



УДК 621.315.592;621.3.049.77;004.93'1

Академік НАН України **Б. Є. Патон, М. І. Клюй,**
О. Є. Коротинський, А. В. Макаров, Ю. О. Трубіцин, В. О. Ганус

Результати натурних вимірювань інтенсивності сонячного випромінювання в м. Київ

Наведено результати вимірювань інтенсивності сонячного випромінювання, одержані протягом 2009–2010 рр. у м. Київ. Методика дозволяє отримати інформацію для прогнозування технічних характеристик автономних фотоелектричних сонячних електростанцій для тих регіонів, де проводяться вимірювання.

Серед альтернативних джерел енергії одними з найбільш перспективних є напівпровідникові фотоелектричні перетворювачі (ФП), за допомогою яких здійснюється пряме перетворення променевої енергії сонячного випромінювання в електричну енергію. Надходження сонячної енергії на поверхню Землі визначається річною та добовою періодичністю і залежить від географічної широти місцевості. Важливу роль при цьому відіграє прозорість атмосфери, адже максимальна кількість сонячної енергії надходить на Землю саме в тих регіонах, де мінімальна хмарність [1].

Для того щоб ухвалити рішення щодо доцільності будівництва автономної фотоелектричної сонячної електричної станції (ФСЕС) і оцінити її техніко-економічну ефективність, необхідно знати, яка кількість сонячної енергії надходить на поверхню Землі в даній місцевості [2]. Спостереження за надходженням сонячної енергії в різних районах нашої планети ведуться давно й уже зібрано досить багато інформації про кількість сонячної енергії, що надходить протягом року, сезонів, місяців, що дозволяє зробити розрахунки середньої кількості електроенергії, що може виробити ФСЕС протягом цих проміжків часу [3–4].

Однією з основних проблем, які необхідно вирішувати при проектуванні автономної ФСЕС, є забезпечення безперебійної подачі електроенергії споживачам. Інтервали часу, протягом яких сонячна енергія може бути відсутньою повністю або її рівень недостатній внаслідок поганої погоди, можуть становити від кількох днів до кількох тижнів. В цих умовах кількість електроенергії, що може одержати споживач, і безперебійність її надходження повністю залежать від запасу накопиченої енергії в акумуляторній батареї (АБ) протягом відрізка часу, коли енергія може накопичуватися. В свою чергу, кількість енергії в АБ, що може бути накопичена протягом певного часу, залежить від ємності АБ, пікової потужності сонячної батареї (СБ) і, природно, від кількості сонячної енергії, яка надходить протягом

© Б. Є. Патон, М. І. Клюй, О. Є. Коротинський, А. В. Макаров, Ю. О. Трубіцин, В. О. Ганус, 2014

розглянутого проміжку часу [5]. З огляду на забезпечення безперебійної подачі електроенергії споживачам протягом певного інтервалу часу, що може становити кілька місяців або кілька сезонів у році, без застосування додаткових джерел електроенергії, а також вибору й обґрунтування величин пікової потужності СБ і ємності АБ, які необхідні для забезпечення цього часу, важливе значення має інформація не про середні значення потоку сонячної енергії протягом значних відрізків часу (місяць, рік), а більш детальна інформація протягом кожної доби. Ця інформація дозволяє визначити тривалість проміжків часу, протягом яких може відбуватися накопичення енергії, а також тривалість проміжків часу, протягом яких надходження енергії є недостатнім. Спираючись на ці дані можна більш об'єктивно зробити вибір і обґрунтування значень пікової потужності СБ і ємності АБ, визначити граничні значення цих параметрів, при яких забезпечується прийнятна техніко-економічна ефективність автономної ФСЕС.

Основні положення методики. Для одержання детальнішої інформації про розподіл сонячної енергії в часовому просторі авторами були проведені вимірювання інтенсивності потоку сонячної енергії протягом року в м. Київ в період з 01.06.2009 по 31.05.2010 відповідно до методики, що базується на відомій залежності величини струму короткого замикання ($I_{кз}$) СБ від інтенсивності потоку сонячної енергії, що потрапляє на її поверхню.

