

ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.311.24, 621.311.245

В.А.ТОЧЕНИЙ, В.Ф.РЕЗЦОВ, Б.Г.ТУЧИНСЬКИЙ

МОДЕЛЮВАННЯ І АНАЛІЗ СОБІВАРТОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВІТРОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Загальні положення

Аналіз витрат на виробництво електроенергії вітровою електростанцією (ВЕС) – одна з важливих складових аналізу ефективності відповідного інвестиційного проекту [1]. Цей аналіз є особливо важливим на попередній стадії оцінки ефективності, коли ще відсутня повна ясність щодо тарифної політики проекту. За цих умов неможливо оцінити дохідність проекту – можливо проаналізувати лише його “витратність”. З цією метою як узагальнений критеріальний показник використовують собівартість електроенергії ВЕС [2, 3, 4].

Даний показник можна обчислити лише в середньому за період експлуатації ВЕС [2]. Це обумовлено тим, що для оцінки поточної собівартості електроенергії необхідно мати інформацію щодо розподілу інвестицій, вкладених в проект перед початком його реалізації, між періодами реалізації проекту. Формально такий розподіл здійснюється шляхом використання механізму амортизації [5, 6], який в будь-якому разі є умовним. Варто згадати, що відповідно до чинного в Україні законодавства цей механізм застосовується по-різному для оподаткування (тут метою є зменшення податкового тягаря в перші роки реалізації інвестиційних проектів) і для статистичної звітності (тут головною задачею є якомога точніше оцінити поточні обсяг і стан основних фондів). Тому єдиним осмисленим підходом до оцінки собівартості електроенергії ВЕС є її обчислення як відношення суми всіх (капітальних і поточних) витрат на реалізацію проекту до загального виробітку електроенергії ВЕС за весь період реалізації проекту [2]¹.

Метою даної статті є формулювання моделі оцінки середньої собівартості електроенергії ВЕС і виконання на її основі аналізу чутливості цього показника до зміни значень вихідних параметрів.

Вихідні параметри

Позначення і базові значення вихідних параметрів розрахунку середньої собівартості електроенергії ВЕС подано в табл. 1.

Таблиця 1

Перелік і базові значення параметрів моделі

№	Показник	Одиниця виміру	Позначення	Базове значення
1	Номинальна потужність ВЕС	кВт	P	—
2	Термін реалізації проекту	років	T_r	25
3	Норматив річних експлуатаційних витрат	% від суми інвестицій	ω	2
4	Коефіцієнт використання номінальної потужності (КВНП) ВЕС	—	k	0.3
5	Питомі інвестиції в проект	€/кВт	i	1350
6	Кількість годин в році	год	Y	8760

Модель розрахунку

Основні припущення моделі:

- інвестиції у ВЕС здійснюються лише один раз — перед початком реалізації проекту;
- проект реалізується виключно за рахунок власних коштів інвестора;
- значення всіх параметрів інвестиційного проекту, поданих у табл. 1, не змінюються протягом терміну реалізації інвестиційного проекту.

Нижче подано послідовність формул розрахунку середньої собівартості електроенергії ВЕС.

¹ В зарубіжних публікаціях в цьому співвідношенні інколи застосовується дисконтування як витрат, так і виробітку електроенергії (такий показник називається “levelized cost of energy (LCOE)” [3, 4]). В даній роботі дослідження виконано для сценарію, в якому не враховується вплив зміни вартості грошей в часі, тобто норма дисконтування дорівнює нулю.

1. Капітальні витрати (інвестиції), необхідні для реалізації проекту:

$$I = iP . \tag{1}$$

2. Річна вартість експлуатаційних витрат [1]:

$$\Omega = \frac{\omega}{100} I . \tag{2}$$

3. Річний виробіток електроенергії ВЕС:

$$E_y = YkP . \tag{3}$$

4. Сума витрат на реалізацію проекту:

$$S = I + T_r \Omega = iP + T_r \frac{\omega}{100} iP . \tag{4}$$

5. Загальний виробіток електроенергії ВЕС:

$$E = T_r YkP . \tag{5}$$

6. Середня собівартість електроенергії ВЕС:

$$s = \frac{S}{E} = \frac{iP + T_r \frac{\omega}{100} iP}{T_r YkP} = \frac{i \left(1 + \frac{T_r \omega}{100} \right)}{T_r Yk} = \frac{i}{Yk} \left(\frac{\omega}{100} + \frac{1}{T_r} \right) . \tag{6}$$

Зазначимо, що за формулою (6) середня собівартість електроенергії ВЕС обчислюється в тих самих грошових одиницях, що й питомі інвестиції. Для того, щоб за формулою (6) середню собівартість електроенергії отримувати в загальноживаних одиницях — Єцентах/кВт·год — питомі інвестиції необхідно представити в Єцентах/кВт.

