

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВІВ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК НА КОМПАРТМЕНТИ СКЛАДНОГО ЛАНДШАФТНОГО КОМПЛЕКСУ ЗА МЕТОДИКОЮ *LIFE CYCLE ASSESSMENT*

Погребенник В.¹, д.т.н. проф., Петров О.², д.т.н. проф.,
Руда М.¹, к.т.н., асис., Бойко Т.³, д.т.н. проф.

¹ – кафедра екологічної безпеки та природоохоронної діяльності, Національний університет «Львівська політехніка», Україна; e-mail: vpohreb@gmail.com, marichkarmv@gmail.com

² – Department of Applied Computer Science, AGH University of Science and Technology, Польща; e-mail: asp1951@gmail.com

³ – кафедра інтелектуальної мехатроніки та роботики, Національний університет «Львівська політехніка», Україн; e-mail: tgbo@ukr.net

Анотація

Для оцінювання екологічного впливу вітроенергетичних турбін на довкілля запропоновано застосувати концепцію життєвого циклу альтернативних джерел енергії. За допомогою імітаційного моделювання з використанням програмного забезпечення SimaPro отримано інтегровану систему показників впливів вітроенергетичних систем на яруси і підсистеми компартментів складних ландшафтних комплексів. Побудовано дерево процесів для виявлення потенційних впливів, їх характеристики, зважування і ранжування. На основі аналізу різних впливів на довкілля встановлено, що найзначніші наслідки для ярусів підсистем компартментів складного ландшафтної комплексу (СЛК) зазвичай виникають на етапі транспортування, встановлення і монтажу вітряних турбін, а також видалення окремих складових чи всієї турбіни після закінченню її експлуатації. Показано, що дослідження лише всіх процесів починаючи від формування і закінчуючи утилізацією ландшафтно-техногенних систем, дасть змогу виявити можливі інтегровані наслідки їх впливу на довкілля.

Ключові слова

Комп'ютерне моделювання, вплив на довкілля, оцінювання життєвого циклу, вітроенергетична установка.

1. Вступ

Діяльність людини в процесі виготовлення продукції чи надання послуги неминує пов'язана з впливом на довкілля. Залежно від природи продукту/послуги екологічний вплив може проявлятися по-різному, наприклад, як виснаження озонового шару, парниковий ефект, окислення ґрунту чи втрата біорізноманіття. Кожен продукт або послуга проходить ряд стадій розвитку, які в сукупності становлять їх «життєвий цикл» і кожна зі стадій має власний, специфічний вплив на довкілля.

Земля є замкненою системою матеріальних потоків. Переходячи з одного продукту в інший та змінюючи форми свого стану, матерія циклічно циркулює в екологічній системі. Саме тому загальна маса матерії не змінюється, незалежно від того що людство виготовляє на Землі, або яку послугу надає, а перебіг матеріальних потоків і процесів відбувається за лінійною схемою. Так на нескінченно довгому відрізьку часу матеріали, що пройшли через техносферу, знову повертаються у довкілля як сировина.

Концепція життєвого циклу розглядає продукти/послуги з початку їх фізичного виникнення і до моменту припинення їх існування. Життєвий цикл складається з таких стадій, як видобуток сировини, виробництво енергії, транспортування, операції первинної обробки, безпосереднє виробництво продукту, пакування, розподіл, утилізація та інших.

В процесі планування і проектування життєвого циклу певного продукту/послуги повинен бути застосований системний підхід, який враховує його взаємодію з системами життєвого циклу інших продуктів/послуг. Вихідні потоки енергії можуть бути як відходами досліджуваної системи, так і слугувати ресурсами (вхідними потоками) в іншу систему. На всіх стадіях життєвого циклу продукту/послуги, коли використовуються енергія та перетворюються матеріали, відбувається певне забруднення довкілля.

Оптимальне керування станами екосистем передбачає використання передових технологій при їх дослідженні, які б базувались на застосуванні сучасних експертних інтелектуальних інформаційних систем. Сталий розвиток регіону, як цілісної соціо-еколого-економічної системи потребує адекватного апарату інформування про стани природного середовища і відповідних імітаційних моделей. Водночас прогнозування повинно базуватись на вірогідних методах моделювання оцінки станів екосистем, що й стало проблемою цього дослідження.

2. Аналіз Літературних Даних Та Постановка Проблеми

В останні десятиліття людство зіткнулося з двома суперечливими енергетичними проблемами. З одного боку це забезпечення надійності енергопостачання, з іншого – боротьба з негативним впливом виробництва енергії на довкілля, як у районах розміщення джерел генерації, так і в масштабах всієї планети [1].

Поширеним є погляд, що використання електроенергії з відновлюваних джерел є екологічно безпечним. Це не зовсім вірно, оскільки такі джерела енергії мають принципово інший спектр впливу на довкілля в порівнянні з традиційними енергообладнаннями на різних видах палива, причому в деяких випадках вплив останніх може мати навіть меншу небезпеку [2]. Екологічний вплив нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії на довкілля досліджено сьогодні значно менше, ніж технічні питання їх використання, особливо щодо їх часового аспекту [3 & 4].

Проблеми моделювання екологічних процесів і систем різних рівнів досліджували багато вітчизняних та іноземних вчених. Особливий внесок у цей напрям зробили: І.С. Благун, В.В. Вітлінський, А.К. Прикарпатський, В.М. Гейц, М.В. Одрехівський, М.І. Скрипниченко, Б.В. Гнеденко, І.М. Коваленко, А.В. Яцик, А.Б. Качинський, В.І. Мунтіян. Однак аналіз літературних джерел дав змогу виявити, що проблемами альтернативної енергетики переважно займаються у технічному плані, вивчаючи питання подальшого вдосконалення конструкції і технологій використання вітроенергетичних установок (ВЕУ), або з економічного погляду розглядаючи економічну ефективність використання енергії вітру. А питання впливу об'єктів вітроенергетики на компоненти довкілля висвітлені недостатньо і у наукових дослідженнях екологів практично не розглядаються.

Практика показує щоби розробити таку методологію, яку можна було б використовувати для дослідження і моделювання будь-яких екосистем і їх станів різних регіонів потрібно застосовувати комплексний підхід. Зокрема, таким може бути метод аналізу життєвого циклу (*Life-cycle analysis, LCA*), що ґрунтується на серії ISO-стандартів [5-8] і є одним з провідних методів оцінки потенційних впливів вітроенергетичних станцій (ВЕС) на довкілля. Такий підхід був використаний у дослідженнях європейських вчених *B. Cleary* і ін. [9], *E. Martinez* і ін. [10], *Ch Ghenai* [11], *T. Toth* і ін. [12]. Деякі з цих оцінок також вказують на велику кількість непрямо утворених відходів, зокрема, у роботі російських вчених Б.В. Єрмоленка і ін. [13], а також одним з найбільших виробників вітряних турбін – данською компанією *Vestas* [20]. Немало сучасних досліджень з оцінювання життєвого циклу для вітрогенераторів з високою номінальною потужністю (600 кВт). Найвні дослідження [14-21] показують домінуючий вплив матеріального виробництва на екологічні показники вітроелектростанцій.

3. Мета, Об'єкт і Предмет дослідження

Мета дослідження полягає в розробленні методичного підходу до побудови інтегрованої системи показників, для оцінювання впливів вітроенергетичних установок на яруси і підсистеми компартментів складних ландшафтних комплексів (СЛК) на всіх етапах їх життєвого циклу (ЖЦ), а також за допомогою імітаційного моделювання.

Об'єктом дослідження стали 34 ВЕУ фірми «*Siemens SWT DD-142*» ВЕС загальною потужністю 120 МВт з необхідною інфраструктурою, а саме, під'їзні дороги, підземні кабельні лінії електропередач 110 кВ та підземні кабельні мережі 35 кВ, розподільчі пункти і підстанція, загальною площею 30,6041 га ТОВ «АТЛАС ВОЛОВЕЦЬ ЕНЕРДЖИ», що входить до вітрового парку. Площадка Воловецької ВЕС розташована на північному заході Закарпатської області в межах Боржавських Полонин Східних флішових Карпат.

Предметом дослідження є СЛК в якій функціонують ВЕУ. СЛК – біологічна система, якій характерна структурно-функціональна єдність взаємозв'язаних компонентів і цілісність біотичної та абіотичної складових. Біотична складова довкілля об'єднана у компартменти, що складаються з підсистем різних рівнів організації і великої кількості різноманітних ярусів, між якими існують тісні матеріально-енергетичні та ієрархічні зв'язки. Боржавські Полонини Східних флішових Карпат за означенням [22 & 23] відносять до СЛК.

Врахування екологічного чинника сьогодні є однією найважливіших умов життєдіяльності не лише виробничих систем різного призначення, якими є ВЕС, але й суспільства загалом. Сталий розвиток – це насамперед збереження і раціональне використання природних ресурсів. Саме тому екологічну складову потрібно розглядати як одну з визначальних при вирішенні проблем досягнення сталого розвитку та прийнятного рівня економічної безпеки, як окремих суб'єктів господарювання, так і регіонів і держави загалом. Її можна характеризувати різноманітністю форм

прояву екологічного впливу, складом й інтенсивністю впливів на довкілля, характером соціальних, економічних, фізіологічних та інших наслідків цих впливів.

Для кількісної оцінки наслідків впливу ВЕУ в компартаментах СЛК здійснено аналіз ЖЦ ВЕУ за допомогою програмного забезпечення *SimaPro*, яке є професійним інструментом для збору, аналізу та моніторингу екологічних характеристик продуктів і послуг. З його допомогою можна моделювати й аналізувати складні ЖЦ систематизованим та зрозумілим способом.