Як датчик інтенсивності потоку сонячної енергії використовувалася СБ на основі кремнієвих фотоелектричних перетворювачів (ФП) сонячної енергії (далі — вимірювальна СБ), що постійно була орієнтована перпендикулярно напрямку на Сонце (по максимуму $I_{кз}$).

Взаємозв'язок $I_{кз}$ СБ і інтенсивності потоку сонячної енергії, що потрапляє на її поверхню, з достатнім ступенем вірогідності є прямопропорційним і, з врахуванням флуктуацій величини потоку сонячної енергії, наводиться у вигляді:

$$\frac{I_{кз\text{сер}\Delta T}}{I_{кз\text{AM}1,5}} = \frac{P_{\text{СЕсер}\Delta T}}{P_{\text{СЕAM}1,5}} = K_{\Delta T}, \quad (1)$$

де $I_{кз\text{сер}\Delta T}$ — середнє значення величини струму короткого замикання вимірювальної СБ за час ΔT , отримане шляхом вимірів; $I_{кз\text{AM}1,5}$ — паспортне значення величини струму короткого замикання вимірювальної СБ, що відповідає стандартним умовам для місцевості, де проводяться виміри; $P_{\text{СЕсер}\Delta T}$ — середнє значення величини енергетичної освітленості поверхні площею 1 м^2 за час ΔT , створюваної сонячним випромінюванням; $P_{\text{СЕAM}1,5}$ — величина енергетичної освітленості, створюваної сонячним випромінюванням, що відповідає стандартним умовам для місцевості, де проводяться виміри ($\text{AM}1,5$ — 1000 Вт/м^2); $K_{\Delta T}$ — безрозмірний коефіцієнт, пропорційний середній величині енергетичної освітленості поверхні вимірювальної СБ, створюваною сонячною енергією протягом часу ΔT .

Для отримання даних про добовий розподіл сонячної енергії світловий день розбивався на 14 відрізків ΔT , що дорівнювали одній годині. Протягом кожної години реєструвалося середнє значення $I_{кз}$. У процесі вимірювання $I_{кз}$ робилася корекція величини $I_{кз}$ із врахуванням змін температури СБ, а також забезпечувалися умови вимірів, при яких “паразитні” (відбиті від місцевих предметів) потоки сонячної енергії не потрапляли б на поверхню СБ.

Методика обробки результатів вимірювань. Відповідно до (1) проводились розрахунки $K_{\Delta T}$ для кожного інтервалу часу ΔT . Цей коефіцієнт, по суті, є коефіцієнтом відносної інтенсивності сонячного випромінювання (ВІСВ) і показує, у скільки разів середня кількість сонячної енергії протягом часу ΔT відрізнялася від відповідної величини в стандартних для конкретної місцевості умовах. З (1) випливає, що середнє значення енер-

гетичної освітленості поверхні площею 1 м^2 за час ΔT , створюване сонячним випромінюванням, визначається співвідношенням

$$P_{\text{СЕ сер}\Delta T} = K_{\Delta T} P_{\text{СЕ АМ 1,5}}. \quad (2)$$

Кількість надходження сонячної енергії на 1 м^2 площі за час ΔT дорівнює:

$$E_{\text{СЕ сер}\Delta T \cdot \text{кв.м}} = P_{\text{СЕ сер}\Delta T} \Delta T. \quad (3)$$

З врахуванням (2)

$$E_{\text{СЕ сер}\Delta T \cdot \text{кв.м}} = P_{\text{СЕ АМ 1,5}} K_{\Delta T} \Delta T. \quad (4)$$

