

УДК 621.316

О.С. Ярмолук, П.О. Замковий

**РОЗРАХУНОК ВИХІДНОЇ ПОТУЖНОСТІ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ З УРАХУВАННЯМ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ІНФОРМАЦІЇ**

*Ефективне функціонування сучасних електричних мереж неможливо без якісного та надійного інформаційного забезпечення. У роботі запропоновано підхід, що дозволяє оптимальним чином використовувати всю наявну різноманітну інформацію з метою формування узагальнених оцінок характеристик сонячних панелей. Для реалізації поставленої задачі використовуються елементи математичного апарату теорії нечітких множин.*

*Ключові слова: функція належності, невизначеність інформації, нечіткі оцінки вихідної потужності.*

Е.С. Ярмолук, П.А. Замковой

**РАСЧЕТ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ**

*Эффективное функционирование современных электрических сетей невозможно без качественного и надежного информационного обеспечения. В работе предложен подход, позволяющий оптимальным образом использовать всю имеющуюся разнообразную информацию с целью формирования обобщенных оценок характеристик солнечных панелей. Для реализации поставленной задачи используются элементы математического аппарата теории нечетких множеств.*

*Ключевые слова: функция принадлежности, неопределенность информации, нечеткие оценки выходной мощности.*

O. Iarmoliuk, P. Zamkoviyy

**CALCULATION OUTPUT POWER OF SOLAR PANELS CONSIDERING INFORMATION UNCERTAINTY**

*Efficient operation of modern electrical networks is impossible without high-quality and reliable information. This paper proposed an approach that allows one the way to optimal formation of fuzzy estimates of solar panels. To realize this problem the elements of the fuzzy sets theory is used.*

*Key words: membership function, the uncertainty information, fuzzy estimates of output power.*

**Вступ.** Питання інформаційного забезпечення, його повноти й якості, особливо на рівні розподілу електричної енергії, завжди були досить болючими для світової енергетики. Даним фактом пояснюється величезна кількість публікацій у вітчизняних та міжнародних періодичних виданнях, де активно обговорювалися як аспекти оснащення електричних мереж сучасною вимірювальною технікою, так і проблеми адекватного моделювання режимів із урахуванням об'єктивно існуючої недостатності та невизначеності інформації. Реалізація багатьма країнами концепції Smart Grid, що передбачає тісну координацію технологічних та інформаційних зв'язків між усіма сторонами, задіяними у процесі енергозабезпечення, з одного боку, стимулювала істотне розширення інформаційної бази, активну автоматизацію процесів передачі даних, але, з іншого боку, масштабна інтеграція у розподільчі мережі, у першу чергу, альтернативних джерел енергії, посилює вплив фактора невизначеності. Все сказане повною мірою відноситься і до електроенергетики України. У той же час з мірою все більш ширшого використання джерел розосередженої генерації, формування інтегрованих

систем електропостачання, різко зростає і відповідальність за коректність і адекватність прийнятих рішень, що накладає особливі вимоги до якості інформаційного забезпечення. Це пов'язано з тим, що при інтелектуалізації електричних мереж, більшість управляючих дій повинні прийматися та реалізовуватися автоматично, без участі представників оперативно-диспетчерської служби енергокомпанії і, відповідно, без можливості будь-якої їх корекції [1].

З метою підвищення якості й адекватності моделювання режимів розподільчих мереж у реальному інформаційному середовищі було розглянуто широке коло питань, пов'язаних із моделюванням електричних навантажень з урахуванням невизначеності вихідної інформації [1 – 4]. Отримані результати дозволяють з більшим ступенем адекватності вирішувати питання оцінки стану розподільчих мереж, управління режимами їх роботи. Проте для ефективного управління режимами інтегрованих систем електропостачання, окрім моделей навантажень вузлів електричної мережі необхідно з відповідним ступенем адекватності визначити характеристики джерел генерації та акумулювання електричної енергії, що включені до їх структури. У першу чергу це стосується альтернативних джерел енергії, вихідні характеристики яких у значній мірі залежать від багатьох метеорологічних факторів, які важко спрогнозувати. Розглянемо для прикладу сонячну електростанцію (СЕС) з метою моделювання вихідних характеристик для подальшого оцінювання режимів інтегрованих ЕПС.

