

МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ТА ДОВКІЛЛЯ

Тарас Бойко, д.т.н. проф.; Марія Руда, к.т.н., доц.,
Національний університет «Львівська політехніка», Україна; e-mail: tgbo@ukr.net
Ольга Чаплик, Національний лісотехнічний університет, Україна

Анотація

Виконано моделювання взаємовпливу вітрової електростанції та екосистеми. Запропоновано вважати компартмент складного ландшафтного комплексу елементарним структурним елементом екосистеми. Вітряна електростанція є складовою складного ландшафтного комплексу і розглядається протягом її життєвого циклу. Визначено категорії впливу на довкілля та відносний вклад шкідливих чинників для кожної категорії. Моделювання виконано з використанням різних сценаріїв поведінки з відходами, які даватимуть змогу знижувати негативний вплив шкідливих чинників для кожної категорії. Отримано зведені дані, щодо впливу шкідливих чинників на довкілля, і побудовано з допомогою методології *Eco-indicator* екологічні профілі. Такі профілі разом з ваговими коефіцієнтами дають змогу комплексно представити екологічних впливів та отримати значення еко-індикаторів, що характеризують шкоду, завдану вітроенергетичною установкою довкіллю. Процес синтезу виробничої кіберфізичної системи представлено п'ятьма типовими кроками, серед яких процес «кібер-реалізація» полягає у створенні «кібер-близнюка» і його порівнянні з реальною системою. Для реалізації цього процесу виконано математичне моделювання, в результаті якого отримано систему диференціальних рівнянь, вхідними даними для яких є значення екологічних впливів, виражені вказаними показниками. Отримана модель виступатиме як ідеальна щодо реальної системи вітроенергетична установка – довкілля і дасть змогу прогнозування наслідків шкідливого впливу вітроенергетичної установки на складний ландшафтний комплекс та визначати керівні впливи для досягнення її максимальної ефективності та адаптації щодо вимог охорони та збереження довкілля. Представлено окремі результати, отримані з використанням розробленої моделі.

Ключові слова

Компартмент складного ландшафтного комплексу, нетрадиційні джерела енергії, життєвий цикл промислової продукції, еко-індикатори.

1. Вступ

Відомо, що розроблення та розгортання виробничих КФС може бути реалізовано впродовж п'яти процесів, зокрема – комунікації, конверсії, кібер-реалізації, когніції, конфігурації [1]. "Комунікація" – це надання зворотного зв'язку за допомогою сенсорів для управління поведінкою системи. Під час "конверсії" зібрані дані аналізують для виявлення критичних моментів і потенційних проблем. "Кібер-реалізація" має на меті створити "кібер-близнюка" та порівняти його з реальним пристроєм для подальшого синтезу системи. Впродовж "когніції" результати порівняння допомагають користувачеві визначити потенційні проблеми. "Конфігурація" полягає у переналаштуванні виробничої системи з урахуванням пріоритетів і ризиків для досягнення її максимальної ефективності.

Задача створення «кібер-близнюка» для вітроенергетичної установки (ВЕУ), що взаємодіє з довкіллям, – багатоетапний процес, який запропоновано реалізувати на основі застосування компартментальної концепції складного ландшафтного комплексу (СЛК) щодо екосистеми [2], а також концепції життєвого циклу (ЖЦ) продукції щодо ВЕУ [3].

Центральним поняттям концепції є компартмент, який піддається екологічному навантаженню з боку абіотичної природи та антропогенних чинників і характеризується певними параметрами. СЛК є закономірним поєднанням природних компонентів – ландшафтних комплексів різного таксономічного рангу, що взаємодіють і утворюють єдину систему. Компартмент – елементарний функціональний елемент СЛК, як системи, який виконує одну чи декілька функцій, має свої властивості, поведінку та контекст використання.

Концепція ЖЦ продукції передбачає, що кожному продукту властиві стадії розвитку, які в сукупності становлять його ЖЦ і кожна з стадій має власний, специфічний вплив на довкілля. На всіх стадіях ЖЦ ВЕУ як продукту, коли використовуються енергія та перетворюються матеріали, відбувається певне забруднення екосистеми зокрема СЛК, в якому він знаходиться.

Оптимальне керування станами екосистем передбачає використання передових технологій, які базувались на застосуванні сучасних інтелектуальних інформаційних систем, а також математичному опрацюванні експериментальних даних. Сталий розвиток будь-якого 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 визначило актуальність теми цього дослідження.

2. Аналіз даних

Останні пів-століття проблемами моделювання процесів і систем нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії різних рівнів займалось дуже багато вчених в цілому світі. Однак, екологічний вплив альтернативних

джерел енергії на довкілля, зокрема їх часовий аспект, досліджено сьогодні значно менше, ніж економічні чи інші особливості їх використання [4-6]. Аналіз літературних джерел дав змогу виявити, що проблемами вітрової енергетики переважно займаються у технічному плані, вивчаючи питання подальшого вдосконалення конструкції і технологій використання ВЕУ, чи з економічного погляду, розглядаючи економічну ефективність використання енергії вітру, способи раціонального розподілу і акумулювання електроенергії [7]. Водночас використовуються «інтелектуальні» технології, а саме Smart Grid, Smart Metering, Demand Response та інші для підвищення ефективності та надійності електропостачання [8]. Однак їх вплив на довкілля практично не досліджується.