Сумарна кількість сонячної енергії, що надходить за добу (світловий день), дорівнює сумі величин енергій, що надходять протягом кожного відрізка часу ΔT на поверхню площею 1 м^2

$$\begin{aligned} E_{\text{СЕ Д}\cdot\text{кв.м}} &= K_{1\Delta T} P_{\text{СЕ АМ 1,5}} \Delta T + K_{2\Delta T} P_{\text{СЕ АМ 1,5}} \Delta T + \dots + K_{n\Delta T} P_{\text{СЕ АМ 1,5}} \Delta T = \\ &= P_{\text{СЕ АМ 1,5}} \Delta T \sum_{i=1}^n K_{i\Delta T}, \end{aligned} \quad (5)$$

де $E_{\text{СЕ Д}\cdot\text{кв.м}}$ — сумарна кількість сонячної енергії, що надходить за добу на поверхню площею 1 м^2 ; n — кількість часових інтервалів, на які розбивався світловий день ($n = 14$).

В (5) сума $\sum_{i=1}^n K_{i\Delta T}$ являє собою коефіцієнт, що необхідно розраховувати для кожного світлового дня в процесі обробки масиву коефіцієнтів $K_{\Delta T}$. Цей коефіцієнт можна позначити як $G_{\text{Д}}$, тоді

$$G_{\text{Д}} = \sum_{i=1}^n K_{i\Delta T}. \quad (6)$$

Коефіцієнт $G_{\text{Д}}$ є інтегральним коефіцієнтом інтенсивності сонячного випромінювання (ІКІСВ) протягом відрізка часу, що дорівнює добі. Цей коефіцієнт є безрозмірним. Він пропорційний сумарному надходженню сонячної енергії протягом доби. За аналогією з $G_{\text{Д}}$ визначається ІКІСВ протягом місяця — $G_{\text{М}}$ і протягом року — $G_{\text{Р}}$

$$G_{\text{М}} = \sum_{i=1}^N G_{i\text{Д}}, \quad (7)$$

де N — кількість днів у місяці,

$$G_{\text{Р}} = \sum_{i=1}^m G_{i\text{М}}, \quad (8)$$

m — кількість місяців у році.

З урахуванням (6)–(8) сумарна кількість сонячної енергії, що надходить на 1 м^2 поверхні протягом доби, місяця, року, визначається, відповідно, співвідношеннями:

$$E_{\text{СЕ Д}\cdot\text{кв.м}} = P_{\text{СЕ АМ 1,5}} \Delta T G_{\text{Д}}, \quad (9)$$

$$E_{\text{СЕМ-кв.м}} = P_{\text{СЕАМ1,5}} \Delta T G_M, \quad (10)$$

$$E_{\text{СЕР-кв.м}} = P_{\text{СЕАМ1,5}} \Delta T G_P. \quad (11)$$

Як ми вже відзначали, автори розбивали світловий день на 14 інтервалів часу ΔT , що дорівнюють 1 год. З (9)–(11) видно, що коли ΔT дорівнює 1 год, кількість сонячної енергії чисельно дорівнюватиме добутку тільки двох співмножників ($\Delta T = 1$), при цьому кількість енергії на 1 м^2 буде виражатися в тих самих одиницях, що й $P_{\text{СЕАМ1,5}}$ (якщо $P_{\text{СЕАМ1,5}}$ у кВт/м^2 , то величина сонячної енергії буде виражатися у $\text{кВт} \cdot \text{год/м}^2$). За допомогою коефіцієнтів G_D , G_M і G_P можна підрахувати також кількість електричної енергії, яку може виробляти реальна СБ. Сумарна кількість електроенергії, яку може виробляти реальна СБ площею 1 м^2 протягом доби, дорівнює:

$$E_{\text{СБД-кв.м}} = E_{\text{СЕД-кв.м}} \eta_{\text{СБ}}, \quad (12)$$

де $\eta_{\text{СБ}}$ — коефіцієнт корисної дії (к. к. д.) реальної СБ.

