

О. А. Гавриш,
докт. техн. наук, професор,
С. В. Нараєвський,
Національний технічний університет України «КПІ»

**АПРОБАЦІЯ СИСТЕМИ ОЦІНЮВАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ ОТРИМАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

**АПРОБАЦИЯ СИСТЕМЫ ОЦЕНИВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

**APPROBATION OF THE ESTIMATION SYSTEM OF
ALTERNATIVE TECHNOLOGIES FOR ELECTRIC POWER
GENERATION**

Запропоновано доповнити систему визначення собівартості електроенергії, що використовується Міжнародним агентством з відновлюваної енергії та Міністерством енергетики США. Обґрунтовано доцільність врахування максимальної кількості складових витрат при розрахунку собівартості електроенергії. Зазначена важливість врахування ліквідаційних та екологічних витрат. Витрати запропоновано розподілити на п'ять складових: інвестиційні, експлуатаційні, паливні, екстернальні, ліквідаційні. Для подальшого дослідження обрані вітрова та сонячна енергетика, що найбільш динамічно розвиваються серед традиційних та альтернативних технологій отримання електричної енергії. Розрахована кожна із п'яти запропонованих складових витрат, враховуючи особливості енергетичного ринку України. На основі зазначених розрахунків визначена собівартість електроенергії для об'єктів альтернативної енергетики (вітрова енергетика та сонячна енергетика). Проведено порівняння собівартості електроенергії для вітрових та сонячних електростанцій з існуючими в Україні «зеленими» тарифами для відповідних видів генерації. За результатами проведеного дослідження визначена можливість корегування «зеленого» тарифу, залежно від умов та специфіки роботи енергетичних об'єктів.

Ключові слова: альтернативні технології, інвестиційні витрати, експлуатаційні витрати, паливні витрати, екстернальні витрати, ліквідаційні витрати, собівартість виробництва електроенергії.

Предложено дополнить систему определения себестоимости электроэнергии, используемую Международным агентством по возобновляемой энергии и Министерством энергетики США. Обоснована

целесообразность учета максимального количества составляющих расходов при расчете себестоимости электроэнергии. Отмечена важность учета ликвидационных и экологических издержек. Расходы предложено разделить на пять составляющих: инвестиционные, эксплуатационные, топливные, экстернальные, ликвидационные. Для дальнейшего исследования выбраны ветровая и солнечная энергетика, как наиболее динамично развивающиеся среди традиционных и альтернативных технологий получения электрической энергии. Рассчитана каждая из пяти предложенных составляющих затрат, учитывая особенности энергетического рынка Украины. На основе указанных расчетов определена себестоимость электроэнергии для объектов альтернативной энергетики (ветровая энергетика и солнечная энергетика). Проведено сравнение себестоимости электроэнергии для ветровых и солнечных электростанций с существующими в Украине «зелеными» тарифами для соответствующих видов генерации. По результатам проведенного исследования определена возможность корректировки «зеленого» тарифа в зависимости от условий и специфики работы энергетических объектов.

Ключевые слова: альтернативные технологии, инвестиционные расходы, эксплуатационные расходы, топливные расходы, экстернальные расходы, ликвидационные расходы, себестоимость производства электроэнергии.

The system of electric power cost estimation used by the International Renewable Energy Agency and the US Department of Energy is proposed to be modified and supplemented. The expediency of taking into account the maximum number of expense elements in the calculation of the prime cost of electricity generation was substantiated. The importance of taking into account the closure and environmental costs was emphasized. The costs were proposed to be divided into five components: investment, operational, fuel, externalities, and liquidation. For further investigation wind and solar power energy was chosen being the fastest-growing traditional and alternative technologies for the production of electrical energy. Each out of five components of the proposed expense elements was calculated taking into account characteristics of the energy market of Ukraine. On the basis of these calculations the cost of electricity for the alternative energy objects (wind power and solar power) was determined. A comparison between the prime cost of electricity for wind and solar power plants and the existing «green» tariffs for respective types of energy generation in Ukraine was carried out. On the basis of the results of the study the possibility of adjusting the «green» tariff was determined depending on the conditions and the specific operation of energy facilities.

