

СИСТЕМНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З МІНЛИВИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПОКАЗНИКАМИ Й ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ МОДЕЛЮВАННЯ

Виконано огляд методів досліджень об'єктів електрогенерації за умов невизначеності їх режимних, експлуатаційних і фінансово-економічних параметрів, придатних для розв'язання широкого кола техніко-економічних задач в системах енергопостачання з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ).

Окреслено переваги й недоліки відомих ймовірнісних методів моделювання залежно від наявної статистичної інформації, показників розподілу випадкових параметрів і змінних. Наголошено на особливостях застосування ймовірнісних методів, методу Монте-Карло й методу точкового оцінювання зокрема, наведено результати співставних розрахунків техніко-економічних оцінок обсягів і собівартості генерації сонячними фотоелектричними установками за чинних умов господарювання в Україні.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, метод дослідження, детерміновано-стохастична модель, собівартість виробництва.

Концепт «електричного світу» як основи енергетики майбутнього вже сьогодні є визначальним рушієм еволюційних змін, яких зазнають електричні мережі у процесі неупинного вдосконалення технологій електрогенерації [1]. Прагнення людства оволодіти технологіями утилізації первинної сонячної енергії та її похідних призвели до помітних зрушень у напрямку здешевлення перетворювачів енергії та електрогенераторів на основі відновлюваних джерел (Е–ВДЕ), водночас породили низку проблем, пов'язаних з необхідністю коректної інтеграції таких об'єктів до електроенергетичної системи (ЕЕС) [2] і автоматичного керування цими об'єктами на основі наявних статистичних та проміжних розрахункових даних в короткостроковій перспективі (принцип *online* або *study mode*) та режимах реального часу (*real-time assessment*) [3].

Складність вирішення задач масштабної інтеграції вітроелектричних установок (ВЕУ) і станцій (ВЕС) і сонячних фотоелектричних установок та станцій (СФЕУ та СФЕС, також «PV-станцій») до системної розподільної мережі зумовлена змінами параметрів потужності генерації у часі – компонент активної і реактивної потужності, вихідної напруги й частоти

© КОСТЮК В.О., 2015

електричної енергії, температурозалежного коефіцієнта корисної дії тощо.

Метою цієї статті є порівняння можливостей математичних методів аналізу техніко-економічних показників енергетичних об'єктів, випадковий характер яких слушно пов'язують з природними властивостями ВДЕ. Для цього проаналізовано специфіку техніко-економічних досліджень систем з мінливими параметрами з урахуванням певних класифікаційних ознак, описано алгоритмічні схеми й наголошено на перевагах і недоліках застосування найбільш вживаних методів досліджень; також продемонстровано практичні результати цінкових розрахунків за моделлю життєвого циклу СФЕУ з використанням найбільш уживаних ймовірнісних методів.

Специфіка задач у сфері досліджень енергетичних систем з мінливими у часі показниками. Техніко-економічні дослідження енергетичних систем охоплюють широке коло питань – від заходів на короткострокову перспективу (наприклад, керування: в режимі реального часу; також у спосіб погодинних, щодобових і/або щотижневих оперативних рішень) до довгострокових планів, які є розв'язками задач економічного планування або формування політики управління енергетичними об'єктами. Управлінський процес, пов'язаний із вра-

хуванням невизначеності параметрів розрахункової моделі, розпочинається на стадіях проектування компонувальних і конструктивних рішень технологічних об'єктів. У випадку застосування ВЕС та СФЕС невизначеність зростає також на етапі розроблення інвестиційного проекту з огляду на впливи численних учасників цього процесу.

Вибір зручного методу пошуку розв'язків техніко-економічних задач, пов'язаних з обґрунтуванням показників систем Е–ВДЕ, має на меті отримання достовірних прогнозних вартісних оцінок з дотриманням певних вимог щодо функціонування комплексу «постачальна система – споживач» [4,5]. Попри специфіку змістовних формулювань, літературні джерела охоплюють задачі, котрі умовно можна розрізнити за належністю до трьох якісно відмінних груп:

Група А – отримання прогнозних розрахункових оцінок обсягів, собівартості й ціни виробництва теплової та електричної енергії в межах галузевого сектору або окремих комбінованих об'єктів, які використовують той чи інший вид первинної енергії ВДЕ [5–8];

Група Б – задачі (оптимального) конфігурування енергогенерувальних комплексів або комбінованих установок Е–ВДЕ, розв'язки яких спрямовані на якнайповніше дотримання вимог споживача з урахуванням режимних параметрів перетворення і/або накопичення енергії та особливостей взаємодії джерел із зовнішніми розподільними мережами в умовах ринку [9,10];

