

МОДИФІКОВАНІ СХЕМИ РОЗРАХУНКУ НОРМОВАНОЇ ЦІНИ ВИРОБНИЦТВА В ЗАДАЧАХ ДЕТЕРМІНОВАНО- СТОХАСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НОВИХ ЕЛЕКТРОГЕНЕРУВАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ

Розглядаються практичні аспекти застосування схем розрахунку оцінок техніко-економічних показників електрогенерувальних установок з відновлюваними джерелами енергії за принципом середньозваженої (нормованої) ціни виробництва – для умов їх функціонування, передбачених українським законодавством. Невизначеність прогнозних технічних і вартісних оцінок показників за проектом спорудження сонячно-фотоелектричної станції (СФЕС) в Україні, яку пов'язують із використанням традиційного детермінованого підходу, запропоновано знизити шляхом програмно-аналітичного врахування мінливих технологічних і економічних показників через параметри керованого розподілу їх випадкових значень в структурі детерміновано-стохастичних економіко-математичних розрахункових моделей. Наведено приклади розв'язання задач для СФЕС методами Монте-Карло (MCSim) й точкового оцінювання (PEsM). Чисельні результати моделювання є придатними для співставлення й використання у подальшому для розв'язування складніших оптимізаційних задач.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, розрахунок нормованої ціни, життєвий цикл, детерміновано-стохастична модель, ймовірнісні методи, дисперсійний аналіз.

У дослідженнях [1-3] техніко-економічних показників енергопостачальних систем з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) застосовано розрахункові моделі за схемою визначення нормованої ціни виробництва енергії (фактично, середньозваженої собівартості – *Levelised Energy Cost*; для позначення й артикуляції вживають акронім *LEC*, також *LCOE* – *Levelised Cost of Electricity*). Поширеним є вжиток поняття «моделі життєвого циклу» для позначення розрахункових схем, кінцевою метою застосування яких є отримання прогнозних значень обсягів та цінних оцінок технологічних об'єктів енергетики. Економіко-математичні моделі, побудовані на основі поняття життєвого циклу, є придатними для розв'язання задач техніко-економічного аналізу об'єктів енергетики на «постанційному» рівні й мають подальшу перспективу застосування у поєднанні зі складними ринковими моделями балансового типу, призначеними для дослідження проблем секторального рівня економіки [4].

Метою цієї роботи є продемонструвати можливості детермінованих та детерміновано-стохастичних моделей енергетичних устав для обчислення уточнених оцінок обсягів і собівартості електрогенерування, а також цін на вироблену електроенергію за умов застосування шкали «зелених тарифів», встановлених в Україні для сонячних фотоелектричних станцій середньої потужності, зокрема.

Особливості аналітичних записів моделі «життєвого циклу». Центральна постановка задачі побудови такої розрахункової моделі, яку формулюють для вичерпного аналізу прогнозних техніко-економічних показників енергетичного об'єкта, полягає у забезпеченні значення кумулятивного доходу від збуту виробленої енергії через розрахунок її нормованої ціни $L(\tau)$ у розрізі по періодах життєвого циклу об'єкта (життєвий цикл становить n таких періодів з номером τ , $\tau = 1, n$) – за дотримання певних значень показника внутрішньої ставки дохідності *IRR* (*Internal Rate of Return*). В контексті інвестиційних задач показник *IRR* також іменують внутрішньою ставкою дохідності на дисконтований грошовий потік – *DCFROR*, або просто *ROR* – *Rate of Return* [4].

Практикою застосування модельних конструкцій для розрахунків за схемою *LEC* [5] продемонстровано можливості отримання прогнозних оцінок нормованої собівартості електроенергії для традиційних і нових технологій. Загалом різні (з огляду на широке число проектних реалізацій) результати відображають специфіку поглядів авторів-дослідників щодо умов локальних ринків, оскільки конкретний запис моделі залежить від ступеню деталізації наявних даних про умови функціонування досліджуваних об'єктів, що проектуються або вже функціонують. Певна невизначеність щодо прогнозних техніко-економічних показників, неточності та відмінності проектних реалізацій зумовлює необхідність подання вартісних оцінок у межах їх ймовірнісних інтервалів [6].

Більшість якісних досліджень, опублікованих протягом 2010-2013рр., містять застереження вступного розділу, де ретельно зазначено правила й економічні умови, за яких виконано співставні

техніко-економічні розрахунки [7, 8], також зазначено перелік джерел використаної статистичної інформації економічного змісту. Зазвичай дослідники наголошують на обов'язковості застосування ринкових процедур щодо визначення усіх компонентів вартості виконуваних робіт на всіх стадіях проекту, починаючи з особливостей вибору земельної ділянки – з урахуванням необхідності її підготовки, утилізації залишків існуючих конструкцій у разі потреби, щорічної плати за землекористування. До проектної вартості включають розрахункові оцінки витрат на проектування, постачання обладнання; на будівельно-монтажні роботи з урахуванням умов роботи персоналу компанії-забудовника, на експлуатаційний супровід протягом гарантійного терміну. Аналізують умови післягарантійного обслуговування, рівень і порядок оплати праці – закінчуючи умовами страхування різноманітних ризиків тощо. Додаткові витрати власника, пов'язані з під'єднанням об'єкта до розподільної мережі, управління проектом спорудження, витрати початкового періоду і матеріально-технічне забезпечення (запасні частини, технологічні рідини тощо) зазвичай не охоплюють проектним кошторисом [6].

Особливо важливим чинником, який впливає на достовірність отриманих техніко-економічних оцінок, є коректність припущень щодо поведінки фінансово-економічної системи (державної, світової). Втім, попри те, що для обчислення грошових потоків протягом життєвого циклу енергетичного об'єкта ці моделі охоплюють прогностичні облікові дані про більшість передбачених розробником господарських операцій пов'язаних з і спорудженням і експлуатацією об'єкта, за структурою ці моделі зазвичай є однопродуктовими, відтак значно простішими для практичних інженерних оцінок, порівняно з багатодуктовими оптимізаційними моделями балансового типу [9].

В моделях використовуються такі терміни для позначення вартості грошей і, відповідно, цін: *дійсні* і *номінальні*. «Дійсні» відображають реальну поточну спроможність (силу) грошових потоків у незмінній (фіксованій) валюті. «Номінальні» – враховують підвищення цін на товари і послуги в часі, тобто цінову «ескалацію». У разі, якщо розрахунки здійснюються у грошових одиницях валюти, яка має дійсну вартість, на відміну від номінальної, значення відсоткової дохідності капіталу так само мають бути дійсними («очищеними» від ескалації, зумовленої інфляційними явищами). Дійсні відсоткові ставки ніколи «не спостерігаються» – вони визначаються на підставі співвідношення:

$$(1 + R) = (1 + r) \times (1 + i), \quad (1)$$

де застосовані позначення: $R, \%$ – номінальна ставка (дисконт, або середня кредитна ставка, за якою банківська установа може надати позику), r – дійсна чи фіксована ставка, $i, \%$ – показник ескалації цін (або ж темп інфляції, зумовлений зростанням споживчих цін і/або цін промислових виробників – у подальшому «інфляція»). Значення ставок у виразі (1) обчислюють у відносних одиницях, задають у %.

Середньозважену собівартість виробленої енергії $LCOE$ (L_{COE}) визначають в термінах поточної (фіксованої на дату приведення) вартості грошей PV (*Present Value*) для номінального значення потужності GW енергоустанови з урахуванням розрахункових значень коефіцієнта використання встановленої потужності C_{ft} (КВВП) для кожного планового року t : \Leftrightarrow т експлуатації об'єкта електрогенерації. Для цього розглядають рівняння балансу сумарних приведених грошових потоків надходжень і витрат, записане для розрахункового (прогностичного) терміну експлуатації тривалістю n років:

$$PV_{revenue} = PV_{cost}, t = \overline{1, n}. \quad (2)$$

Розрізняють три окремі визначення оцінок нормованої ціни, які однаково успішно застосовують для побудови моделей за схемою $LCOE$, відтак ці визначення потребують правильного тлумачення у записях модельних конструкцій, використаних для співставлення числових результатів моделювання:

1) оцінка *номінальної* нормованої ціни. Всі витратні компоненти PV_{cost} визначають у номінальній вартості грошей з урахуванням уявлень щодо прогностичних річних рівнів інфляції. Вираз для визначення нормованої ціни (сталого значення для всіх періодів t циклу) з врахуванням (2) отримують у вигляді:

$$L_{COE} = PV_{cost} \left/ 8760 \cdot GW \cdot \sum_t \frac{C_{ft}}{(1 + R)^t} \right. , \quad (3)$$

причому для приведення грошових потоків до обраної дати застосовують номінальне значення дисконту R .