Key words: alternative technologies, investment costs, operating costs, fuel costs, externalities costs, liquidation costs, electricity generation costs.

Вступ. При розробці інвестиційних проектів у сфері енергетики, оцінюючи можливості використання різних видів енергетичних технологій доцільно розглянути максимально можливу кількість складових. Міжнародні організації, що працюють у сфері енергетики (Міжнародне агентство з відновлюваної енергії (International Renewable Energy Agency – IRENA)) та енергетичні відомства деяких країн (Міністерство енергетики США (US Department of Energy)) поділяють витрати на інвестиційні, експлуатаційні та паливні [1, с. 9; 2, с. 10]. Поряд з тим, поза увагою залишається етап зупинки електростанції та виведення її з експлуатації. Також, недостатня увага приділяється забрудненню навколишнього оточуючого середовища та врахуванню витрат пов'язаних із ліквідацією негативного впливу від роботи енергетичних об'єктів.

Постановка завдання. Основним завданням статті є апробація системи (математичної формули) оцінювання альтернативних технологій отримання електричної енергії з урахуванням максимальної кількості складових. Такий підхід, при розрахунку собівартості електроенергії, повинен дозволити електростанції працювати успішно протягом усього періоду корисного використання обладнання та акумулювати кошти для етапу виведення з експлуатації, коли електростанція доходу вже не приносить, а витрат ще потребує.

Методологія. Теоретичну основу дослідження складає системний підхід до оцінювання витрат на виробництво електроенергії з використанням альтернативних технологій. Методологічну основу дослідження становлять методи порівняльного аналізу, витратної ефективності, дисконтування грошових потоків та логічного узагальнення.

Результати дослідження. Проводячи оцінювання різних видів технологій для виробництва електроенергії, витрати мають охоплювати увесь життєвий цикл енергетичного проекту від початку будівництва, наступний період експлуатації та етап припинення виробництва електроенергії і виведення станції з експлуатації. Тож, до вже згаданих витрат (інвестиційні, експлуатаційні, паливні) необхідно додати ліквідаційні. Враховуючи негативний вплив, який об'єкти енергетики завдають навколишньому середовищу, необхідним буде врахування екологічної складової (інша назва – екстернальні витрати). Таким чином, для охоплення всього життєвого циклу електростанції витрати необхідно розподілити на п'ять складових: інвестиційні, експлуатаційні, паливні, екстернальні, ліквідаційні. Формула розрахунку собівартості одиниці електроенергії набуде такого вигляду:

$$C = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t + Ext_t + L_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (1)$$

де C – собівартість одиниці електроенергії, грн/кВт·год, дол./кВт·год;

I_t – інвестиційні витрати за рік, грн, дол.;

M_t – експлуатаційні витрати за рік, грн, дол.;

F_t – витрати на паливо за рік, грн, дол.;

Ext_t – екстернальні витрати за рік (екологічна складова), грн, дол.;

L_t – ліквідаційні витрати за рік, грн, дол.;

E_t – обсяг виробництва електроенергії за рік, кВт·год/рік;

r – ставка дисконтування, %;

n – тривалість дії проекту, роки;

t – порядковий номер (рік) дії проекту.

Запропонований підхід розрахунку собівартості електричної енергії надасть можливість більш об'єктивно оцінювати інвестиційні проекти у енергетичній галузі та виявить їхню реальну вартість, без перекладання витрат на інші статті бюджету.

Проведемо порівняння найбільш розповсюджених на сьогодні альтернативних технологій отримання електричної енергії, які використовуються в умовах України. До цих видів технологій слід віднести вітрову та сонячну енергетику. Обсяги встановленої потужності вітрових (247,9 МВт) та сонячних (319,3 МВт) електричних станцій (ВЕС та СЕС) лише у 2012 р., разом (567,2 МВт) перевищили 1 % загальної встановленої потужності електроенергетики України (55 001,2 МВт), але за темпами розвитку вони суттєво випереджають традиційну енергетику (табл. 1).