Група В – задачі керування енергетичними об'єктами, які під'єднані до зовнішніх електричних мереж з метою збуту виробленої енергії через механізм оптового чи двостороннього ринку енергії; або функціонують у складі енергетичного комплексу, який здійснює енергопостачання господарського об'єкта за схемою нарізного чи сумісного постачання електричної і теплової енергії, також енергії холоду. Такі енергетичні об'єкти є джерелами розосередженої генерації (РГ) [11], що функціонують за умов коливань частоти в енергосистемі. Об'єкти Е–ВДЕ мають взаємодіяти із системами регулювання частоти і потужності, включно для забезпечення стійкості розподільних мереж в режимах *online* і *real-time* [12]. Економічні аспекти задач цієї групи розгля-

даються окремо, причому вартісні показники аналізуються в комплексі з економічними вигодами від застосування засобів автоматичного контролю у поєднанні з очікуваними втратами у разі скорочення збуту [13].

Фактором, за яким можливо розрізнити задачі за їх приналежністю до відповідної групи, є властивості випадкових параметрів і змінних, які фігурують у математичній моделі системи. В загальному випадку фізичні явища видового перетворення енергії, що протікають в енергоустановках, є *випадковими процесами*, залежними від параметра часу t , сукупність значень якого лежить у межах деякого відрізка числової осі: $t \in T, T = [a, b]$. Отже, такі процеси є нестационарними за визначенням [14] й «неповторюваними», а тому важко уявити здійсненість алгоритмів керування з використанням якої-небудь статистичної (історичної) інформації про миттєві значення змінних об'єкта системи для розв'язання задач *Групи В* у режимі *real-time*. Деякі результати проміжних розрахунків використовують в режимі *online* за певної організації структури обчислювальної мережі станції диспетчерського керування [3].

Вибір методу дослідження й записи моделей для розгляду окреслених задач зазвичай кореспондується із часовими інтервалами осереднення випадкових величин – саме цей фактор є підґрунтям диференціації проблеми техніко-економічного оцінювання [4,15,16]. Для врахування статистичних оцінок швидкості вітру в місці розташування ВЕС шляхом математичного моделювання використовують функції щільності розподілу ймовірностей PDF (*Probability Density Function*), для чого нехтують залежністю швидкості вітру від пори року. Для демонстрації впливу інтервалу усереднення на рівень деталізації моделей для техніко-економічних досліджень подамо нижче простий приклад щодо оцінок середньої потужності ВЕС.

Приклад 1. Наближену оцінку значення середньої потужності ВЕС, оснащеної вітротурбіною *Vestas V.112* номінальною потужністю $P_{\text{ном}} = 3,0$ МВт, можна визначити на підставі її паспортної кривої потужності від швидкості вітру [4]: для середньої швидкості вітру 5,0 м/с потужність становить $P_{\text{ВЕС}} = 0,1 P_{\text{ном}} = 0,3$ МВт. Однак розподіл швидкості вітру в загальному випадку не є нормальним, найча-

стіше застосовують несиметричний розподіл Вейбулла [15, 16]. Оцінку середньої статистичної потужності цієї ВЕУ розраховують як математичне очікування випадкової величини, визначене через функцію розподілу щільності вітру $F(v)$ у вибраному місці розташування:

$$P_{\text{ВЕУ}}^{\text{cm}} = \int_0^{\infty} p(v)F(v)dv$$

де $p(v)$ – апроксимована характеристика потужності вітротурбіни. Обчисливши інтеграл, можна отримати числове значення середньої статистичної потужності навіть на рівні $P_{\text{ВЕУ}}^{\text{cm}} = 0,25 P_{\text{НОМ}} = 0,755 \text{ МВт}$ [4]. Отже, розрахункове значення суттєво залежить від даних кліматології вітру, опрацьованих статистично.

Натомість відносну середньорічну потужність ВЕУ для отримання розв'язків задач Групи А можна оцінити через річний обсяг виробництва ВЕУ W^{pik} : $P_{\text{ВЕУ}}^{\text{pik}} / P_{\text{НОМ}} = W^{\text{pik}} / (8760 \cdot P_{\text{НОМ}}) \approx 0,15$ – відповідає показнику коефіцієнта використання встановленої потужності (КВВП)¹. За наявної розбіжності «стандартних» розрахункових середніх значень потужності ВЕС виникає потреба у застосуванні уточнених оцінок потужності ВЕС для пошуку розв'язків складніших задач із Груп Б і В [17].