Розрахована за даними табл. 1 відповідно до формули (6) середня собівартість електроенергії ВЕС становить 3,08 Єцентів/кВт·год. Нагадаємо про припущення, згідно з яким ВЕС будується інвестором за власні кошти, без залучення кредиту. Тому в формулі (6) не враховано витрати на обслуговування боргу.

Зауважимо також, що відповідно до поданої моделі (6) середня собівартість електроенергії ВЕС не залежить від потужності ВЕС. Насправді ж в загальному випадку діє закон економії витрат зі збільшенням масштабу проекту. В той же час формула (6) залишається наближено вірною за умови незначущості величини фіксованих витрат по відношенню до величин змінних витрат.

Границі параметрів

На рис. 1 подано графік залежності середньої собівартості електроенергії ВЕС від КВНП ВЕС і від терміну реалізації проекту ($i=135000$ Єцентів/кВт, $\omega=2\%$).

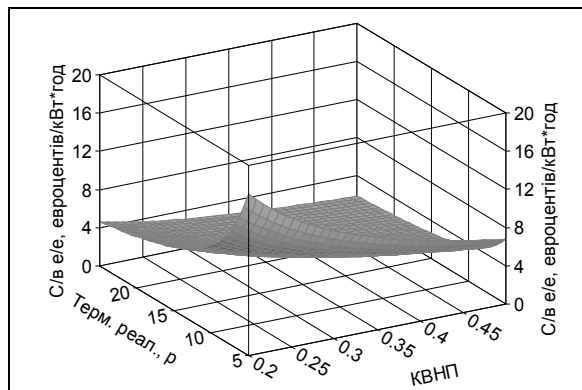


Рис. 1. Графік залежності середньої собівартості електроенергії ВЕС від КВНП і терміну реалізації проекту

З рис. 1 видно, що існують певні границі доцільних значень зазначених параметрів середньої собівартості електроенергії ВЕС. Перевищення цих границь не призводить до суттєвих наслідків щодо зменшення собівартості електроенергії ВЕС. Визначити ці границі можливо на основі застосування формули (6). Інтерес представляє дослідження даного питання саме для терміну реалізації проекту і КВНП — факторів, що впливають на середню собівартість електроенергії ВЕС нелінійним чином.

Спочатку розглянемо поставлене питання стосовно терміну реалізації проекту. Запишемо формулу (6) у вигляді:

$$s = a + \frac{b}{T_r}, \quad (7)$$

де

$$a = \frac{i\omega}{Yk}, \quad b = \frac{i}{Yk} = \frac{a}{\omega}. \quad (8)$$

Використовуючи числові значення параметрів, наведені в табл. 1, отримуємо за формулами (8): $a = 1,0274$, $b = 51,37$.

Функція залежності зменшення середньої собівартості електроенергії ВЕС від терміну реалізації проекту за умови збільшення його на один рік має вигляд²:

$$\Delta s(T_r) = s(T_r) - s(T_r + 1) = \frac{b}{T_r(T_r + 1)}. \quad (9)$$

Відповідний графік залежності подано на рис. 2.