**Загальна характеристика.** Енергія, що йде від Сонця, розповсюджується у вигляді електромагнітного випромінювання у діапазоні від коротких радіохвиль довжиною 30 м до рентгенівських променів із довжиною хвилі  $10^{-10}$  м. Частина електромагнітних коливань відбивається і/або поглинається атмосферою, хмарами, і та частина, яка досягає поверхні Землі є сонячною радіацією. Не вся частина сонячного випромінювання, що проходить через земну атмосферу, потрапляє до поверхні землі. Велика частина сонячного випромінювання відбивається хмарами та самою атмосферою Землі; поглинається атмосферою, коли енергія сонячного випромінювання переходить у тепло (інфрачервоне випромінювання); відбивається від поверхні землі і у вигляді інфрачервоного випромінювання йде назад в космос. І тільки 27 % всього сонячного випромінювання, що надходить на землю з космосу, перетворюється в енергію, яка йде на випаровування і нагрівання води, нагрівання атмосфери, створення вітрів, хвиль, течій і т.д.

З причини наявності атмосфери та поверхні Землі на довільно-орієнтований приймальний майданчик сонячне випромінювання надходить уже у вигляді трьох потоків сонячної енергії: пряме  $E_{\text{пр}}(t)$ , дифузне або розсіяне  $E_{\text{диф}}(t)$  і відображене  $E_{\text{від}}(t)$  від поверхні Землі [5]:  $E_{\Sigma}(t) = E_{\text{пр}}(t) + E_{\text{диф}}(t) + E_{\text{від}}(t)$ .

Оскільки сонячні модулі приймають тільки пряму, а деякі моделі дифузну (розсіяну) сонячну радіацію, то надалі будемо використовувати лише ці дві складові сонячної радіації. На практиці прямі промені від дифузної складової відрізняються тим, що спрямований потік може бути сфокусований. Навіть в ясний день є деяка кількість розсіяного випромінювання. Відношення інтенсивності спрямованого потоку до повної інтенсивності випромінювання змінюється від 0,9 в ясний день до нуля в дуже похмурий день.

Кількість сонячної енергії, що падає на одиницю площі в одиницю часу, залежить від години доби, пори року, широти місцевості, місцевого клімату. Для розрахунку кількості сонячної енергії на певній місцевості необхідно знати кути падіння сонячних променів на похилу чи на горизонтальну поверхні, котрі поглинають тепло. Інтенсивність сонячної енергії на поверхні Землі, а саме у деякій точці для заданого моменту часу визначається трьома основними кутами: 1) схиленням  $\delta$ ; 2) широтою місцевості  $\varphi$ ; 3) годинним кутом  $\omega$ .

Годинний кут  $\omega$  у довільній точці є кут, на котрий Земля повертається з моменту сонячного полудня. Оскільки Земля повертається на  $(360^\circ / 24 \text{ год}) = 15^\circ$  за 1 год, то годинний кут визначається за виразом [5 – 7]

$$\omega = 15 (12 - \tau),$$

де  $\tau$  – добове значення години, год.

Годинний кут дорівнює нулю у сонячний полудень. Приріст цього кута на  $15^\circ$  довгоги визначає зміну часу на 1 годину. Відлік годинного кута зі знаком «+» є до полудня, а після полудня зі знаком «-».

Земля обертається навколо Сонця за рік. Напрямок земної осі залишається фіксованим у просторі під кутом  $\delta_0$  відносно нормалі до площини обертання. Кут між напрямленням до Сонця та екваторіальною площиною називається схиленням  $\delta$  й є мірою сезонних змін. Схилення є широтою точки, для котрої Сонце знаходиться у зеніті у полудень за сонячним часом. Як видно з рис. 1, у північній півкулі  $\delta$  плавно змінюється від  $\delta_0 = +23,5^\circ$  у період літнього сонцестояння до  $\delta_0 = -23,5^\circ$  у період зимнього сонцестояння. Аналітично отримано формулу кута схилення [5, 7, 8]

$$\delta = \delta_0 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right),$$

де  $\delta_0$  – кут нахилу земної осі у просторі відносно нормалі до площини обертання,  $\delta_0 = 23,5^\circ$ ;  $n$  – порядковий день року (наприклад,  $n = 1$  відповідає 1 січня).