Зокрема, *SimaPro* дає можливість аналізувати продукти з урахуванням сценаріїв поводження з відходами, який можна моделювати самостійно, в залежності від обраного продукту/послуги. ЖЦ містить сценарії поводження з відходами з відсотковими частками кожного етапу (наприклад рециклінг, захоронення тощо) у загальному сценарії або один сценарій їх захоронення на сміттєзвалищі.

Для аналізу впливу на довкілля ВЕУ у компартаментах СЛК протягом його ЖЦ до програми *SimaPro* занесено дані про окремі складові ЖЦ ВЕУ у компартаментах СЛК з зазначенням матеріалів, компонентів і процесів, що їх супроводжували. Всі необхідні вхідні дані були згруповані за відповідними етапами ЖЦ ВЕУ, а саме: виробництво – містить виробництво сировини (бетон, алюміній, сталь, скловолокно тощо) для виготовлення складових частин турбіни; транспортування – охоплює перевезення сировини для виробництва компонентів вітряної турбіни, доставку складових частин на місце установки під час монтажу та необхідне переміщення транспорту під час обладнання вітропарку; установка і монтаж – містить роботи зі зведення і встановлення вітрових турбін; експлуатація та технічне обслуговування – найдовший етап, що охоплює період роботи ВЕУ, заміни мастил та використання транспорту для технічного обслуговування; демонтаж – передбачає остаточне закриття вітрового парку після закінчення терміну його експлуатації і подальшу утилізацію утворених відходів.

4. Мета, Об'єкт і Предмет дослідження

Іншим терміном, вирішальним для розуміння цілісного підходу до ЖЦ, є його оцінка (ОЖЦ), яка охоплює всі процеси, необхідні для виконання функції продукту, або які надаються послугою [24].

Зараз ОЖЦ використовують в таких прикладних сферах [25] як: інфраструктура; важка промисловість; переробна промисловість; виробництво енергії; перевезення; споживчі товари; засоби до існування.

Стандарт *ISO 14040/44* визначає концепцію оцінювання життєвого циклу (*life cycle assessment, LCA*) як компіляцію входів і виходів виробничої системи та їх потенційного впливу на довкілля на всіх етапах ЖЦ – від видобутку сировини й виробництва енергії аж до виведення з експлуатації. Відтак ОЖЦ – це сукупність всебічних довільних характеристик товару / послуги / процесу, де кількісним виміром їх екологічності є результат процесу ОЖЦ [26].

Отже, ОЖЦ є методикою оцінки потенційних аспектів, зокрема екологічних, пов'язаних з тим чи іншим продуктом за допомогою: складання списку важливих балансів потоків; оцінки потенційних екологічних впливів цих потоків; тлумачення результатів попередніх стадій аналізу з точки зору цілей дослідження тощо.

Процедуру ОЖЦ регламентують стандарти: *ISO 14040: Principles and Framework* та *ISO 14044: Requirements and Guidelines*. Проте використання стандартів не виключає суб'єктивності оцінок у визначенні границь аналізу (меж системи), рівня важливості впливів, порівняння сили впливів різної природи. Тому дотримання стандартів і використання програмних продуктів не гарантує об'єктивності результатів, тож їх використання для публічного інформування потребує акуратного документування та незалежної експертної оцінки. Використання Правил для категорії товарів (*Product Category Rules, PCR*), які регламентує стандарт *ISO 14025*, жорсткіше регламентує процедуру ОЖЦ і забезпечує більшу об'єктивність оцінок і довільної декларації товарів (*Environmental Product Declarations, EPD*). Підготовка довільних декларацій є однією з найважливіших сфер застосуванням ОЖЦ. В окремих країнах практика їх застосування є дуже поширеною.

На європейському рівні стандарти ОЖЦ уточнені і доповнені довідником *ILCD Handbook*, що забезпечує більшу послідовність і об'єктивність оцінок впливів на довкілля.

ОЖЦ покладено в основу таких програмних продуктів, як *SimaPro, Gabi, Ecoinvent, Umberto, OpenLCA, LCAPIX, BEES 4.0, TEAM, Athena Impact Estimator* тощо. Зараз лідерами серед комерційного програмного забезпечення ОЖЦ в Європі є *SimaPro* та *Gabi* [27]. Який саме програмний продукт застосувати для конкретного випадку, аналітик визначає на основі поставленої мети та об'єкта дослідження.

Крім різнопланових оцінок ЖЦ, які дають всебічну характеристику впливів, використовують також оцінки, сфокусовані на певному впливі, скажімо, вуглецевий слід – *carbon footprint (GHG Protocol i ISO 14067)* чи водневий слід (*ISO 14046*).

Програмний продукт *SimaPro*, який використовуватимемо для ОЖЦ, підтримує EPDs, GHG protocol та ILCD Handbook; ним передбачено чотири етапи дослідження:

I-й етап – визначення мети і предмету дослідження (*Goal and scope*) – бенефіціари та їхні очікування.

2-й етап – опис життєвого циклу (*Life cycle inventory, LCI*) – формування моделі життєвого циклу з відображенням усіх довірливих входів і виходів.

3-й етап. Оцінювання впливу життєвого циклу (*Life cycle impact assessment, LCIA*) – дослідження важливості всіх входів і виходів щодо їх можливого впливу. Стандарт *ISO 14040/44* розрізняє такі кроки в оцінюванні впливів: обов'язкові: класифікація (англ. *classification*) і характеристикація (англ. *characterization*); додаткові: нормалізація (англ. *normalization*), ранжування (англ. *ranking*), групування (англ. *grouping*) і порівняння (англ. *weighting*).

4-й етап – інтерпретація отриманих результатів [26].

Згідно Європейського стандарту довірливих впливів, спричинених ВЕУ, є сім категорій впливів: абіотичне виснаження – невикопні ресурси (*ADP-non-fossil, kg Sbeq*); абіотичне виснаження – викопні ресурси (*ADP-fossil, MJ net caloric value*); окислення (*AP, kg SO₂ eq*); евтрофікація (*EP, kg (PO₄)₃ eq*); глобальне потепління (*GWP, kg CO₂ eq*); руйнування озонового шару (*ODP, kg CFC-11 eq*); утворення фотохімічного озонового шару (*POCP, kg C₂H₄ eq*) [28].

Категорії впливів дещо відрізняються для різних методів кількісного оцінювання. На сьогодні найчастіше на практиці використовують такі методи: *ReCiPe Endpoint (E)*, *Impact 2002*, *Eco-points*, *Eco-indicator*, *EPS system*, *MIPS concept* та ін. [29]. Категоріями шкоди в багатьох методах є якість екосистем, здоров'я людини та виснаження природних ресурсів. Але вони можуть бути також і дуже специфічними, відповідно до потреб аналізу (поглинання CO₂, зміна ґрунту, викопне паливо і ін.) [26].

У цьому дослідженні застосовано інтегровані показники для оцінки впливів ВЕУ на компартменти СЛК протягом їхнього життєвого циклу. Для цього *SimaPro* пропонує широкий набір методів і баз даних, які вважають найбільш визнаними та обґрунтованими для аналізу такого напрямку.

Етапами дослідження передбачено такі кроки: визначення передумов проблеми, *functional unit* опис, побудова блок-схеми ЖЦ, визначення меж системи, *Waste scenario*, інвентаризація, генерування дерева процесу, класифікація, характеристикація, нормалізація, порівняння впливів, визначення екологічного індексу.

Передумови проблеми. Зараз завдяки більшій турботі про довкілля і зростанню екологічних обмежень стрімко розвиваються поновлювані джерела енергії. Останніми десятиріччями вітряна енергетика є найвигіднішою технологією відновлюваної електроенергетики (крім великої гідроенергетики) з найшвидше зростаючим ринком і середнім кумулятивним приростом 28% [30]. І ця тенденція збережеться в наступні роки. Прогнозується, що на кінець 2020 року потужність вітроенергетики, встановленої в усьому світі, досягне рівня майже 700 000 МВт.

На Європу припадає понад 31% від загальної встановленої потужності (220 000 МВт) та 10% річний приріст ринку протягом останніх років. А енергія вітру в 2019 році постачала 15% всієї спожитої електроенергії в Європі.

Але чи є ця технологія відновлюваної енергії «зеленою» (екологічно чистою), як це, зазвичай, стверджують? Такий аргумент, як правило, ґрунтується на відсутності впливу на довкілля експлуатаційної фази вітрової турбіни, яка буде виробляти електроенергію без споживання викопного палива та без забруднення. Однак, попри це, виключають всю фазу виробництва турбіни від одержання необхідних матеріалів до її будівництва, не враховуючи виробничі процеси, всі транспортні потреби та фазу виведення з експлуатації.

Функціональна одиниця. В цьому дослідженні як функціональну одиницю вибрано електроенергію, яку генерує один ВЕУ протягом ЖЦ. За даними [31] ВЕУ виробляє 7,890 МВт×г на рік, що відповідає коефіцієнту потужності (кількість енергії, яку виробляє турбіна за один рік, поділена на загальну кількість, яку б отримали, якщо вона працювала б на повну потужність [32]) 30,02 %, що становить 157 800 МВт × год електроенергії, виробленої протягом 25 років. Значення може змінюватись на різних ділянках і через різні умови вітру.

Блок-схема процесу. На рис. 1 подано життєвий цикл вітрогенератора від виробництва до поводження з відходами. Етап передачі енергії, виробленої ВЕУ, не враховано, оскільки вважається, що передача електроенергії з будь-якого джерела енергії була б однаковою. Викиди представлені як «Em».