Запропоноване дослідження базується на комплексному підході, який симулює взаємодію СЛК і енергетичного об'єкту впродовж всього його ЖЦ як КФС, і може бути використане для моделювання взаємодії будь-яких електричних та екологічних систем.

Базовим може бути метод оцінювання ЖЦ (Life-cycle assessment, LCA), що ґрунтується на серії ISO-стандартів [9-11] і є одним з провідних методів оцінки потенційних впливів вітроенергетичних станцій (ВЕС) на довкілля. Такий підхід застосовано у дослідженнях європейських вчених В. Cleary і ін. [12], Е. Martinez і ін. [13], Сh Ghenai [14], Т. Toth і ін. [15], а також одним з найбільших виробників вітряних турбін – датською компанією Vestas [16]. На сьогодні існує не так багато досліджень з оцінки ЖЦ для ВЕУ з високою номінальною потужністю (600 кВт). Доступні дослідження [17-19] вказують, що екологічні показники ВЕУ значно залежать від виробництва і використання різних видів матеріалів, які можуть мати шкідливий екологічний вплив, а також від непрямо утворених відходів [20], які теж повинні бути враховані. В роботі [21] показано, що взаємодію між ВЕУ і СЛК доцільно реалізувати на основі компартментальної концепції СЛК.

Також в [22] зроблено подібні висновки щодо СЛК як системи, яку слід характеризувати структурою, що є поєднанням природних компонентів різного таксономічного рангу [23]. Водночас, з врахуванням ВЕУ, що розташовані в межах СЛК, характерною є структурно-функціональна єдність біотичних та абіотичних компонентів [24]. Причому біотична складова складається з великої кількості ієрархічно пов'язаних підсистем і ярусів, між якими є матеріально-енергетичні та причинно-наслідкові зв'язки. Це дало змогу визначити початкові у мови і межі моделювання.

3. Мета дослідження.

Мета дослідження полягає у імітаційному моделюванні і прогнозуванні станів окремого СЛК, в якому функціонує вітроенергетична станція, на основі використання інтегрованої системи екологічних впливів вітроенергетичної установки на всіх етапах її життєвого циклу.

4. Методи досліджень

Типовим дизайном КФС є 5С архітектура, запропонована [1] і використана в цьому дослідженні.

Для аналізу ЖЦ ВЕУ використано [11]. 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.

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.

Значення екоіндикаторів отримані з використанням методики *Eco-indicator* [25].

5. Обговорення результатів досліджень

1. Моделювання впливу ВЕУ на компартменти СЛК. Нехай СЛК складається з n компартментів, які обмінюються потоками речовини f_{AB} (з A -го в B -й). Кожен компартмент чи його елементарний структурний елемент (блок) пов'язані з навколишнім абіотичним середовищем або іншими компартментами латеральними зв'язками, зовнішні серед яких є вхідними і вихідними потоками. Як ціле вони реагують і на зовнішні впливи, в першу чергу антропогенні. Для ландшафтознавства простором є, передусім, територія, суцільно заповнена цими компартментами. Отже, дослідити простір (територію) – означає охарактеризувати ці компартменти.

Представимо компартмент СЛК у вигляді ієрархічно організованої системи (графу), що складається з наступних 6-ти підсистем: деревостан, підріст, підлісок, трав'яно-чагарниковий ярус, моховий ярус, ґрунт. В свою чергу, кожна підсистема складається з ієрархічно послідовних ярусів. Зокрема, для підсистеми «деревостан» такими ярусами є шпильки (листя) ↔ пагони поточного року ↔ гілки ↔ кора внутрішня ↔ кора зовнішня ↔ деревина без кори ↔ коріння. Для підсистем «підріст» та «підлісок» ярусами є шпильки (листя) ↔ тонкі гілки ↔ стовбурна деревина ↔ кора ↔ коріння. Для підсистеми «трав'яно-чагарниковий ярус» ярусами є надземна фітомаса ↔ підземна фіто маса. Для підсистеми «моховий ярус» ярусами є жива частина ↔ мертва частина. Для підсистеми «ґрунт» ярусами є лісова підстилка, що поділяється на: свіжий опад ↔ гриби-сапротрофи ↔ напіврозкладена лісова підстилка ↔ гриби сапротрофи ↔ розкладений опад; мінеральні шари: основні горизонти ↔ додаткові горизонти ↔ додаткові, відносно відокремлені морфологічні елементи ґрунту.

У результаті взаємодії перелічених природних компонентів і антропогенних чинників формується специфічна система СЛК різноманітного таксономічного рангу. Зупинимось на моделюванні процесів впливу ВЕУ на

підсистеми та яруси компартментів СЛК. У представленій системі, всі величини набувають переважно трьох індексів: i_1 – для позначення області простору (компартменту СЛК); i_2 – для позначення геофізичного середовища; i_3 – для позначення впливу. 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 . Згідно [26] такі індекси називають мультиіндексами і позначають однією літерою $i = (i_1 i_2 i_3)$, а множину мультиіндексів у моделі – літерою Ω . 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 чи підсистемах i_2 області приросту компартменту i_1 , що виникають у момент часу t . Позначимо через $k_{ij}(\tau)$ значення цього впливу, який через час τ 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 компартменту до іншого компартменту не виникає і не зникає, то:

$$\sum_{j \in \Omega} k_{i,j} = \sum_{j_1=1}^n \sum_{j_2=1}^f \sum_{j_3=1}^m k_{i_1 i_2 i_3 j_1 j_2 j_3} = 1 \quad (2)$$