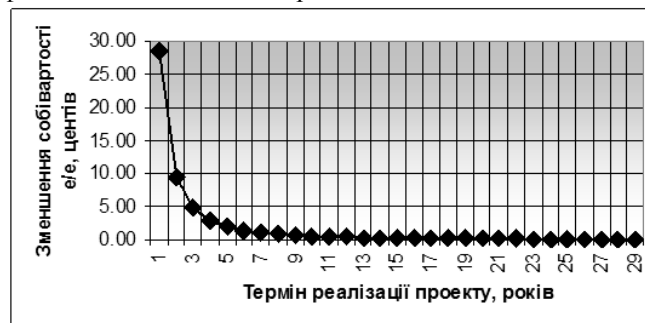


Рис. 2. Графік залежності зменшення собівартості електроенергії ВЕС від терміну реалізації проекту

З даного графіка видно, що, після певного рівня, збільшення терміну реалізації проекту не призводить до суттєвого зменшення собівартості електроенергії ВЕС. Вважатимемо границею доцільного рівня терміну реалізації проекту таке його значення, збільшення якого на один рік призводить до зменшення собівартості електроенергії ВЕС на таку величину ε центів/кВт·год, яку можна вважати незначущою. Для такої границі терміну реалізації проекту з урахуванням (7)-(8) матимемо рівняння:

$$\Delta s(T_r) = \varepsilon. \quad (10)$$

Зробивши відповідні підстановки і перетворення, отримуємо квадратне рівняння:

$$\varepsilon T_r^2 + \varepsilon T_r - b = 0, \quad (11)$$

звідки маємо для шуканого значення T_r :

$$\bar{T}_r = \frac{1}{\varepsilon} \left(\sqrt{1 + \frac{4b}{\varepsilon}} - 1 \right). \quad (12)$$

(Другий корінь рівняння (11) є від'ємним і до розгляду не береться).

Як видно з (12), граничне значення терміну реалізації проекту є залежним від значення параметра ε , яке задається певною мірою суб'єктивно. Графік цієї залежності подано на рис. 3.

Як видно з графіка, $\varepsilon = 0,1$ центів/кВт·год є достатньо обґрунтованим значенням даного параметра. Його збільшення не призводить до суттєвих змін граничного терміну реалізації проекту, а зменшення — не є доцільним з економічної точки зору.

Для базових значень інших параметрів, наведених в табл. 1, отримуємо, що за умови $\varepsilon = 0,1$, $\bar{T}_r = 22$ роки. Таким чином, за зазначених умов, термін реалізації проекту має бути не меншим, ніж 22 роки. Менші терміни реалізації проекту даватимуть таку середню собівартість електроенергії ВЕС, що може бути суттєво знижена за рахунок навіть незначного подовження терміну реалізації проекту. За більших термінів реалізації середня собівартість електроенергії суттєво не знизиться, але за умови достатньо високого тарифу на електроенергію ВЕС доход проекту збільшуватиметься зі збільшенням терміну його реалізації.

² За умови фіксації значень інших параметрів на базових рівнях (табл. 1).

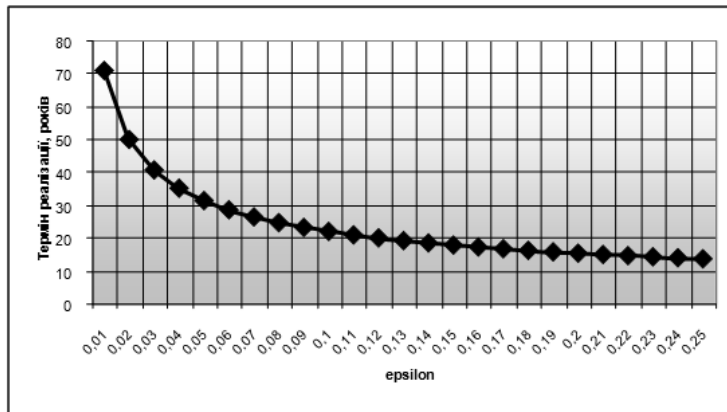


Рис. 3. Графік залежності граничного терміну реалізації проекту від параметра ϵ

Термін реалізації проекту є похідною від терміну корисної експлуатації вітрових електроустановок (ВЕУ) на ВЕС. Цей параметр фігурує в паспортних даних виробника ВЕУ і, як правило, становить 20...30 років. З виконаного вище аналізу випливає, що за інших рівних умов варто використовувати ВЕУ з терміном корисної експлуатації не меншим, ніж 22 роки. В той же час, збільшення даного параметру понад вказаної величини не призведе до суттєвого зменшення собівартості електроенергії ВЕС.

Перейдемо до оцінювання граничного (в зазначеному сенсі) значення КВНП ВЕС. На рис. 4 подано графік залежності середньої собівартості електроенергії ВЕС від КВНП ВЕС.