Межі системи. Ще одним істотним завданням на першому етапі ОЖЦ є визначення меж досліджуваної системи, оскільки важливо відкинути впливи, неістотні для аналізу. Визначаючи межі системи виникає явище рекурсії: для видобутку сировини чи виробництва енергії необхідні основні засоби (машини, обладнання, транспорт і т.д.), а вони теж мають свій життєвий цикл (нескінченна регресія, *endless regression*). Виключення окремих складових системи з розгляду може суттєво вплинути на результати оцінювання. Тому, щоб уникнути помилок, в практиці ОЖЦ використовують два підходи: основні засоби зовсім не розглядають в аналізі або враховують лише впливи від видобутку сировини і транспортування. Такі бази даних як *Ecoinvent* та *USA Input Output* враховують основні засоби, використовуючи другий підхід. В ОЖЦ природних систем ці системи розглядають як економічні, а не як природні. Тому поглинання вуглецю і вплив на землекористування не розглядають взагалі, але враховують забруднення довкілля пестицидами. Метод *ReCiPe*, який реалізований у *SimaPro*, базується саме на цьому принципі визначення меж між природними та економічними системами.

Перший етап завершують визначенням мети і предмету дослідження.

Наступним етапом дослідження, згідно з процедурою ОЖЦ, є опис життєвого циклу. Для виявлення та опису впливу ЖЦ потрібні такі дані: відомості про досліджуваний об'єкт, які повинен зібрати аналітик (*Foreground data*), і

фонові дані про фізичні/хімічні залежності та процеси (*Background data*), які містяться в літературі та базі даних *Ecoinvent v3*, котра пропонується разом з програмою *SimaPro*.

Більшість використаних даних походять зі звіту *LCA*, реалізованого *Vestas* [31], та з Загальної специфікації «*Siemens SWT DD-142*» [33].

На рис. 1, як приклад, показана згенерована програмою *SimaPro* модель для досліджуваної турбіни, яка розглядатиметься далі в підрозділі «результати досліджень».

Виробництво ВЕУ охоплює період від отримання сировини до завершення роботи зі встановлення вітрогенератора. Виробництво турбіни можна подати як виготовлення трьох її основних частин: вежі, ротора і гондоли.

Оскільки дані про споживання енергії, яку використовують для кожного виробничого процесу, є недоступні, загальне споживання енергії було визначено для всього виробництва та експлуатації турбін і становить 7405 МВт×год електроенергії. Загальне споживання енергії протягом фази виробництва становить 7795 МВт×год [33].

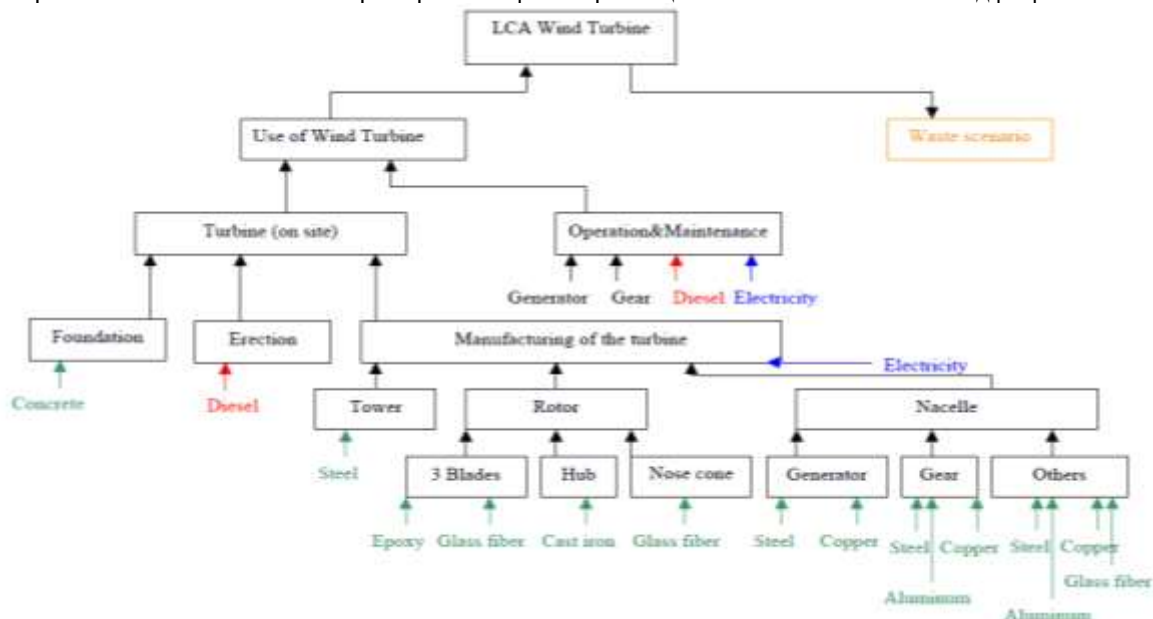


Fig. 1. Model for wind turbine in *SimaPro*

Але це число окрім енергії, необхідної для виготовлення та експлуатації турбіни, містить також енергію, необхідну для всієї фази переробки сировини. Тому слід відняти 390 МВт×год (число, розраховане за даними, доступними в *SimaPro*) від 7795 МВт × год, щоб споживання енергії на сировину не подвоювалось.

В *SimaPro* використані дані бази *BUWAL250* – Електроенергія Данії В250, що є змішаним виробництвом середньої електроенергії в Данії.

Нижче подана інформація з різних баз даних про затрати матеріалів і палива, що теж використані, як вхідні дані до програми *SimaPro*. Зокрема вежа виготовлена зі сталевих (100% сталі) плит [31]. За даними бази Процеси системи *Ecoinvent* для виробництва 105-метрової вежі турбіни потрібно 275 тонн арматурної заводської сталі [33]. Вигляд вежі в моделі не враховано.

Ротор складається з 3-х лопатей, маточини і конуса. Лопаті турбіни *Vestas* виготовлено з *Prepreg*, що є різновидом просоченого епоксидною смолою скловолокна. Воно містить 60% скловолокна і 40% епоксидної смоли [31]. За даними баз *IDEMAT 2001* та Процеси системи *Ecoinvent* використано епоксидні смоли, армований скловолокном пластик і поліефірну смолу. Маса лопаті становить 6,6 тонн, а з врахуванням 10% відходів *Prepreg* під час обробки – 7,3 тонн (2,9 тонн епоксидної смоли і 4,35 тонн скловолокна) [31 & 33]. Також у складі лопаті є деяка кількість вуглецевого волокна, але цими даними знехтувано. Фарбування конуса в моделі теж не враховано.

За даними бази Процеси системи *Ecoinvent* маточина виготовлена з чавуну і важить 8,5 тонн [33].

Конус – захисна оболонка маточини. Оскільки їх спільна маса становить 20 тонн [33], то маса конуса – 11,5 тонн. За даними бази Процеси системи *Ecoinvent* його виготовлено з армованого скловолокном поліестеру, пластику і поліефірної смоли. Фарбування конуса в моделі теж не враховано.

Гондола складається з кришки, генератора, редуктора, трансформатора, системи позиціонування і електроніки. Оскільки, згідно документації виробника, генератор і редуктор протягом терміну експлуатації турбіни слід

замінювати, то гондолу моделюють як три основні компоненти: генератор, редукторна ситема, механізми і кожухи (цей компонент містить все окрім генератора і редуктора).

Маса генератора 8,5 т [33]. За даними бази Процеси системи *Ecoinvent* генератор містить 35% рафінованої міді і 65% арматурної сталі [35]. Хоча генератор окрім вказаних основних містить і інші матеріали, але оскільки про них відсутні дані, то була обрана саме така модель.

Редукторна система (редуктор, коробка передач) має загальну масу 23 тонн [33]. За даними бази даних Процеси системи *Ecoinvent* редуктор містить 1% рафінованої міді, 98% арматурної сталі і 1% алюмінієвого виробничого сплаву [36].

Третій компонент – механізми і кожухи - має загальну масу 37 тонн [31]. За даними бази Процеси системи *Ecoinvent* він містить 85% арматурної сталі, 8% алюмінієвого виробничого сплаву, 4% рафінованої міді та 3% армованого скла, а саме армованого скловолоконном пластику і поліефірної смоли.

Хоча ця частина ВЕУ місимть більшу кількість складових, зокрема – кожух редуктора, трансформатор, електроніка, вал тощо, але, оскільки, для кожного з них дані недоступні, то наведена вище модель базується на обліку основних використаних матеріалів і їх відсотка щодо загальної маси одиниці.

Для отримання готової до функціонування турбіни на певній ділянці необхідно реалізувати три окремі етапи ЖЦ ВЕУ. Спочатку слід завершити фазу її виготовлення. Тоді на місці встановлення ВЕУ треба побудувати фундамент. І нарешті, різні частини ВЕУ (вежа, ротор і редуктор) повинні бути встановлені і зібрані. Фундаментом є котлован з типовими розмірами 15 м × 15 м × 2 м, заповнений армованим бетоном. За даними бази *IDEMAT 2001* використано армований залізобетон загальною масою 1200 т [31].

Енергетичні затрати на реалізацію котловану окремо не розглядалися, оскільки цей етап поєднано з транспортування різних частин турбіни до майданчика та зведення турбіни на місці.

Використовуваний паливний ресурс – це, зазвичай, дизельне паливо. За даними бази Процеси системи *ETH-ESU 96* використано 5382 кг дизеля *Europ S* бо енергія, спожита для монтажу і транспортування становить 74 МВт × год, тобто 266400 МДж [34], а теплотворна зданість дизельного палива 49,5 МДж/кг.

Фаза «Використання вітрогенератора» включає етап експлуатації та обслуговування ВЕУ (на місці). Експлуатація турбіни майже не потребує ресурсів, оскільки сама ВЕУ використовує вітрову енергію не виділяючи будь-якого забруднювача. Водночас, деяка частина енергії потрібна для системи повороту ротора ВЕУ за вітром. Через відсутність конкретних даних ці затрати включені в загальне споживання енергії і враховані у фазі виготовлення.

Споживання енергії під час технічного обслуговування – це, в основному, споживання палива, оскільки стосується транспортування персоналу до місця розташування турбіни.