Більш зручно при розрахунку електричної енергії, що може виробити реальна СБ, оперувати не формулою (12), за якою розраховується кількість електроенергії, що виробляє 1 м^2 СБ, а потужністю СБ. З врахуванням (9), а також площі реальної СБ

$$E_{\text{СБД}} = P_{\text{СЕАМ1,5}} S_{\text{СБ}} \Delta T G_D \eta_{\text{СБ}}, \quad (13)$$

де $E_{\text{СБД}}$ — кількість електричної енергії, що виробляє реальна СБ протягом доби; $S_{\text{СБ}}$ — площа реальної СБ.

Добуток $P_{\text{СЕАМ1,5}} S_{\text{СБ}} \eta_{\text{СБ}}$ являє собою потужність реальної СБ в умовах АМ1,5, що називається піковою потужністю СБ — $P_{\text{пiкСБ}}$, тоді:

$$E_{\text{СБД}} = P_{\text{пiкСБ}} \Delta T G_D. \quad (14)$$

Аналогічно розраховується сумарна кількість електроенергії, що може виробити реальна СБ протягом місяця й року відповідно:

$$E_{\text{СБМ}} = P_{\text{пiкСБ}} \Delta T G_M, \quad (15)$$

$$E_{\text{СБР}} = P_{\text{пiкСБ}} \Delta T G_P. \quad (16)$$

Так, як і при розрахунках кількості сонячної енергії за (9)–(11), при розрахунках кількості електроенергії, що може виробити реальна СБ, за формулами (14)–(16) для випадку $\Delta T = 1$ год, кількість електроенергії чисельно дорівнює добутку двох співмножників. Кількість виробленої СБ електроенергії буде виражатися в тих же одиницях, що й $P_{\text{пiкСБ}}$ (якщо $P_{\text{пiкСБ}}$ у кВт , то $E_{\text{СБ}}$ у $\text{кВт} \cdot \text{ч}$ і т.п.).

З розглянутих формул (9)–(11) і (14)–(16) видно, що коефіцієнти G_D , G_M і G_P зручно застосовувати для відображення інформації про інтенсивність сонячного випромінювання. За допомогою цих коефіцієнтів за формулами (9)–(11) можна обчислити надходження сонячної енергії протягом доби, місяця, року відповідно, а за формулами (14)–(16) розрахувати кількість електроенергії, що може виробити реальна СБ заданої пікової потужності в ці відрізки часу при безперервному стеженні за Сонцем.

Результати вимірів інтенсивності сонячного випромінювання в період з 01.06.2009 по 31.05.2010 у м. Київ. Результати вимірів наведено у вигляді безрозмірних коефіцієнтів G_D , G_M і G_P . На рис. 1, 2 зображені графіки значень коефіцієнтів