2) оцінка *дійсної* нормованої ціни – також є сталим значенням для всіх періодів t циклу. Щорічні експлуатаційні витрати $C_t^{O\&M}$ в структурі витратних компонент PV_{cost} визначають у дійсній вартості грошей на дату приведення вартості за рівнянням (2), тобто «очищеними» від інфляції $i \neq 0, \%$. Для цього номінальні прогностичні значення компонент $C_t^{O\&M}$ записують через їх дійсні прогностичні значення у t -му році експлуатації, застосувавши множник $(1 + i)^t$:

$$PV_{\text{cost}} = C^{\text{cap}} + \sum_t^n C_t^{\text{O\&M}} \left[\frac{1+i}{1+R} \right]^t = C^{\text{cap}} + \sum_t^n \frac{C_t^{\text{O\&M}}}{(1+r)^t}, \quad (4)$$

де r – дійсна ставка дисконту, %, визначається за співвідношенням (1); C^{cap} – загальна сума капітальних витрат на проектування будівництво й монтаж об'єкта, з урахуванням обслуговування заборгованості за користування банківською позикою. Нормовану ціну визначають за виразом (3) з урахуванням (4), причому в (3) слід прийняти $R = r$.

3) оцінка *номінальної* нормованої ціни, отриманої на основі фіксованої *дійсної* з урахуванням дії інфляційних чинників. Для її розрахунку поточні експлуатаційні витрати $C_t^{\text{O\&M}}$ враховують з показником річної інфляції $i \neq 0$ в термінах номінальної вартості грошей:

$$L_t = L_{\text{COE}} \cdot (1+i)^t, \quad (5)$$

Значення нормованої ціни для випадку врахування явища поступової деградації продуктивності установки (ефективну потужність диференційовано за роками) обчислюють безпосередньо за виразом

$$L_{\text{COE}} = PV_{\text{cost}} / 8760 \cdot \sum_t^n \frac{GW_t \cdot C_{ft}}{(1+r)^t}. \quad (6)$$

У виразах (3)–(6) особливу увагу слід приділити порядкові визначення показника C^{cap} , встановивши дату приведення грошових потоків (наприклад такою, що відповідає проектній даті початку експлуатації об'єкта, [1, 2]).

На рис. 1 зображено криві нормованої ціни на електроенергію для певних умов ринку електроенергії (ставки дисконтування $R = 10,0\%$, середнє значення інфляції $i=2,5\%$), які графічно пояснюють зміст наведених визначень нормованої ціни. Шкали дійсної і номінальної вартостей співпадають.

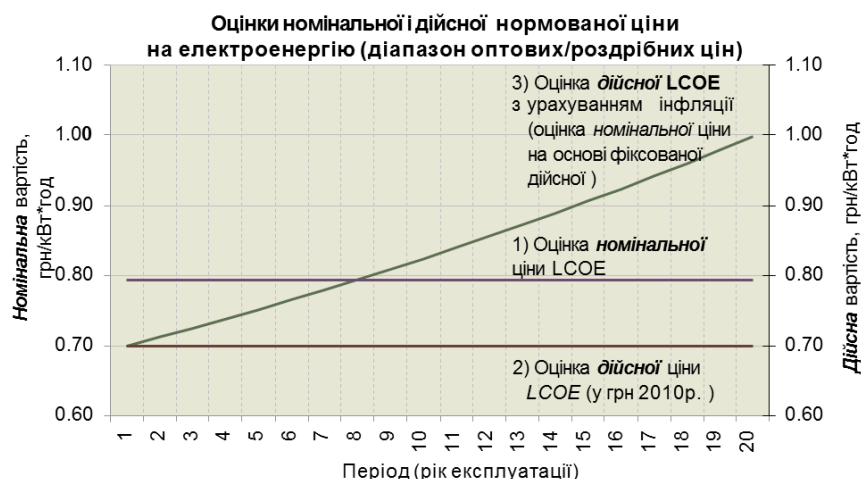


Рис. 1 Графічна ілюстрація вживаних визначень нормованої ціни

Приклад 1. Вартісні оцінки технологій сонячної фотоелектричної станції (СФЕС) за детермінованою моделлю з урахуванням прогностичних економічних показників. З метою формування розв'язків детермінованої моделі гіпотетичного об'єкта, оберемо енергетичну установку типу «СФЕС, змонтована на даху» потужністю 1,0 МВт_{пик}, яка спроектована з урахуванням економічних умов господарювання в Україні, зокрема для розташування у межах географічних широт міста Києва.

Техніко-економічні й вартісні показники СФЕС, взяті до розрахунків як орієнтовні прогностичні номінальні значення на основі ринкових цінових пропозицій на обладнання і вартість послуг з монтажу і обслуговування, з використанням фотоелектричних модулів СФЕМ на основі полікристалічного та монокристалічного кремнію [7, 8].

Серії значень нормованої ціни на електроенергію та кумулятивного грошового потоку отримані в результаті варіантних розрахунків для різних значень капітальних витрат та дисконту – з урахуванням витрат на обслуговування банківської позики протягом п'яти років за схемою щорічних виплат рівними частками, шляхом ануїтетних платежів. Прийнято, що експлуатація СФЕС розпочинається у 2015-му році, амортизаційні відрахування за основними засобами здійснюється прямолінійним методом [8], а ціну збуту електроенергії СФЕС до оптового ринку електроенергії встановлено на рівні «зеленого» тарифу, передбаченому законодавством України (у подальшому – «ЗУ»).

Для аналізу динаміки грошових потоків в номінальних грошах обрано запис моделі на основі виразів (5)-(6). Цінові оцінки виконані для розрахункового терміну експлуатації $n = 20$ років, за середнього протягом цього терміну інфляції $i = 4,0\%$ і номінального дисконту $R = 14\%$ та вартості банківської позики $RD = 9,0\%$; значення «зеленого» тарифу на електроенергію наземних СФЕС в Україні зображено верхніми кривими: ступінчаста для випадку застосування певного алгоритму зміни у часі (регулювання) коефіцієнта зеленого тарифу для обраного типу СФЕС).