В результаті спостереження за значенням впливу Q_i для кожного мультиіндексу i отримаємо вираз, що визначає динаміку поширення досліджуваних впливів для різних ярусів та підсистем компартменту, зокрема:

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

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

Стан ${}^{t_r} Q$ у момент часу t_r пов'язаний з станом ${}^{t_{r-1}} Q$ у момент часу t_{r-1} співвідношенням:

$${}^{t_r} Q = {}^{t_{r-1}} Q K, \quad (4)$$

де K – лінійний оператор, який характеризує процес поширення і перетворення впливу чи забруднювача у ярусах і підсистемах за час τ , та має певні властивості, а саме, якщо за початкового стану ${}^0 Q$ n раз використати оператор K , то отримаємо:

$${}^n Q = {}^{n-1} Q K, \quad (5)$$

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

Стани компартментів СЛК ${}^t Q_i$ можна представити ієрархічною структурою у вигляді графів з вершинами, що ідентифікують ці стани, наприклад: S_1 – «добрий»; S_2 – «задовільний»; S_3 – «незадовільний»; S_4 – «поганий».

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

Формалізацію графів взаємодії компартменту СЛК і ВЕУ здійснюють за допомогою системи диференціальних рівнянь Колмогорова:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_{i,j,S_1}}{dt} = -\lambda_{i,j,S_1,S_2} \cdot P_{i,j,S_1} + \lambda_{i,j,S_1} \cdot P_{i,j,S_2}; \\ \dots \dots \dots \\ \frac{dP_{i,j,S_l}}{dt} = \lambda_{i,j,S_{l-1},S_l} \cdot P_{i,j,S_{l-1}} - (\lambda_{i,j,S_{l-1}} + \lambda_{i,j,S_l,S_m}) \cdot P_{i,j,S_l} + \lambda_{i,j,S_m,S_l} \cdot P_{i,j,S_m}; \\ \frac{dP_{i,j,S_m}}{dt} = \lambda_{i,j,S_l,S_m} \cdot P_{i,j,S_l} - (\lambda_{i,j,S_m,S_l} + \lambda_{i,j,S_m,S_{m+1}}) \cdot P_{i,j,S_m} + \lambda_{i,j,S_m,S_{m+1}} \cdot P_{i,j,S_{m+1}}; \\ \dots \dots \dots \\ \frac{dP_{i,j,S_n}}{dt} = \lambda_{i,j,S_{n-1},S_n} \cdot P_{i,j,S_{n-1}} - \lambda_{i,j,S_n,S_{n-1}} \cdot P_{i,j,S_n}; \end{array} \right. \quad (6)$$

де $i = 1, 2, \dots, N$ та $j = 1, 2, \dots, M$ – порядкові номери мультиіндексів i та j відповідно; $S_1, \dots, S_l, S_m, \dots, S_n$ – стани компартментів СЛК; P_{i,j,S_l} – імовірність знаходження компартментів СЛК або концентрації шкідливих речовин

у стані S_l чи S_m ; λ_{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.

Якщо, наприклад, обмежитись $m, l = 1, 2, 3, 4$ і $m \neq l$, тоді система диференціальних рівнянь матиме вигляд (7), розв'язуючи яку з допомогою обчислювальної техніки, можна здійснювати дослідження станів розвитку СЛК у динамічному та стаціонарному режимах:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_{i,j,S_1}}{dt} = -\lambda_{i,j,S_1,S_2} \cdot P_{i,j,S_1} + \lambda_{i,j,S_2,S_1} \cdot P_{i,j,S_2} \\ \frac{dP_{i,j,S_2}}{dt} = \lambda_{i,j,S_1,S_2} \cdot P_{i,j,S_1} - (\lambda_{i,j,S_2,S_1} + \lambda_{i,j,S_2,S_3}) \cdot P_{i,j,S_2} + \lambda_{i,j,S_3,S_2} \cdot P_{i,j,S_3} \\ \frac{dP_{i,j,S_3}}{dt} = \lambda_{i,j,S_2,S_3} \cdot P_{i,j,S_2} - (\lambda_{i,j,S_3,S_2} + \lambda_{i,j,S_3,S_4}) \cdot P_{i,j,S_3} + \lambda_{i,j,S_4,S_3} \cdot P_{i,j,S_4} \\ \frac{dP_{i,j,S_4}}{dt} = \lambda_{i,j,S_3,S_4} \cdot P_{i,j,S_3} - \lambda_{i,j,S_4,S_3} \cdot P_{i,j,S_4} \end{array} \right. \quad (7)$$

Значення інтенсивностей переходів зі стану в стан для кожного елемента ієрархічної структури (яруси 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. Водночас таку інформацію можна отримати шляхом імітаційного моделювання.

2. Імітаційне комп'ютерне моделювання процесу отримання результатів експериментальних досліджень ВЕУ протягом його життєвого циклу. Моделювання процесу експериментальних досліджень ВЕУ здійснено з використанням програми *SimaPro*, яка дає змогу отримати відносно вірогідні дані щодо екологічних впливів виражені в еко-індексах, на основі сукупності вхідної інформації, що характеризує техногенний об'єкт. В нашому випадку було змодельовано процес, що охоплює ЖЦ формування віртуальної ВЕС в реальних умовах українських Карпат.

