

## Кіберфізична система для оцінювання впливів вітроенергетичних установок на компоненти довкілля

Т.Г. Бойко, М.В. Руда

Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна  
tgbo@ukr.net; marichkarmv@gmail.com

### Анотація

Оцінено вплив вітроенергетичних станцій на компоненти довкілля, якими є компартменти складних ландшафтних комплексів з урахуванням низки їх параметрів. Визначено перелік категорій впливу, якими представлено навантаження на довкілля, а також для кожної категорії визначено відносний внесок шкідливих чинників з урахуванням можливих сценаріїв поведінки з відходами. За всіма потенційними впливами з допомогою методології *Eco-indicator* побудовано екологічні профілі, які дали змогу отримати значення екологічних показників (впливів) та еко-індикаторів, виражених в еко-балах, що характеризують вплив досліджуваної вітроенергетичної станції.

Виконано математичне моделювання процесів впливу окремої вітроенергетичної установки на підсистеми та яруси компартментів, за результатами якого отримано систему диференціальних рівнянь, вхідними даними для яких є окремі показники і еко-індикатори, а також статистична інформація функціонування елементів ієрархічної структури складного ландшафтного комплексу. Розв'язуючи систему рівнянь, можна здійснювати дослідження (прогнозування) станів розвитку складного ландшафтного комплексу в динамічному та стаціонарному режимах під час впливу життєвого циклу вітроенергетичної установки на підсистеми та яруси їх компартментів, з метою оптимізації діяльності людини щодо забезпечення мінімального ступеня її негативного впливу на довкілля.

**Ключові слова:** кіберфізична система; відновлювальні джерела енергії; складний ландшафтний комплекс; життєвий цикл; стани екосистеми; еко-бали.

Отримано: 18.11.2020

Відредаговано: 21.01.2021

Схвалено до друку: 29.01.2021

### Вступ

Кожному продукту властиві стадії розвитку, які в сукупності становлять їх життєвий цикл (ЖЦ), і кожна зі стадій має власний, специфічний вплив на довкілля. На всіх стадіях ЖЦ продукту, коли використовується енергія та перетворюються матеріали, відбувається певне забруднення довкілля.

Оптимальне керування станами екосистем передбачає використання передових технологій, які базувалися на застосуванні сучасних експертних інтелектуальних інформаційних систем, а також математичне опрацювання експериментальних даних. Сталий розвиток регіону як цілісної соціо-еколого-економічної системи потребує адекватного апарату інформування про стани довкілля, відповідних імітаційних моделей та вірогідних методів моделювання оцінки станів екосистем, що й стало проблемою цього дослідження.

### Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В останні десятиліття людство зіткнулося з двома суперечливими енергетичними проблемами. З одного боку, це забезпечення надійності енер-

гопостачання, з іншого – боротьба з негативним впливом виробництва енергії на довкілля. Проблеми моделювання екологічних процесів і систем різних рівнів досліджували: І.С. Благун, В.В. Вітлінський, В.М. Гейц, М.В. Одрехівський, Б.В. Гнеденко, І.М. Коваленко, А.В. Яцик, В.І. Мунтян. Однак проблемами альтернативної енергетики переважно займаються у технічному або економічному плані, вивчаючи питання подальшого вдосконалення конструкції та технологій використання вітроенергетичних установок (ВЕУ), чи розглядаючи економічну ефективність використання енергії вітру. А питання впливу ВЕУ на компоненти довкілля висвітлені недостатньо. Практика показує, що необхідною є методологія, яку можна було б використовувати для дослідження і моделювання будь-яких екосистем та їх станів у різних регіонах. Зокрема, таким може бути метод аналізу ЖЦ, що ґрунтується на серії ISO-стандартів [1] разом з оцінкою потенційних впливів вітроенергетичних станцій (ВЕС) на довкілля. Такий підхід використано у дослідженнях вчених В. Cleary, E. Martinez, Ch. Chenai, T. Toth та ін. [2–5]. Наявні дослі-

дження показують суттєвий вплив на екологічні показники матеріального виробництва ВЕС. Деякі з цих оцінок також вказують на велику кількість непрямо утворених відходів, зокрема, у роботі вечних Б.В. Єрмоленка та ін. [6], а також за даними одного з найбільших виробників ВЕУ – компанії Vestas [7].