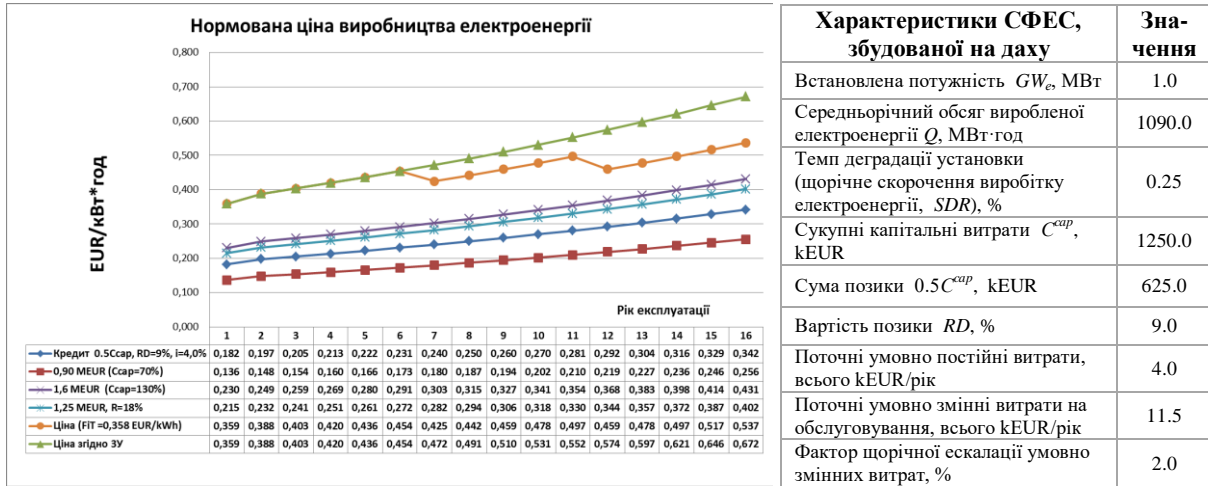


Рис. 2 Розрахункові нормовані ціни електроенергії СФЕС і параметри моделі

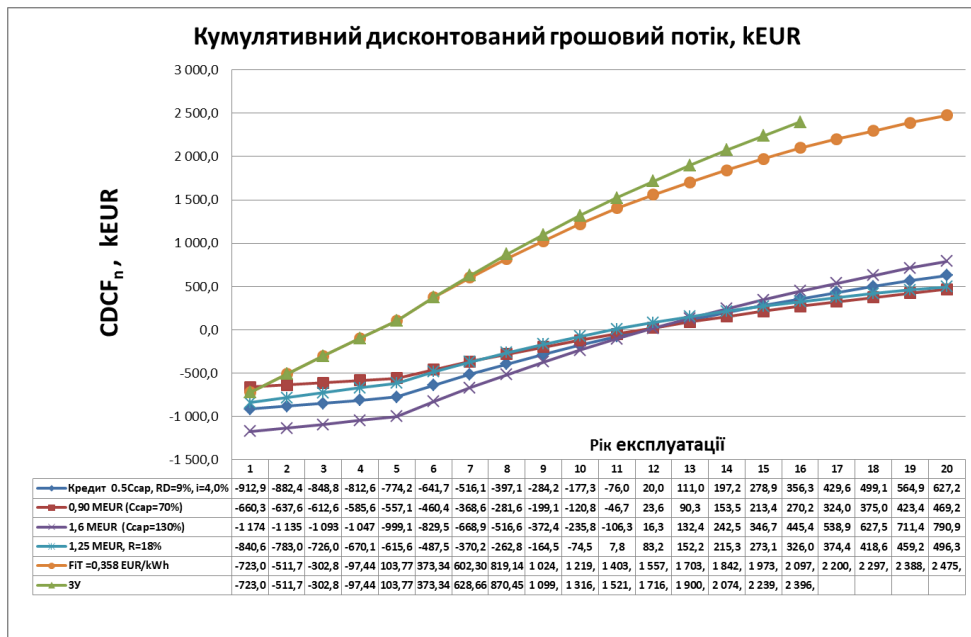


Рис. 3 Розрахункові криві кумулятивного дисконтованого грошового потоку

Насамперед, на рис. 2 зображено криві розрахованих нормованих цін: перші чотири серії – нормована собівартість; наступні дві – нормовані ціни, причому остання – за умови збуту на рівні зеленого тарифу згідно ЗУ. В таблиці рис. 2 наведено основні розрахункові показники детермінованої моделі. Відповідні криві приведених кумулятивних грошових потоків ($CDCF_n$ – *Cumulated Discounted Cash Flows*), сформованих від збуту виробленої електроенергії протягом n років за цінами рис. 2 зображено на рис. 3.

Поверхневий аналіз динаміки розрахованих грошових потоків свідчить про високу дохідність проекту (фактично, на рівні надприбутків), відтак принципово постає питання можливості застосування раціонального регулювання коефіцієнтів зеленого тарифу для технології електрогенерування СФЕС вже починаючи з п'ятого року періоду експлуатації [2]. Зображена на рис. 3 крива, що відповідає деякому способу м'якого регулювання дохідності за проектом шляхом періодичного ступінчастого зниження

пільгового тарифу (рис.2), фіксує той факт що скупний дохід отриманий від збуту за діючим зеленим тарифом (ЗУ) протягом 16-и років є так само досяжним наприкінці повного життєвого циклу СФЕС (розрахунковий термін експлуатації становить $n = 20$ років).

Детермінована модель СФЕС, числові результати розрахунків за якою подані вище, не відображає повною мірою фінансових ризиків інвестора, відтак породжує сумніви щодо успішності проекту за умов підвищеної волатильності фінансових показників в умовах загострення економічної кризи в Україні. Це логічно пов'язується із використанням в модельних записах детермінованої моделі фіксованих розрахункових значень технологічних параметрів, які в дійсності мають *мінливий характер*, зумовлений примхами природи чи вадами прогнозних оцінок щодо вартісних показників компонентів електрогенерувальної системи.

Детерміновано-стохастичні економіко-математичні моделі життєвого циклу із використанням ймовірнісних методів. Ймовірнісні методи слушно пов'язують з методологічною основою стохастичного факторного аналізу, зокрема дисперсійного й кореляційного аналізу [10,11].

За цією методологією побудова моделі зводиться до запису функції n випадкових значень розрахункових параметричних змінних (параметрів) $y_m = f(X)$, причому X – вектор, що містить мінливі (слабко обумовлені) параметри у вигляді множини: $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, а функція щільності розподілу (у подальшому – “PDF” – *Probability Density Function*) для вектора X є відомою.

Функція y_m може бути задана неявно, наприклад реалізована шляхом структурованих записів у табличному процесорі з метою подальших аналітичних досліджень, наприклад, методом дисперсійного аналізу. В загальному випадку функція y_m є векторною, і тоді шуканий вектор змінних Y_m є таким що містить довільне число компонент – розрахункових змінних детерміновано-стохастичної моделі (ДСМ):

$$Y_m = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}.$$

Задача полягає у знаходженні функцій PDF для y_m , або обмежується обчисленнями стандартних параметрів розподілу, якщо кількість ітерацій є достатньо великою відповідно до закону великих чисел [11].

Метод Монте-Карло (Monte Carlo Simulation, у подальшому – MCSim). Для спрощення викладу обмежимося розглядом одновимірної функції $y_m = y$. Розрахунковий процес за цим методом достатньо просто реалізувати за таким покроковим алгоритмом:

Крок 1. Встановити початкове значення лічильника ітерацій $k = 1$.

Крок 2. Здійснити вибірки для компонент вектора X з використанням PDF для кожного компонента x_i .

Крок 3. Розрахувати значення функції y_k на кроці k для вектора $X = X_k$:

$$y_k = f(X_k).$$

Крок 4. Розрахувати очікуване значення Y як середнє (математичне очікування), також середньоквадратичне відхилення значень функції y для всіх попередніх ітерацій $Y = \{y_k | k = 1, 2, \dots\}$:

$$M(y) = (1/k) \sum_k y_k, \quad \sigma(y) = M(Y^2) - M^2(Y). \quad (7)$$

Крок 5. Перевірити умову завершення ітераційного процесу. Такою умовою може бути число виконаних ітерацій n порівняно із попередньо заданим, зокрема. Для продовження ітераційного процесу: збільшити значення лічильника на «1»: $k = k + 1$, перейти до Кроку 2.

Крок 6. Завершення процесу.

Критерієм завершення ітераційного процесу пошуку для задач цього дослідження є задана кількість ітерацій стохастичного процесу (числа розрахункових значень $y_k, k = \overline{1, n}$).

В якості компонент вектора розрахункових змінних детерміновано-стохастичної моделі СФЕС обираємо значення цінних оцінок за схемою нормованої ціни: собівартості, обчислені з врахуванням особливостей структури обліку нормованих витрат, а також тарифної ціни на вироблену електроенергію СФЕС.