У вітровій енергетиці витрати можна розподілити на інвестиційні, експлуатаційні, ліквідаційні та екстернальні. Витрати на паливо у вітровій енергетиці відсутні, оскільки паливо у своїй роботі вітрова електростанція не використовує.

У 2014 р. міжнародна організація, що працює у сфері відновлювальної енергетики Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN 21) випустила річний звіт про ситуацію у галузі (Renewables 2014 Global Status Report), в якому наводить порівняльну характеристику інвестиційних витрат за різними напрямками альтернативної енергетики. У вітровій енергетиці для проектів на основі вітрових електричних установок (ВЕУ) одиничною потужністю 1,5 – 3,5 МВт інвестиційні витрати становлять залежно від регіону та країни: Китай та Індія (925 – 1 470 дол./кВт), інші країни та регіони (1 500 – 1 950 дол./кВт) [6, с. 64].

Таблиця 1

**Нарощування встановленої потужності традиційної та
альтернативної електроенергетики України у 2011 – 2013 рр.**

Джерело: розроблено на основі [3, с. 5; 4, с. 5; 5, с. 5]

Тип станції	Встановлена потужність електростанцій у 2011 р., тис. кВт	Встановлена потужність електростанцій у 2012 р., тис. кВт	Темпи зростання у 2012 р. до попереднього року, %	Встановлена потужність електростанцій у 2013 р., тис. кВт	Темпи зростання у 2013 р. до попереднього року, %
ТЕС	35 025,5	35 128,9	0,3	35 615,9	1,39
АЕС	13 835,0	13 835,0	0	13 835,0	0
ГЕС	5 469,0	5 470,1	0,02	5 489,1	0,35
ВЕС	145,8	247,9	70,03	361,3	45,74
СЕС	148,2	319,3	115,45	612,3	91,76
Усього	54 623,5	55 001,2	0,69	55 913,6	1,66

Українські компанії, які працюють у сфері вітроенергетики подібних даних не наводять. Сума інвестиційних витрат для вітроенергетичних проектів в Україні має знаходитись на рівні не вищому за показники Китаю. Частка витрат на виготовлення вітроустановки для наземної вітроенергетики залежно від проекту становить 65 – 84 % загальної суми інвестиційних витрат, частка витрат на монтаж та технологічне приєднання – 9 – 14 %, частка будівельних робіт – 4 – 16 %, інші складові витрат – 4 – 10 % [1, с. 24 – 25]. Обладнання для вітроенергетики відповідно до законодавства України з 1 липня 2014 р. має, не менше ніж на 50 %, виготовлятися на українських підприємствах [7]. Оскільки витрати на монтаж та технологічне приєднання, а також будівельні роботи фактично повністю формуються в Україні, то частка витрат, яка може припадати на закордонне обладнання (закупівля окремих компонентів ВЕУ) не повинна перевищувати 30 – 40 % загальної суми інвестиційних витрат. Рівень життя (валовий внутрішній продукт (ВВП) за паритетом купівельної спроможності (ПКС) на особу) та рівень заробітних плат у Китаї вже вищий ніж в Україні. У Китаї ВВП (ПКС) на особу у 2013 р. становив 9,8 тис. дол./особу, в Україні – 7,4 тис. дол./особу [8].

Експлуатаційні витрати можуть визначатись на одиницю виробленої електроенергії – змінні або варіативні (дол./кВт·год) чи на одиницю встановленої потужності – постійні (дол./кВт/рік). За даними IRENA експлуатаційні витрати становлять 20 – 25 % від загальною суми витрат, і, так само як інвестиційні витрати, мають стійку тенденцію до зниження. Так, середні експлуатаційні витрати у США у 80-х роках по 24-м проектам становили 0,033 дол./кВт·год виробленої електроенергії, у 90-х роках по 27-ми проектам – 0,022 дол./кВт·год, а у першому десятилітті XXI ст. по 65-ти

проектам – 0,01 дол./кВт·год. У країнах Європи у 2010 р. експлуатаційні витрати при їхньому розрахунку у вигляді змінних витрат становили від 0,013 – 0,017 дол./кВт·год у Нідерландах до 0,043 дол./кВт·год у Швейцарії, а у вигляді постійних від 35 дол./кВт/рік у Нідерландах та Фінляндії до 64 дол./кВт/рік у Німеччині. [1, с. 31 – 34]. У 2012 р. середні постійні експлуатаційні витрати у вітроенергетиці країн Європи становили 19,2 євро./кВт/рік, а у 2013 р. – 18 євро./кВт/рік (24 дол./кВт/рік) [9, с. 7].