За даними бази Процеси системи *ETH-ESU 96* використано дизель *Europ S* обсягом 1020 кг, оскільки споживання енергії для монтажу та транспортування дорівнює 14 МВт × год [34].

Крім того, передачу та редуктор замінюють один раз протягом 25 років експлуатації вітрогенератора. Оскільки їх віднесено до «ресурсів», використаних під час експлуатації та технічного обслуговування, а енергія, необхідна для їх виготовлення, була врахована як затрати для виготовлення всієї турбіни, то потрібно додати 608 МВт×год електроенергії, щоби всі ресурси були враховані. Вказане значення (608 МВт × год) відповідають 8,2% споживання електроенергії за весь виробничий процес турбіни (7405 МВт × год), оскільки вага редуктора та генератора (31,5 т) становить 8,2% від загальної маси турбіни (385,5 т).

Заміна мастильних матеріалів, необхідних для всіх рухомих деталей, наприклад в редукторі, врахована в загальному споживанні енергії, вираженому як обсяг спожитого дизельного палива, і не розглядається як власний використаний ресурс.

Розглянуто такі сценарії поводження з відходами:

– для типу відходів: сталь і чорні метали – за даними бази Процеси системи *Ecoinvent* 90% сталі та заліза переробляють; за даними бази Процеси системи *ETH-ESU 96* 10% сталі, неактивної в умовах звалища, складують на землі [31];

– для типу відходів: мідь - за даними бази *Ecoinvent* 90% міді переробляють; за даними бази Процеси системи *ETH-ESU 96* решта 10% міді, неактивної в умовах звалища, складують на землі [31]. Споживання енергії під час виробництві міді становить 130,3 ГДж/т [37], а затрати на її переробку становлять 20% від виробництва (13% під час переробки [37], 20% під час консервування). Під час переробки міді, за даними Данія В250, споживання енергії, 8переведеної в електроенергію, становить 7 МВт×год;

– для типу відходів: пластмаси – 100% пластмас та скловолокна спалюють [31]. За даними бази Процеси системи *Ecoinvent* утилізація поліетилентерефталату потребує 0,2% води під час спалювання в міських печах;

– для типу відходів: бетон – за даними бази Процеси системи *ETH-ESU 96* 100% бетону, неактивного в умовах звалища, складують на землі;

– 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. За даними бази *BUWAL 250* використано вантажівку В250 вантажопідйомністю 28 т.

5. Результати досліджень

Генерація електроенергії за рахунок вітру не має суттєвого негативного впливу на довкілля та соціальну сферу, окрім того спостерігається скорочення викидів парникових газів та інших шкідливих речовин до атмосфери. За оцінками Інституту відновлюваної енергетики НАН України, тільки за рахунок запланованого введення в експлуатацію ВЕС потужністю 16000 МВт до 2030 р. середньорічні викиди вуглекислого газу не збільшаться на 32 млн. т., а річна економія газу становитиме 14,4 млрд. м³.

Однак вітровий парк хоча і є джерелом відновлювальної енергетики та запобігає виснаженню природних невідновних ресурсів, як будь-який інший об'єкт господарської діяльності, викликає зміни природних характеристик ландшафту та властивостей його компонентів, що призводить до формування техногенних геокомплексів [39].

Дослідження впливу ВЕС на компоненти довкілля були проведені з урахуванням низки їх параметрів, зокрема технічних характеристик. Згідно намірів Замовника і проектного рішення запроєктована ВЕС складається з окремих ділянок та розташуваних на них споруд і обладнання. Основним обладнанням проекту є ВЕУ. Зважаючи на вітрові та погодні умови на території планованої діяльності, а також шумові, вібраційні та інші характеристики Замовником обрано ВЕУ фірми «*Siemens SWT DD-142*». Вітроустановки сертифіковані згідно *ISO 9001* та *IEC 61400-12-1*.

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

При розміщенні ВЕУ враховують 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 проєктуються підземні кабельні та комунікаційні лінії і технологічні дороги, які відображено на схемах інженерних мереж.

Межами системи дослідження ВЕУ є: виробництво матеріалів та обладнання, потрібних для виготовлення складових частин турбіни та допоміжних споруд і фундаменту (бетон, алюміній, сталь, скловолокно тощо); експлуатація наявних доріг для транспортування складових частин вітряної турбіни 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.

За результатами реалізації **1 – етапу** встановлено *мету та предмет дослідження*. Метою є розрахунок інтегрованих показників впливу ВЕУ протягом його ЖЦ на компартменти СЛК. Отримані показники – предмет дослідження – будуть використані для моделювання впливу на підсистеми та яруси компартментів СЛК та прогнозування їх станів.

Згідно з процедурою ОЖЦ встановлені мета і предмет дослідження, а також згенерована програмою SimaPro модель (див. рис. 1), дали змогу продовжити **2 – етап дослідження** – *опис життєвого циклу ВЕУ* і перейти до інвентаризації. Інвентаризацію виконано згідно з визначеними межами і внесеними даними.

Фаза інвентаризації є ядром і спільною рисою будь-якого ОЖЦ. На цьому етапі ідентифікують та кількісно визначають всі матеріальні потоки, потоки енергії та всі потоки відходів, що потрапляють у довкілля протягом усього життєвого циклу досліджуваної системи. Кінцевим результатом аналізу запасів є таблиця інвентаризації. Фаза інвентаризації складається з чотирьох окремих кроків:

- побудова дерева процесів – інакше, схеми технологічного процесу;
- збір даних;
- алокація – пов'язування даних з вибраним функціональним блоком;
- інвентаризаційна таблиця – інакше, розробка загального енергетичного та матеріального балансу (усі входи і виходи протягом усього життєвого циклу).

Опис життєвого циклу найкраще почати з самого готового продукту, а потім розвивати всі етапи ЖЦ продукту до і після нього.

Далі слід визначити, яку частку загальних викидів та споживання матеріалів слід віднести до кожного конкретного продукту. Те саме стосується процесів з багатьма входами, як наприклад, виробництво бензину. Основною проблемою алокації є розподіл викидів та витрат матеріалів між кількома продуктами або процесами, для вирішення якої розроблено кілька методів.

Альтернативою алокації – може бути її відсутність. Інакше кажучи, оскільки для розподілу завжди потрібні більш-менш суб'єктивні рішення, ISO рекомендує його уникати, якщо це можливо. Для цього рекомендовано розширити межі системи, включивши в неї процеси, які були б необхідні, щоб зробити той самий побічний продукт звичайним способом.

За оцінками Національної лабораторії США з питань розвитку відновлювальної енергетики (*NREL*) на всіх етапах життєвого циклу ВЕС розрізняють зони постійного і тимчасового впливу. Зони постійного впливу становлять 1-2 % загальної площі, зайнятої під ВЕС. Зони тимчасового впливу займають від 1 до 6 % території ВЕС. Ділянки майданчиків ВЕС, які залишаються поза впливом будівництва можуть бути використані для інших потреб, наприклад для вирощування сільськогосподарських культур, або для випасу худоби чи рекреації. Це додаткова користь в результаті процесу, пов'язаного з аналізованим продуктом, яку слід відобразити у його екологічному профілі. Тоді екологічне навантаження на етапі виробництва та транспортування ВЕУ, якого уникають внаслідок інших позитивних чинників, можна відняти від загального екологічного навантаження. Так можна виділити ту частину викидів і споживання матеріалів, за які відповідає основний продукт, а решту можна віднести до уникнення небажаного екологічного впливу.

Типова інвентаризаційна таблиця ОЖЦ містить декількох сотень і більше елементів. Вони можуть бути згруповані в категорії: сировина, викиди в атмосферу, воду, ґрунт, тверді викиди, нематеріальні викиди (шум, радіація, землекористування) тощо. Інвентаризаційна таблиця є основою для наступного кроку ОЖЦ – оцінки впливу. Дані з інвентаризаційної таблиці слід опрацювати для досягнення більш високого рівня агрегації. В ідеалі процес агрегації повинен привести до значущого єдиного балу.

На рис. 2 показано типовий блок процесу для розрахунку екологічного індексу, що містить матеріал, процес або життєвий етап – тут ВЕУ, кількість – тут 1, поточно розраховане значення – тут частковий екологічний показник - для цього впливу та «термометр», що показує внесок процесу в загальний екологічний показник.

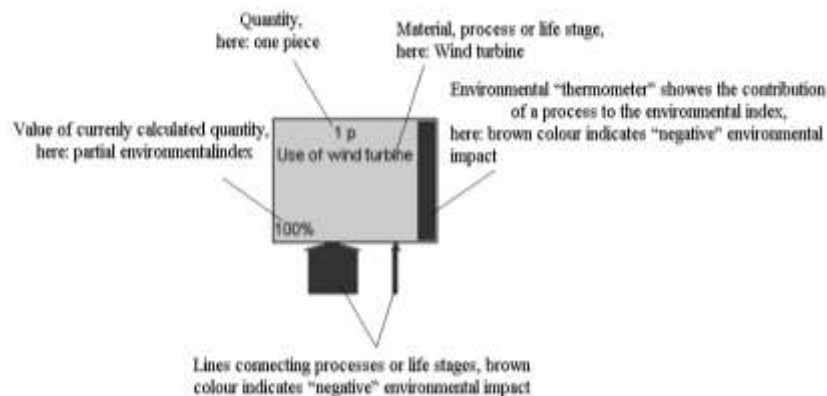


Fig. 2. A process box for the calculation of an environmental index

Значення межі було встановлено як 4%, а лінії мають ширину відповідно до їх значимості в кінцевому результаті. Дослідження блок-схеми дасть змогу проаналізувати конкретні етапи ЖЦ ВЕУ і їх вплив на кінцевий результат. Розрахунок проводять для кожного елемента життєвого циклу ВЕУ.