Метод Монте-Карло підтримує всі можливі форми функцій щільності розподілу PDF параметрів моделі і ця властивість є однією з його вагомим переваг, адже фізико-технічні параметри енергоустанов на основі ВДЕ можуть набувати випадкових значень, розподілених довільно (криві їх PDF-функцій можуть мати будь-яку форму в загальному випадку). В інженерній практиці найчастіше описують статистичні властивості техніко-економічних показників з використанням *несиметричних* розподілів: із «трикутною» формою функції щільності розподілу або з несиметричною формою функції щільності типу PERT-

розподілу (версія Бета-розподілу [12]). Обидва види згаданих несиметричних розподілів задаються трьома характерними значеннями випадкової величини (мінливого показника): його мінімальним і максимальним значеннями, які відповідають нульовій щільності ймовірності реалізацій випадкового процесу, і найбільш очікуваним (бажаним) значенням x_0 , якому відповідає максимальне значення функції PDF – щільності розподілу випадкових значень мінливого показника.

Значення ймовірності реалізації випадкового значення параметра моделі з несиметричною формою одновимірної функції щільності отримаємо, застосовуючи *метод зворотного перетворення*. Відомо, що для двох довільних розподілів імовірності справедливим є співвідношення:

$$\xi_2 = \Pi_2^{-1}(\Pi_1(\xi_1)), \quad (8)$$

де $\Pi_1(\xi_1)$ – відомий закон розподілу випадкового значення ξ_1 ; $\Pi_2^{-1}(p)$ – функція обернена до $\Pi_2(\xi_2)$, p – ймовірність набуття параметром випадкового значення ξ . У разі, якщо перший (відомий) закон розподілу є *рівномірним*, тобто, $\Pi_1(\xi) = \xi \quad \forall \xi \in [0,1]$, отримаємо:

$$\xi_2 = \Pi_2^{-1}(\xi). \quad (9)$$

Тут функція $\Pi_2^{-1}(\xi)$ є такою, що $\Pi_2^{-1}(\Pi_2(\xi)) = \xi$.

Зокрема, для параметра x з «трикутною» формою PDF -функції (див. рис. 4, де несиметричну PDF -форму щільності утворено двома прямими лініями, які формують вершину PDF -функції для найбільш очікуваного значення x_0) за цим методом знайдемо значення його ймовірності $s_\Delta(p)$ через ймовірність його рівномірного розподілу $p \in [0, 1]$ за наступними виразами:

$$s_\Delta(p) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{1+c/a}} \cdot p & \forall p \in [0, t_0]; \\ 1 - \sqrt{\frac{c/a}{1+c/a}} \cdot (1-p) & \forall p \in]t_0, 1]. \end{cases} \quad (10)$$

Відповідно до позначень, прийнятих на рис. 4, для показника x , випадкові значення якого описуються $PERT$ -розподілом (його несиметричну функцію щільності PDF утворено двома відтинками кривих нормального розподілу з різними параметрами, що визначаються в процесі зворотного перетворення), отримаємо ймовірності $s_{PERT}(p)$ у вигляді:

$$s_{PERT}(p) = \begin{cases} \frac{1 + \frac{1}{3} \cdot \Phi^*^{-1}(1 + \tilde{p} - \Phi^*(3))}{(1+c/a)} & \forall p \in [0, t_0]; \\ \frac{1 + \frac{1}{3} \cdot c/a \cdot \Phi^*^{-1}\left[\frac{1}{2} + \frac{1}{c/a} \cdot \left(\tilde{p} - \left(\Phi^*(3) - \frac{1}{2}\right)\right)\right]}{(1+c/a)} & \forall p \in]t_0, 1], \end{cases} \quad (11)$$

де $\Phi^*(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{\xi^2}{2}} d\xi$ – функція Лапласа із відомими властивостями [11]; $\tilde{p} = \frac{p}{2}(1+c/a)$.

Справедливість записаних співвідношень легко перевірити застосовавши підстановку виразу для оберненого перетворення: $x(t) = (x_0 - a) + (c + a)t, \quad \forall t = [0, 1]$.

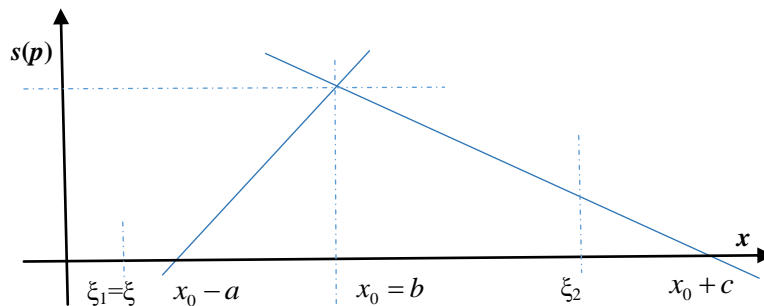


Рис. 4 Визначення ймовірності реалізації ξ_2 випадкового параметра x з кусково-лінійною («трикутною») формою PDF -функцією щільності розподілу через його рівномірно розподілене значення $\xi_1 = \xi$.

Метод точкового оцінювання. В спеціальній літературі відомий як *Point Estimate Method* (у подальшому – *PEsM*). 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 і є реалізацією методу моментів, запропонованого К. Пірсоном [13].

Метод точкового оцінювання формалізують з використанням записів для областей імовірних значень $\gamma_{\zeta,i}$ та ймовірних концентрацій $\pi_{\zeta,i}$ з використанням значень третього моменту $M_3(x_{\zeta})$ для кожного невизначеного параметра x_{ζ} ; причому $i=1,2$. Алгоритм розрахунків є таким:

Крок 1. Початкові умови: $M(y) = M(y^2) = 0$, $\zeta = 1$, причому $\zeta = \overline{1, n}$.

Крок 2. Визначення областей імовірних значень $\gamma_{\zeta,i}$ та ймовірних концентрацій $\pi_{\zeta,i}$:

$$\gamma_{\zeta,i} = \frac{M_3(x_{\zeta})}{2\sigma_{x_{\zeta}}^3} + (-1)^{i+1} \sqrt{n + \frac{1}{2} \left(\frac{M_3(x_{\zeta})}{2\sigma_{x_{\zeta}}^3} \right)^2}, \quad \pi_{\zeta,i} = (-1)^i \frac{\gamma_{\zeta,3-i}}{2n \sqrt{n + \frac{1}{2} \left(\frac{M_3(x_{\zeta})}{2\sigma_{x_{\zeta}}^3} \right)^2}}, \quad (12)$$

де $M_3(x_{\zeta})$ – момент третього порядку параметра x_{ζ} .

Крок 3. Визначити множину точок концентрації $x_{\zeta,i}$ за виразом:

$$x_{\zeta,i} = \mu_{x_{\zeta}} + \gamma_{\zeta,i} \cdot \sigma_{x_{\zeta}}, \quad i = 1, 2, \quad (13)$$

де $\mu_{x_{\zeta}}$ і $\sigma_{x_{\zeta}}$ – задані середнє значення й стандартне середньоквадратичне відхилення параметра x_{ζ} , відповідно; причому для більшості реальних фізичних систем варіації компонент вектора параметрів $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{\zeta,i}, \dots, x_n\}$, $i = 1, 2$ мають бути невід’ємними: $x_{\zeta,i} \geq 0$.

Крок 4. Розрахувати математичні очікування $M(y)$ і $M(y^2)$ за виразами:

$$M(y) = M(y) + \sum_{i=1}^2 \pi_{\zeta,i} f(x_1, x_2, \dots, x_{\zeta,i}, \dots, x_n), \quad (14)$$

$$M(y^2) = M(y^2) + \sum_{i=1}^2 \pi_{\zeta,i} \cdot f^2(x_1, x_2, \dots, x_{\zeta,i}, \dots, x_n). \quad (15)$$

Крок 5. Змінити номер невизначеного параметра $\zeta = \zeta + 1$; якщо $\zeta < n$, повернутись до Кроку 2, інакше продовжити і перейти до Кроку 6.

Крок 6. Розрахувати середнє значення змінної y та її середньоквадратичне відхилення:

$$\mu_y = M(y), \quad \sigma_y = \sqrt{M(y^2) - M^2(y)}. \quad (16)$$

Алгебраїчні вирази для обчислення моментів несиметричного розподілу «трикутної» форми, придатні для обчислень за методом *PEsM*, подано таблицею 1. Записи отримані аналітично для функції щільності розподілу *PDF* несиметричного розподілу випадкового параметра, зображеної на рис. 4, шляхом обчислення визначених інтегралів [10] з використанням прийнятих позначень, причому покладено $x_0=b$.