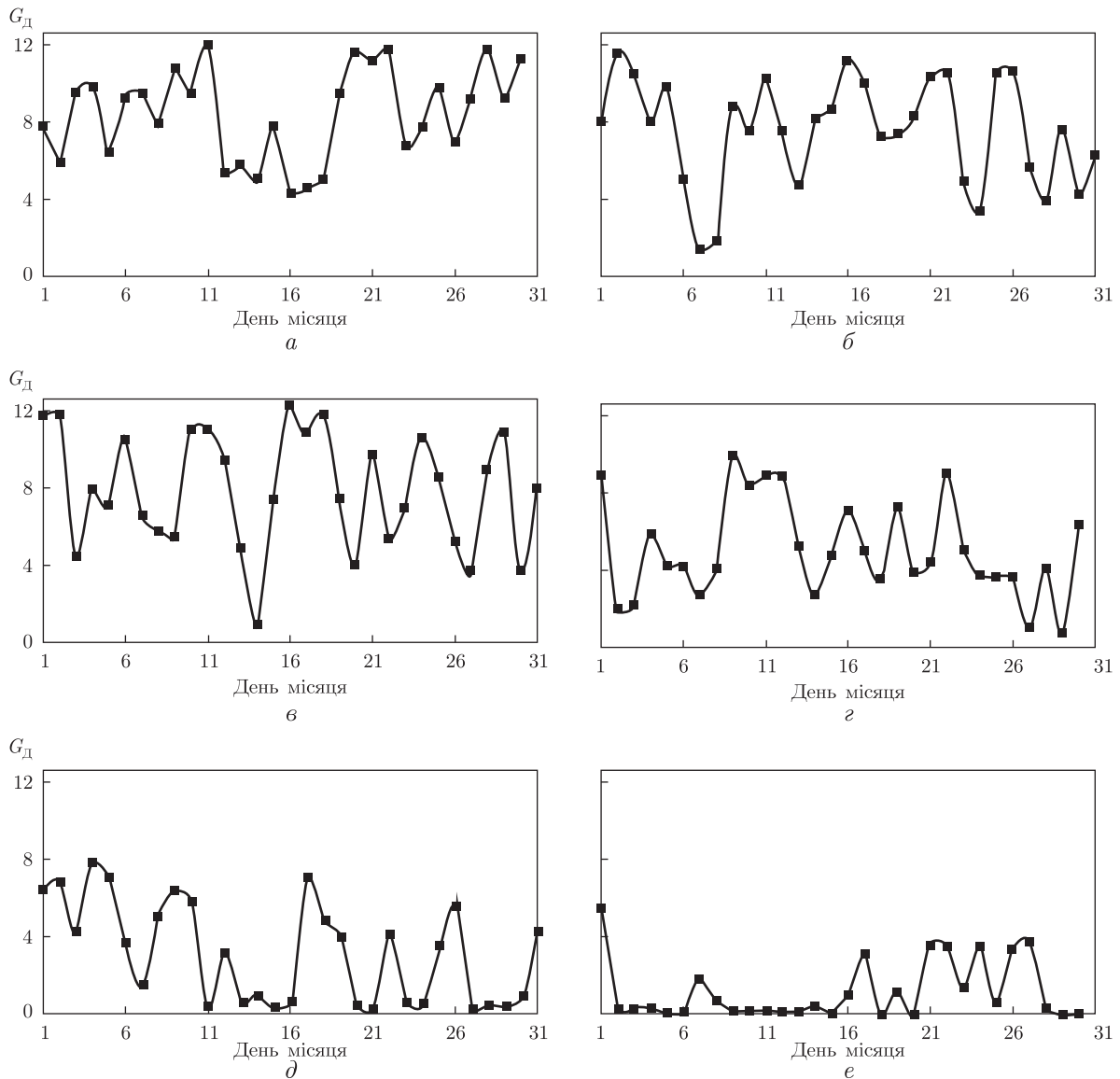


Рис. 1. Значення коефіцієнтів G_d для місяців в період з 01.06.2009 по 30.11.2009 у м. Київ (а — червень; б — липень; в — серпень; г — вересень; е — листопад)

G_d для кожного місяця в період з 01.06.2009 по 31.05.2010, отриманих в результаті обробки даних вимірів $I_{кз}$ вимірювальної СБ і розрахунків коефіцієнтів $K_{\Delta T_i}$ для умов AM1,5 (1000 Вт/м^2) відповідно до описаної методики.

На рис. 3 наведений графік значень коефіцієнтів G_M для кожного місяця протягом інтервалу часу, що дорівнює один рік. Значення коефіцієнта G_R , що пропорційне сумарній кількості сонячної енергії протягом року, становить величину близько 1558. За формулами (9)–(11) розраховується величина надходження сонячної енергії протягом доби, місяця, року, при цьому кількість енергії на 1 м^2 буде вимірюватися в тих самих одиницях, що й $P_{CEAM1,5}$ (для $P_{CEAM1,5}$ 1 кВт/м^2 кількість сонячної енергії протягом доби, місяця, року буде у $\text{кВт} \cdot \text{год/м}^2$). За допомогою коефіцієнтів G_d , G_M , G_R , використовуючи фор-