Аналізуючи діаграму було встановлено, що споживання енергії (особливо з вугілля), виражене як Електроенергія України В250, значно впливає на довкілля (57,5%). Це можна пояснити впливом споживання палива і, отже, видобутку ресурсів, а також збільшенням викидів (парникові гази, респіраторні неорганічні речовини тощо) чи продукуванням канцерогенів. Як вже згадувалося раніше, вказану енергію використовують для таких необхідних процесів, як виробництво різних деталей вітряних турбін чи транспортування.

Іншими стадіями процесу, які суттєво впливають на результат, є виробництво міді та арматурної сталі з впливом відповідно 13,8% та 11,5%. Також було виявлено, що процеси експлуатації і обслуговування теж істотні з впливом 11% на загальний результат.

Перший крок для досягнення вищого рівня агрегації даних – це їх класифікація. З класифікації розпочинається **3-й етап дослідження - оцінювання впливу на довкілля життєвого циклу ВЕУ.**

Класифікація. Вхідні та вихідні потоки ЖЦ групують так, що кожна з груп представляє обрану категорію впливу. Аналогічно впорядковують інвентаризаційну таблицю щоби для кожної категорії впливу враховувати (якісно та кількісно) всі відповідні викиди чи споживання матеріалів.

Тут типовим джерелом невизначеності є відсутність загальновизнаного відповідного офіційного переліку впливів на довкілля. Однак, в результаті численних вже виконаних ОЖЦ існує «стандартний» перелік впливів на довкілля, які слід доцільно використати. Зокрема, це широко визнані екологічні проблеми, такі як виснаження ресурсів, токсичність, глобальне потепління, руйнування озону, евтрофікація, підкислення тощо. І, хоча вибір категорій впливу суб'єктивний, його слід скорегувати так, щоби добре представити навантаження на довкілля, спричинене продуктом, оскільки результат ОЖЦ сильно залежить від вибору категорій впливу. Перелік, якщо це можливо, слід укласти вже як частину визначених мети та предмету дослідження.

Існує багато інших категорій впливу, які можуть бути важливими в певних ситуаціях, особливо в локальному масштабі, і тому теж повинні бути враховані. Наприклад, радіація, залишкові поклади твердих відходів, шум, запах та деградація ландшафту.

Деякі впливи можуть бути віднесені до більш ніж однієї категорії, наприклад NO₂ викликає підкислення, евтрофікацію та токсичність (рис. 3).

Отже під час оцінювання ЖЦ всі викиди та споживання у ньому, потенційно можуть сприяти утворенню екологічної проблем. Тому обидва терміни «вплив на довкілля» і «життєвий цикл» повинні бути належно зрозумілі і тлумачені.

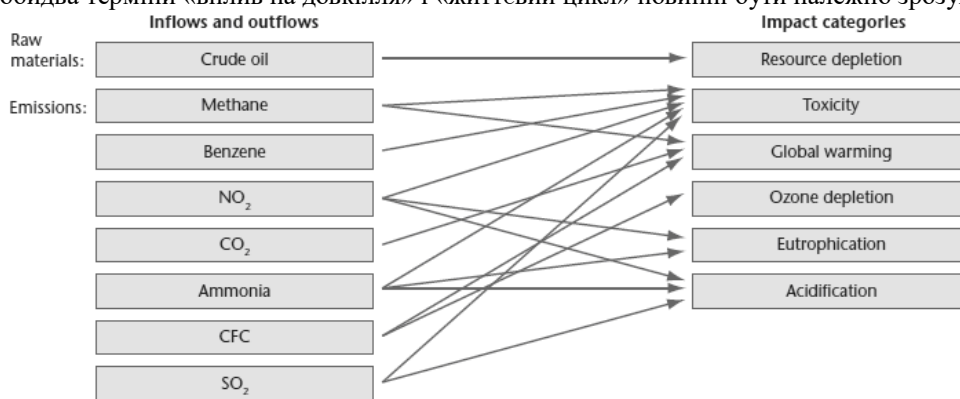


Fig. 3. Relations between emissions and impact categories. To the left are raw materials used (top) and pollutants emitted (bottom) during the life cycle of a product. To the right are the impact categories to which these emissions contribute. The figure illustrates that one emission may contribute to several impacts, and that several emissions contribute to the same impact

Вплив на довкілля є наслідком фізичної взаємодії між досліджуваною системою та довкіллям. На практиці всі екологічні наслідки представлені кількома категоріями екологічних проблем. Найчастіше використовують: виснаження ресурсів; глобальне потепління; руйнування озонового шару; токсичність для людини; екотоксичність; фотохімічне окислення; підкислення; евтрофікація; землекористування; інші (зокрема, тверді відходи, важкі метали, канцерогени, радіація, вимирання видів, шум).

На попередньому етапі речовини були віднесені до певної категорії впливу з інвентаризаційної таблиці і згруповані. Однак різні речовини серед однієї групи мають різний вплив. Під час етапу характеристики оцінюють відносну силу кожного небажаного впливу і оцінюють його внесок у кожну екологічну проблему. Це необхідно, щоби виразити вплив для кожної категорії одним числом.

Для цього характеристику слід представити екологічною моделлю, що дає змогу порівнювати різні речовини, які сприяють одній і тій же екологічній проблемі. Використана для агрегування даних за однією категорією впливу обчислювальна процедура може бути пояснена на прикладі глобального потепління. Для цього використовують так звані коефіцієнти еквівалентності, які показують у скільки разів певна сполука посилює проблему в порівнянні з обраною еталонною речовиною. Для глобального потепління таким еталом є вміст CO₂. Всім іншим речовинам, що сприяють парниковому ефекту, присвоюють коефіцієнт, пропорційний цьому ефекту. Наприклад, метан має коефіцієнт еквівалентності 11. Це означає, що 1 кг метану спричиняє такий самий парниковий ефект, як і 11 кг вуглекислого газу. Результат виражають в еквівалентній кількості CO₂.

Коли підраховано еквівалентність всі показники, віднесені до однієї категорії впливу, мають спільне представлення і можуть бути підсумовані. Зазвичай після перерахунку всі викиди виражають в кілограмах.

Електроенергія, спожита для виготовлення БЕУ, має найбільший вплив на *зміну клімату* (рис. 4), і становить 85% від загальної кількості або 1,58 DALY (тут і далі DALY, *англ. Disability Adjusted Life Years* – роки життя з інвалідністю – одна уніфікованих одиниць для представлення ступеня небажаного впливу). Це очевидно, оскільки виробництво електроенергії в Україні в основному базується на використанні вугілля, як палива [40], що безумовно призводить

до викидів CO₂. За рахунок скорочення вугілля серед первинних джерел енергії поточний вплив на зміну клімату може бути меншим, ніж в представленій моделі ОЖС.

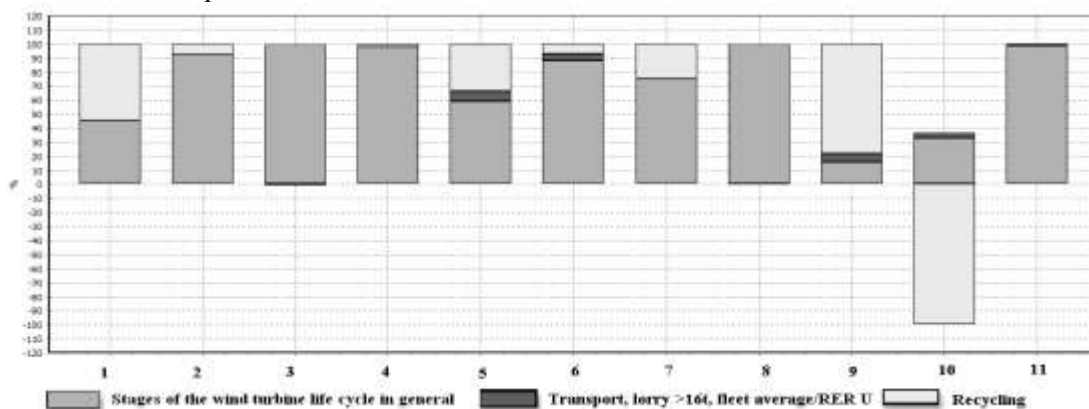


Fig. 4. Characterization of the impacts of the life cycle of a wind farm according to the methodology Eco-indicator'99: 1 – Carcinogens; 2 – Resp. organic; 3 – Resp. inorganic; 4 – Climate change; 5 – Radiation; 6 – Ozone layer; 7 – Ecotoxicity; 8 – Acidification/Eutrofication; 9 – Land use; 10 – Minerals; 11 – Fossil fuels

Виробництво арматурної сталі є наступним найістотнішим фактором, який, однак, є незначним порівняно з електроенергією з вугілля. Переробка сталі та чавуну з вітротурбіни позитивно впливає на зміну клімату, оскільки заміняє затрати енергії, необхідні для виробництва 334 тонн заліза.

Вплив використання вітрогенератора становить 2,14 DALY. Однак реалізація сценарію відходів (0,883 DALY) зменшує це значення до загального впливу 1,25 DALY (на 41%, див. рис. 4).

Електроенергія з вугілля найбільше сприяє канцерогенному впливу внаслідок виробництва сталі та міді (рис. 4). Оскільки вся сталь і залізо йдуть на переробку, то скорочення канцерогенів за рахунок їх рециклінгу є більшим (0,41 DALY), ніж під час виробництва арматурної сталі (0,38 DALY).

Основними речовинами, які мають канцерогенний вплив і потрапляють у воду як іони, є миш'як (0,81 DALY) та неідентифіковані метали (0,028 DALY), а в повітря – неідентифіковані метали (0,342 DALY), кадмій (0,06 DALY) та миш'як (0,27 DALY).

Вугілля для електростанцій є найбільшим джерелом респіраторної неорганіки (рис. 4). Також бетон для фундаментів ВЕУ має серйозний вплив на дихальну систему. Пил, діоксид азоту та діоксид сірки (2,33, 1,65 і 1,51 DALY відповідно) є головними загрозами для органів дихання. Використання сценарію відходів дає змогу знизити викиди неорганічних речовин на 15,4% і досягнути їх загального впливу 5,91 DALY.