Дослідження впливу ВЕС на компоненти довкілля виконано з урахуванням низки технічних характеристик ВЕУ, що є основним обладнанням проекту. ВЕС складається з окремих ділянок та розташованих на них споруд і обладнання. Зважаючи на вітрові та погодні умови на території планованої діяльності, а також шумові, вібраційні та інші характеристики обрано ВЕУ фірми «Siemens SWT DD-142». Більшість використаних даних походять зі звіту LCA, реалізованого компанією Vestas [27], та з Загальної специфікації «Siemens SWT DD-142» [28].

До стаціонарних об'єктів ВЕС входять: система і споруди управління роботою ВЕС, споруди ремонтно-експлуатаційної бази і розподільчі пункти з силовим обладнанням та інженерними комунікаціями, фундаменти башт, башти ВЕУ, опори, повітряні і підземні лінії, під'їзні шляхи, інші допоміжні споруди та інженерні комунікації, необхідні для роботи і життєдіяльності ВЕС.

При розміщенні ВЕУ враховано наявність доріг для транспортування обладнання та можливість організації під'їздів до ВЕУ, зокрема максимальне використання існуючої інфраструктури для якнайменшого впливу на довкілля. Орієнтація розміщення ВЕУ враховує домінуючі напрямки вітру. Відстані між турбінами визначались, виходячи насамперед з результатів аналізу вітрових характеристик території та міркувань оптимізації розташування ВЕУ для зменшення впливу на довкілля, а також врахування візуального впливу на населення найближчих поселень, туристів тощо.

На місцях розташування ВЕУ передбачено тимчасове розміщення будівельних майданчиків для монтажу та обслуговування об'єктів. Іншу категорію становлять земельні ділянки, які тимчасово використовують для зберігання деталей конструкцій. Уздовж рядів ВЕУ проектується підземні кабельні та комунікаційні лінії і технологічні дороги, які відображено на схемах інженерних мереж.

Виробничими процесами, які, впродовж ЖЦ ВЕУ, матимуть вплив на довкілля є: виробництво матеріалів та обладнання, потрібних для виготовлення складових частин ВЕУ та допоміжних споруд і фундаменту (бетон, алюміній, сталь, скловолокно тощо); експлуатація наявних доріг для транспортування складових частин ВЕУ та іншого обладнання від місця їх виробництва до місця встановлення спеціалізованими вантажівками; монтаж ВЕУ за допомогою підйомних кранів; тимчасово використана земельна ділянка площею 1,25 га для зберігання деталей конструкцій; візуальний вплив ВЕУ висотою до 150 м (з врахуванням обертання лопатей); мерехтлива тінь, шумовий вплив і вібрація від обертання лопатей та роботи генераторів; електромагнітне випромінювання проєктованих повітряних і кабельних ліній електропередач та трансформаторної підстанції; вплив на водне середовище. Оскільки дані про споживання енергії для кожного виробничого процесу, є недоступні, то загальне споживання енергії було визначено для всього виробництва ВЕУ і становить 7405 МВт×год електроенергії [29].

Враховано такі можливі сценарії поводження з відходами. Зокрема для типу відходів: сталь і чорні метали – за даними [30] 90% сталі та заліза переробляють; за даними [31] 10% сталі, неактивної в умовах звалища, складають на землі; для типу відходів: мідь – за даними [30] 90% міді переробляють; за даними [30] решта 10% міді, неактивної в умовах звалища, складають на землі [30]. Споживання енергії під час виробництва міді становить 130,3 ГДж/т [31], а затрати на її переробку становлять 20% від виробництва (13% під час переробки [31], 20% під час консервування); для типу відходів: бетон – за даними [30] 100% бетону, неактивного в умовах звалища, складають на землі; для типу відходів: пластмаси – 100% пластмас та скловолокна спалюють [30]. За даними [30] утилізація поліетилентерефталату потребує 0,2% води під час спалювання в міських печах; під час транспортування прийнято, що місце для рециклінгу, складування ґрунту та сміттєспалювальний завод розташовані в середньому за 200 км від місця встановлення ВЕУ. Тоді на кожен тону матеріалу, що переробляється, припадає 200 км транспортування вантажівкою вантажопідйомністю 28 т.

Виробництво ВЕУ подано як виготовлення трьох її основних частин: вежі, ротора і гондоли, що охоплює період від отримання сировини до завершення робіт зі встановлення, а також формування фундаменту.

За поданим описом, визначеними виробничими процесами, етапами життєвого циклу ВЕУ і внесеними до програми даними виконано інвентаризацію компонентів і матеріалів, результати якої представлено у табл. 1.