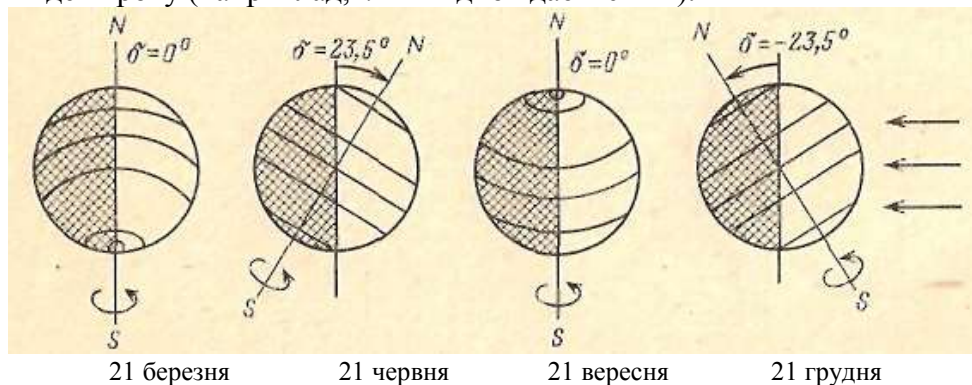


Рис. 1. Схема освітлення поверхні Землі сонячним промінням у різні пори року. Відзначено широти  $0^\circ$ ;  $\pm 23,5^\circ$ ;  $\pm 66,5^\circ$ . Видно як змінюється схилення  $\delta$ . Стрілками позначений потік сонячного випромінювання

Для похилої поверхні (приймача) визначимо наступні кути (рис. 2).

Кут нахилу  $\beta$ . Кут між площиною, що розглядається, та горизонтальною ( $0^\circ < \beta < 90^\circ$  для поверхонь, повернутих до екватору;  $90^\circ < \beta < 180^\circ$  для поверхонь, повернутих від екватору). Рациональним є встановлення сонячних панелей взимку:  $\beta = \varphi + (10^\circ - 15^\circ)$ , влітку:  $\beta = \varphi - (10^\circ - 15^\circ)$ , весною-осінню:  $\beta = \varphi$ .

Азимут  $\gamma$ . Відхилення від меридіани проекції на горизонтальну площину нормалі до поверхні приймача ( $\gamma = 0$  для площини, орієнтованій строго на південь;  $\gamma > 0$  – орієнтованій до заходу від напрямлення строго на південь;  $\gamma < 0$  – до сходу. Для горизонтальної площини вважаємо  $\gamma = 0$ ).

Зенітний кут Сонця  $\theta_z$  [5, 7, 8]

$$\cos\theta_z = \cos\varphi\cos\delta\cos\omega + \sin\varphi\sin\delta, \quad (2)$$

де  $\varphi$  – широта місцевості,  $^\circ$ , наприклад для Києва  $\varphi = 50^\circ$ .

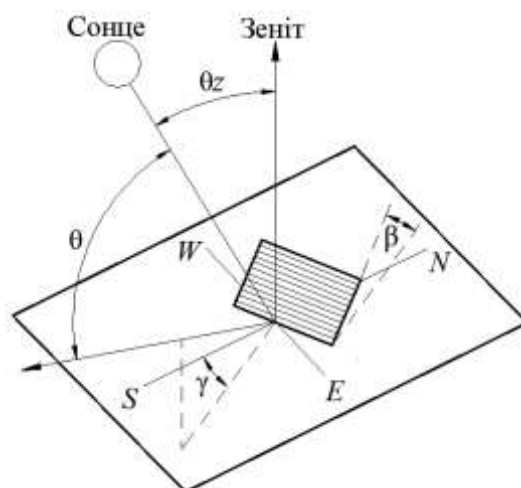


Рис. 2. Зенітний кут  $\theta_z$ , кут нахилу  $\beta$  й азимут  $\gamma$  для похилої поверхні (для випадку, зображеного на рисунку,  $\varphi < 0$ ): 1 – нормаль до горизонтальної площини; 2 – нормаль до похилої площини