Методи, які застосовують для подолання труднощів, пов'язаних з необхідністю врахуван-

ня невизначених параметрів, є різноманітними [18]. Структурно класифікувати сукупність відомих розвинутих методів можна так, як це зображено на рис. 1. Центральне місце у класифікаційній схемі посідають *гібридні моделі* – відображення можливостей раціонального поєднання методів дослідження відповідно до змісту задачі та її інформаційного забезпечення.

Серед названих методів імовірнісні методи (*Probabilistic Modeling*) є найбільш придатними для оцінювання впливу ВДЕ. Підґрунтям такого висновку є фактична залежність вихідних параметрів об'єктів з ВДЕ від характеристик їх первинних енергетичних ресурсів, таких як сонячна радіація, швидкість вітру, температура навколишнього середовища тощо. Ретроспективні статистичні дані щодо змін цих параметрів зазвичай є наявними або можуть бути якісно прогнозованими, а тому можуть бути враховані в моделі за допомогою функцій щільності розподілу ймовірностей *PDF*.

Ймовірнісні методи моделювання. За цією методологією розглядається функція n випадкових значень розрахункових параметричних змінних (параметрів) $y = f(X)$, причому X – вектор, що містить мінливі параметри у вигляді множини: $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, а функція щільності розподілу *PDF* для вектора X є відомою. Задача полягає у знаходженні функції *PDF* для y .



Рис. 1. Класифікація методів досліджень за умов невизначеності

¹Середнє значення для українських ВЕС згідно зі статистичними даними ДП «НЕК «Укренерго» за 2012 рік становить 12,3% ; практично для деяких кращих ВЕУ сягає значення 20%.

Можливим є застосування таких класичних методів.

Метод Монте-Карло (*Monte Carlo Simulation*, далі – *MCSim*). Алгоритм обчислень за цим методом достатньо просто формалізувати. Критерієм завершення ітераційного процесу пошуку може бути кількість ітерацій (розрахунків значень компонент $y_j, j = \overline{1, l}$ у векторі $Y_l = \{y_1, y_2, \dots, y_l\}$), сходження послідовності розрахункових значень до очікуваного y^* тощо. Відомими є процедури зупинки ітераційного процесу, розроблені для розв'язання задач нелінійної стохастичної оптимізації шляхом перевірки рівності нулю градієнта цільової функції й оцінки її довірчого інтервалу [19], або ж на основі застосування методів стохастичної градієнтної оптимізації [20].

До переваг методу Монте-Карло відносять: 1) метод не потребує знання функції f для обчислення y ; 2) метод може бути використаний для розв'язування задач з недиференційованими або неопуклими функціями у випадках дослідження технічно-складних систем, також задач із визначення режимних показників; 3) підтримує будь-які форми функцій щільності розподілу *PDF*; 4) є інтуїтивно зрозумілим і відносно легким для застосування.

Водночас *MCSim* має суттєві недоліки: 1) метод є застосовним лише для задач, описаних з використанням *PDF*; 2) використання методу пов'язане із значними труднощами обчислень, оскільки розрахунковий алгоритм є ітераційним (потребує великого числа розрахунків для визначення декількох оцінок функції $f(X)$); 3) метод є наближеним розрахунковим методом.

Розрахунковий покроковий процес за методом *MCSim* зводиться до обчислення очікуваного значення Y як середнього (математичного очікування), також середньоквадратичного відхилення (СКВ) σ значень функції y для кож-

ної завершеної ітерації з номером $k = \overline{1, m}$:

$$Y = \{y_k | k = 1, 2, \dots\}, M(y) = (1/k) \sum_k y_k, \quad (1)$$

$$\sigma(y) = M(Y^2) - M^2(Y).$$

Покроковий алгоритм реалізації методу для числових розрахунків поданий автором у роботі [21].

Метод точкового оцінювання. В спеціальній літературі відомий як *Point Estimate Method* (далі – *PEsM*) і є реалізацією методу моментів,

запропонованого К. Пірсоном [22]. За допомогою методу обчислюють очікуване значення і варіацію змінної y , ґрунтуючись на відомій функції *PDF* для x_i . Якщо вектор X містить n мінливих параметрів, то за цим методом виконують $2n$ обчислень для знаходження математичних очікувань $M(y)$ і $M(y^2)$.

Метод *PEsM* дозволяє отримати розрахункові значення середнього значення $M(y)$ та середнього квадрата $M(y^2)$ невідомої змінної y шляхом адитивної процедури за $2n$ кроків. Метод точкового оцінювання нескладно формалізувати з використанням записів для областей імовірних значень $\gamma_{\xi, i}$ та ймовірних концентрацій $\pi_{\xi, i}$ з використанням значень третього моменту $M_3(x_{\xi})$ для кожного невизна-

ченого параметра x_{ξ} , причому $\xi = \overline{1, n}; i = 1, 2$.