Таблиця 1. Інвентаризаційна таблиця для виробництва одного ВЕУ

Component	Sub-component	Material	Quantity
Rotor	Blades	Glass-reinforced plastics	53 t
	Hub w/nose cone	Cast iron	35 t
		Low-alloy steel	21 t
		Glass-reinforced plastics	1.4 t
Nacelle	Generator	Copper	10 t
		Electrical steel	23 t
	Gearbox	Cast iron	42 t
		High-alloy steel	42 t
	Housing	Glass-reinforced plastics	10 t
	Main frame	Cast iron	35 t
		Low-alloy steel	19 t
	Main shaft	High-alloy steel	27 t
		Low-alloy steel	4.8 t
	Transformer	Copper	7.8 t
Electrical steel		18 t	
Tower	Tubular steel	Low-alloy steel	350 t
	Tower internals	Aluminum	2.6 t
		Copper	1.3 t
Foundation	Ballast	Gravel	5200 t
	Concrete	Concrete	1300 m ³
	Reinforcement	Reinforcement steel	560 t

На основі всіх представлених даних програмою SimaPro згенеровано дерево процесів для визначення потенційних впливів на довкілля. Всі вхідні та вихідні потоки впродовж ЖЦ ВЕУ згруповано так, що кожна з груп представляла обрану категорію впливу. Аналогічно впорядковано інвентаризаційну таблицю так, щоби для кожної категорії впливу якісно і кількісно врахувати всі відповідні викиди чи споживання матеріалів.

Хоча вибір категорій впливу був частково суб'єктивний, його скореговано так, щоби адекватно представити навантаження на довкілля, спричинене ВЕУ. Зокрема, це широко визнані екологічні проблеми, такі як канцерогенний вплив – 1, вплив респіраторної неорганіки – 2 і органіки 3, кліматичні зміни – глобальне потепління – 4, вплив радіації – 5, руйнування озонового шару – 6, екотоксичність – 7, підкислення і евтрофікація – 9, землекористування 10, виснаження корисних копалин – 10 і викопного палива – 11.

На рис. 1 представлені одиничні оцінки, що розділені на чотири етапи ЖЦ: виготовлення, експлуатація, транспортування та утилізація. Це дає змогу виявити саме ті етапи ЖЦ, які мають значний вплив безпосередньо на довкілля. Наприклад, виробництво значно сприяє виснаженню ресурсів.

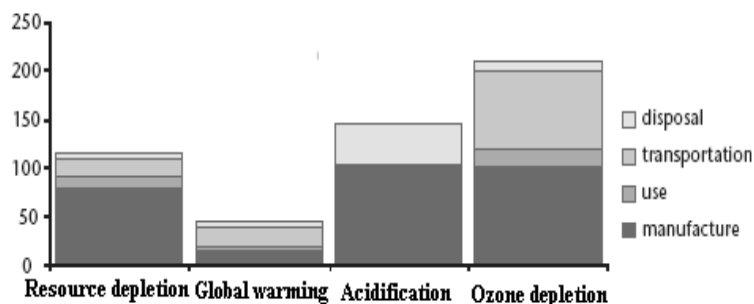


Рис. 1. Довкільний профіль з врахуванням етапів життєвого циклу ВЕУ

Отримані результати не можна порівнювати, бо вони, зазвичай, представлені у різних одиницях. Для цього виконано процедуру нормалізації, що дає змогу порівнюючи категорії впливу визначити, які наслідки мають вищий пріоритет. Нормалізована оцінка ефекту – відсоток щорічного внеску певного продукту в цей ефект у певній області.

Наступним здійснено зважування категорій, яке виконано домноженням значень нормалізованого довкільного профілю на присвоєний категорії коефіцієнт вагомості. Зважування – зазвичай, базується на суб'єктивних міркуваннях. Для порівняння впливів використовують вагові коефіцієнти, які визначають: рішенням групи експертів – методи *Eco-indicator 99* і *ReCiPe*; методом урахування віддаленості від цілі – *Ecological Scarcity methods*; грошової оцінки шкоди – метод *EPS 2000*.

Впродовж наступного кроку обчислюють експозицію навантажень, використовуючи середньоєвропейські дані. В *Eco-indicator*-підході виділено три категорії уражень: здоров'я людини, якість екосистеми та виснаження ресурсів. До першої категорії віднесено: канцерогени, респіраторні речовини, зміну клімату, радіацію, руйнування озонового шару та екотоксичність. Якість екосистем охоплює підкислення/евтрофікацію і землекористування. Третя категорія – природні ресурси містить: корисні копалини і викопні види палива.

Значення *Eco-indicator* для певного впливу виражають як суму впливів для кожної з трьох категорій. Кожну з категорій впливу виражають однією одиницею. Вплив на здоров'я людини виражають як DALY (англ.

Disability Adjusted Life Years – роки життя з урахуванням інвалідності). Вплив на якість екосистеми виражено як PAF × m² × рік та PDF × m² × year (англ. Potentially Affected Fraction і Potentially Disappeared Fraction, відповідно – потенційно уражена фракція та потенційно зникла фракція). Виснаження ресурсів виражають як надлишок енергії, необхідної для наступного видобутку корисних копалин та викопного палива. В таблиці 2 вказані отримані в дослідженні вагові коефіцієнти для застосованих трьох категорії уражень: здоров'я людини, якість екосистеми, ресурси.