**Визначення інтенсивності сонячної радіації.** Отже, кількість прямого сонячного випромінювання, котре надходить на горизонтальну поверхню на одиницю площі при ясному небі визначають за виразом [5]

$$E_{\text{пр.гор}} = e_0 \tau_D \cos \theta_z,$$

де  $E_{\text{пр.гор}}$  – енергія прямого сонячного випромінювання, котра надходить на горизонтальну поверхню на одиницю площі, Вт/м<sup>2</sup>;  $e_0$  – сонячна константа, інтенсивність сонячного випромінювання у вільному просторі на відстані, рівній середній відстані між Сонцем та Землею,  $e_0 = 1360$  Вт/м<sup>2</sup> [5, 7, 8];  $\tau_D$  – коефіцієнт атмосферної прозорості;  $\theta_z$  – зенітний кут Сонця, °.

Коефіцієнт атмосферної прозорості враховує ефект атмосфери Землі на пряму сонячну радіацію [9, 10], у відповідності з формулою (4), під дією відношення маси повітря  $m$  за двома основними факторами, а саме напрямку сонячних променів та місцевого підвищення, показано у виразі (4) [6]

$$\tau_D = 0,56 \left( e^{-0,65m} + e^{-0,095m} \right), \quad (4)$$

де  $m$  – пропорція маси повітря.

Маса повітря розраховується за допомогою формули Кастена [6, 11, 12]

$$m = \frac{1 - 10^{-4} z}{\cos \theta_z + 0,50572 \left( 96,07995^\circ - \theta_z \right)^{-1,6364}}, \quad (4)$$

де  $z$  – висота розміщення над рівнем моря, м, наприклад для Києва  $z = 179$  м.

Для перерахунку інтенсивності прямої сонячної радіації на похилу поверхню необхідно використати наступний вираз [13]

$$E_{\text{пр.пох}} = R_b E_{\text{пр.гор}},$$

де  $E_{\text{пр.пох}}$  – інтенсивність прямої сонячної радіації на похилу поверхню, кВт/м<sup>2</sup>;  $R_b$  – коефіцієнт, необхідний для розрахунку інтенсивності прямої сонячної радіації на похилу поверхню.

Коефіцієнт, необхідний для розрахунку інтенсивності прямої сонячної радіації на похилу поверхню розраховується наступним чином [13]

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}.$$

Кількість дифузного (розсіяного) сонячного випромінювання, котре надходить на горизонтальну поверхню на одиницю площі при ясному небі визначають за виразом [5]

$$E_{\text{диф.гор}} = e_0(0,271 - 0,294\tau_D)\cos\theta_z,$$

де  $E_{\text{диф.гор}}$  – енергія дифузного сонячного випромінювання, котра надходить на горизонтальну поверхню на одиницю площі, кВт/м<sup>2</sup>.

Коефіцієнт, необхідний для розрахунку інтенсивності дифузної сонячної радіації на похилу поверхню розраховується наступним чином [13]

$$R = \Delta_{\text{пр}} R_b + \Delta_{\text{диф}} \frac{1 + \cos\beta}{2} + \frac{(1 - \cos\beta)\rho}{2},$$

де  $\Delta_{\text{пр}}$  – доля прямої сонячної радіації у сумарній радіації, наприклад для неба повністю ясного  $\Delta_{\text{пр}} = 0,8$  [13];  $\Delta_{\text{диф}}$  – доля дифузної сонячної радіації у сумарній радіації, наприклад для неба повністю ясного  $\Delta_{\text{диф}} = 0,2$  [13];  $\rho$  – значення відбиваючої здатності поверхні Землі: 0,2 при відсутності снігу та 0,7 при наявності сніжного покриву [13].