Детальний опис алгоритму розрахунків за методом точкового оцінювання також подано в [21].

Порівняними перевагами методу *PEsM* є: 1) процедура розрахунків за методом не є ітеративною; 2) складність реалізації алгоритмічного процесу для розв'язання практичних задач є помірною; 3) проблеми сходження процесу не існує; 4) метод також застосовний до задач із просторовою кореляцією між невизначеними вхідними параметрами випадкового характеру.

Попри очевидні переваги, недоліками методу *PEsM* є: 1) обчисленими можуть бути лише стандартизовані показники розподілу (середні значення та середньоквадратичні відхилення) випадкових змінних-параметрів; 2) інформація щодо форми кривих щільності розподілу *PDF* випадкових змінних, отриманих в результаті моделювання, відсутня; 3) метод застосовний для задач, вхідні параметри яких описані у формі функцій *PDF*; 4) метод дає вірогідні результати лише для симетричних форм кривих *PDF*.

Метод сценарного прийняття рішень. Очевидним наслідком невизначеності мінливих параметрів є нескінченне число технічно можливих (*feasible*) реалізацій технічної системи, тому нераціонально ґрунтувати об'єктивні висновки техніко-економічного аналізу на підставі опрацювання будь-якої обмеженої, хоча й досить чисельної множини таких варіантних реалізацій. Натомість, простір можливих реалізацій секціонують (формують сценарії) із спе-

цифічною ймовірністю реалізації «за вибраним сценарієм». Для того щоб це виконати, перелік сценаріїв формують на підставі функції *PDF* кожного невизначеного параметра із X . Очікуване значення вихідної змінної y обчислюється так:

$$M(y) = \sum_s \pi_s \cdot f(X_s), \quad (2)$$

де $\sum \pi_s = 1$, і π_s – ймовірність сценарію з номером s .

Теорія мартингалів і стохастично-диференціальні рівняння. Одним із плідних підходів до опису випадкової компоненти електрогенерації ВЕС для оцінки потреби балансуючих потужностей є модель на основі стохастично-диференціальних рівнянь (СДР, СДАР [23]), що описують компоненти базової генерації, базового споживання та генерації ВЕС. Метод Монте-Карло використано у подальшому для аналізу ризику аварії енергосистеми *Nordic System* (охоплює Схід Данії, Швеції, Норвегії, Фінляндії) в умовах дерегульованого ринку електроенергії – у результаті ймовірної втрати можливості передавати деяку нетто-потужність (*Net Transmission Capacity, NTC*) магістральними лініями електропередачі, якими зв'язані енергетичні острови трьох країн. Для використання випадкового процесу Орнштайна–Уленбека в роботах [17, 23] пропонується застосувати логарифмічно-нормальний розподіл виробленої енергії ВЕС: $W(t) = W_0 \cdot e^{\omega_m(t) + U(t)}$, де $\omega_m(t)$ – алгебраїчна функція, що представляє середнє значення логарифма від величини $W(t)/W_0$ виробленої енергії ВЕС, а $U(t)$ є стохастичним процесом Орнштайна–Уленбека і описується рівнянням

$$dU(t) = -\eta U(t)dt + \nu dB(t), \quad t \geq 0, \quad (3)$$

де $B(t)$ – вінерівський (броунівський) процес, а тому є нормально розподілений. Фактично виразом $\omega_m(t) + U(t)$ моделюється ряд значень випадкової величини $y_k = \ln(W(t)/W_0)$, яка відповідно до (3) є процесом Орнштайна–Уленбека. Процес Орнштайна–Уленбека (Ornstein–Uhlenbeck process) є розв'язком стохастичного рівняння, відомого у фізиці як рівняння Ланжевена, що описує броунівський рух [23].

Результат інтегрування СДР-рівняння (3) отримують за формулою стохастичного інтеграла $\int \delta^2$ й записують через нормальний розподіл $\varepsilon \sim N(0,1)$ випадкової величини із нульовим середнім та одиничною дисперсією $B(t) = \sqrt{t} \cdot \varepsilon$, зводячи задачу до звичайного детермінованого інтегрування:

$$U(t) = U(0) \cdot e^{-\eta t} + \frac{\sigma}{\sqrt{2\eta}} \sqrt{1 - e^{-2\eta t}} \cdot \varepsilon, \quad (4)$$

де η та σ – параметри випадкового процесу. Таким чином, результатом моделювання є апроксимована середня величина $\omega_m(t)$ та стохастична складова, що визначається виразом (4) [17]. Метод дає можливість подолати недоліки традиційних моделей з погодинним записом осереднених (технологічних) змінних: виробленої електроенергії, потужності [23].