**Мета, завдання та методи дослідження**

Мета дослідження полягає у використанні інтегрованої системи показників оцінювання екологічних впливів ВЕУ на всіх етапах їх ЖЦ для імітаційного моделювання і прогнозування станів окремого складного ландшафтного комплексу (СЛК), в якому функціонує ВЕС.

Об’єктом дослідження є процес техногенного навантаження ВЕС на довкілля і керівні впливи для зменшення його негативних наслідків.

Завдання дослідження: отримавши значення показників та еко-індикаторів, які характеризують вплив досліджуваної ВЕС, виконати математичне моделювання процесів впливу ВЕУ на підсистеми і яруси компартментів СЛК.

Стандарт ISO 14040/44 визначає концепцію оцінювання життєвого циклу (ОЖЦ) як сукупність всебічних довкільних характеристик продукту, де кількісним виміром їх екологічності є результат процесу ОЖЦ [8]. Програма *SimaPro*, яку використано для ОЖЦ, підтримує *EPDs*, *GHG protocol* та *ILCD Handbook*; ними передбачено п’ять етапів дослідження: 1 – визначення мети і предмету дослідження; 2 – формування моделі ЖЦ ВЕУ з відображенням усіх довкільних входів і виходів; 3 – оцінювання впливу ВЕУ на компартменти СЛК; 4 – отримання конкретних значень впливів та інтерпретація результатів; 5 – моделювання впливу ВЕУ на підсистеми та яруси компартментів СЛК.

**Результати досліджень впливу ВЕУ на компартменти СЛК**

Дослідження впливу ВЕС на компоненти довкілля виконано з урахуванням низки технічних характеристик ВЕУ фірми “*Siemens SWT DD-142*” ВЕС загальною потужністю 120 МВт і з необхідною інфраструктурою.

Межами системи дослідження ВЕУ є: виробництво матеріалів і обладнання для виготовлення ВЕУ, допоміжних споруд та фундаменту; експлуатація наявних доріг для транспортування складових частин ВЕУ і обладнання спеціалізованими вантажівками; монтаж ВЕУ за допомогою підймальних кранів тощо.

Для зниження екологічного впливу в *SimaPro* передбачено використання різних сценаріїв поводження з відходами, які залежно від особливостей показника можуть знижувати або підвищувати сумарний негативний вплив.

На рис. 1 показано розподіл отриманих значень екологічних показників з допомогою *Eco-indicator* за чотирма етапами ЖЦ ВЕС: виробництво, демонтаж і утилізація, експлуатація, транспортування і встановлення.

*Інтерпретація результатів.* Відповідно до [1], інтерпретація охоплює: аналіз невизначеності, аналіз чутливості результатів до зміни припущень і параметрів та аналіз вкладу окремих процесів / речовин у загальний вплив.

Одним із джерел *невизначеності* можуть бути неточності у вимірюванні даних, які, зокрема, усувають методами Монте-Карло. Інше джерело невизначеності – коректність моделей, прийнятих для аналізу. Причинами тут можуть бути алокація впливів, методи поводження з відходами, особливо у віддаленому майбутньому, функціональні одиниці, прийняті для порівняння тощо.