Для перерахунку інтенсивності дифузного (розсіяного) сонячного випромінювання на похилу поверхню необхідно використати наступний вираз [13]

$$E_{\text{диф.пох}} = R E_{\text{диф.гор}},$$

Для розрахунку інтенсивності сумарної сонячної радіації на похилу поверхню необхідно використати наступний вираз [13]

$$E_{\text{пох}} = E_{\text{диф.пох}} + E_{\text{пр.пох}}.$$

**Структура та складові сонячної електростанції (СЕС).** Наведемо умовну схему структури СЕС, що включає наступні складові: сонячний модуль або панель, регулятор відбору максимальної потужності, контролер заряду-розряду акумуляторної батареї (у разі накопичення енергії, яку генерує сонячна батарея), акумулятор (у разі накопичення енергії, яку генерує сонячна батарея), інвертор, з'єднуючі кабелі.

Тому при розрахунку вихідної потужності необхідно враховувати втрати потужності у кожній складовій СЕС.

Сонячний модуль або фотоелектрична панель – це електричний пристрій, що перетворює частину сонячного електромагнітного випромінювання у постійний електричний струм. Є найбільш ефективним, з енергетичної точки зору, пристроєм для перетворення сонячної енергії в електричну енергію. Сонячний модуль на основі монокристалічного кремнію має найбільший ККД, який становить 17 – 18 %. Даний вид сонячних батарей досягає максимальної потужності при ясному небі, середній температурі повітря 25° С і напрямку панелей прямо на сонце. У той же час, навіть невелика хмарність сильно знижує потужність установки (на 70 %), а сильна хмарність практично блокує її роботу (на 90 %). Діапазон робочих температур для одержання оптимальної потужності коливається від 15 до 25° С. Альтернативою монокристалічним панелям є полікристалічні сонячні панелі. ККД сонячної панелі на основі полікристалічного кремнію становить 10 – 12 %. Тонкоплівкові панелі – найбільш дешевий варіант з усіх видів сонячних панелей. Тонкоплівкові панелі не вимагають прямих сонячних променів, працюють при розсіяному випромінюванні, завдяки чому сумарна вироблена за рік потужність на 10 – 15 % перевищує показники традиційних кристалічних сонячних панелей. Тонка плівка є набагато більш рентабельним способом виробництва енергії і може переграти монокристали в областях з туманним, похмурим кліматом або у тих галузях промисловості, яким властива запиленість повітря [14].

Зазвичай, у регуляторах відбору потужності батарей реалізується принцип пошуку максимуму потужності шляхом коротких періодичних змін положення робочої точки. Якщо при цьому потужність на виході приладу зростає, то положення робочої точки змінюється у цьому напрямку при подальшому кроці. Таким чином, безперервно оптимізується

навантажувальна характеристика для відбору максимальної потужності, а також забезпечується можливість регулювання у широкому динамічному діапазоні та формування імпульсів струму, здатних зарядити акумуляторну батарею навіть в умовах слабкої освітленості. Потрібно враховувати, що регулятори мають ККД 0,85 – 0,95 [14].

Сонячний генератор (яким би складним і великим він не був) може виробляти лише постійний струм. Для перетворення постійного струму акумуляторної батареї на змінний синусоїдальної форми, потрібен інвертор. Для всіх типів інверторів ключовий параметр – ККД (який повинен бути більше 90 %). ККД інверторів зазвичай знаходиться у діапазоні 90 – 95 % [14].

Кращий спосіб уникнути непотрібних втрат у з'єднувальних кабелях – використання відповідних електрокабелів і правильне їх підключення до приладів. Якщо частина кабелю знаходиться під відкритим небом, то він повинен бути стійким до поганих погодних умов. Стійкість до ультрафіолетового випромінювання також важлива. При правильному виборі перерізу втрати потужності на дроті становлять близько 3 % [14].

**Визначення потужності на виході СЕС.** Отже, кількість потужності, яку можна отримати на виході СЕС без наявності акумулятора (слідкування за сонцем відсутнє – система стаціонарна) [5, 7, 8]

$$P_{\text{СЕС}} = P_{\text{н}} E_{\text{пох}} \eta_{\text{в.п}} \eta_{\text{інв}} \eta_{\text{п.с}} \cdot 10^{-3},$$

де  $P_{\text{н}}$  – потужність сонячного модуля, кВт, береться з паспортних даних;  $\eta_{\text{в.п}}$  – ККД відбору максимальної потужності, в.о.;  $\eta_{\text{інв}}$  – ККД інвертора, в.о.;  $\eta_{\text{п.с}}$  – врахування на втрати у проводах, відбиванні від скла та т.п., в.о.