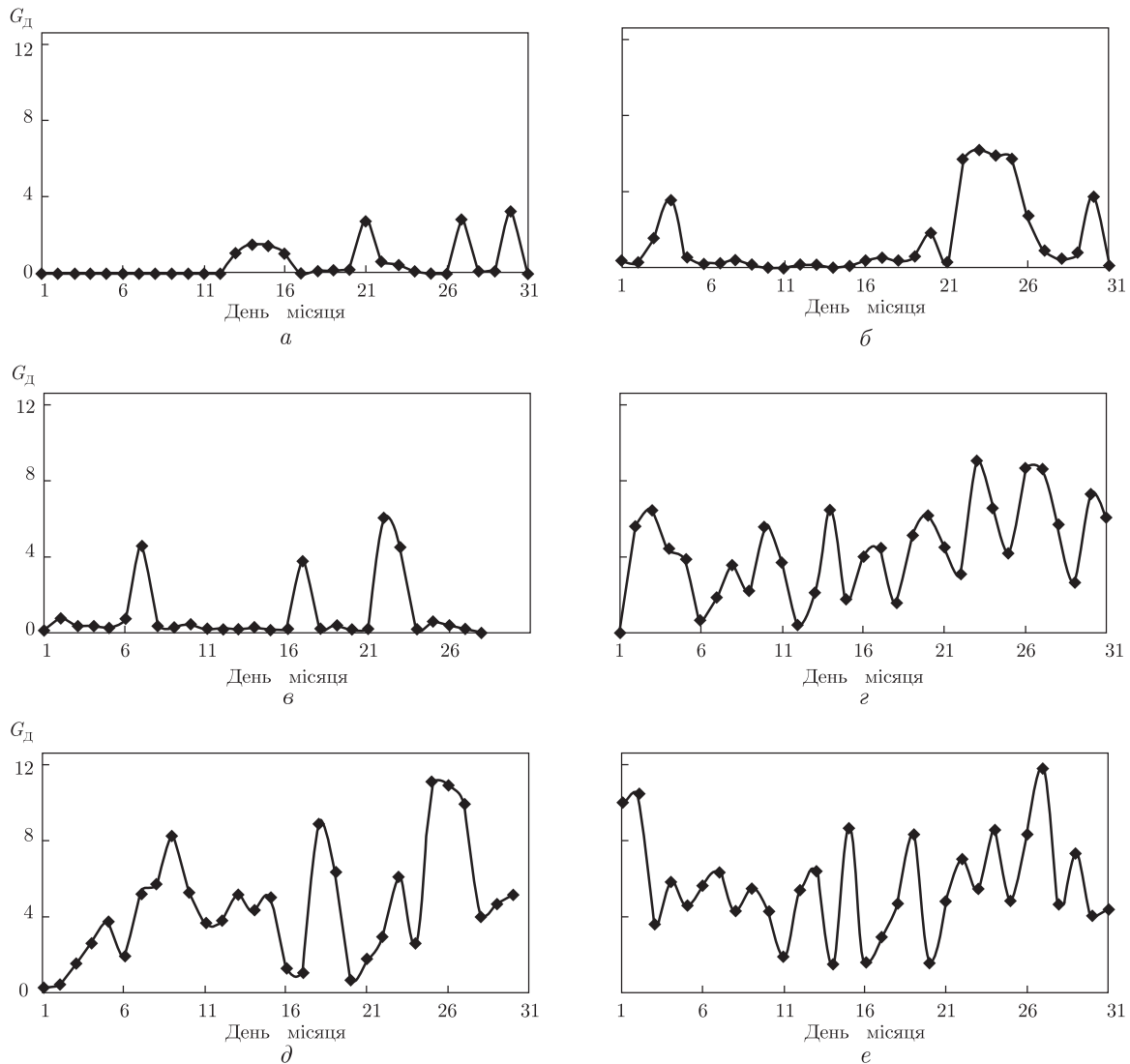


Рис. 2. Значення коефіцієнтів G_d для місяців в період з 01.12.2009 по 31.05.2010 у м. Київ (а — грудень; б — січень; в — лютий; г — березень; д — квітень; е — травень)

мули (14)–(16), можна підрахувати кількість електричної енергії, яка може бути вироблена реальною СБ заданої пікової потужності протягом дня, місяця або року, відповідно, при безперервному стеженні за Сонцем.