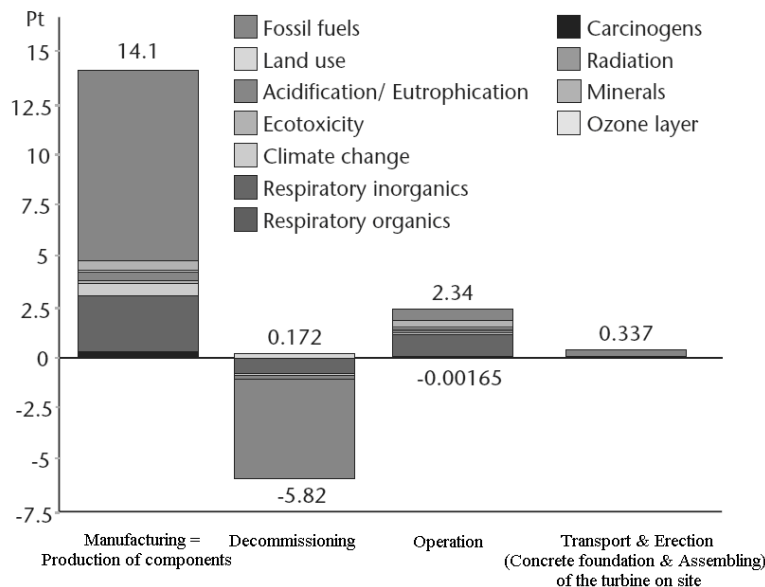


Рис. 1. Екологічні показники ЖЦ ВЕС для чотирьох етапів

Аналіз чутливості виявляє вплив найважливіших гіпотез на результати оцінювання. Його виконують засобами аналізу “якщо-то”. У випадку, коли результати ОЖЦ критично залежать від зміни гіпотез, необхідно їх уточнити та обґрунтувати міркування щодо їхньої коректності.

Аналіз внеску. Зазвичай лише низка процесів (5% або навіть 1%) відіграє вирішальну роль у екологічному профілі продукту, тоді як усіма іншими можна знехтувати без серйозного впливу на результати. Аналіз спрямований виявити процеси, що мають найвищий внесок у екологічний індекс.

### Моделювання впливу ВЕУ на компартменти СЛК

СЛК, як поєднання біотичних та абіотичних компонентів, містить  $n$  компартментів, які обмінюються потоками речовини  $f_{AB}$  (з  $A$ -го в  $B$ -й). У наданій системі всі величини набувають переважно трьох індексів:  $i_1$  – область простору (компартменту СЛК);  $i_2$  – геофізичне середовище;  $i_3$  – вплив. Тоді вираз  $Q_{i_1 i_2 i_3}$  означатиме вплив ВЕУ на всіх етапах життєвого циклу –  $i_3$ , у ярусах чи підсистемах –  $i_2$ , компартменту СЛК –  $i_1$ . Такі індекси називають мультиіндексами і позначають  $i = (i_1 i_2 i_3)$ , а їх множину в моделі – літерою  $\Omega$  [9].

Якщо СЛК складається з  $n$  компартментів і розглядається  $m$  впливів, то:

$$1 \leq i_1 \leq n; \quad 1 \leq i_2 \leq f; \quad 1 \leq i_3 \leq m. \quad (1)$$

Нехай  $Q_i$  – вплив  $i_3$  у ярусах  $i_2$  області приросту компартменту  $i_1$ , що виникають у момент  $t$ . Позначимо через  $k_{ij}(\tau)$  значення цього впливу, виражене в еко-балах, який через час  $\tau$  опиниться в ярусах чи підсистемах  $j_2$  області приросту  $j_1$ , здійснивши в процесі перетворення потоку речовини  $f$  у вплив  $j_3$ . Оскільки значення впливів у процесі переносу з ярусів до підсистем компартменту та від одного до іншого компартменту не виникає і не зникає, то:

$$\sum_{j \in \Omega} k_{i,j} = \sum_{j_1=1}^n \sum_{j_2=1}^f \sum_{j_3=1}^m k_{i_1 i_2 j_1 j_2 j_3} = 1. \quad (2)$$

У результаті спостереження за значенням впливу  $Q_i$  для кожного мультиіндексу  $i$  отримуємо вираз, що визначає динаміку поширення досліджуваних впливів для різних ярусів та підсистем, зокрема

$${}^{t+\tau}Q = \sum_{i \in \Omega} {}^tQ_i k_{i,j}(\tau), \quad i \in \Omega, \quad (3)$$

де  ${}^tQ_i$  – стан системи в момент часу  $t$ .

Стан  ${}^tQ$  у момент часу  $t_r$  пов'язаний зі станом  ${}^{t_r-1}Q$  у момент часу  $t_{r-1}$  співвідношенням  ${}^tQ = {}^{t_r-1}QK$ , де  $K$  – лінійний оператор, який характеризує процес поширення і перетворення впливу чи забруднювача у ярусах і підсистемах за час  $\tau$ , та має певні властивості, а саме, якщо за почат-

кового стану  ${}^0Q$  оператор  $K$  використати  $n$  разів, то отримаємо  ${}^nQ = n^{-1}Q \cdot K$ . Такі процеси можна вивчати з допомогою теорії марківських ланцюгів, основним результатом яких є: для будь-якого  ${}^0Q$  послідовність подій визначається як  ${}^nQ = n^{-1}Q \cdot K$  і прямує до деякого  ${}^*Q$  так, що  $\lim^n Q(i) = {}^*Q(i)$  для будь-якого  $i \in \Omega$  [10].