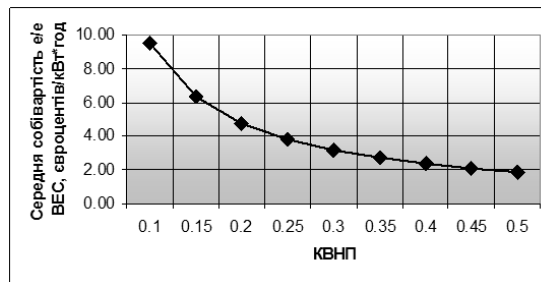


Рис. 4. Графік залежності середньої собівартості електроенергії ВЕС від КВНП

З рис. 4 видно, що швидкість зменшення собівартості зі збільшенням КВНП спадає з ростом КВНП. Для відшукування відповідної точки незначущості достатньо розв'язати рівняння:

$$s(k) - s(k + \Delta k) = \epsilon, \tag{13}$$

де Δk — заданий приріст значення КВНП.

З урахуванням (6) це рівняння еквівалентно наступному:

$$\epsilon k^2 + \epsilon k \cdot \Delta k - p \cdot \Delta k = 0, \tag{14}$$

де
$$p = \frac{i}{Y} \left(\frac{o}{100} + \frac{1}{T_r} \right).$$

Додатній корінь квадратного рівняння (14) обчислюється за формулою

$$\bar{k} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{(\Delta k)^2 + \frac{4p \cdot \Delta k}{\epsilon}} - \Delta k \right) \tag{15}$$

і є розв'язком поставленої задачі.

Підстановка в (15) реальних значень $\Delta k = 0,05$, $\epsilon = 0,25$ дає значення $\bar{k} = 0,41$. Збільшення КВНП понад 0.41 не призводитиме до суттєвого зниження середньої собівартості електроенергії ВЕС.

Врахування недетермінованості вітрового режиму площадки ВЕС

Виробіток електроенергії ВЕС (а з ним і параметр КВНП) залежить від вітрового режиму території і тому не є точно визначеною величиною. Доцільно як її модель використати випадкову величину. Позначатимемо цю випадкову величину через ξ , а щільність її розподілу — через

$f(x)$. За таких умов середня собівартість електроенергії ВЕС також є випадковою величиною, що є детермінованою функцією (6) від ξ . Математичне сподівання (по КВНП) середньої (за термін реалізації проекту) собівартості електроенергії ВЕС визначатиметься за формулою, що є окремим випадком відповідної формули теорії ймовірностей [7, С. 212]:

$$\bar{s} = c \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(x)}{x} dx, \quad (16)$$

$$\text{де } c \equiv \frac{i}{Y} \left(\frac{o}{100} + \frac{1}{T_r} \right).$$

В загальному випадку інтеграл в формулі (16) неможливо розв'язати в явному вигляді, тому неможливо отримати аналітичний вираз для очікуваної середньої собівартості електроенергії ВЕС. Що ж до її обчислення з урахуванням недетермінованості КВНП ВЕС, то для цього можна використати метод Монте-Карло [8]. В той же час для деяких окремих випадків можливо для формули (16) отримати аналітичний вираз.

Так, припустимо, що КВНП ВЕС має рівномірний розподіл [7, С. 104], тобто:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } x < k_1, \\ \frac{1}{k_2 - k_1}, & \text{якщо } x \in [k_1, k_2), \\ 0, & \text{якщо } x \geq k_2. \end{cases} \quad (17)$$

де k_1, k_2 — граничні значення зміни КВНП.

Тоді для математичного сподівання середньої собівартості електроенергії ВЕС отримуємо:

$$\bar{s} = \frac{c}{k_2 - k_1} \int_{k_1}^{k_2} \frac{dx}{x} = \frac{c}{k_2 - k_1} \ln \frac{k_2}{k_1} = \frac{i \ln \frac{k_2}{k_1}}{Y(k_2 - k_1)} \left(\frac{o}{100} + \frac{1}{T_r} \right). \quad (18)$$

Для даних табл. 1 і $k_1 = 0,27$, $k_2 = 0,33$, $s = 3,09$ €центів/кВт·год.