Так, наприклад, якщо потрібно визначити величину надходження сонячної енергії на одиницю площі поверхні протягом будь-якої доби, наприклад, 11 червня 2009 р., то, згідно з формулою (9), отримуємо таке значення:

$$E_{\text{СЕД-кв.м}} = 1000 \text{ Вт/м}^2 \cdot 1 \text{ год} \cdot 12 = 12000 \text{ Вт} \cdot \text{год/м}^2 \text{ або } 12 \text{ кВт} \cdot \text{год/м}^2.$$

Для визначення сумарної кількості сонячної енергії, що надходить на одиницю площі поверхні протягом будь-якого місяця, наприклад, червня 2009 р., необхідно скористатися формулою (10):

$$E_{\text{СЕМ-кв.м}} = 1000 \text{ Вт/м}^2 \cdot 1 \text{ год} \cdot 254 = 254000 \text{ Вт} \cdot \text{год/м}^2 \text{ або } 254 \text{ кВт} \cdot \text{год/м}^2.$$

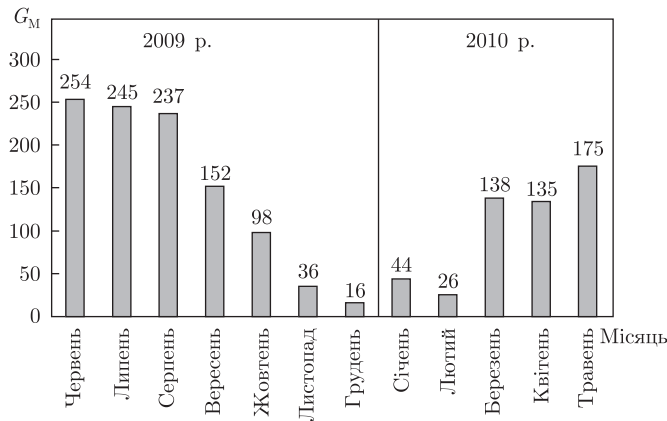


Рис. 3. Значення коефіцієнта G_M у період з 01.06.2009 по 31.05.2010 для м. Київ

Кількість сонячної енергії, що надходить на одиницю площі поверхні за цілий рік, розраховується за формулою (11) і становитиме:

$$E_{\text{СЕР-КВ.М}} = 1 \text{ кВт/м}^2 \cdot 1 \text{ год} \cdot 1558 = 1558 \text{ кВт} \cdot \text{год/м}^2 \text{ або } 1,558 \text{ МВт} \cdot \text{год/м}^2.$$

Отже, за період з 01.06.2009 по 31.05.2010 у м. Київ й прилеглих районах при умовах АМ1,5 на 1 м^2 площі поверхні надійшло $1,558 \text{ МВт} \cdot \text{год}$ сонячної енергії.

Таким чином, якщо є, наприклад, СБ з піковою потужністю 100 Вт , то, відповідно до формули (14), наприклад для 11 червня 2009 р., ми одержимо таку кількість електроенергії:

$$E_{\text{СБД}} = 100 \text{ Вт} \cdot 1 \text{ год} \cdot 12 = 1200 \text{ Вт} \cdot \text{год} \text{ або } 1,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Для того щоб визначити кількість електричної енергії, що могла б виробити в м. Київ СБ з піковою потужністю 100 Вт протягом місяця, наприклад, за червень 2009 р., необхідно скористатися формулою (15), тоді:

$$E_{\text{СБМ}} = 100 \text{ Вт} \cdot 1 \text{ год} \cdot 254 = 25400 \text{ Вт} \cdot \text{год} \text{ або } 25,4 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Кількість електроенергії, що виробить СБ протягом року, обчислюється за формулою (16) і, наприклад, для СБ з піковою потужністю 100 Вт вона становитиме:

$$E_{\text{СБР}} = 100 \text{ Вт} \cdot 1 \text{ год} \cdot 1558 = 155800 \text{ Вт} \cdot \text{год} \text{ або } 155,8 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Отже, за період з 01.06.2009 по 31.05.2010 у м. Київ та прилеглих районах дана СБ потужністю 100 Вт могла б виробити порядку $155,8 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Наведені вище графіки значень коефіцієнтів G_D і G_M , а також значення коефіцієнта G_P повною мірою характеризують розподіл сонячної енергії в м. Київ у період з 01.06.2009 р. по 31.05.2010 р.