Стани компартментів СЛК  ${}^iQ_i$  можна подати ієрархічною структурою і виразити в еко-балах. Тоді значення впливу, виражене через *Eco-indicator*, описуємо станами:  $S_1$  – “норма”;  $S_2$  – “нижче норми”;  $S_3$  – “вище норми”;  $S_4$  – “суттєво вище норми”, що відображено за результатами моделювання (рис. 1).

Коефіцієнтами  $k_{i,j}(t)$  виступають імовірності переходів  $P_{i,j}(t)$  відповідної матриці переходів  $P$  та інтенсивності переходів  $\lambda_{i,j}(t)$  матриці інтенсивностей переходів  $\Lambda$  компартментів або концентрації шкідливих речовин зі стану  $i$  в стан  $j$ .

Формалізацію графів ієрархічної структури СЛК здійснюють за допомогою системи диференціальних рівнянь Колмогорова. Якщо обмежитись  $m, l = 1, \dots, 4$  і  $m \neq l$ , тоді система матиме вигляд (4), розв'язуючи яку згідно з [11], можна отримати стани розвитку СЛК у динамічному та стаціонарному режимах:

$$\begin{cases} \frac{dP_{i,j,S_1}}{dt} = -\lambda_{i,j,S_1,S_2} \cdot P_{i,j,S_1} + \lambda_{i,j,S_2,S_1} \cdot P_{i,j,S_2} \\ \frac{dP_{i,j,S_2}}{dt} = \lambda_{i,j,S_1,S_2} \cdot P_{i,j,S_1} - (\lambda_{i,j,S_2,S_1} + \lambda_{i,j,S_2,S_3}) \times \\ \times P_{i,j,S_2} + \lambda_{i,j,S_3,S_2} \cdot P_{i,j,S_3} \\ \frac{dP_{i,j,S_3}}{dt} = \lambda_{i,j,S_2,S_3} \cdot P_{i,j,S_2} - (\lambda_{i,j,S_3,S_2} - \lambda_{i,j,S_3,S_4}) \times \\ \times P_{i,j,S_3} + \lambda_{i,j,S_4,S_3} \cdot P_{i,j,S_4} \\ \frac{dP_{i,j,S_4}}{dt} = \lambda_{i,j,S_3,S_4} \cdot P_{i,j,S_3} - \lambda_{i,j,S_4,S_3} \cdot P_{i,j,S_4} \end{cases}, \quad (4)$$

де  $i = 1, 2, \dots, N$  і  $j = 1, 2, \dots, M$  – порядкові номери мультиіндексів;  $S_1, \dots, S_4$  – стани компартментів СЛК;  $P_{i,j,S_l}$  – імовірність знаходження компартментів СЛК або концентрації шкідливих речовин у стані  $S_l$  чи  $S_m$ ;  $\lambda_{i,j,S_l,S_m}$  – інтенсивності переходів компартментів СЛК або концентрації шкідливих речовин зі стану  $S_l$  в стан  $S_m$  для кожного мультиіндекса.

Значення інтенсивностей переходів зі стану в стан для кожного елемента ієрархічної структури (яруса та підсистеми компартменту) є статистичною інформацією, яку отримують дослідженням функціонування СЛК. Для оцінки і прогнозування станів цих СЛК та їх компартментів інформацію про впливи на етапах ЖЦ ВЕУ доцільно збирати в різні проміжки часу функціонування СЛК.