Корисний термін експлуатації ВЕС може становити 20 – 30 років [10, с. 100; 11]. Після завершення цього періоду є декілька варіантів подальшого використання обладнання ВЕС. Воно може бути демонтоване, вивезене за кордон і реалізоване новим покупцем для подальшої експлуатації у країни Азії чи Африки. Така ситуація спостерігається у країнах Європи, які першими почали активно розвивати вітроенергетику (Німеччина, Данія) та мають окремі зразки техніки, що вже відпрацювали двадцять чи навіть більше років. Вітроустановки можуть бути модернізовані чи замінені на нові. Може відбуватись встановлення нових вітроустановок мегаватного класу на тих самих ділянках, де вже встановлені старі малопотужні ВЕС. У такому випадку старі та нові вітроустановки мають різну висоту башти, що не заважає їхній спільній роботі.

У разі прийняття рішення про припинення роботи ВЕС і виведення ділянки з експлуатації необхідно провести такі роботи: від'єднання вітрових турбін від системи, демонтаж і транспортування вітрових турбін, видалення бетонних основ під баштами вітроустановок, розрівнювання поверхні та засівання ділянки рослинністю [11]. У такому випадку основні роботи пов'язані з демонтажем ВЕУ. Витрати на демонтаж становлять близько 1/3 витрат на монтаж і встановлення нових ВЕУ. Якщо сума інвестиційних витрат буде становити в межах 900 – 1 500 дол./кВт [6, с. 64], а витрати на монтаж та технологічне приєднання складуть 9 – 14 % [1, с. 24 – 25] інвестиційних витрат, то сума ліквідаційних витрат буде в межах 27 – 70 дол./кВт.

Стосовно екологічної складової, то існують різні погляди на негативний вплив, що завдає вітрова енергетика довкіллю. Одні дослідники розглядають негативний вплив вітрової енергетики на навколишнє середовище і намагаються його підрахувати, інші, зокрема провідні вітчизняні фахівці Інституту відновлюваних джерел енергії, при порівнянні витрат на розробку проектів теплової та вітрової станцій розглядають лише викиди парникових газів, SO₂, NO_x. Оскільки вітрова електростанція у процесі експлуатації таких викидів не здійснює, то її витрати пов'язані з забрудненням навколишнього середовища прирівнюють до нуля [10, с. 99 – 102]. Та все ж, намагаючись охопити максимальну кількість складових витрат будемо враховувати і екстернальну складову. За результатами дослідження «The True Cost of Electric Power» проведеного за підтримки REN 21, автори якого намагалися

охопити усю доступну інформацію, екстернальні витрати у вітровій енергетиці становлять 0 – 0,034 дол./кВт·год [12, с. 16, 32].

У сонячній енергетиці, так само як і у вітровій енергетиці, витрати можна розподілити на інвестиційні, експлуатаційні, ліквідаційні та екстернальні. Витрати на паливо у сонячній енергетиці, як і у вітровій енергетиці, відсутні.

За результатами дослідження Renewables 2014 Global Status Report міжнародної організації REN 21 інвестиційні витрати для промислових сонячних електростанцій знаходились в діапазоні 1 200 – 1 950 дол./кВт [6, с. 64].

Сонячна електростанція у процесі експлуатації потребує мінімального технічного обслуговування, оскільки вона немає рухомих елементів і потреба в ремонтних роботах обумовлена лише якістю виготовлення окремих елементів обладнання. Експлуатаційні витрати для сонячних електростанцій з фіксованим нахилом панелей знаходяться в межах 47 – 52 дол./кВт/рік, а для сонячних панелей з системою стеження наближаються до 60 дол./кВт/рік [13]. Переважна більшість великих сонячних електростанцій використовують панелі з фіксованим нахилом.