Очевидно, що значення цих коефіцієнтів, розраховані на основі даних, отриманих шляхом вимірювання у конкретний день, місяць, рік, не можуть повторитися в точності в наступні роки. В той же час інформація про розподіл сонячної енергії тільки за один рік дозволяє більш точно і обґрунтовано робити розрахунок та вибір основних параметрів автономних ФЕСС, розташованих на території Київської області і прилеглих областей, з урахуванням забезпечення безперебійної подачі електроенергії споживачам.

Таким чином, проведено натурні вимірювання інтенсивності сонячного випромінювання з 01.06.2009 р. по 31.05.2010 р. у м. Київ та представлено детальну інформацію (протягом кожної доби) про кількість сонячної енергії.

Розроблено алгоритм обробки результатів вимірювання інтенсивності сонячної енергії, завдяки якому можна наводити дані про інтенсивність сонячного випромінювання у відрізки часу, що дорівнюють добі, місяцю і року, у вигляді безрозмірних коефіцієнтів, використання яких для відображення цієї інформації є більш універсальним, оскільки дозволяє отримати дані як про кількість сонячної енергії, яка надходить протягом обраних проміжків часу, так і спростити розрахунки кількості електроенергії, що може виробити реальна СБ із заданою піковою потужністю протягом цих проміжків часу.

1. *Мировая энергетика: состояние, проблемы, перспективы* / Под ред. В. В. Бушуева. – Москва: Энергия, 2007. – 664 с.
2. Патон Б. Є., Клюй М. І., Макаров А. В., Коротинський О. Є., Трубицын Ю. О. Умови ефективного застосування сонячних електроенергетичних систем // Вісн. НАН України. – 2012. – № 3. – С. 48–59.
3. Оксанич А. П., Тербан В. А., Волохов С. О., Клюй М. І. та ін. Сучасні технології виробництва кремнію та кремнієвих фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії. – Кривий Ріг: Мінерал, 2010. – 267 с.
4. Акулинин А., Смыков В. Оценка возможностей солнечной энергетики на основе точных наземных измерений солнечной радиации // Пробл. региональной энергетики. – 2008. – № 1(6). – С. 29–36.
5. Возняк О. Т., Янів М. Є. Сонячно-енергетичні ресурси України // http://www.siriusone.net/index.php?action=page&page_id=136.

*Институт электросваривания
им. С. О. Патона НАН Украины, Київ
Институт физики полупроводников
им. В. С. Лашкарьова НАН Украины, Київ*

Надійшло до редакції 19.03.2014

**Академик НАН Украины Б. Е. Патон, Н. И. Клюй, А. Е. Коротынский,
А. В. Макаров, Ю. А. Трубицын, В. А. Ганус**

Результаты натурных измерений интенсивности солнечного излучения в г. Киев

Представлены результаты измерений интенсивности солнечного излучения, проведенные в период 2009–2010 гг. в г. Киев. Методика позволяет получить информацию для прогнозирования технических характеристик автономных фотоэлектрических солнечных электростанций для тех регионов, где проводятся измерения.

**Academician of the NAS of Ukraine B. E. Paton, M. I. Klyui, O. E. Korotynsky,
A. V. Makarov, Yu. O. Trubitsyn, V. O. Ganus**

The results of field measurements of the solar radiation intensity in Kiev

The data of solar radiation intensity measurements during 2009–2010 in the Kiev city are presented. The methodology allows one to obtain the information for forecasting the specifications of autonomous photovoltaic solar power plants for the regions, where the measurements are carried out.