Прогнозування станів концентрації шкідливих речовин і станів компартменту СЛК у динамічному та стаціонарному режимах можна реалізувати,

розв'язуючи систему диференціальних рівнянь (4) та алгебраїчних рівнянь (8) за допомогою інформаційних технологій. Зокрема, дослідження динаміки станів ієрархічних структур та їх елементів запропоновано здійснювати на основі розв'язку системи диференціальних рівнянь (4) за допомогою чисельного методу Рунге – Кутти четвертого порядку [12], звівши їх до вигляду

$$\begin{aligned} \frac{dP_0}{dt} &= a_{00} \cdot P_0(t) + a_{01} \cdot P_1(t) + a_{02} \cdot P_2(t) + \dots + a_{0n} \cdot P_n(t), \\ \frac{dP_1}{dt} &= a_{10} \cdot P_0(t) + a_{11} \cdot P_1(t) + a_{12} \cdot P_2(t) + \dots + a_{1n} \cdot P_n(t), \\ \frac{dP_2}{dt} &= a_{20} \cdot P_0(t) + a_{21} \cdot P_1(t) + a_{22} \cdot P_2(t) + \dots + a_{2n} \cdot P_n(t), \\ &\dots \dots \dots (5) \\ \frac{dP_m}{dt} &= a_{m0} \cdot P_0(t) + a_{m1} \cdot P_1(t) + a_{m2} \cdot P_2(t) + \dots + a_{mn} \cdot P_n(t), \\ P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + \dots + P_n(t) &= 1. \end{aligned}$$

За заданих початкових умов  $P(0) = \begin{pmatrix} P_0(0) \\ P_1(0) \\ P_2(0) \\ \dots \\ P_n(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{00} \\ P_{10} \\ P_{20} \\ \dots \\ P_{n0} \end{pmatrix}$ ,

з використанням методів наближених обчислень і комп'ютерної техніки розв'язок системи рівнянь (5) можна записати у вигляді

$$P_{i,k+1} = P_{ik} + \frac{H}{6} \cdot (K_{1i} + 2 \cdot K_{2i} + 2 \cdot K_{3i} + K_{4i}), \quad (6)$$

де

$$\begin{aligned} K_{1i} &= \sum_{j=0}^n a_{ij} \cdot P_{jk}, i = 0, 1, 2, \dots, n; \\ K_{2i} &= \sum_{j=0}^n a_{ij} \cdot \left( P_{jk} + K_{1i} \cdot \frac{H}{2} \right), i = 0, 1, 2, \dots, n; \\ K_{3i} &= \sum_{j=0}^n a_{ij} \cdot \left( P_{jk} + K_{2i} \cdot \frac{H}{2} \right), i = 0, 1, 2, \dots, n; \\ K_{4i} &= \sum_{j=0}^n a_{ij} \cdot \left( P_{jk} + K_{3i} \cdot H \right), i = 0, 1, 2, \dots, n; \\ H &= \Delta t. \end{aligned} \quad (7)$$

Дослідження СЛК як об'єкта з ієрархічною структурою у стаціонарному режимі, коли  $t \rightarrow \infty$  і  $\frac{dP}{dt} = 0$ , здійснюють за допомогою чисельних методів на основі розв'язку системи алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{aligned} -\lambda_{i,j,s_1,s_2} \cdot P_{i,j,s_1} + \lambda_{i,j,s_2,s_1} \cdot P_{i,j,s_2} &= 0, \\ \lambda_{i,j,s_1,s_2} \cdot P_{i,j,s_1} - (\lambda_{i,j,s_2,s_1} + \lambda_{i,j,s_2,s_3}) \cdot P_{i,j,s_2} + \\ + \lambda_{i,j,s_3,s_2} \cdot P_{i,j,s_3} &= 0, \\ \lambda_{i,j,s_2,s_3} \cdot P_{i,j,s_2} - (\lambda_{i,j,s_3,s_2} - \lambda_{i,j,s_3,s_4}) \cdot P_{i,j,s_3} + \\ + \lambda_{i,j,s_4,s_3} \cdot P_{i,j,s_4} &= 0, \\ \lambda_{i,j,s_3,s_4} \cdot P_{i,j,s_3} - \lambda_{i,j,s_4,s_3} \cdot P_{i,j,s_4} &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

матрична форма запису якої має вигляд  $\Lambda \cdot P = 0$ , (9) де  $\Lambda$  – інтенсивності переходів зі стану в стан;  $P$  – ймовірності станів.