Узагальнюючи вищезазначене можна зробити наступний висновок. Задача оцінки вихідної потужності СЕС повинна розглядатися у залежності від потужності сонячної батареї, яка береться з паспортних даних СЕС, котра визначається при стандартних тестових умовах (STC-Standard Test Conditions, сонячна радіація 1000 Вт/м<sup>2</sup>, температура – 25 °С та сонячний спектр на широті 45° (AM1,5)), та умовно розбиватися на два етапи.

Моделювання режиму роботи СЕС може здійснюватися на основі характерного графіка добового зміни сонячної радіації для певної години доби, вимірюного або певного аналітичним шляхом у фактичному або передбачуваному місці розміщення станції.

Необхідно враховувати, що значення сонячної радіації для кожного  $t$ -го інтервалу часу задаються детермінованою величиною, а, як було показано вище, такі показники як ККД регулятора відбору потужності, інвертора, врахування на втрати у проводах, відбиванні від скла задаються інтервальною величиною:

$$\left[ \eta_{\text{в.п}}, \bar{\eta}_{\text{в.п}} \right], \left[ \eta_{\text{інв}}, \bar{\eta}_{\text{інв}} \right], \left[ \eta_{\text{п.с}}, \bar{\eta}_{\text{п.с}} \right].$$

Тоді, на першому етапі кількість енергії СЕС для окремих періодів часу  $t$  можна оцінити таким чином:

$$\left[ P_{\text{СЕС}t}, \bar{P}_{\text{СЕС}t} \right] = P_{\text{н}} E_{\text{пох}} \left[ \eta_{\text{в.п}}, \bar{\eta}_{\text{в.п}} \right] \left[ \eta_{\text{інв}}, \bar{\eta}_{\text{інв}} \right] \left[ \eta_{\text{п.с}}, \bar{\eta}_{\text{п.с}} \right] \cdot 10^{-3}$$

Очевидно, що у цьому випадку, враховуючи правила виконання операцій із нечіткими числами, результуюча величина також буде представлена інтервальним числом:

$$\left[ P_{\text{СЕС}t}, \bar{P}_{\text{СЕС}t} \right]$$

У свою чергу розрахована на попередньому етапі кількість енергії буде відповідати умовам ясного неба. Але оскільки прозоре небо не характерне для кожного дня року, то на отриманий результат необхідно «накласти» вплив хмарності неба, яка є типовою для певних

сезонів року. Навіть невелика хмарність сильно знижує потужність установки (на 70 %), а сильна хмарність практично блокує її роботу (на 90 %) [14].

Отримане значення кількості енергії на першому етапі є максимально можливим значенням енергії, яке можна отримати на виході СЕС, яке у природі існує дуже рідко. Тому вважаємо, що хмарність (непрозорість) неба знижує значення кількості енергії на виході СЕС у деякі сезони року практично до нуля. Отже на другому етапі отримуємо результуючу величину, яка буде представлена нечітким числом із трапецієвидною функцією приналежності (рис. 3).

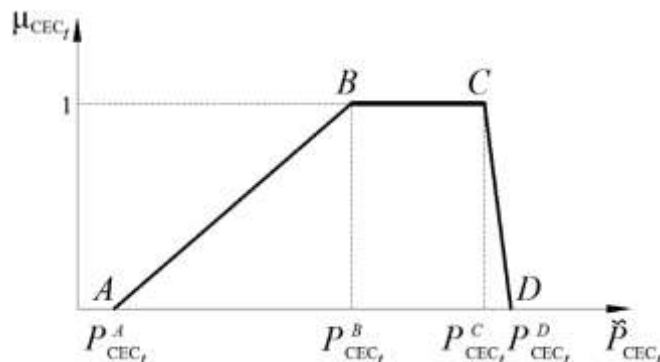


Рис. 3. Результуюча величина, що представлена нечітким числом із трапецієвидною функцією належності

Вважаємо, що верхнє плато отриманої трапеції відповідає інтервалу  $[P_{СЕС,t}, \bar{P}_{СЕС,t}]$ , отриманого на першому етапі. А розміщення верхнього плато ближче до нуля чи до максимального значення буде залежати від характеру сезону року, та кількості хмарних та ясних днів у сезоні (місяці).