Нечітко-можливісні моделі. Грунтуються на застосуванні нечітко визначених множин і достатньо ефективно застосовуються для моделювання складних задач керування енергокомплексами, моделювання потоків енергії та аналізу впливу джерел РГ [24]. Пошук розв'язків у складних технічних системах зазвичай спирається на інструменти програмного середовища для імітаційного моделювання, побудованого на ідеях L.A. Zadeh [25], наприклад, надбудови *FuzzyCalc* до таблиць Exel MS Office; також Matlab *SIMULINK*.

Особливе місце в групі нечітко-можливісних (*possibilistic*) моделей посідають задачі моделювання навантажень. Алгоритм пошуку розв'язку виконується в декілька стадій: а) фазифікація, б) опис лінгвістичних правил логіки функціонування системи з формулюванням нечітких висновків і композиції; 3) дефазифікація. В задачах конструювання нечітких регуляторів, для енергосистем зокрема [24], дефазифікація може здійснюватись одним із числа практичних методів: метод центра ваги *COG* (Center Of Gravity), метод центра площі *COA* (Center Of Area), *WFM* (Weighted Fuzzy Mean) та інші.

Співставні результати чисельного моделювання. Вартісні показники споруджуваних нині Е–ВДЕ мають стійку тенденцію до зниження. Однак вирішальним чинником для інвесторів, котрі зважають на ризики, є точність прогнозних розрахункових техніко-економічних оці-

²Спеціальний випадок стохастичного інтеграла по відношенню до броунівського (вінерівського) руху.

нок показників нових енергетичних об'єктів. Основою співставного аналізу зазвичай є прогнозні середньозважені ціни виробництва електроенергії (*LCOE*) [6, 7].

Зважаючи на чисельні застосування різноманітних імітаційних моделей, в основу котрих покладено механізм методу Монте-Карло для аналізу технічних систем із мінливими параметрами, в роботі [21] автором подані числові і графічні результати розрахунків кривих щільності розподілу цінових оцінок виробництва електричної енергії проектною СФЕУ, виконаних шляхом організації стохастичного процесу за методом Монте-Карло з числом ітерацій 50 тис. Конструктивне виконання проектного об'єкта – СФЕУ «змонтована на даху», фіксований кут нахилу *PV*-панелей до горизонту; довільно вибране значення потужності для кожної ітерації (реалізації проекту) розглядалося розподіленним рівномірно. Отримані в [21] числові оцінки відповідають широкому діапазону значень проектної потужності СФЕУ 0,1–2,0 МВт_{пик}.

У цій статті продемонструємо плідність ідей імітаційного моделювання шляхом співставлення числових результатів застосування ймовірнісних методів Монте-Карло та точкового оцінювання на основі інформаційного забезпечення детерміновано-стохастичної моделі (ДСМ), використаного у [21].

Приклад 2. Точність числових результатів моделювання із застосуванням найбільш вживаних ймовірнісних методів оцінимо шляхом виконання серії простих розрахункових експе-

риментів для моделі СФЕУ. Розрахункову модель розроблено на основі фінансової моделі життєвого циклу СФЕУ (до 20 років) за умов українського законодавства станом на 2014 рік: обліку амортизаційних відрахувань за методом прискореної амортизації згідно з Податковим Кодексом України, пільг щодо оподаткування [26] та застосуванням норм чинної редакції Закону України «Про електроенергетику» щодо «зелених тарифів».

Інформаційне забезпечення моделі. Сукупність технологічних параметрів моделі СФЕУ в процесі конструювання сформовано у групи: фінансово-економічні, експлуатаційні, режимні. Для реалізації розрахункових алгоритмів за вибраними ймовірнісними методами в розрахунковій моделі застосовано аналітичні записи функцій щільності розподілу (*PDF*) до параметрів техніко-економічної задачі, статистичні дані щодо яких є відомими або визначені частково. Зокрема, значення ККД сонячного фотоелектричного модуля (СФЕМ на основі монокристалічного кремнію) вважають розподіленими нормально навколо моди 16% із стандартним середньоквадратичним відхиленням $\sigma = 1\%$ (рис. 2, а), коефіцієнт деградації (%/рік) – за несиметричним розподілом із формою щільності *PDF* (рис. 2, б). Водночас питомі умовно-постійні експлуатаційні витрати на обслуговування установки коливаються в межах від 8–20 євро/рік із найбільш імовірним значенням близько 10 євро/рік і подані – функція *PDF* має «трикутну» форму (рис. 2, в).