Таблиця 2. Вагові коефіцієнти за Eco-indicator

Substance	Damage category	Hierarchist weights	Egalitarian weights	Individualist weights
Resource use (/kg)				
Coal (29.3 MJ/kg)	Resources	0.00599	0.0687	0
Crude oil (41 MJ/kg)	Resources	0.140	0.114	0
Natural gas (30.3 MJ/kg)	Resources	0.108	0.0909	0
Aluminium ore	Resources	0.0119	0.0168	0.667
Copper ore	Resources	0.00987	0.0140	0.553
Iron ore	Resources	0.000690	0.000976	0.0387
Zinc ore	Resources	0.00178	0.00253	0.10
Ecosystem quality land use (/m2 year or /m2)				
Industrial area	Occupation (/m2 year)	0.0655	0.0819	0.0466
Industrial area	Conversion (/m2)	1.96	2.45	1.39
Forest land	Occupation (/m2 year)	0.00858	0.0107	0.00610
Forest land	Occupation (/m2 year)	0.0897	0.112	0.0637
Forest land	Conversion (/m2)	2.68	3.35	1.91
Emission to air (/kg)				
CO	Human health, respiratory	0	0.00579	0
CO ₂	Human health, climate	0.0297	0.0222	0.0497
NH ₃	Human health, respiratory	0.0902	0.673	0.938
NH ₃	Ecosystem quality	1.21	1.52	0.863
NH ₃	Sum, NH ₃ to air	2.112	2.193	1.801

На рис. 2 показано розподіл отриманих в дослідженні значень екологічних показників за чотирма етапами життєвого циклу ВЕС: виробництво; демонтаж і утилізація; експлуатація; транспортування і встановлення.

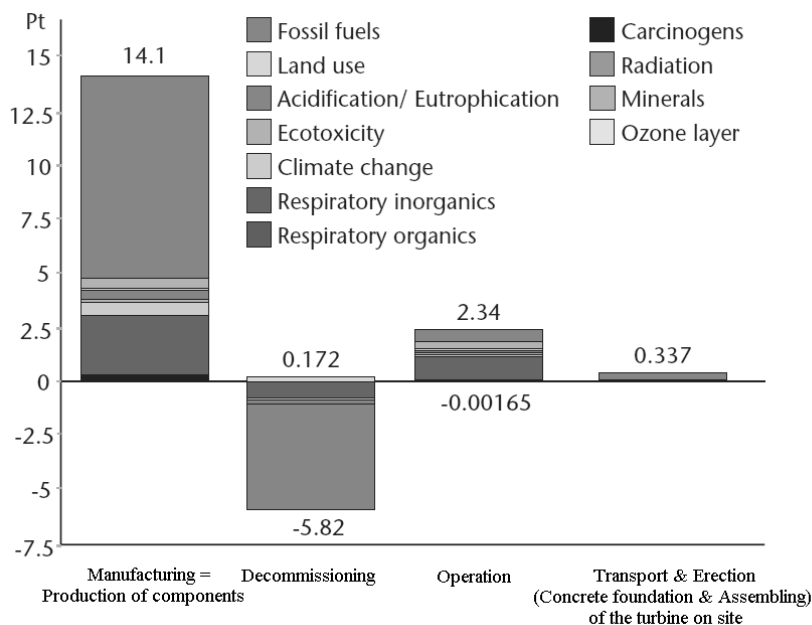


Рис. 2. Екологічні показники життєвого циклу ВЕС для чотирьох етапів

3. Прогнозування наслідків шкідливого впливу ВЕС на СЛК. Прогнозування впливів шкідливих речовин і станів компартменту СЛК, як ієрархічної структури у динамічному та стаціонарному режимах, можна реалізувати розв'язуючи систему диференціальних рівнянь (7) та алгебраїчних рівнянь (13) за допомогою інформаційних технологій та представлених даних, отриманих з використанням результатів комп'ютерного моделювання експериментальних досліджень ВЕС впродовж його ЖЦ в програмі *SimaPro* та методики *Eco-indicator*. В цьому випадку стани компартментів, що входять до системи рівнянь (7) можна виразити з допомогою методології *Eco-indicator* через представлений в еко-балах вплив (рис. 2). Нехай ієрархічну структуру станів

		ярус компартменту			species-rich Nardus grasslands та фрагменти реліктових фітоценозів з домінуванням аркто-альпійського виду <i>Juncus trifidus</i> L., які можна розглядати в межах асоціації <i>Oreochloetum (distichae) juncosum (trifidi)</i> , занесеного до З. к. України
	Occupied area as industrial area	(land use)	X	X	12 типів оселищ, які підлягають охороні (а саме: «C2.12», «C2.18», «C2.19», «C2.25», «D2.226», «D2.3», «E1.71», «E4.11», «E4.3», «E5.5», «F4.2», «G1.6»).
		грунтова підсистема лісового компартменту	га	~30,6	Зняття верхнього родючого шару ґрунту. Вітрова та водна ерозія. Зміни у ґрунтовому профілі.
		(land use)	X	X	Зміна гідрологічного режиму
		Тваринний світ	X	X	Посилення крайового ефекту. Втрата природних ареалів, місць гніздування, харчування для птахів та рукокрилих.
	CO	Air	kg	27	Забруднення
	CO2		kg	17	
	CxHy		kg	14	
Operation & Maintenance	Occupied area as industrial area	грунтова підсистема лісового компартменту	га	~30,6	Ущільнення ґрунту
		Тваринний світ	X	X	Ураження кажанів та птахів під час зіткнення з турбінами, лініями електропередач
		(land use)	m	150	Вплив на візуальне сприйняття оточуючого середовища
	Паливно-мастильні матеріали	трав'яно-чагарниковий ярус компартменту	га	0.003	Можливі проливи під час заміни комплектуючих
	BOD	Wastewater	g	456	Поверхневий стік
Decommissioning	Occupied area as industrial area	трав'яно-чагарниковий ярус & грунтова підсистема лісового компартменту	га	~30,6	Знищення, або пошкодження особливо цінних видів
	Acid as H+	Wastewater	g	48	Забруднення
	BOD		g	850	
	Calcium ions		g	47	
	Cl		mg	37	
	COD		g	76	
	CxHy		g	26	
	Detergent/oil		mg	49	
	Occupied area as industrial area	Тваринний світ	X	X	Перешкоджання вільній міграції видів
	CO	Air	kg	23	Забруднення
	CO2		kg	20	
CxHy	kg		19		