Термін використання сонячних панелей складає 40 – 50 років. Оскільки сонячна енергетика на основі фотоперетворювачів є однією з найбільш нових технологій виробництва електроенергії, то на сьогодні важко знайти приклади виведення з експлуатації великих сонячних електростанцій. У випадку ліквідації СЕС необхідно, як і у випадку із вітровою електростанцією провести демонтаж обладнання. У даному випадку обсяг робіт повинен бути меншим ніж при демонтажу ВЕС, оскільки при спорудженні СЕС не потрібно проводити значний обсяг будівельних робіт пов'язаних з бетонуванням фундаментів. При спорудженні СЕС вартість робіт з встановлення основи та стелажів складає 40 – 50 дол./кВт, а вартість робіт з підключення та налагодження електрообладнання 70 – 80 дол./кВт [14, с. 26]. Вартість демонтажу, яка становить близько 1/3 монтажних робіт, буде складати 37 – 43 дол./кВт.

В процесі експлуатації сонячна енергетика не наносить шкідливого впливу навколишньому середовищу, сонячні панелі не створюють викидів чи відходів. Процес виробництва та переробки відпрацьованих сонячних панелей відноситься до хімічної промисловості, і у випадку дотримання відповідних норм із захисту навколишнього середовища негативного впливу справляти не повинен. Але на основі дослідження «The True Cost of Electric Power» екстернальні витрати для СЕС становлять 0 – 0,081 дол./кВт·год [12, с. 16, 32].

На основі формули (1) та даних наведених у табл. 2 проведемо розрахунок собівартості електроенергії для ВЕС та СЕС. Інші дані для розрахунку проекту були наступні: термін роботи електростанцій прийнято за

30 років; встановлена потужність складає 1 000 МВт; ставка дисконтування 10 % (0,1); використання встановленої потужності для ВЕС становить 25 – 40 %, для СЕС – 10 – 30 %. Вартість електроенергії визначена в діапазоні від найкращого з можливих варіантів (мінімальні витрати при максимально можливому коефіцієнті використання встановленої потужності) до найгіршого з можливих варіантів (максимальні витрати при мінімально можливому коефіцієнті використання встановленої потужності).

Таблиця 2

**Витрати на виробництво електроенергії для об'єктів
альтернативних технологій**

Джерело: розраховано на основі [1, с. 24 – 25; 6, с. 64; 9, с. 7; 12, с. 16, 32; 14, с. 26]

Тип станції	Витрати			
	Інвестиційні, дол./кВт	Експлуатаційні, дол./кВт/рік	Екстернальні, дол./кВт·год	Ліквідаційні, дол./кВт
ВЕС	900 – 1 500	24	0 – 0,034	27 – 70
СЕС	1 200 – 1 950	47 – 52	0 – 0,081	37 – 43

Для ВЕС в Україні найнижчий «зелений» тариф у серпні 2014 р. становив 177,9 коп/кВт·год виробленої електроенергії, а найвищий – 194,85 коп/кВт·год. Тож, при найкращому з можливих варіантів (мінімальній собівартості електроенергії 3,69 цента за кВт·год та обмінному курсі гривні до долара США на 1.08.2014 на рівні 1196,3280 грн за 100 дол. США) собівартість електроенергії буде складати 44,14 коп/кВт, а при найгіршому з можливих варіантів (максимальній собівартості електроенергії 12,51 цента/кВт·год) – 149,66 коп/кВт·год, що також нижче за зелений тариф [15; 16].

Для наземних об'єктів СЕС найнижчий «зелений» тариф у серпні 2014 р. становив 533,71 коп/кВт·год, а найвищий – 731,95 коп/кВт·год. При найкращому варіанті роботи СЕС собівартість електроенергії буде складати (7,12 центу/кВт·год) 85,18 коп/кВт·год, а при найгіршому (31,94 центу/кВт·год) – 382,11 коп/кВт·год [15; 16].