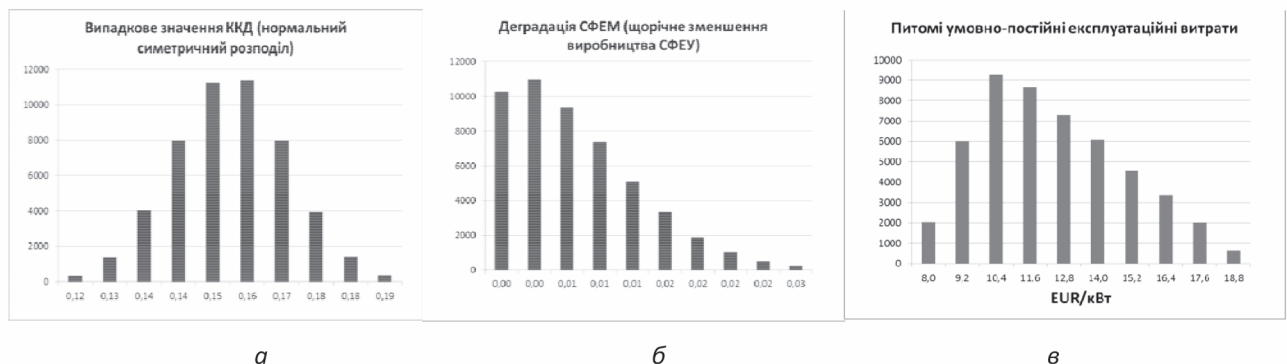


Рис 2. Функції щільності розподілу випадкових значень параметрів моделі СФЕУ

Імовірні числові інтервали значень інших мінливих параметрів ДСМ СФЕУ, обрані для отримання співставних результатів моделювання ймовірнісними методами, у межах яких здійснено стохастичний процес їх вибірки, адаптовано до умов функціонування в межах географічних широт України [21]. Питомі капіталовкладення для такої установки вибираються із діапазону 1300–1600 євро/МВт_{пик} відповідно до публічних прогнозних даних щодо цього показника на середньострокову перспективу до 2035 року.

Схема розрахункового експерименту. Для одержання серій числових розв'язків моделі за методом точкового оцінювання (*PEsM*) вважатимемо вхідні параметри розподілені: рівномірно (серія I) і за нормальним законом (серія II) із показниками розподілів $N = [\mu_{x\zeta}, \sigma_{x\zeta}]$, $\zeta = 1, n$; для обох випадків число вхідних параметрів моделі, що змінюються незалежно, становить $n = 23$.

Несиметричні властивості розподілів статистичних і прогнозних значень чотирьох «керуваних» мінливих параметрів, включно номінальної ставки дисконтування R , описано за допомогою *PDF*-функцій «трикутної» форми (рис. 2, в). Алгебраїчні вирази для обчислення моментів несиметричного розподілу «трикутної» форми, придатні для обчислень за методом *PEsM*, подано в табл. 1 (a, b, c – абсциси вершин трикутника *PDF*).

Проміжний розрахунок за детермінованою моделлю виконано для фіксованих центральних значень вибраних інтервалів мінливих параметрів ДСМ, що дає змогу співставити

числові оцінки стохастичних змінних відносно детермінованої точки у першому наближенні.

Результати. Числові значення оцінок шуканої випадкової функції (собівартостей і середньої ціни) за варіантами експерименту на основі ДСМ СФЕУ із варіацією 23-х параметрів, випадкові значення яких змінюються незалежно (є некорельованими), занесено до табл. 2.

Співставні результати імітаційного моделювання, отримані за допомогою ДСМ СФЕУ, свідчать про принципову можливість отримувати імовірні середньозважені цінові показники проєктованих Е–ВДЕ за методами *MCSim* та *PEsM* у випадку застосування аналітичних записів функцій щільності *PDF* для розподілів параметрів детерміновано-стохастичної моделі. Застосування таких ДСМ у поєднанні з бажаними способами амортизації основних засобів суттєво підвищує точність розрахункових цінових оцінок енергетичного об'єкта (числові значення «Середня_MODEL») порівняно з записами моделей детермінованого типу (відображено оцінками «Середньозважена_ANNUITY»).

Остаточні висновки щодо адекватності застосування ДСМ для техніко-економічного дослідження такого об'єкта Е–ВДЕ слід формулювати на підставі глибших результатів кореляційного аналізу, отриманих шляхом врахування взаємозалежностей технологічних та економічних параметрів такого об'єкта. Уточнені статистичні дані щодо чисельних значень мінливих параметрів зазвичай отримують експериментально за спеціальними програмами досліджень діючих енергетичних об'єктів.