Таблиця 1
Аналітичні вирази, придатні для обчислення моментів несиметричного розподілу мінливого параметра моделі

Параметр розподілу з «трикутною» формою <i>PDF</i>	Аналітичний вираз для обчислень, записаний в термінах позначень, ужитих на рис. 4
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	$M_3(x) = \frac{1}{10}[a^3 + b^3 + c^3 + a^2(b + c) + b^2(a + c) - c^2(a + b) + abc]$

Вірогідні інтервали значень деяких параметрів ДСМ СФЕС

Для СФЕУ, змонтованих на даху та СФЕС відкритого типу	Одиниця виміру	Значення, діапазон	
		Мін.	Макс.
Встановлена пікова потужність СФЕУ та/або СФЕС	МВт _{пик}	1,1	2,0
Питомі капіталовкладення	kEUR/ МВт _{пик}	1,30	1,60
Частка основних фондів групи 4	% / від вартості проекту	90	95
Термін експлуатації (тривалість «життєвого циклу»)	рік	15	20
Деградація СФЕМ (щорічне зменшення виробництва СФЕУ)	%	0,1	0,21
Коефіцієнт корисної дії сонячних модулів (ККД СФЕМ)	%	13	19
Частка умовно-змінних експлуатаційних витрат від вартості об'єкта (без врахування заробітної плати)	% / від вартості проекту	0,8	1,6
Збільшення умовно-змінних витрат з часом	% / рік	2,0	3,0
Питомі умовно-постійні експлуатаційні витрати	EUR/кВт	8,0	16,0
Дисконт номінальний	%	10,0	18,0
Інфляція (цінова ескалація)	%	7,0	10,0

Імітаційне моделювання техніко-економічних показників СФЕС методом MCSim. В основу моделі покладено записи для визначення дійсних нормованих цін за виразом (4). Запис моделі дозволяє серед витрат врахувати амортизаційні нарахування, обчислені будь-яким методом, в тому числі визначеним законодавчою практикою закордоном [14]. У прикладах розглянутих нижче застосовано алгоритм нарахування методом прискореного зменшення залишкової вартості основних засобів 4-ої групи, визначеним Податковим Кодексом України (ПКУ) [15]. Модель враховує всі особливості чинного законодавства України щодо пільгового оподаткування тих суб'єктів господарювання, які експлуатують енергоустанови на основі відновлюваних джерел енергії.

Для об'єкта, розглянутого у *Прикладі 1*, детерміновано-стохастична модель (у подальшому – ДСМ) побудована з урахуванням мінливого характеру сукупності показників (параметрів), які характеризуються певною невизначеністю на етапі формулювання задачі: технічні параметри задані у межах їх очікуваних відхилень від середнього чи бажаного значення, а фінансово-економічні показники – відповідно до прогнозів у межах обраних довірчих інтервалів. Такі параметри в процесі імітаційного моделювання набувають довільних значень завдяки організації ітераційної процедури. В загальному випадку функції щільності розподілу *PDF* цих параметрів задають на підставі наявних статистичних даних, отриманих шляхом лабораторних досліджень, експертних оцінок або очікувань.

Сукупність техніко-економічних параметрів моделі СФЕС у процесі конструювання групують за їх описовим змістом: фінансові, експлуатаційні, режимні. Число мінливих параметрів моделі, варіація яких здійснюється незалежно, визначає дослідник. Для тестових розрахунків цього дослідження число таких параметрів становить 23, причому варіація реального значення ставки дисконтування забезпечується шляхом розрахунку за виразом (1) двох випадкових параметрів – номінального дисконту та інфляції.

Вірогідні інтервали числових значень деяких мінливих параметрів ДСМ СФЕС, обрані для отримання співставних результатів моделювання ймовірнісними методами, подано таблицею 2.

Приклад 2. У цьому прикладі розрахунки кривих щільності розподілу значень собівартості та середньозваженої ціни виробництва СФЕС виконано за методом Монте-Карло, кількість ітерацій стохастичного процесу може становити від 10 тис до 100 тисяч, що є прийнятним для більшості практичних задач.

Тестові розрахунки за ітераційним алгоритмом обчислень методом Монте-Карло виконано з використанням аналітичних записів функцій щільності розподілу (*PDF*) до тих параметрів техніко-економічної задачі, статистичні дані щодо яких є відомими, або визначені частково. Зокрема, значення ККД сонячного фотоелектричного модуля (СФЕМ на основі монокристалічного кремнію) промислові виробники цих компонентів вважають розподіленими нормально навколо моди $M_{\text{ККД}}=16\%$ із стандартним середньо-квадратичним відхиленням $\sigma_{\text{ККД}} = 1\%$ (рис. 5а), коефіцієнт деградації (%/рік) – за несиметричним розподілом із формою щільності *PDF* рис. 5б (так званий *PERT*-розподіл). Водночас, питомі умовно-постійні експлуатаційні витрати на обслуговування устави коливаються в межах від

8÷20 €/рік із найбільш вірогідним значенням близько 10 €/рік і подані – функція PDF має «трикутну» форму (рис. 5в).



Рис. 5 Функції щільності розподілу випадкових значень параметрів СФЕС

Розрахунки виконані для діапазону значень проектної потужності СФЕС $1,1 \div 2,0$ МВт_{пик} (конструктивне виконання – «змонтована на даху»); довільно обране значення потужності для кожної реалізації процесу розподілене рівномірно. Числові інтервали значень параметрів розрахункової моделі, у межах яких здійснено стохастичний процес їх вибірки за методом Монте-Карло, адаптовано до фізичних (природних) та економічних умов функціонування в Україні. Питомі капіталовкладення для такої устави обираються з інтервалу значень 1300÷1800 EUR/ МВт_{пик} відповідно до опублікованих прогнозних показників на середньострокову перспективу до 2035 року [6].

Криві розподілу розрахункових значень собівартості виробленої електроенергії подано на рис. 6а у варіантах для порівняння:

- “Собівартість_MODEL”, EUR/МВт·год – з урахуванням аналітичних записів заданих функцій щільності розподілу обраних параметрів: номінального дисконту, % річних; питомих умовно-постійних витрат на експлуатацію, EUR/кВт; деградації PV-модулів (щорічного зниження обсягів генерування електроенергії PV-панелями) і ККД PV-модулів (СФЕМ),

- “Собівартість_UNIFORM”, EUR/МВт·год – за умов, коли вибіркові значення всіх змінних параметрів розрахункової моделі розподілені рівномірно або нормально (останні два рядки у співставній таблиці 3), однак випадкова вибірка значень цих параметрів моделі здійснюється одноразово й розрахункові значення підтримуються фіксованими, тобто є однаковими для всіх розрахункових періодів (протягом терміну експлуатації – життєвого циклу);

- “Собівартість_ANNUITY”, EUR/МВт·год – за умов, коли значення щорічних дисконтованих витрат за проектом спорудження й експлуатації СФЕС вважати однаковими в межах життєвого циклу (тривалість життєвого циклу є випадковою величиною, див. табл. 2).

Для оцінки форм PDF-кривих результуючих розрахункових розподілів собівартості від нормального розподілу на рисунку пунктирними лініями зображено стандартизовані криві нормального розподілу, побудовані для отриманих за методом Монте-Карло середніх значень та середньоквадратичних похибок собівартості.

Зауважимо, що числові значення стохастичної змінної “Собівартість_ANNUITY” (крива із середнім значенням 151,3 EUR/МВт·год), значення якої обчислені за схемою ДСМ СФЕС, практично відповідають розрахунковим значенням собівартості, отриманим за детермінованою моделлю у *Прикладі 1*: відмінності зумовлені застосуванням прискореного методу нарахування амортизації та вибіркою випадкового значення тривалості життєвого циклу (рівномірно розподіленого у межах від 15 до 20 років) для ДСМ.