Аналіз чутливості собівартості

Аналіз чутливості середньої собівартості електроенергії ВЕС виконаємо із застосуванням коефіцієнтів еластичності [9, 10]. В загальному випадку, такий коефіцієнт дає відповідь на запитання — якою буде відносна зміна значення функції, якщо відносно значення аргументу зміниться на невелику величину (скажімо, на 1%)? Застосування таких коефіцієнтів дозволяє упорядкувати фактори за їх впливом на зміну середньої собівартості електроенергії ВЕС. Обчислення коефіцієнта еластичності для i -го аргументу функції $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ в точці $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$ здійснюють за формулою [11]:

$$e(x_i) = \frac{\partial f}{\partial x_i}(x') \cdot \frac{x'_i}{f(x')}. \quad (19)$$

На практиці формулу (19) застосовують для середніх значень аргументів, функцій та їх похідних для цих значень. В подальшому дослідженні значення аргументів обиратимуться з табл. 1.

Нижче подано формули для розрахунку коефіцієнтів еластичності середньої собівартості електроенергії ВЕС, отримані за формулами (6) і (19):

$$e(i) = 1, \quad (20)$$

$$e(o) = \frac{1}{1 + \frac{100}{T_r}}, \quad (21)$$

$$e(k) = -\frac{2}{1 + \frac{100k}{T_r \omega}}, \quad (22)$$

$$e(T_r) = -\frac{2}{1 + \frac{\omega}{100} T_r} \tag{23}$$

В табл. 2 подано розраховані значення коефіцієнтів еластичності середньої собівартості електроенергії ВЕС.

Таблиця 2

Коефіцієнти еластичності середньої собівартості електроенергії ВЕС

№	Фактор	Коефіцієнт еластичності
1	Питомі інвестиції	1
2	Норматив річних витрат на експлуатацію ВЕС	0,20
3	КВНП ВЕС	-1,25
4	Термін реалізації проекту	-1,33

З табл. 2 випливає, що за умов, визначених табл. 1, середня собівартість електроенергії ВЕС найбільш чутлива до змін терміну реалізації проекту і КВНП, збільшення яких на 1% призводить до зменшення середньої собівартості електроенергії ВЕС на 1.33% і 1.25% відповідно.

Як зазначалось, табл. 2 розрахована для значень параметрів середньої собівартості електроенергії ВЕС, фіксованих на певних реальних рівнях. Зміна значень цих параметрів може суттєво впливати на еластичність середньої собівартості електроенергії ВЕС. Чутливість еластичності наочно продемонстрована на рис. 4-8, побудованих відповідно до формул (21)-(23).

З (21) випливає, що за будь-яких умов $|e(\omega)| < 1$.

З (22) випливає, що $|e(k)| > 1$ за умови $k < \frac{T_r \omega}{100}$. Для базових значень $T_r = 25, \omega = 2$ маємо цю умову у вигляді $k < 0.50$. Для граничних реальних значень $T_r = 20, \omega = 1,5$ маємо $|e(k)| > 1$ за умови $k < 0,30$.

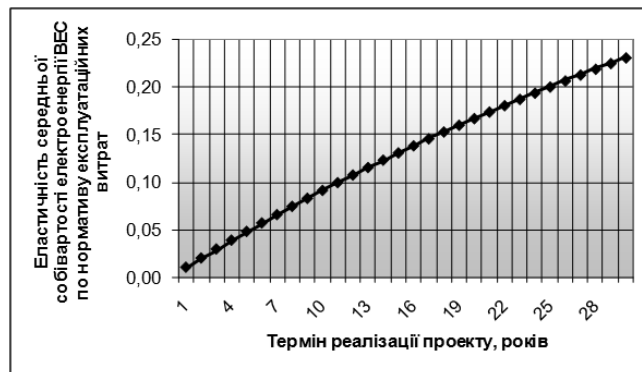


Рис. 4. Графік залежності еластичності середньої собівартості електроенергії ВЕС по нормативу експлуатаційних витрат від терміну реалізації проекту