Для отримання розв'язку досліджуваної системи рівнянь (4) в стаціонарному режимі зведемо їх до вигляду

$$\begin{aligned} a_{00} \cdot P_0 + a_{01} \cdot P_1 + a_{02} \cdot P_2 + \dots + a_{0n} \cdot P_n &= 0, \\ a_{10} \cdot P_0 + a_{11} \cdot P_1 + a_{12} \cdot P_2 + \dots + a_{1n} \cdot P_n &= 0, \\ a_{20} \cdot P_0 + a_{21} \cdot P_1 + a_{22} \cdot P_2 + \dots + a_{2n} \cdot P_n &= 0, \\ \dots \dots \dots \\ a_{m0} \cdot P_0 + a_{m1} \cdot P_1 + a_{m2} \cdot P_2 + \dots + a_{mn} \cdot P_n &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Використовуючи схему Холецького чисельного методу Гауса [12], знаходимо  $P_n, P_{n-1}, \dots, P_0$  у такому порядку:

$$\begin{aligned} P_0 + a_{01} \cdot P_1 + a_{02} \cdot P_2 + \dots + a_{0n} \cdot P_n &= 0, \\ P_1 + a_{12} \cdot P_2 + \dots + a_{1n} \cdot P_n &= 0, \\ \dots \dots \dots \\ P_n &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

з допомогою рекурентних формул

$$\begin{aligned} \gamma_{i0} &= a_{i0}, (i = 0, 1, 2, \dots, n), \\ \alpha_{0k} &= \frac{\alpha_{0k}}{\alpha_{00}}, (k = 1, 2, \dots, n), \\ \gamma_{ik} &= a_{ik} - \sum_{j=0}^{k-1} \gamma_{ij} \cdot \alpha_{jk}, (i, k = 1, 2, \dots, n; n \geq k), \\ \alpha_{ik} &= \frac{1}{\gamma_{ii}} \cdot \left( a_{ik} - \sum_{j=k}^{i-1} \gamma_{ij} \cdot \alpha_{jk} \right), (i, k = 1, 2, \dots, n; i < k). \end{aligned} \quad (12)$$

Надані алгоритми отримання вхідних даних, побудови і розв'язку систем диференціальних та алгебраїчних рівнянь можуть бути покладені в основу математичного забезпечення кіберфізичної системи дослідження станів компартменту СЛК і оцінювання впливів ВЕУ на компоненти довкілля.

**Висновки**

За допомогою програмного забезпечення *SimaPro* і методології *Eco-indicator* отримано інтегровану систему виражених в еко-балах показників впливів ВЕС. Зокрема, виявлено, що найбільший шкідливий екологічний вплив зі значенням еко-індикатора – 14,1 відбувається протягом етапу виробництва ВЕУ. Особливо це пов'язано з типом використовуваної електроенергії.

Пошук напрямків зменшення шкідливого антропогенного впливу реалізовано на основі математичного моделювання. Тут однією з головних задач є керування станами ландшафтно-інженерних – ВЕУ і ландшафтно-техногенних систем – ВЕС, яке полягає у математичному поданні механізмів, що визначають динамічні властивості



перебігу процесів у середовищі вказаних систем. Отримані моделі даватимуть змогу аналізувати стани елементів ієрархічної структури СЛК і прогнозувати розвиток того чи іншого техногенно-екологічного процесу впродовж ЖЦ ВЕУ для оптимізації діяльності людини щодо забезпечення мінімального ступеня її негативного екологічного впливу.

Основою аналізу станів елементів СЛК є дослідження комбінованих впливів шкідливих чинників, передусім антропогенного походження, на яруси і підсистеми компартментів СЛК, значення яких оцінені імітаційним моделюванням в експериментальній частині цієї роботи. Вхідними даними для розв'язку системи рівнянь, які визначають динаміку поширення досліджуваних шкідливих впливів у різних ярусах та підсистемах компарт-

ментів СЛК, є показники, виражені в еко-балах, а також статистична інформація функціонування елементів СЛК.

Розв'язуючи систему рівнянь, оцінюють як результуючий негативний ефект цих впливів, так і виявляють, які з них найсуттєвіші й домінуючі. Вказані результати даватимуть змогу розробляти алгоритми керування станами цієї ландшафтно-інженерної системи для оптимізації взаємодії ВЕУ з компартментами СЛК, а також здійснювати прогнозування станів розвитку СЛК у динамічному та стаціонарному режимах внаслідок впливу ЖЦ ВЕУ на його підсистеми і яруси компартментів. Очевидно, що оптимального керування станами системи досягають застосуванням інтелектуальних та кіберфізичних систем.