Наведена математична модель СЕС, що наведена у роботі може доповнюватися іншими факторами, які можуть зробити вагомий вплив на розрахунок вихідних параметрів станції.

1. Праховник А.В. Требования и общие принципы организации базы данных для решения задач моделирования и оптимизации режимов в современных системах электроснабжения [Текст] / А.В. Праховник, В.А. Попов, В.В. Ткаченко, Е.С. Луцько // Энергетика: економіка, технології, екологія / Наук. журнал. – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – № 1. – С. 42 – 47. – Бібліогр.: с. 47. – 150 екз. – ISSN 1813-5420.
2. Экель П.Я. Учет фактора неопределенности в задачах моделирования и оптимизации электрических сетей [Текст] / П.Я. Экель, В.А. Попов // Известия Академии наук СССР. Серия: Энергетика и транспорт / Наук. журнал. – М.: Издательство «Наука», 1985. – № 2. – С. 50 – 58.
3. Popov V. Methodology of soft computing in modelling power systems and subsystems modes of operation [Текст] / V. Popov, P. Ekel, F. Farret // Proceedings of the Seventh International Fuzzy System Association World Congress. – Prague, 1997. – Vol. 4. – PP. 214 – 219.
4. Попов В.А. Принципы учета неопределенности исходной информации при моделировании нагрузок в распределительных сетях [Текст] / В.А. Попов, Е.С. Ярмолук, С. Банузаде Сахрагард, А.А. Журавлев // Энергетика: економіка, технології, екологія / Наук. журнал. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – № 1. – С. 61 – 66. – Бібліогр.: с. 66. – 150 екз. – ISSN 1813-5420.
5. Виссарионов В.И. Солнечная энергетика: Навчальний посібник для ВНЗів [Текст] / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин; під редакцією В.И. Виссарионова. – М.: Видавничий дім МЕІ. – 2008. – 317 с. – 300 екз.

- 
6. Nemes C. Potential solar irradiance assessment based on a digital elevation model / C. Nemes, F. Munteanu // *Advances in Electrical and Computer Engineering*. – 2011. – V. 11. – № 4. – P. 89 – 92.
  7. Дудюк Д.Л. Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі: Навчальний посібник [Текст] / Д.Л. Дудюк, С.С. Мазепа, Я.М. Гнатишин. – Львів: Магнолія 2006. – 2008. – 188 с. – ISBN 978-966-2025-39-2.
  8. Твайделл Дж. Возобновляемые источники энергии [Текст] / Дж. Твайделл, А. Уэйр; пер. з англ. під ред. В.А. Коробкова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с., іл. – 3450 экз. – ISBN 5-283-02469-5 (рус.).
  9. Zekai Sen. *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques* / Sen Zekai. – Springer, 2008. – 276 p. – ISBN-10: 1848001339.
  10. Bailang Yu. Investigating impact of urban morphology on spatiotemporal variations of solar radiation with airborne Lidar data and a solar flux model: a case study of downtown Houston / Yu. Bailang, Liu. Hongxing, Wu. Jianping, Lin Wei-Ming // *Int. Journal of Remote Sensing*. – 2009. – Vol. 30. – № 17. – PP. 4359 – 4385.
  11. Paulescu M. *Algoritmi de estimare solare* / M. Paulescu. – Romanian: Editura Matrix Rom, București, 2005. – ISBN 973-685-951-7.
  12. Kasten F. Revised optical air mass tables and approximation formula / F. Kasten, A.T. Young. – *Applied Optics*, 1989. – Vol. 28. – PP. 4735 – 4738.
  13. Даффи Дж.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии [Текст] / Дж.А. Даффи, У.А. Бекман. – М.: Мир, 1987. – 413 с.
  14. Компанія світлотехнічного й електротехнічного обладнання «Софіт-Люкс»: Сонячні електростанції в Україні. Перспективи розвитку: [http://sofit.com.ua/articles/solnechnaya\\_e\\_nergetika\\_v\\_ukraine/](http://sofit.com.ua/articles/solnechnaya_e_nergetika_v_ukraine/).