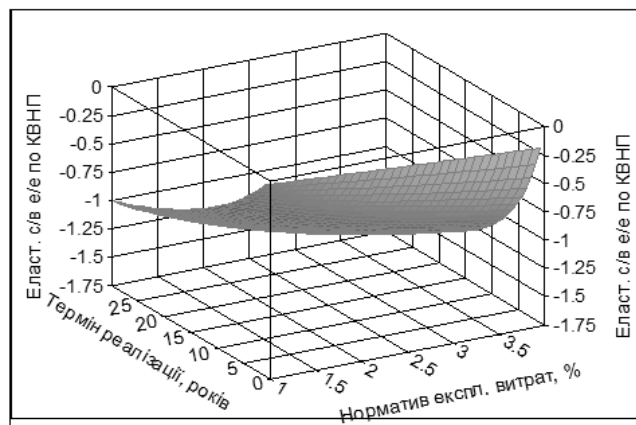


Рис. 5. Графік залежності еластичності середньої собівартості електроенергії ВЕС по КВНП від нормативу експлуатаційних витрат і терміну реалізації проекту

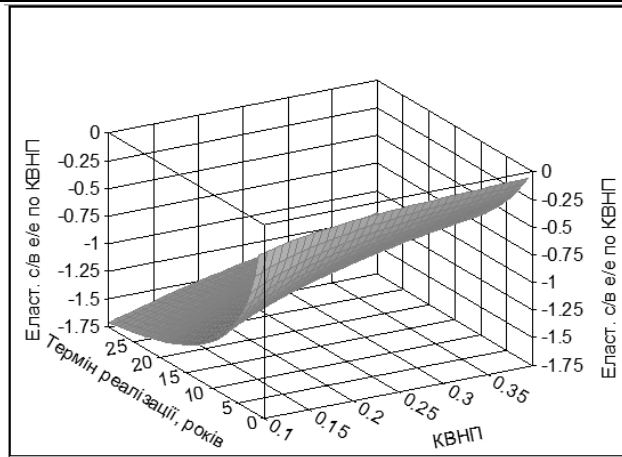


Рис. 6. Графік залежності еластичності середньої собівартості електроенергії ВЕС по КВНП від КВНП і терміну реалізації проекту

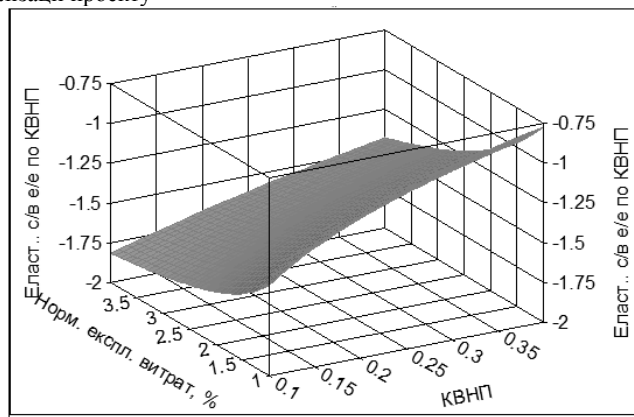


Рис. 7. Графік залежності еластичності середньої собівартості електроенергії ВЕС по КВНП від КВНП і нормативу експлуатаційних витрат

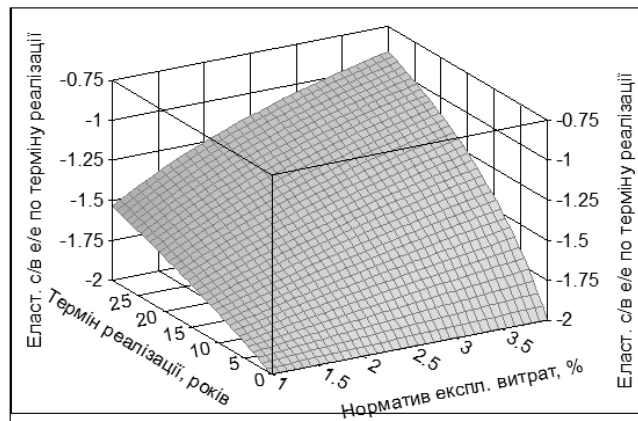


Рис. 8. Графік залежності еластичності середньої собівартості електроенергії ВЕС по терміну реалізації проекту від терміну реалізації і нормативу експлуатаційних витрат