Отже, на сьогодні, навіть при врахуванні усіх витрат і при існуючому «зеленому» тарифі ВЕС та, особливо, СЕС в Україні, мають працювати прибутково.

Висновки. Запропоновано власний підхід до оцінювання технологій виробництва електроенергії з поділом витрат на п'ять складових: інвестиційні, експлуатаційні, паливні, екстернальні, ліквідаційні. Науковою новизною є проведення порівняльного розрахунку собівартості електроенергії для об'єктів альтернативної енергетики (ВЕС та СЕС) з урахуванням усіх

можливих складових витрат. Отримані результати можуть бути використанні для обґрунтування та розрахунків «зелених» тарифів на електроенергію для об'єктів альтернативної енергетики. Особливо це стосується сонячної енергетики, де «зелений» тариф, навіть при найгіршому з можливих варіантів, перевищує собівартість виробництва електроенергії у півтора-два рази.

Подальші наукові дослідження слід зосередити на проведенні порівняльного аналізу собівартості виробництва електроенергії на основі традиційних та альтернативних технологій її отримання, а також моделювання ситуації на основі різної вартості грошових коштів (ставки дисконтування) для здійснення інвестиційних проектів.

Література:

1. Renewable energy technologies: cost analysis series : Wind Power. IRENA Secretariat. International Renewable Energy Agency (IRENA). – Abu Dhabi : IRENA Secretariat, 2012. – 64 p.
2. Updated Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity General Plants. U.S. Energy Information Administration. – Washington : U.S. Department of Energy. 2013. – 201 p.
3. Статистичний бюлетень. Виробництво електроенергії та окремі техніко-економічні показники роботи електростанцій за 2011 рік. Державна служба статистики України. Департамент статистики виробництва. – К. : Дежраналітінформ. 2012. – 23 с.
4. Статистичний бюлетень. Виробництво електроенергії та окремі техніко-економічні показники роботи електростанцій за 2012 рік. Державна служба статистики України. Департамент статистики виробництва. – К. : Дежраналітінформ. 2013. – 17 с.
5. Статистичний бюлетень. Виробництво електроенергії та окремі техніко-економічні показники роботи електростанцій за 2013 рік. Державна служба статистики України. Департамент статистики виробництва. – К. : Дежраналітінформ. 2014. – 17 с.
6. Renewables 2014 Global Status Report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN 21). – Bonn : REN21 Renewables Academy. 2014. – 215 p.
7. Сайт Верховної Ради України. Закон України «Про внесення змін до Закону України «Про електроенергетику» щодо стимулювання виробництва електроенергії з альтернативних джерел енергії» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/5485-17>.
8. Сайт Центрального Розвідувального Управління США. Всесвітня книга фактів. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>.

9. Clover R. 9TH SKF Wind farm management conference. Insight service market survey results. Recharge insight / R. Clover. – Berlin : Director Recharge insight, 2014. – 29 p.
10. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії : підруч. / С. О. Кудря. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 492 с.
11. Сайт ТОВ «Віндкрафт Україна». Проекти. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://2er.eu/uk/proekty-ukr/zagalna-informatsiya>.
12. Burtraw D., Krupnick A., Sampson G. The True Cost of Electric Power. Resources For the Foture / D. Burtraw, A. Krupnick, G. Sampson. – Washington : REN21. 2012. – 48 p.
13. Сайт ресурсу фотовольтаїки. Інвестиційні та експлуатаційні витрати. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.pvresources.com/economics/investment.aspx>.
14. Renewable energy technologies: cost analysis series : Solar Photovoltaics. IRENA Secretariat. International Renewable Energy Agency (IRENA). – Abu Dhabi : IRENA Secretariat, 2012. – 52 p.
15. Сайт національної комісії, що здійснює державне регулювання у сфері енергетики. Постанова №1072 від 31.07.2014 Про встановлення «зелених» тарифів на електричну енергію. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.nerc.gov.ua/?id=11585>.
16. Сайт Національного банку України. Офіційний курс гривні до іноземних валют. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.bank.gov.ua/control/uk/curmetal/detail/currency?period=daily>.