На рис. 7 зображено гістограми розрахункової середньозваженої тарифної ціни на вироблену електроенергію СФЕС за двома варіантами: а) у випадку застосування рівномірного розподілу значень параметрів моделі і б) у випадку реалізації процесу згідно моделі з керованою щільністю.

На обох рисунках із збереженням кроку сітки по вертикальній осі (повторюваність реалізацій або частота вибірки випадкового значення) зазначено:

- “Ціна_MODEL” – криві (гістограми) розподілу середньозваженої ціни у випадку застосування певного алгоритму «регулювання» зеленого тарифу з метою зменшення середньої ціни виробника [2];

- “Ціна_ЗУ” – криві розподілу ціни за умов дії зеленого тарифу для обраної СФЕС, визначеного законодавцем, починаючи з 2015 року.

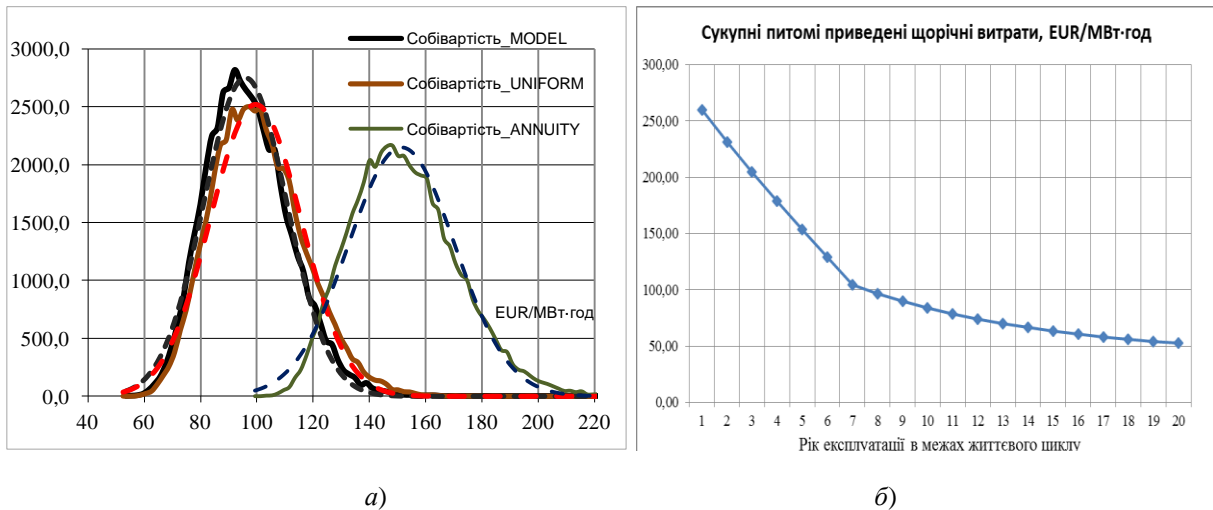


Рис. 6. Чисельні результати моделювання показників за ДСМ СФЕС 1,1 ÷ 2,0 МВт_{пк}, Приклад 2 : а) гістограми розрахованих методом *MCSim* значень собівартості електроенергії, виробленої (*MCSim*, 50 тис. ітерацій); б) крива приведеної собівартості СФЕС 1,1 МВт_{пк} для певної часткової реалізації ДСМ

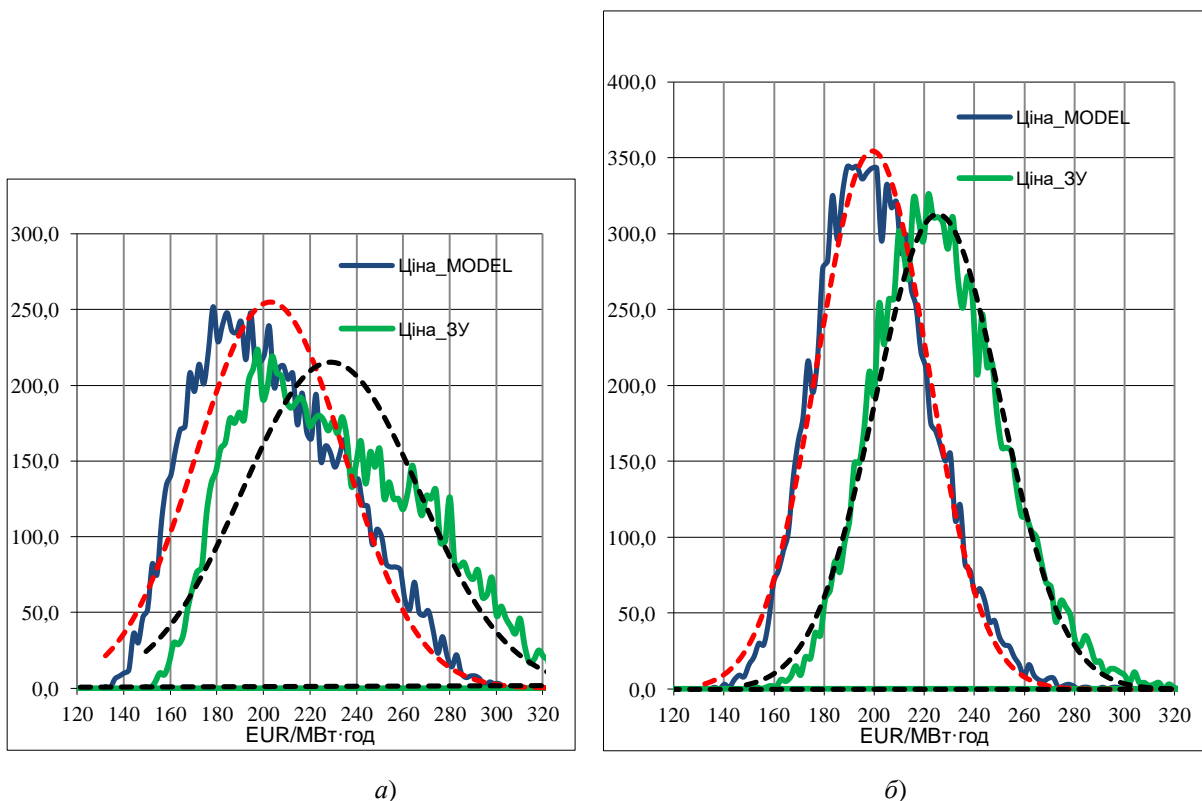


Рис. 7. Гістограми середньозваженої тарифної ціни на електроенергію СФЕС зі встановленою потужністю 0,1 ÷ 2 МВт_{пк}, 10 тис. ітерацій *MCSim*: а) за умови рівномірного розподілення значень параметрів моделі і б) у випадку реалізації процесу згідно моделі з керованою щільністю.

Відмінності форми кривих на рис.7б від рис.7а зумовлені уточненим розподілом розрахункових значень дисконту, ККД (рис. 5а) і деградації (рис. 5б) сонячних панелей. Цілком слушним є висновок про переваги детерміновано-стохастичних моделей з «керованим» розподілом параметрів [3] – таких, де випадкові параметри ДСМ задають уточненими на підставі даних лабораторних досліджень, експертних

оцінок та статистичних даних, отриманих у процесі експлуатації подібних електрогенерувальних об'єктів.

Супутнім результатом детерміновано-стохастичного моделювання, є можливість аналізувати поточні прогнозні витрати за проектом СФЕС шляхом побудови кривих собівартості (щорічних витрат на виробництво одиниці електроенергії у вартості грошей, фіксованій на дату початку експлуатаційного періоду об'єкта) – приклад кривої питомих витрат для однієї з випадкових реалізацій цієї ДСМ зображено на рис. 6б. Крива, отримана за умови прискореної амортизації основних фондів, демонструє помітне зниження питомих витрат у часі. Подібні розрахункові дані часто використовують у практиці техніко-економічного обґрунтування вигоди від реалізації проекту об'єкта з ВДЕ, порівнюючи їх з питомими витратами на підтримання традиційних технологій. Однак, питомі витрати у розрізі по роках не відтворюють повною мірою концепту моделі середньозваженої ціни *LCOE* (1)-(6), відтак не можуть слугувати інструментом для з'ясування дійсних економічних переваг проекту шляхом співставлення.