З (23) випливає, що $|e(T_r)| > 1$ за умови $T_r < \frac{100}{\omega}$. Зважаючи на граничне для даного випадку реальне значення $\omega = 2$, зазначена умова перетворюється в умову $T_r < 50$, яка на практиці завжди виконується. Нескладно показати, що за реальних значень параметрів k і ω завжди має місце нерівність $|e(k)| > e(\omega)$. Для того, щоб виконувалась нерівність $|e(T_r)| > |e(k)|$, необхідно і достатньо виконання нерівності $k > \left(\frac{T_r \omega}{10}\right)^2 \equiv \bar{k}$. Для значень $T_r = 30, \omega = 2$ маємо $\bar{k} = 0,36$, тобто

для всіх $\bar{k} > 0,36$ маємо $|e(T_r)| < |e(k)|$. Для менших значень терміну реалізації і нормативу експлуатаційних витрат маємо $|e(T_r)| > |e(k)|$.

Висновки

1. Узагальненим показником витрат інвестиційного проекту ВЕС є середня собівартість електроенергії ВЕС.
2. Модель середньої собівартості електроенергії ВЕС (6) дозволяє оцінити зазначений показник за умов незначущої величини фіксованих витрат, а також за відсутності дисконтування експлуатаційних витрат і виробітку електроенергії ВЕС.
3. Отримані формули (12) і (15) дозволяють розрахувати числові оцінки точок незначущості для терміну реалізації проекту і для КВНП ВЕС.
4. Для урахування недетермінованості КВНП ВЕС запропоновано рандомізацію моделі середньої собівартості електроенергії ВЕС (формула (18)).
5. Отримано формули (20)-(23) для коефіцієнтів еластичності середньої собівартості електроенергії ВЕС. На основі розрахованих коефіцієнтів еластичності виконано аналіз чутливості середньої собівартості електроенергії ВЕС до зміни параметрів. Побудовано графіки залежності коефіцієнтів еластичності від параметрів інвестиційного проекту ВЕС.
6. З чотирьох параметрів середньої собівартості електроенергії ВЕС високоеластичними є два — КВНП і термін реалізації проекту. Їх коефіцієнти еластичності більші одиниці — вони близькі між собою, а їх співвідношення залежить від значень вихідних параметрів.
7. Напрямами подальших досліджень мають бути виконання аналогічного аналізу в умовах залучення кредитних коштів, урахування зміни вартості грошей в часі.

Література

1. Б.Г.Тучинський, І.В.Іванченко. Структурний аналіз витрат на реалізацію інвестиційного проекту вітрової електричної станції // Відновлювальна енергетика XXI століття. Матеріали VIII міжнародної конференції. — АР Крим, с.м.т. Миколаївка, 17-24 вересня 2007. — С. 118-123.
2. Б.Г.Тучинський. Попередня оцінка собівартості електроенергії ВЕС // Інформаційний бюлетень МНТЦ вітроенергетики НАНУ. Вітроенергетика України, №1 — 2002. — С. 15-16.
3. The Drivers of The Levelized Cost of electricity for Utility-Scale Photovoltaics. — SUNPOWER CorporaTion, 14 August 2008. — 27 p.
4. S.Thomas, M.Fischedick. Levelised Cost of Energy (LCOE) and GHG abatement costs – Definition, calculation, limitations, and examples for renewable energies. — Wuppertal Institute for Climate, Enviroment and Energy. Budget Allocation Charts Workshop Beirut 30/31 March 2009 — 13 p.
5. Г.Бирман, С.Шмидт. Экономический анализ инвестиционных проектов. — М.: Банки и биржи. Издательское объединение “ЮНИТИ”, 1997. — С.149-158.
6. П.Л.Виленский, В.Н.Лившиц, С.А.Смоляк. Оценка эффективности инвестиционных проектов — М.: Дело, 2007. — С. 139-145.
7. Е.С.Вентцель. Теория вероятностей. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1969. — 576 с.
8. И.М.Соболь. Метод Монте-Карло. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. — 78 с.
9. И.Бернар, Ж.-К. Колли. Толковый экономический и финансовый словарь. Т.1. — М.: Международные отношения, 1997. — 639с.
10. Г.Фандель. Теорія виробництва і витрат. — К.: Таксон, 2000. — 85с.
11. М. Интрилигатор. Математические методы оптимизации и экономическая теория. — М.: Прогресс, 1975. — 536с.