Таблиця 1 – Моменти *PDF*-функцій трикутної форми: a, b, c – абсциси вершин «трикутника» гістограми розподілу мінливого параметра моделі об'єкта

Характеристика розподілу	Аналітичний вираз для обчислень моментів розподілу мінливих параметрів моделі з трикутною формою <i>PDF</i>
Перший момент	$M_1(x) = \mu_x = \frac{1}{3}(a + b + c)$
Другий момент	$M_2(x) = \frac{1}{6}(a^2 + b^2 + c^2 + ab + bc + ac)$
Дисперсія	$D(x) = M_2(x) - \mu_x^2 = \sigma_x^2 = \frac{1}{18}(a^2 + b^2 + c^2 - ab - bc - ac)$
Третій момент	$M_3(x) = \frac{1}{10}[a^3 + b^3 + c^3 + a^2(b + c) + b^2(a + c) - c^2(a + b) + abc]$

Таблиця 2 – Детерміновано-стохастична модель СФЕУ, змонтована на даху 1,1–2,0 МВт_{пік}: співставні результати розрахункових експериментів за методами Монте-Карло (*MCSim*, 10 тис. ітерацій) та точкового оцінювання (*PEsM*, $n = 23$)

Варіанти організації розрахункового експерименту показників СФЕУ		Розрахункові значення змінних моделі СФЕУ 1,1 – 2,0 МВт _{пік} , змонтованої на даху					
		Собівартість виробленої електроенергії: очікуване середнє $M(y)$, євро/МВт-год; коефіцієнт варіації $v(y) = \sigma(y)/M(y)$, %				Середня ціна електроенергії, євро/МВт-год	
		Середня MODEL		Середньозважена ANNUITY		збут за «зеленим тарифом»	
		$M(y_1)$	$v(y_1)$	$M(y_3)$	$v(y_3)$	$M(y_4)$	$v(y_4)$
Для центральних значень вхідних параметрів (детермінована модель): $\mu_{x_i}, \zeta = 1, 2, \dots, 23$		106,06	0,0	161,69	0,0	229,16	0,0
Для рівномірно розподілених параметрів моделі, $n = 23$	<i>MCSim</i>	105,99	19,93	169,07	16,16	228,38	15,11
	<i>PEsM</i>	107,37	20,96	161,22	18,33	231,90	13,87
Для нормально розподілених параметрів моделі, $n = 23$	<i>MCSim</i>	104,70	17,90	167,43	13,78	228,11	15,11
	<i>PEsM</i>	106,81	18,80	161,11	16,34	231,22	12,88

ВИСНОВКИ

1. На основі системного погляду на проблему дослідження об'єктів енергетики з мінливими технологічними показниками, специфічні задачі цієї сфери досліджень запропоновано розрізняти за властивостями випадкових параметрів і змінних математичної моделі, які формально визначаються: а) за наявністю і принциповою можливістю використати статистичну (історичну) інформацію щодо поведінки цих мінливих параметрів, а також б) за часовим інтервалом осереднення випадкових параметрів і шуканих змінних.

2. Для відомих математичних методів техніко-економічних досліджень енергетичних об'єктів з мінливими параметрами запропоновано класифікаційну схему і наголошено на перспективах застосування гібридних моделей, що поєднують в собі практичні переваги широкочисельних ймовірнісних методів.

3. Результати числових розрахунків, виконаних для співставлення ефективності застосування методів Монте-Карло та точкового оцінювання за точністю та витратами часу на розрахункові експерименти, демонструють достатню точність розрахованих оцінок показників, отриманих неітераційним методом *PEsM* за швидким алгоритмом. Алгоритм може бути

ефективно пристосований для пошуку оптимальних рішень в задачах з об'єктами Е–ВДЕ.

1. *Стогній Б.С.* Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні / Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, А.В. Праховник, С.П. Денисюк // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 5. – С.52–67.
2. *Кириленко О.В.* Проблеми інтеграції відновлюваних джерел електроенергії в «слабкі» електричні мережі / О.В. Кириленко, В.В. Павловський, Л.М. Лук'яненко, І.В. Трач // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 3. – С.25–26.
3. *Savulescu S.C.* Real-time stability assessment in modern power system control centers // IEEE Press, Series on Power Engineering. – John Wiley&Sons, 2009. – 2nd.ed. – 425 p.
4. *Павловський В.В.* Стохастичне моделювання режимів вітрових електростанцій / В.В. Павловський, Л.М. Лук'яненко, А.О. Стелюк, І.С. Гончаренко, О.В. Ленґа // Відновлювана енергетика. – 2013. – № 1. – С. 58–68.
5. *Jamil M.* Techno-Economic Feasibility Analysis of Solar Photovoltaic Power Generation: A Review / M.Jamil, Sh. Kirmani, M. Rizwan // Smart Grid and Renewable Energy. – 2012, No. 3. – p.266–274.