6. Висновки

З врахуванням всіх етапів життєвого циклу ВЕУ має істотний негативний вплив на довкілля, не зважаючи на те, що його відносять до так званої «зеленої енергетики». Причому основну увагу слід звернути на етапи, що передують експлуатації готового ВЕУ, а також його демонтаж та утилізацію. Взаємодію ВЕУ з СЛК як компонентом довкіллям, можна трактувати як КФС, якщо механізми їх інтеграції відстежують комп'ютерні алгоритми.

Реалізовано задачу створення «кібер-близнюка» взаємодії ВЕУ і СЛК математичним моделюванням станів його компонентів під інтегрованою дією забрудників і шкідливих компонентів. Процес їх поширення охарактеризовано лінійним оператором станів системи в попередній і наступний момент часу. Граф з вершинами, що ідентифікують ці стани, формально представлено диференціальними рівняннями Колмогорова, де часова зміна ймовірності знаходження системи в певному стані пов'язана з інтенсивністю переходів шкідливих речовин між станами.

Інформацію про значення поширення забрудників і шкідливих чинників в ярусах та підсистемах компартменту СЛК отримано шляхом імітаційного моделювання процесу його взаємодії з ВЕУ впродовж всього ЖЦ з використанням програми *SimaPro* і методології *Eco-indicator '99*. Тут вхідними даними для розв'язку системи рівнянь, які визначають динаміку поширення досліджуваних шкідливих впливів в різних ярусах та підсистемах компартментів СЛК, є виражені в еко-балах значення показників, отримані за різних сценаріїв розвитку системи та поводження з відходами.

Розроблено екологічні профілі та отримано вагові коефіцієнти, які дали змогу представити впливи впродовж ЖЦ ВЕУ у вигляді еко-індикаторів. Прикладом є система еко-індикаторів, розподілених за чотирма етапами ЖЦ ВЕС: виробництво; експлуатація; транспортування і встановлення; демонтаж і утилізація. Найбільший шкідливий екологічний вплив зі значенням еко-індикатора - 14,1 відбувається впродовж етапу виробництва ВЕУ, що пов'язано з типом використовуваної електроенергії.

Система еко-індикаторів дала змогу перейти до прогнозування впливів шкідливих речовин і станів компартменту СЛК, як ієрархічної структури, у динамічному та стаціонарному режимах, на основі розв'язків розроблених систем диференціальних та алгебраїчних рівнянь. Ієрархічну структуру компартментів ідентифіковано чотирма станами, а саме: S_1 – «норма»; S_2 – «нижче норми»; S_3 – «вище норми»; S_4 – «істотно вище норми». Найбільш істотні наслідки виникають на етапі транспортування, установки і монтажу ВЕУ, а також видалення окремих складових чи всієї турбіни після закінченню її експлуатації. Цей вплив має локальний і тимчасовий характер, однак з огляду на значний обсяг уражень екосистеми слід виявляти можливі напрямки і розробляти заходи щодо його зниження.

Розв'язок систему рівнянь дає змогу оцінити як результуючий негативний ефект цих впливів, так і виявити які з них найістотніші і домінуючі. Вказані результати даватимуть змогу розробляти алгоритми керування станами цієї ландшафтно-інженерної системи для оптимізації взаємодії ВЕУ з компартментами СЛК, а також здійснювати прогнозувати станів розвитку СЛК у динамічному та стаціонарному режимах внаслідок впливу ЖЦ ВЕУ на його підсистеми і яруси компартментів.

Отримана модель виступатиме як ідеальна щодо реальної системи ВЕУ-довкілля і дасть змогу прогнозування наслідки шкідливого впливу ВЕУ на СЛК та визначати керівні впливи для досягнення її максимальної ефективності та адаптації щодо вимог охорони та збереження довкілля.