## Киберфизическая система для оценки воздействий ветроэнергетических установок на компоненты окружающей среды

Т. Г. Бойко, М. В. Руда

Национальный университет "Львовская политехника", ул. С. Бандеры, 12, 79013, Львов, Украина  
tgbo@ukr.net; marichkarmv@gmail.com

### Аннотация

Оценено влияние ветроэнергетических станций на компоненты окружающей среды, а именно компартменты сложных ландшафтных комплексов с учетом ряда их параметров. По всем потенциальным воздействиям с помощью методологии *Eco-indicator* построены экологические профили, которые позволили получить значения экологических показателей (воздействий) и эко-индикаторов, выраженных в эко-баллах, характеризующие влияние исследуемой ветроэнергетической станции.

Выполнено математическое моделирование процессов влияния отдельной ветроэнергетической установки на подсистемы и ярусы компартментов, по результатам которого получена система дифференциальных уравнений, входными данными для которых являются отдельные показатели и эко-индикаторы, а также статистическая информация функционирования элементов иерархической структуры сложного ландшафтного комплекса. Решая систему уравнений, можно исследовать (прогнозировать) состояния развития сложного ландшафтного комплекса в динамическом и стационарном режимах при воздействии жизненного цикла ветроэнергетической установки на подсистемы и ярусы их компартментов, с целью оптимизации деятельности человека по обеспечению минимальной степени ее воздействия на окружающую среду.

**Ключевые слова:** киберфизическая система; возобновляемые источники энергии; сложный ландшафтный комплекс; жизненный цикл; состояния экосистемы; эко-баллы.

## Cyber-physical system for assessing the impact of wind farms on environmental elements

T. Boyko, M. Ruda

Lviv Polytechnic National University, S. Bandery Str., 12, 79013, Lviv, Ukraine  
tgbo@ukr.net; marichkarmv@gmail.com

### Abstract

The article assesses the impact of wind power plants on the components of the environment, which are compartments of complex landscape systems, taking into account a number of their parameters. A list of impact categories has been made up, which represent the load on the environment; also, for each category, the relative contribution of harmful factors has been identified, taking into account possible scenarios for waste management. For all potential impacts, using the Eco-indicator methodology, ecological profiles have been built, which made it possible to obtain the values of ecological indexes (impacts) and eco-indicators, expressed in eco-points, characterizing the impact of the wind power plant under study.

Mathematical modeling of the processes of influence of a separate wind power plant on the subsystems and layers of compartments was carried out, according to the results of which a system of differential equations has been obtained, the input data for which are individual indexes and eco-indicators, as well as statistical information on the functioning of the elements of the hierarchical structure of compartments of a complex landscape system. The structure graphs are formalized using the Kolmogorov system of differential equations. It is proposed to study the dynamics of the structure on the basis of solving a system of differential equations using the fourth-order numerical Runge – Kutta method.

By solving the system of equations, it is possible to study (predict) the developmental stages of a complex landscape system in dynamic and stationary modes during the impact of the life cycle of wind turbines on the subsystems and layers of their compartments, in order to optimize human activities to ensure minimal environmental impact.

It is proposed to use the presented algorithms as a mathematical support for a cyber-physical system for studying the states of complex landscape systems and assessing the impact of wind turbines on environmental components.

**Keywords:** cyber-physical system; renewable energy sources; complex landscape system; life cycle, ecosystem states; eco-points.