6. Костюк В.О., Охріменко І.А. Ханицька О.О. Оцінка ефективності інтегрованої геліоколекторної системи гарячого водопостачання на основі моделі життєвого циклу // Наукові праці ДонНТУ. Серія "Електротехніка і енергетика". – 2014. – № 1(16). – С.95–100.
7. Костюк В.О. Техніко-економічні оцінки виробництва електроенергії фотоелектричними станціями і проблема валоризації відновлюваних джерел енергії в Україні / В.О. Костюк, С.В. Шульженко, І.А. Охріменко // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 5. – С.59–61.
8. Мхитарян Н.М. Комплексное использование энергии возобновляемых источников / Н.М. Мхитарян, С.О. Кудря, Л.В. Яценко та ін. // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 17. – С.15–22.
9. Dufo-Lypez R., Bernal-Agustinn JL. Multi-objective design of PV–wind–diesel–hydrogen–battery systems // Renewable Energy. – 2008, Volume 33, Issue 12. – Pp.2559–2572.
10. Ashok S. Optimized model for community based hybrid energy system / Renewable Energy. – Elsevier, 2007. – No 32. – Pp. 1155–1164.
11. Кириленко О.В. Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах / О.В. Кириленко, В.В. Павловський, Л.М. Лук'яненко // Техн. електродинаміка. – 2011. – № 1. – С.46–53.
12. Кириленко О.В. Керування режимом роботи електростанції з відновлюваними джерелами енергії в умовах зміни частоти в енергосистемі / О.В. Кириленко, В.В. Павловський, О.С. Яндульський, А.О. Стелюк // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 4. – С.52–57.
13. Lukianenko L.M. Determination of the optimal placement and capacity of distributed generation // Lukianenko L.M., Goncharenko I.S., Blonska O.V. // 2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – Kyiv, 2014. – Pp. 159–162.
14. Гихман И.И. Теория вероятностей и математическая статистика / И.И. Гихман, А.В. Скороход, М.И. Ядренко. – К.: Вища школа, 1979. – 408 с.
15. Bostan I. Resilient energy systems. Renewables: Wind, Solar, Hydro / Ion Bostan, Adrian Gheorghe, Valeriu Dulgheru et al. – Springer Science+Business Media B.V., 2013. – 507 p.
16. Кузнецов М.П. Застосування нормального розподілу до опису швидкості вітру / М.П. Кузнецов // Відновлювана енергетика. – 2013. – № 2. – С. 53–58.
17. Кузнецов М.П. Імовірнісні характеристики потужності вітроелектричних станцій у складі електроенергетичної системи: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук.: спец. 05.14.08 «Перетворювання відновлюваних видів енергії» / Микола Петрович Кузнецов; Ін-т відновлюваної енергетики НАН України. – К., 2015. – 41 с.
18. Веников В.А. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики: учебник для студентов вузов / В.А. Веников, Э.Н. Зуев, И.В. Литкенс и др.; под ред. В.А. Веникова. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1981. – 288 с.
19. Сакалаускас Л. Нелинейная стохастическая оптимизация методом Монте-Карло / Л. Сакалаускас // Стохастическая оптимизация в информатике. Межвузовский сборник. – С.-Петербург: Из-во С.-Петербургского университета, 2005. – С.190–204.
20. Bottou L. Stochastic Learning. Lecture. NEC Labs of America, Princeton NJ, USA. – 2003. – 22 p.
21. Костюк В.О. Модифіковані схеми розрахунку нормованої ціни виробництва в задачах детерміновано-стохастичного моделювання нових електрогенерувальних об'єктів / В.О. Костюк // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2015. – № 2. – С.64–77.
22. Крамер Г. Математические методы статистики. – М.: Мир, 1975. – 648 с.
23. Perninge M. Modeling the uncertainties involved in net transmission capacity calculation. Licenciate Thesis, KTH School of Electrical Engineering, Stockholm, Sweden. – 2009. – 107 p.
24. Кирик В.В., Губатюк О.С. Регулювання режиму напруги мережі з джерелами розподіленої генерації / В.В. Кирик, О.С. Губатюк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2013. – № 1. – С. 125–128.
25. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л.А. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
26. Податковий Кодекс України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2755-17>.

Надійшла до редколегії: 10.08.2015