Викопне паливо, таке як вугілля, нафта та газ, в основному використовують для отримання електроенергії. Виробництво металів, наприклад сталі чи заліза є дуже енергозатратним. Тому виробництво арматурної сталі є третім за обсягом споживачем викопного палива. Транспортування сировини і компонентів ВЕУ, а також його зведення потребують значної кількості дизельного палива, що на рисунку 7 виражено як сира нафта.

Респіраторна органіка. Сценарій відходів в цьому випадку недоцільний, оскільки сам має негативний вплив з обсягом 5,93% на довкілля. Загальні викиди становлять 33,2E-4, серед яких основними є неметанові леткі органічні сполуки (25,2E-4), а також метан і неідентифіковані ароматичні вуглеводні (7,45E-4).

Зниження радіації при використанні сценарію відходів становить 16,5% з загальним обсягом впливу ВЕУ 3,79E-3. Причиною, в основному, є присутні в повітрі радон-222 і вуглець-14. Їх випромінювання становить 2,55E-3 і 1,22E-3 відповідно.

Озоновий шар. Це ще одна категорія, коли сценарій з відходами має негативний вплив, який становить 7,34% від загального впливу, або 5,27E-4. Здебільшого причиною є бромтрифторметан (БТМ), відомий також, як галон 1303 з впливом 5,02E-4 D.

Екотоксичність. Це друга за розміром категорія з позитивною дією сценарію відходів, який зменшує вплив на довкілля на 47,8%. Після цього загальний вплив становить 2,32E6 PAF × м² × рік з найбільшим внеском неідентифікованих металів (1,25E6), нікелю і цинку (6,33E5 разом) та свинцю (9,64E4), які є в повітрі.

Підкислення/евтрофікація. Тут реалізація сценарію відходів дає незначне зменшення негативного впливу на 4,07%, що разом становить 1,38E5 PAF × м² × рік. Найбільший вклад в це значення мають оксиди азоту і оксиди сірки, що містять 1,06E5 та 2,88E4 відповідно.

Землекористування. Сценарій відходів у цьому випадку дуже доречний оскільки мінімізує негативний вплив на 32,3%, а загальний вплив становить 3,1E4 PDF × м² × рік. Це переважно перетворення (9,18E3) або зайнятість

промислових зон (1,3E4). Завдяки сценарію з відходами зайнятість сміттєзвалищ зменшують на 1,46E4, що найістотніше впливає на зменшення впливу.

Корисні копалини. Дія сценарію відходів тут максимальна, що зменшує негативний вплив на 79,1% і становить 1,01E5 МДж профіциту загалом. Негативний вплив переважно мають два мінерали: нікель (1,98% у силікатах, 1,04% у сирій руді) та мідь (0,99% у сульфіді, 0,36% у чистій міді та 8,2E-3% МО у сирій руді). Вони становлять 6,47E4 і 3,68E4 МДж відповідно.

Як видно, сценарій з відходами має різний вплив на кожну категорію, серед яких виділяються три, де його дія найістотніша: корисні копалини, екотоксичність і канцерогенний вплив. Це пояснюється тим, що майже 80% відходів (крім бетону) може бути перероблено і повторно використано, в основному, мідь, залізо та алюміній, і, очевидно, зменшить їх видобуток, та обмежить викид елементів, таких як кадмій, нікель, свинець чи миш'як, що супроводжують виробництво.

На жаль сценарій з відходами має не лише позитивний, але й негативний вплив, оскільки під час процесу переробки виділяється багато газів, що може призвести, наприклад, до руйнування озонового шару.

Характеризація є простою, якщо всі речовини відомі, віднесені до своєї категорії впливу, визначені еталонні речовини, а також коефіцієнти еквівалентності. Для багатьох впливів коефіцієнти еквівалентності є суперечливими щодо методик, за якими вони обчислюються. Особливо це стосується категорій, які важко описати, наприклад «Здоров'я людини». Проте, коефіцієнти еквівалентності для основних екологічних проблем все ж встановлені (табл. 1).

Table 1. Equivalence factors for environmental impacts

| Класифікація впливів на довкілля | Коефіцієнт еквівалентності та еталонна речовина | |
|----------------------------------|---|-----------------------|
| Руйнування озонового шару | Потенціал виснаження озонового шару | CFC-11 еквівалент |
| Підкислення | Потенціал підкислення | SO2 еквівалент |
| Евтрофікація | Потенціал евтрофікації | Фосфатний еквівалент |
| Формування фотохімічного смогу | Потенціал фотохімічного формування озону | Етиленовий еквівалент |

Внесок у вплив на довкілля розраховують для будь-якої речовини, якщо є коефіцієнт еквівалентності.

Кінцевим результатом кроку характеризації є перелік потенційних впливів на довкілля. Такий перелік оцінок ефектів, по одному для кожної категорії, називають екологічним профілем товару або послуги.

На рис. 5 представлені екологічні профілі ВЕУ. Це набори з чотирьох окремих оцінок, по одній для кожної з чотирьох категорій впливу: виснаження ресурсів, глобальне потепління, підкислення і руйнування озону. На рис. 5 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.

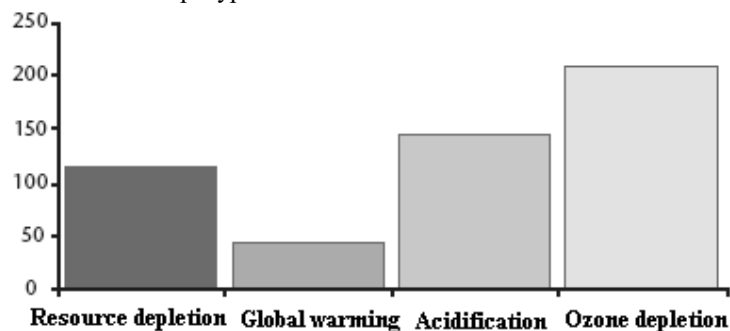


Fig. 5. Environmental profile of the entire wind turbine life cycle

Однак результати на етапі характеризації не можна порівнювати, оскільки вони, зазвичай, представлені у різних одиницях (CO₂ eq., SO₂ eq., CFC-11 eq тощо). Зокрема рис.5 не вказують, які наслідки є найвищим пріоритетом, тобто не можна сказати, що глобальне потепління є більш серйозною екологічною проблемою, ніж руйнування озону, ні навпаки. Екологічний довкільний профіль є представленням впливів лише у ширшому контексті, що полегшує їх тлумачення.

Тому наступною виконують процедуру, що дає змогу порівнювати категорії впливу між собою.

Normalisation. Нормалізацію виконують для порівняння оцінок ефектів екологічного профілю. Нормалізована оцінка ефекту - відсоток щорічного внеску певного продукту в цей ефект у даній області [40]:

$$\text{Normalized effect score} = \frac{\text{annual contribution to that effect in a certain area}}{\text{effect score for a given category}} \quad (1)$$

На рис. 5 показано навантаження на довкілля для категорій впливу, які були обрані для аналізу. Як можна помітити, існують дві категорії, які мають найбільше значення як за загальним впливом, так і за сценарієм відходів. Зокрема з нормалізованого екологічного профілю (рис. 5) видно, що респіраторна неорганіка становить 0,052 % усіх еквівалентів CO₂ у життєвому циклі БЕУ. Отже, життєвий цикл БЕУ більше впливає на глобальне потепління, ніж на руйнування озонового шару і майже не впливає на флору у регіоні будівництва та експлуатації БЕУ. Основною складністю на етапі нормалізації є відсутність відповідних значень, що представляють щорічний внесок у екологічні проблеми.

Респіраторні неорганічні речовини, такі як оксиди азоту, сірки та багато інших, мають найбільший вплив на довкілля з загальною кількістю 454 балів. Вони викидаються, в основному, під час спалювання палива. Однак слід зазначити, що сценарій з відходами є найважливішим для цієї категорії. Навіть незважаючи на те, що вплив корисних копалин зменшився майже на 80%, а неорганічних речовин - лише на 15%, кінцевий результат показує, що ця остання кількість є більшою.

Наступним найбільшим впливом на довкілля є *викопне паливо* – 365 балів. Це спричинено, в основному, використанням електроенергії протягом усього процесу, яка виробляється в першу чергу з вугілля, а також з нафти та газу. Вклад альтернативних ресурсів (гідро- та атомних електростанцій) незначний. Є очевидним, що споживання відбувається на дуже ранній стадії процесу, але впливає на подальші, де споживання найбільше - виготовлення деталей турбіни та транспорту.

Зміна клімату має також значний вплив. Його слід розглядати як глобальне потепління, спричинене парниковими газами, такими як вуглекислий газ або метан, і може призвести до зміни рівня моря, розподілу опадів або збільшення інтенсивності погодних катастроф, наприклад, ураганів.

Нормалізація підтверджує вибір кліматичних змін, канцерогенів, респіраторної неорганіки та викопного палива як основних категорій характеристики. Вони мають значно більший вплив, ніж решта категорій.

Зважування – визначення значущості є найбільш складним, суб'єктивним і суперечливим етапом оцінювання, оскільки базується не на строгих фізичних моделях, а на суб'єктивних міркуваннях. Для порівняння впливів, зазвичай, використовують вагові коефіцієнти, які визначають такими методами: рішенням групи експертів – методи *Eco-indicator 99* і *ReCiPe*; методом урахування віддаленості від цілі – *Ecological Scarcity methods*; грошової оцінки шкоди – метод *EPS 2000*.