Список літератури

- [1] Lee J, Bagheri B and Kao HA. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manuf Lett* 2015; 3: 18–23/
- [2] DK-7000 Fredericia, Copenhagen, DK., Lenzen M, Munksgaard J (2002): Energy and CO2 life-cycle analyses of wind turbines – Review and applications. *Renewable Energy* 26: 339–362.
- [3] Lenzen M, Wachsmann U (2004): Wind turbines in Brazil and Germany: an example of geographical variability in life-cycle assessment. *Applied Energy* 77: 119-130.
- [4] Burton T., Sharpe D., Jenkins N., Bossanyi E. (2001), *Wind energy*.
- [5] Handbook. / [West Sussex], England, 643 p., Chmielniak, T. (2008).
- [6] Technologie energetyczne. [Wydawnictwa NaukowoTechniczne], Warszawa. – 564 p.
- [7] Schleisner L (2000): Life cycle assessment of a wind farm and related externalities. *Renewable Energy* 20: 279–288.
- [8] Tech-wise A/S (2001): Livscyklusvurdering af vindmøller., 01-488, Techwise A/S, Kraftværksvej 53, Fredericia, DK Schleisner 2000, Tech-wise A/S 2001.
- [9] ISO 14040 (1997). Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and framework. International Organisation for standardisation: Geneva, Switzerland.,
- [10] Екологічне управління. Оцінювання впливів у процесі життєвого циклу. Приклади застосування ISO 14042: ДСТУ ISO/TR 14047:2007 (ISO/TR 14047:2003, IDT). – [Чинний від 2009-07-01]. – Офіц. вид. – К. : Держстандарт України, 2009. – 24 с.
- [11] Екологічне керування. Оцінювання життєвого циклу. Принципи та структура: ДСТУ ISO 14040:2004. – [Чинний від 2006-01-01]. – Офіц. вид. – К. : Держстандарт України, 2007. – 14 с.
- [12] Cleary B. Using life cycle assessment to compare wind energy infrastructure / B. Cleary, A. Duffy, A. O'Connor // *Proceedings of International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction*. – 2012. – P. 31-39.
- [13] Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine / E. Martinez, F. Sanz, S. Pellegrini [et. Al] // *Renewable Energy*. - № 34(3). – 2009. – P. 667-673.
- [14] Chenai Ch. Life cycle analysis of wind turbine // *Sustainable Development – Energy, Engineering and Technologies – Manufacturing and Environment*. – 2012.
- [15] Toth T. Anthropogeomorphologic impacts of onshore and offshore wind farms / T. Toth, S. Szegedi // *Acta climatologica et chorologica*. – 2007. - № 40-41. – P. 147-154.
- [16] Final Report. Life Cycle Assessment Of Electricity Production from a Vestas V112 Turbine Wind Plant. – 2011. <http://www.vestas.com.>, Vestas, 2005.
- [17] Andersen PD (7/8.3.2002): Environmentally Sound Design and Recycling of Future Wind Power Systems. In: IEA R&D Wind's Topical expert meeting on Material recycling and life cycle analysis (LCA) of wind turbines.
- [18] Risoe National Laboratory., Elsam (2004): Livscyklusvurdering af hav- og landplacerede vindmølleparker, 02-170261, Elsam Engineering A/S, Kraftværksvej 53.
- [19] Fredericia, DK., Hassing H, Varming S (2–6.7.2001): Life Cycle Assessment for Wind Turbines. In 2001 European Wind Energy Conference and Exhibition. Tech-wise A/S, Kraftværksvej 53.
- [20] Battele Columbus Laboratories, “Energy use patterns in metallurgical and non-metallic mineral processing”. As cited in United Nations Centre 1992 on Transnational Corporations, Climate Change and Transnational Corporations Analysis and Trends. Retrieved on 20/05/2006. [Online]. – Available from: <http://www.ieer.org/reports/climchg/ch7.pdf>.
- [21] T. Gh. Bojko, M. M. Paslavskyi, M. V. Ruda, “Stability of composite landscape complexes: model formalization”. *Scientific Bulletin of UNFU*, 29(3), 2019, pp. 108–113. doi: 10.15421/40290323.
- [22] Tech-wise A/S (2001): Livscyklusvurdering af vindmøller., 01-488, Techwise A/S, Kraftværksvej 53, Fredericia, DK Schleisner 2000, Tech-wise A/S 2001.
- [23] O. Pombo, K. Allacker, B. Rivela, J. Neila, “Sustainability assessment of energy saving measures: a multi-criteria approach for residential buildings retrofitting”. *Energy and Buildings*, 116, 2016, pp. 384–394. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.01.019.

- [24] Copenhagen Sustainability Lectures, 2019. [Online]. – Available from: http://klima.ku.dk/sustainability_lectures/inger_andersen/.
- [25] Zbicinski, I., Stavenuiter, J., Kozłowska, B., Van de Coevering, H. 2006. Product design and Life Cycle Assessment. The Baltic University Press, 4. ISBN 91-975526-2-3 pp. 314.
- [26] SimaPro Manuals. [Online]. – Available from: <http://www.pre.nl/content/manuals>.
- [27] Vestas, 2005, Environmental Statement 2004, Retrieved on 28/04/2006. [Online]. – Available from: http://www.vestas.com/pdf/news/2005/Vestas2004_Miljo_UK.pdf.
- [28] Danish Energy Authority, 2006. Energy Statistics 2004. Retrieved on 21/05/2006. [Online]. – Available from: http://www.ens.dk/graphics/Publikationer/Statistik_UK/Energy_Statistics_2004/html/large01e.htm
- [29] European Wind Energy Agency, 2006. Retrieved on 28/04/2006. [Online]. – Available from: <http://www.ewea.org/index.php?id=196>
- [30] Energy & Recycling. Retrieved on 20/05/2006. [Online]. – Available from: <http://faculty.washington.edu/crowther/KidsZone/recycling.html>.
- [31] Kollner, T. and Jungbluth, N. (1999). Life Cycle Impact Assessment for Land Use. Third SETAC World Congress, May 21-25, 2000, Brighton, UK.
- [32] Granino A. Korn and Theresa M. Korn Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review, Dover Publications 2013.