Моделювання техніко-економічних показників СФЕС методом *PEsM*. З метою подальшого співставлення числових результатів моделювання розрахункові експерименти для ДСМ СФЕС з використанням *PEsM* виконано з урахуванням особливостей задачі у попередньо опрацьованих прикладах. Зазначимо, що для реалізації методу відповідно до алгоритмічної покрокової процедури (10)-(14) у таблиці 2 інтервали випадкових значень параметрів (їх довірчі інтервали) з урахуванням вимог кроку (11) обрано звуженими. Необхідність налаштування інтервалів на вимогу забезпечення невід'ємних числових значень варіацій окремих параметрів у даному випадку слід віднести до недоліків методу *PEsM*.

Крім того, для співставного аналізу результатів у першому наближенні, зокрема з оцінками, отриманими за методом *MCSim* у *Прикладі 2*, випадкові значення параметрів з «керованим» несиметричним розподілом будемо вважати розподіленими за трикутним законом (рис. 4).

Приклад 3. Розв'язки моделі за методом точкового оцінювання *PEsM* отримано для експериментальних наборів даних, для чого вхідні параметри у серіях співставних розрахунків були розподілені: а) рівномірно і б) за нормальним законом $N = [\mu_{x_\zeta}, \sigma_{x_\zeta}]$, $\zeta = \overline{1, n}$; для обох випадків загальне число вхідних параметрів моделі, що змінюються незалежно, становить $n = 23$. Несиметричні властивості розподілів прогнозних значень чотирьох «керованих» мінливих параметрів з «трикутною» *PDF*-формою розподілу, включно номінального дисконту R , визначено за схемою *Прикладу 2* (див рис. 5).

Фактично, цей приклад демонструє можливості застосованих у цьому дослідженні ймовірнісних методів щодо точності отриманих розрахункових даних досліджуваних економіко-математичних ДСМ для дисперсного й глибшого, кореляційного аналізу. Варіанти експериментальних розрахунків за моделлю СФЕС із варіацією 23-х параметрів, випадкові значення яких змінюються незалежно (є некорельованими), описані у таблиці 3. Дані для методу Монте-Карло *MCSim* наведено для випадку 10 тис. ітерацій стохастичного процесу. Проміжний розрахунок за детермінованою моделлю виконано для фіксованих центральних значень обраних інтервалів варіації мінливих параметрів ДСМ, що дає змогу обчислити і співставити розрахункові оцінки стохастичних змінних відносно цієї детермінованої точки у першому наближенні: адже параметри з «керованим» розподілом враховані шляхом обчислення старших моментів несиметричних *PDF*-функцій «трикутної» форми за виразами, записаними у табл. 1 (значення інших 19 параметрів розподілені нормально або рівномірно).

Числові результати моделювання різними методами за умови врахування статистичних даних лише для декількох (чотирьох) мінливих параметрів моделі, що задаються несиметричними формами їх *PDF*-функцій, демонструють достатню точність застосування простішого (неітераційного) методу *PEsM* для розв'язування техніко-економічної задачі; інші параметри бажано задавати нормально розподіленими. Відповідно до даних табл. 3, у такому випадку можливо суттєве скорочення витрат часу, порівняно з такими витратами для реалізації імітаційного моделювання за методом *MCSim*.

Отримані результати імітаційного моделювання свідчать про принципову можливість отримувати вірогідні середньозважені цінові показники проєктованих електрогенерувальних устав з ВДЕ за методами *MCSim* та *PEsM* на основі детерміновано-стохастичних моделей у разі застосування аналітичних записів функцій щільності *PDF* для будь-яких розподілів мінливих технологічних і економічних параметрів ДСМ. Застосування таких економіко-математичних ДСМ у поєднанні з бажаними методами амортизації основних засобів суттєво підвищує точність розрахункових цінових оцінок енергетичних об'єктів порівняно з записами моделей детермінованого типу. Коригування цінових показників для випадку моделі гіпотетичної СФЕС середньої потужності сягає 10%; похибки оцінювання суттєво зменшуються за умови визначення і врахування характеристик розподілу (*PDF*) вхідних параметрів розрахункової моделі.

Таблиця 3.

Детерміновано-стохастична модель СФЕС змонтованої на даху $1,1 \div 2 \text{ МВт}_{\text{пик}}$: 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 СФЕС $1,1 - 2,0 \text{ МВт}_{\text{пик}}$, змонтованої на даху							
		Собівартість виробленої електроенергії: очікуване середнє $M(y)$, EUR/МВт·год; середньоквадратичне відхилення $\sigma(y)$						Середня ціна електро-енергії, EUR/МВт·год	
		Середня _MODEL		Середня _UNIFORM		Середньозважена _ANNUITY		збут за «зеленим тарифом»	
		$M(y_1)$	$\sigma(y_1)$	$M(y_2)$	$\sigma(y_2)$	$M(y_3)$	$\sigma(y_3)$	$M(y_4)$	$\sigma(y_4)$
За схемою Прикладу 2 методом <i>MCSim</i>		100,33	16,67	105,46	18,33	159,46	22,02	225,12	24,69
Для центральних значень вхідних параметрів (детермінована модель): $\mu_{x_\zeta}, \zeta = 1, 2, \dots, 23$		106,06	0,0	110,67	0,0	161,69	0,0	229,16	0,0
Для рівномірно розподілених параметрів моделі, $n = 23$	<i>MCSim</i>	105,99	21,12	110,83	22,86	169,07	27,32	228,38	34,52
	<i>PEsM</i>	107,37	22,51	112,60	23,96	161,22	29,56	231,90	32,17
Для нормально розподілених параметрів моделі, $n = 23$	<i>MCSim</i>	104,70	20,08	110,34	21,23	167,43	19,95	228,11	34,46
	<i>PEsM</i>	106,81	20,08	112,02	21,23	161,11	26,33	231,22	29,77

Висновки

1. В роботі виявлено відмінності вживаних схем моделі відповідно до визначення нормованої ціни (*LCOE*) і запропоновано інтерпретацію аналітичних записів *LCOE*, які використані для побудови детермінованих і детерміновано-стохастичних моделей (ДСМ) життєвого циклу електрогенерувальних установ з ВДЕ; зазначено на особливостях використання моделей відповідно до змісту техніко-економічної задачі, сформульованої з урахуванням умов, визначених українським законодавством.

2. З метою підвищення точності розв'язків техніко-економічних задач ймовірнісними методами для ДСМ СФЕС запропонована модифікація розрахункової схеми *LCOE*, котра в структурі детерміновано-стохастичної моделі СФЕС дозволяє врахувати довільне число мінливих параметрів з керованими функціями їх щільності розподілу. Функційні можливості такої ДСМ для фотоелектричної станції (СФЕС) продемонстровано прикладами, де отримано уточнені значення обсягових і цінних оцінок за методом Монте-Карло – їх математичних очікувань та значень середньоквадратичного відхилення, обчислених на основі дійсних функцій щільності розподілу їх прогнозних значень.

3. Підтверджено ефективність застосування методу точкового оцінювання (*PEsM*) для отримання швидких результатів – шляхом серій розрахункових експериментів з використанням алгоритму неітераційного типу досягнуто суттєвого скорочення обсягів обчислень за збереження точності.

4. Остаточні висновки щодо адекватності досліджених ДСМ слід сформулювати на підставі глибших результатів кореляційного аналізу – врахування взаємозалежностей технологічних та економічних параметрів детерміновано-стохастичної моделі.

Список літератури

1. 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". – 2014р. – №1(16). – с.95-100.
2. Костюк В.О. Техніко-економічні оцінки виробництва електроенергії фотоелектричними станціями і проблема валоризації відновлюваних джерел енергії в Україні / Костюк В.О., Шульженко С.В., Охріменко І.А. // Техн. електродинаміка. – 2014. – №5. – С.59-61.
3. Костюк В.О. Детерміновано-стохастичні моделі з керованим розподілом випадкових значень параметрів енергоустановок на основі ВДЕ / Костюк В.О., Ханицька О.О., Лукінов М.О. // Збірник тез

доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Сталий енергетичний розвиток: сучасні тенденції технології та рішення – 2014». К.: НТУУ КПІ, 2014. – с.35.