Альтернативний комбінований підхід до порівняння впливів пропонують [41-44], який і використано в *SimaPro*. Згідно методу екологічності виробів, процесів чи послуг відносять для трьох категорій шкоди: здоров'я людини, якості екосистем і ресурсів, використовуючи всі можливі їх поєднання. Для кожної їх комбінації – відповідної точки трикутника порівняння (рис. 6) – сума коефіцієнтів становить 100%. За *Eco-indicator'99* прийнято, що впливи на здоров'я і екосистему є вдвічі важливішими, ніж вплив на ресурси; відповідно вагові коефіцієнти становлять 40 %, 40 % і 20 % [39]. Такий варіант був обраний з практичних причин. Хоча вибір сам по собі не настільки важливий, якщо рівні уражень добре піддаються порівнянню. Наприклад, якщо всі цільові значення подвоїти, то всі вагові коефіцієнти зменшаться вдвічі. Очевидно, що це не вплине і на їх взаємну кореляцію.

Програма виконує розрахунок навантаження на довкілля для всіх можливих значень вагових коефіцієнтів. Якщо на порівняльну оцінку екологічності аналізованих виробів впливає співвідношення ваги критеріїв порівняння, то у трикутнику порівняння відображають обидві альтернативи з відображенням умов виникнення їх переваги (рис. 6).

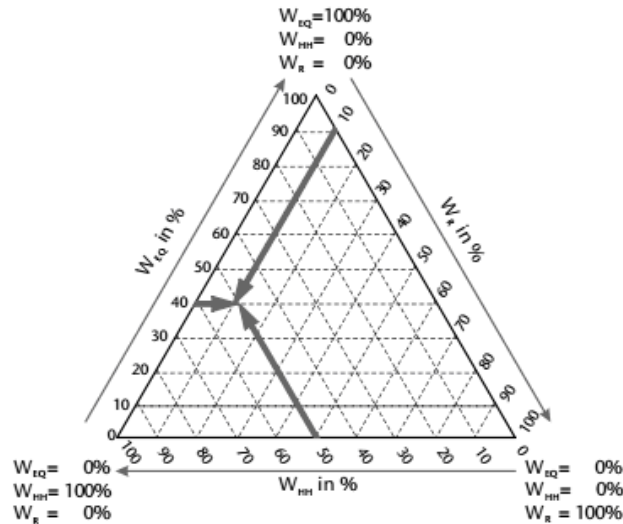


Fig.6. The weighting triangle: W_{EQ} – Weighting factor for the damage to ecosystem quality; W_{HH} – Weighting factor for the damage to human health; W_R – Weighting factor for the damage to energy resources; $W_{EQ} + W_{HH} + W_R = 100\%$

Ранжування категорій впливу щодо їх впливу на довкілля робить чітку різницю між зважуванням та всіма попередніми кроками, де використано емпіричні знання про вплив на довкілля та їх механізми, тоді як зважування, в основному, базується на преференціях та соціальних цінностях. Саме зважування виконують домноженням значень нормалізованого довкілля профілю на присвоєні категорії коефіцієнти вагомості.

Якщо кожній категорії впливу надано коефіцієнт відповідно до її екологічної значущості, то екологічний профіль можна виразити одним числом – сумою зважених показників, з яких складається екологічний профіль. Порівняння на основі екологічних індексів, наприклад двох продуктів А і В з відповідно індексами 5 і 10, приводить до висновку, що А вдвічі екологічніший ніж В. Основна складність полягає у відсутності загальноприйнятої методології встановлення вагових коефіцієнтів. Наразі важко уникнути критики класифікуючи екологічні проблеми.

Метод *Eco-indicator* – багатоетапний процес, який розпочинають з розрахунку екологічних навантажень протягом ЖЦ виробу. Протягом двох наступних етапів обчислюють їх експозицію та вплив експозиції, використовуючи середньоєвропейські дані.

Далі слід відповісти на критичне питання: що слід вважати екологічною проблемою. В *Eco-indicator*-підході виділяють три категорії уражень, так звані кінцеві точки: здоров'я людини, якість екосистеми та ресурси. Ці три категорії не є очевидно зрозумілими і тому для побудови методології необхідним є опис того, що серед іншого входить в кожне з трьох понять. Так здоров'ю будь-якої людини, яка є членом теперішнього чи майбутнього покоління, можуть бути завдані збитки, зокрема передчасною смертю, або спричиненням тимчасової чи сталої інвалідності. Зокрема до збитків *здоров'ю людини*, що мають екологічне походження, включають, наприклад:

- Інфекційні, серцево-судинні та респіраторні захворювання, а також примусове переміщення через зміни клімату.
- Рак внаслідок іонізуючого випромінювання;
- Рак і пошкодження очей через виснаження озонового шару;
- Респіраторні захворювання та рак через токсичні хімічні речовини в повітрі, питній воді та їжі.

Зазвичай вказані види збитків спричинені викидами з систем продукції. Однак цей перелік ще далеко не повний. Наприклад, шкода здоров'ю від викидів важких металів, таких як Cd і Pb, ендокринних руйнівників тощо, а також шкоди для здоров'я від алергенних речовин, шуму та запаху ще не модельовані в *Eco-indicator 99*.

Екосистеми дуже складні і визначити всю завдану їм шкоду дуже складно. Важлива відмінність порівняно зі здоров'ям людини полягає в тому, що навіть якщо б ми могли, ми не дуже переймаєтесь окремим організмом, рослиною чи твариною. Однак саме різноманітність видів тут використано як показник *якості екосистем*. Можна виразити шкоду екосистемі у відсотках видів, яким загрожує зникнення або які зникають з деякої території протягом певного часу.

Для екоотоксичності в *Eco-indicator 99* використано метод, розроблений в Нідерландах для голландського екологічного прогнозу [46]. Згідно методу визначають потенційно уражену фракцію (*англ.* Potentially Affected Fraction – PAF) видів щодо концентрації токсичних речовин. PAF визначають на основі даних про токсичність для

наземних та водних організмів, таких як мікроорганізми, рослини, черви, водорості, земноводні, молюски, ракоподібні та риби.

PAF виражає відсоток видів, підданих впливу вищій концентрації, ніж Концентрація, що Не Має Впливу (*англ.* No Observed Effect Concentration – NOEC). Очевидно, що більша концентрація спричиняє ураження більшої кількості видів, а функція уражень PAF має типову форму.

Логістична крива PAF виражає потенційну частку видів уражену різними концентраціями речовини. Коли хімічна речовина викидається в зону, її концентрація в цій зоні тимчасово зростає. Ця зміна концентрації спричинить зміну значення PAF. Ураження, спричинене викидом цієї речовини, залежить від нахилу кривої у відповідно обраній робочій точці.

Базуючись на NOEC, PAF не обов'язково відповідає спостережуваній шкоді. Навіть високе значення PAF в 50% або навіть 90% не повинно спричинити дійсно помітний ефект. Тут PAF слід трактувати як токсичний стрес, а не як міру моделювання зникнення чи вимирання видів.

Подібно для землекористування в *Eco-indicator 99* як індикатор використано потенційно зниклу фракцію (ПЗФ, *англ.* Potentially Disappeared Fraction – PDF). Однак у цьому випадку розглядають не цільові, а всі види. Модель пошкодження досить складна і містить чотири різні моделі:

- ісцевий ефект землекористування;
- Місцевий ефект перетворення землі.
- Регіональний ефект землекористування;
- Регіональний ефект перетворення земель.

Місцевий ефект стосується зміни кількості видів, яка відбувається на самій занятій чи перетвореній природній території, тоді як регіональний вплив стосується змін поза нею. Регіональний ефект вперше описано в [46]. Дані щодо кількості видів за типом землекористування та деякі поняття, що використані для місцевого впливу, ґрунтуються на [47].

Дані про кількість видів базуються на спостереженнях, а не на моделях. Проблема цього типу даних полягає в тому, що неможливо відокремити вплив типу землекористування від впливу викидів. Тому слід бути особливо обережним, щоб уникнути подвійного підрахунку наслідків уражень.

Категорія шкоди якості екосистеми є найбільш проблематичною з трьох категорій, оскільки вона не є повністю однорідною. Як тимчасове рішення можна використати поєднання PAF та PDF.

Що стосується *непоновлюваних ресурсів* (корисних копалин та викопних палив), очевидно, що враховуючи специфіку їх використання людьми, досить суперечливо вказувати дані про загальну кількість, що припадає на ресурс, доступний в певному регіоні землі. Кількість відомих і легко експлуатованих родовищ досить мала порівняно з поточними щорічними видобутками, зокрема з джерел з низькою концентрацією або з дуже важким доступом. Складно встановити переконливі аргументи для їх врахування або неврахування, оскільки кількість і якість тут безпосередньо пов'язані.

Для вирішення цієї проблеми методологія *Eco-indicator* розглядає не кількість ресурсів як таких, а їх якісну структуру. Зокрема Чапман і Робертс [48] розробили процедуру оцінки істотності виснаження ресурсів, що базується на енергії, необхідній для видобутку мінералу залежно від його концентрації. З добуванням більшої кількості корисних копалин майбутні енергетичні затрати будуть зростати. На цьому принципі ґрунтується міра шкоди, яка використовується в *Eco-indicator* щодо видобутку ресурсів - це енергія, необхідна для видобутку 1 кг мінералу в майбутньому. Більше даних подано в [49].

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 кількість втрачених років життя та кількість років проживання інвалідами (*англ.* Disability Adjusted Life Years – DALY). Вплив на якість екосистеми виражають, як втрату видів на певній території протягом певного часу $PDF \times m^2 \times рік$ ($PDF \times m^2 \times year$). Виснаження ресурсів – надлишок енергії, необхідної для наступного видобутку корисних копалин та викопного палива.

