону з різною середньою хмарністю

Частка днів з низькою хмарністю складає близько 4 % на рік, найбільша їх кількість припадає на весну та зиму. І хоча згідно рис. 4 відносна амплітуда коливань потужності в такі дні невисока, тим не менш навесні вона може бути значною в абсолютному виразі. Це пояснюється тим, що навесні рівень інтенсивності сонячного випромінювання хоча і менший ніж влітку, але вже достатньо високий. В той же час температура повітря і, відповідно, температура фотоелектричних панелей набагато менші ніж влітку. Завдяки цьому навесні в ясні дні ККД ФЕС вищий, і її потужність може бути такою самою, або навіть більшою ніж влітку.

### Висновки

Аналіз даних про роботу дослідної ФЕС в м. Харків показав, що найбільші коливання її потужності у будь-яку пору року спостерігаються при хмарності 70–80 %. Отримані оцінки коливань потужності ФЕС при різній хмарності можуть бути використані при проектуванні ФЕС та їх підключенні до енергосистеми. Але через те, що на ефективність ФЕС впливають особливості місцевого рельєфу та клімату, такі дослідження мають проводитись для кожного конкретного регіону розміщення. Для більш точного оцінювання впливу хмарності, яке могло би бути покладено в основу планування роботи енергосистеми, необхідно провадити спеціалізовані, більш детальні метеорологічні спостереження і прогнози метеоумов.

Дослідження впливу метеоумов на потужність ФЕС є важливою складовою пошуку шляхів ефективного використання сонячної енергії в діючих енергосистемах та створення нових енергосистем, орієнтованих на відновлювані джерела. Ця задача стоїть і перед енергетикою України, яка вже почала стрімко нарощувати частку відновлюваних джерел енергії, маючи мінімальний запас маневрених потужностей.

**Список використаної літератури:**

1. Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis. September 2014 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.lazard.com/PDF/Levelized Cost of Energy --Version 8.0.pdf>
2. Косатый Д. М., Кудрявцев И. Н., Махотило К. В. Фотоэлектрические системы. Учебное пособие. Х.: НТМТ, – 2014. – 399 с.
3. Лабораторії. Кафедра електричних станцій НТУ «ХПІ» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.kpi.kharkiv.edu/es/index.php/LaboratorU>.
4. Харьков (аэропорт) – Rp5.ua [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [rp5.ru/Погода\\_в\\_Харькове\\_\(аэропорт\)](http://rp5.ru/Погода_в_Харькове_(аэропорт)).

**References:**

1. Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis. September 2014, available at: <http://www.lazard.com/PDF/Levelized Cost of Energy - Version 8.0.pdf>
2. Kosatyy D. M., Kudriavtsev I. N., Makhotilo K. V. (2014) Photovoltaic systems. Tutorial [Fotoelektricheskie sistemy. Uchebnoe posobie], NTMT, Kharkiv, 399 p.
3. Laboratory. Department of Electrical stations NTU "KhPI" [Laboratorii. Kafedra elektrychnykh stantsii NTU "KhPI"], available at: <http://www.kpi.kharkiv.edu/es/index.php/LaboratorU>.
4. Kharkiv (Airport) – Rp5.ua [Kharkov (aeroport) – Rp5.ua], available at: [rp5.ru/Погода\\_в\\_Харькове\\_\(аэропорт\)](http://rp5.ru/Погода_в_Харькове_(аэропорт)).

Поступила в редакцию 25.10 2014 г.