### Список літератури

1. ISO 14040 Environmental Management. Life Cycle Assessment. Principles and framework. International Organisation for standardisation: Geneva, Switzerland, 1997. 52 p.
2. Cleary B., Duffy A., O'Connor A. Using life cycle assessment to compare wind energy infrastructure. Proceedings of International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction, July 10–12, 2012. Nantes, France, 2012, pp. 31–39.
3. Martinez E., Sanz F., Pellegrini S., Jimenez E., Blanco J. Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine. *Renewable Energy*, 2009, no. 34(3), pp. 667–673. doi: 10.1016/j.renene.2008.05.020
4. Chenai Ch. Life cycle analysis of wind turbine. Sustainable Development – Energy, Engineering and Technologies – Manufacturing and Environment, 2012. doi: 10.5772/29184
5. Toth T., Szegedi S. Anthropogeomorphologic impacts of onshore and offshore wind farms. *Acta climatologica et chorologica*, 2007, no. 40–41, pp. 147–154.
6. Ермоленко Б.В., Ермоленко Г.В., Рыженков М.А. Экологические аспекты ветроэнергетики. *Теплоэнергетика*. 2011. № 11. С. 72–78.
7. Vestas, 2005. Environmental Statement 2004. Retrieved on 28/04/2006. URL: [http://www.vestas.com/pdf/news/2005/Vestas2004\\_Miljo\\_UK.pdf](http://www.vestas.com/pdf/news/2005/Vestas2004_Miljo_UK.pdf)
8. Hassing H., Varming S. Life Cycle Assessment for Wind Turbines. Proceedings of European Wind

- Energy Conference and Exhibition, July 2–6, 2001. Copenhagen, Denmark, 2001.
9. Одрехивский Н.В., Угрин Л.Е. Оценка и прогнозирование состояния экологической безопасности территории. Дрогобыч, 2006. 236 с.
10. Богобоящий В.В., Курбанов К.Р., Палій П.Б., Шмандій В.М. Принципи моделювання та прогнозування в екології. Київ, 2004. 216 с.
11. Одрехівський М.В. Методологія моделювання станів валеологічних технологій та їх економічної ефективності. *Економічна кібернетика*. 2006. № 3–4. С. 15–22.
12. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Москва: Наука, 1974. 832 с.

### References

1. ISO 14040 Environmental Management. Life Cycle Assessment. Principles and framework. International Organisation for standardisation: Geneva, Switzerland, 1997. 52 p.
2. Cleary B., Duffy A., O'Connor A. Using life cycle assessment to compare wind energy infrastructure. Proceedings of International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction, July 10–12, 2012. Nantes, France, 2012, pp. 31–39.
3. Martinez E., Sanz F., Pellegrini S., Jimenez E., Blanco J. Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine. *Renewable Energy*, 2009, no. 34(3), pp. 667–673. doi: 10.1016/j.renene.2008.05.020

4. Chenai Ch. Life cycle analysis of wind turbine. Sustainable Development – Energy, Engineering and Technologies – Manufacturing and Environment, 2012. doi: 10.5772/29184
5. Toth T., Szegedi S. Anthropogeomorphologic impacts of onshore and offshore wind farms. *Acta climatologica et chorologica*, 2007, no. 40–41, pp. 147–154.
6. Ermolenko B.V., Ermolenko G.V., Ryzhenkov M.A. Ekologicheskiye aspekty vetroenergetiki [Environmental aspects of wind power]. *Thermal Engineering*, 2011, no. 11, pp. 72–78 (in Russian).
7. Vestas, 2005. Environmental Statement 2004. Retrieved on 28/04/2006. Available at: [http://www.vestas.com/pdf/news/2005/Vestas2004\\_Miljo\\_UK.pdf](http://www.vestas.com/pdf/news/2005/Vestas2004_Miljo_UK.pdf)
8. Hassing H., Varming S. Life Cycle Assessment for Wind Turbines. Proceedings of European Wind Energy Conference and Exhibition, July 2–6, 2001. Copenhagen, Denmark, 2001.
9. Odrehivskiy N.V., Ugrin L.E. Otsenka i prognozirovaniye sostoyaniya ekologicheskoy bezopasnosti territorii [Assessment and forecasting of the state of ecological safety of the territory]. Drogobych, 2006. 236 p. (in Russian).
10. Bogobojashhyj V.V., Kurbanov K.R., Palij V.M., Shmandij V.M. Pryntsyepy modeliuвання ta prohnnozuvannya v ekolohii [Principles of modeling and forecasting in ecology]. Kyiv, 2004. 216 p. (in Ukrainian).
11. Odrehivskiy M.V. Metodolohiia modeliuвання staniv valeolohichnykh tekhnolohii ta yikh ekonomichnoi efektyvnosti [Methodology of modeling the standards of valeological technologies and economic efficiency]. *Economic Cybernetics*, 2006, no. 3–4, pp. 15–22 (in Ukrainian).
12. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov [A guide to mathematics for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 832 p. (in Russian).