4. Мелкумов Я.С. Теоретическое и практическое пособие по финансовым вычислениям. – М.: ИНФРА-М, 1996. – 336 с.

5. Salvatore J. et al. World Energy Perspective. Cost of Energy Technologies /Bloomberg New Energy Finance. – London: World Energy Council, 2013. – 48p.

6. Cost and performance data for power generation technologies. Black & Veatch Holding Company, prepared for National Renewable Energy Laboratory, US. – 2012. –105 p.

7. Cost and Performance Assumptions for Modeling Electricity Generation Technologies. Subcontract Report NREL/SR-6A20-8595, U.S. Department of Energy, November 2010. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.osti.gov/bridge>.

8. Schroder A. et al. Current and Prospective Cost of Electricity Generation until 2050 / Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, – Berlin: DIW, 2013. – 94p.

9. Добровольський В.К. Економіко-математичне моделювання енергетичних систем / В.К. Добровольський, О.В. Стогній, В.О. Костюк, М.І. Каплін / Інститут загальної енергетики НАН України. – Київ, Наукова Думка. – 2013. – 250 с.

10. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. — 6-е изд. стер. — М.: Высш. шк., 1999.— 576 с.

11. Гихман И.И. Теория вероятностей и математическая статистика / Гихман И.И., Скороход А.В., Ядренко М.И. – К.: Вища школа. –1979. – 408с.

12. Pert distribution. EPIX Analytics – ModelAssist for Crystal Ball. [Електронний ресурс].– Режим доступу: http://www.epixanalytics.com/modelassist/CrystalBall/Model_Assist.htm#Distributions/Continuous_distributions/PERT_%28Beta%29.htm . – Назва з титул. екрану.

13. Крамер Г. Математические методы статистики. – М.: Мир, 1975. – 648с.

14. How To Depreciate Property. Publication 946, for use in preparing 2013 returns / Department of the Treasury, January, 2014.–116p. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.irs.gov/>.

15. Податковий Кодекс України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2755-17>.

V.O. Kostiuk

Institute of General Energy of NAS of Ukraine

THE MODIFIED TECHNIQUE FOR LEVELIZED ENERGY COST COMPUTING TO PROVIDE DETERMINISTIC AND STOCHASTIC MODELING OF NEW GENERATING FACILITIES

Practical aspects of feasibility assessment problem are considered, basing on the levelized energy cost concept (LCOE) for newly commissioned renewable power plants to be operated under Ukrainian law. An uncertain modeling data, either technical or cost estimates, relevant for the site with solar-photovoltaic plant (PVPP) in Ukraine will essentially influence the decision making process when classical deterministic approach is applied traditionally. To deal with uncertainties the use of value's distribution control for certain technical and economic parameters is proposed as to be introduced seamlessly within the structure of deterministic and stochastic mathematical model. Computed problem solutions by means of Monte Carlo Simulation (MCSim) and Point Estimation Method (PEsM) are presented for the typical PVPP cases. Obtained numerical results are applicable for variance analysis whilst the stochastic models should be enhanced and deployed to find feasible and optimal solutions for complex distributed generation systems (DGS).

Keywords: renewable energy, levelized energy cost computation, life cycle, deterministic and stochastic model, probabilistic methods, variance analysis.

1. Kostiuk V.O. Evaluating the Effectiveness of Integrated Solar and Collector Hot Water System Based on the Life Cycle Model / V.O. Kostiuk, I.A. Okhrimenko, O.O. Khanytska // Donetskiy NTU, Collected volume of science papers: "Electrical Engineering and Energy". –2014p. – №1(16). – Pp.95-100.

2. Kostiuk V.O. Feasibility assessment of photovoltaic electricity generation plant and valorization problem of renewable energy sources in Ukraine / V.O. Kostiuk, S.V. Shulzhenko, I.A. Okhrimenko // Tekhnichna elektrodynamika. – 2014. –№5. – P.59-61.

3. Kostiuk V.O., Khanytska O.O. Combined requirements for control and reliability implementation for rationally designed hybrid power-supply system based on renewables // XII International Conference “Monitoring and Control in Complex Systems” («KUSS-2014»), Collection volume of theses – Vinnytsya, VNTU. – 2014. – P.145.

4. Melkumov Y.S. Theoretical and practical handbook for financial computations. – Moscow: INFRA-M, 1996. – 336 p.

5. Salvatore J. et al. World Energy Perspective. Cost of Energy Technologies /Bloomberg New Energy Finance. – London: World Energy Council, 2013. – 48 p.
6. Cost and performance data for power generation technologies. Black & Veatch Holding Company, prepared for National Renewable Energy Laboratory, US. – 2012. –105 p.
7. Cost and Performance Assumptions for Modeling Electricity Generation Technologies. Subcontract Report NREL/SR-6A20-8595, U.S. Department of Energy, November 2010. [Electronic resource].– Access mode: <http://www.osti.gov/bridge>.
8. Schroder A. et al. Current and Prospective Cost of Electricity Generation until 2050 / Deutsches Institut fur Wirtschaftsforschung, – Berlin: DIW, 2013. – 94p.
9. Dobrovolsky V.K., Stogniy O.V., Kostiuk V.O., Kaplin M.I. Economic and mathematical Modeling of Power Systems. – Kyiv: Naukova dumka, 2013. – 250 p.
10. Ventsel E.S. Probability theory: Textbook for universities. — 6-th edition. — Moscow: Vysshaya shkola, 1999.— 576 p.
11. 17. Gikhman I.I. Probability theory and mathematical statistics / I.I. Gikhman, A.V.Skorokhod, M.I. Yadrenko. – Kyiv: «Вища школа». –1979. – 408p.
12. Pert distribution. EPIX Analytics – ModelAssist for Crystal Ball. [Electronic resource].– Access mode: http://www.epixanalytics.com/modelassist/CrystalBall/Model_Assist.htm#Distributions/Continuous_distributions/PERT_%28Beta%29.htm .
13. Cramer H. Mathematical Methods of Statistics /University of Stockholm, 1946 / Translated into Russian. – Moscow: Mir, 1975. – 648p.
14. How To Depreciate Property. Publication 946, for use in preparing 2013 returns / Department of the Treasury, January, 2014.–116p. [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.irs.gov/>.
15. Podatkovyy Kodeks Ukrainy. [Electronic resource].– Access mode: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2755-17>.

УДК 620.92+621.31:519.24

В.О. Костюк, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
Институт общей энергетики НАН Украины

**МОДИФИЦИРОВАННЫЕ СХЕМЫ РАСЧЕТА НОРМИРОВАННОЙ ЦЕНЫ
ПРОИЗВОДСТВА В ЗАДАЧАХ ДЕТЕРМИНИРОВАННО-СТОХАСТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ НОВЫХ ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ**

Рассматриваются практические аспекты применения схем расчета оценок технико-экономических показателей новых электрогенерирующих установок с возобновляемыми источниками энергии на основе принципа средневзвешенной (нормированной) цены производства – для условий их функционирования, предусмотренных законодательством Украины. Неопределенность прогнозных стоимостных оценок проектных показателей сооружаемой солнечно-фотоэлектрической станции (СФЭС) в Украине, которую связывают с использованием классического детерминированного подхода, предложено снизить путем программно-аналитического учета изменяющихся технологических и экономических показателей посредством параметров управляемого распределения их случайных значений в структуре детерминировано-стохастических экономико-математических расчетных моделей. Даны примеры решения задач для СФЭС методами Монте-Карло (MCSim) и точечного оценивания (PEsM). Численные результаты моделирования пригодны для сопоставления и использования в дальнейшем для решения более сложных оптимизационных задач.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, расчет нормированной цены, жизненный цикл, фотоэлектрическая станция, детерминированно-стохастическая модель, вероятностные методы, дисперсионный анализ.

Надійшла 02.04.2015
Received 02.04.2015