6. Висновки

Мета дослідження життєвого циклу вітрогенераторів була повністю досягнута завдяки цьому дослідженню. Ми проаналізували весь життєвий цикл, починаючи з фази виготовлення до фази утилізації, та встановили всі екологічні наслідки, пов'язані з вітровою турбіною протягом усього її життя. Сценарій відходів є дуже важливою фазою життєвого циклу вітрогенератора. Утилізуючи матеріали, ми в змозі значно зменшити негативний вплив на навколишнє середовище. Іншими словами, без утилізації вітрогенераторів більший негативний вплив на навколишнє середовище. Фаза виготовлення є дуже важливою фазою життєвого циклу вітрогенератора, оскільки вона надає найбільший вплив на навколишнє середовище. Особливо це пов'язано з типом використовуваної електроенергії. Більше «зелене» джерело електроенергії, що використовується у фазі виготовлення вітрогенератора; тим менше вплив вітрогенератора на навколишнє середовище. Аналіз показав, що хоча більшість продуктів була перероблена, а корисні копалини могли бути

використані знову, все ж викопне паливо найбільше впливає на ресурс, і це питання слід враховувати відповідно до вдосконалення системи. Важко було сказати, який конкретний процес був енергоємним у виробничому процесі, оскільки енергетичні результати давались як загальна сума за весь виробничий процес. Слід зазначити, що вітрогенератори також візуально впливають на навколишнє середовище. Однак через свою суб'єктивну природу категорія була опущена.

References

- [1] D. de Renzo, "Vetrojenergetika" [Wind power], [Per. s angl. Zubareva V.V. i Drankfurta M.O.]; Jenergoatomizdat, Moskva, 1982 (in Russian).
- [2] Gh. M. Zabarnyj, A. V. Shhurchkov "Energhetychnyj potencial netradycijnykh dzherel energhiji" [Energy potential of non-traditional energy sources], ITTF, Kyiv, 2002, pp. 151-159 (in Ukrainian).
- [3] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi, *Wind energy*. Handbook, England, 2001.
- [4] T. Chmielniak, *Technologie energetyczne*. Wydawnictwa NaukowoTechniczne, Warszawa, 2008.
- [5] ISO 14040 Environmental Management. Life Cycle Assessment. Principles and framework. International Organisation for standardisation: Geneva, Switzerland, 1997.
- [6] ISO 14042: DSTU ISO/TR 14047:2007 (ISO/TR 14047:2003, IDT) Ekologichne upravlinnja. Ocinjuvannja vplyviv u procesi zhyttjevogho cyklu. Pryklady zastosuvannja. [Environmental management. Impact assessment in the life cycle. Application examples], Derzhstandart Ukrainy, Kyiv, 2009 (in Ukrainian).
- [7] DSTU ISO 14040:2004 Ekologichne keruvannja. Ocinjuvannja zhyttjevogho cyklu. Pryncypy ta struktura [Environmental management. Life cycle assessment. Principles and structure], Derzhstandart Ukrainy, Kyiv, 2007 (in Ukrainian).
- [8] B. Cleary, A. Duffy, A. O'Connor, "Using life cycle assessment to compare wind energy infrastructure", Proceedings of International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction, 2012, pp. 31-39.
- [9] E. Martinez, F. Sanz, S. Pellegrini [et. Al] "Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine", *Renewable Energy* 34(3), 2009, pp. 667-673. doi: 10.1016/j.renene.2008.05.020.
- [10] Ch. Chenai, *Life cycle analysis of wind turbin*. Sustainable Development, Energy, Engineering and Technologies, Manufacturing and Environment, 2012.
- [11] T. Toth, S. Szegedi, "Anthropogeomorphologic impacts of onshore and offshore wind farms" *Acta climatologica et chorologica* 40-41, 2007. pp.147-154.
- [12] B. V. Ermolenko, G. V. Ermolenko, M. A. Ryzhenkov "Jekologicheskie aspekty vitroenergetiki" [Environmental aspects of wind power]. *Teplojenergetika*, Moskva, 11, 2011, pp. 72-78 (in Russian).
- [13] 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. Risoe National Laboratory.
- [14] E. Martínez, F. Sanz, S. Pellegrinia, E. Jiménez, J. Blancob. "Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine" *Renewable Energy*, Volume 34, Issue 3, March 2009, pp. 667–673. doi: 10.1016/j.renene.2008.05.020.
- [15] Elsam: Livscyklusvurdering af hav- og landplacerede vindmølleparker, 02-170261, Elsam Engineering A/S, Kraftværksvej 53, Fredericia, DK, 2004.
- [16] H. Hassing, S. Varming, "Life Cycle Assessment for Wind Turbines". In *2001 European Wind Energy Conference and Exhibition. Tech-wise A/S, Kraftværksvej 53, DK-7000, 2-6.7.2001*, Fredericia, Copenhagen, DK.
- [17] M. Lenzen, J. Munksgaard, "Energy and CO₂ life-cycle analyses of wind turbines". Review and applications. *Renewable Energy* 26, 2002, pp. 339-362.
- [18] M. Lenzen, U. Wachsmann, "Wind turbines in Brazil and Germany: an example of geographical variability in Life-cycle assessment". *Applied Energy* 77, 2004, pp. 119-130.
- [19] L. Schleisner, "Life cycle assessment of a wind farm and related externalities". *Renewable Energy* 20:, 2000, pp. 279-288.
- [20] Tech-wise A/S: Livscyklusvurdering af vindmøller., 01-488, Techwise A/S, Kraftværksvej 53, Fredericia, DK Schleisner 2000, Tech-wise A/S 2001.
- [21] Final Report. Life Cycle Assessment Of Electricity Production from a Vestas V112 Turbine Wind Plant., 2011. [Online]. – Available from: <http://www.vestas.com>.
- [22] T. Gh. Bojko, M. M. Paslavskiy, M. V. Ruda, "Stability of composite landscape complexes: model formalization". *Scientific Bulletin of UNFU*, 29(3), 2019, pp. 108–113. doi: 10.15421/40290323.
- [23] M. V. Ruda, A. M. Hyvlyud, V. V. Lentyakov, "Application of compartment analysis for modeling of environmental influence of consortium ecotones of protected type". *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(6), 2018, pp. 60–67. doi: 10.15421/40280612.
- [24] M. Stachowicz, *Classification and evaluation of life cycle assessment tools*. MS Thesis, Faculty of Process and Environmental Engineering, Technical University of Lodz, Lodz, Poland, 2001.
- [25] I. Zbicinski, J. Stavenuiter, B. Kozłowska, H. P. M. Coevering, *Product Design and Life Cycle Assessment*. Uppsala, BUP, 2006.
- [26] M. Goedkoop, M. Oele, J. Leijting, T. Ponsioen, E. Meijer, "Introduction to LCA with SimaPro". 2016. [Online]. – Available from: <https://www.presustainability.com/download/SimaPro8IntroductionToLCA.pdf>.
- [27] R. Sinha, M. Lennartsson, B. Frostell, "Environmental footprint assessment of building structures: a comparative study." *Building and Environment*, 104, 2016, pp. 162-171. doi: 10.1016/j.buildenv.2016.05.012
- [28] O. Pombo, K. Allacker, B. Rivela, J. Neila, "Sustainability assessment of energy saving measures: a multi-criteria approach for residential buildings retrofitting". A case study of the Spanish housing stock. *Energy and Buildings*, 116, 2016, pp. 384–394. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.01.019.

- [29] I. Zbicinski, J. Stavenuiter, B. Kozłowska, H. Van de Coevering, *Product design and Life Cycle Assessment*. The Baltic University Press, 4, 2006.
- [30] European Wind Energy Agency, 2006. Retrieved on 28/04/2006. [Online]. – Available from: <http://www.ewea.org/index.php?id=196>.
- [31] Vestas, 2005, Life cycle assessment of offshore and onshore sited wind power plants based on Vestas V90-3.0 MW turbines. Retrieved on 20/05/2006. [Online]. – Available from: <http://www.vestas.com/pdf/miljoe/pdf/LCA%20V90-3.0%20MW%20onshore%20og%20offshore%20samt%20energibalance.%202005.pdf>.
- [32] State Energy Conservation Office (SECO). Retrieved on 01/06/2006 <http://www.infinitepower.org/resglossary.htm>.
- [33] Vestas, 2004, General Specification V90 – 3.0 MW 60 Hz Variable Speed Turbine. Retrieved on 20/05/2006. [Online]. – Available from: http://mainegov-images.informe.org/doc/lurc/projects/redington/Documents/Section01_Development_Description/Development_Electric/E_Pro_Reports/A_ppendix%20A%20V90%20General%20Spec%20950010R1.pdf.
- [34] Vestas, 2005, Environmental Statement 2004, Retrieved on 28/04/2006. [Online]. – Available from: http://www.vestas.com/pdf/news/2005/Vestas2004_Miljo_UK.pdf.
- [35] 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.
- [36] D. Ancona, J. Mc Veigh, “Wind Turbine”. Materials and Manufacturing Fact Sheet. Retrieved on 28/04/2006. [Online]. – Available from: http://www.generalplastics.com/uploads/technology/WindTurbine-MaterialsandManufacturing_FactSheet.pdf.
- [37] 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>.
- [38] Energy & Recycling. Retrieved on 20/05/2006. [Online]. – Available from: <http://faculty.washington.edu/crowther/KidsZone/recycling.html>.
- [39] P. P. Bezrukih, “Ispol'zovanie jenerгии vetra” [Use of wind energy Tehnika, jekonomika, jekologija, Kolos, Moscow, 2008 (in Russian).
- [40] SimaPro Manuals. [Online]. – Available from: <http://www.pre.nl/content/manuals>.
- [41] J. M. Makovecška, “Ocinjuvannja zhyttjevogho cyklu produkciji jak instrument vplyvu na minimizaciju vidkhodiv” [Assessing the product life cycle as a tool for influencing waste minimization] Elektronne naukovie fakhove vydannja “Efektyvna ekonomika”, [Online]. – Available from: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=1529>.
- [42] Copenhagen Sustainability Lectures, 2019. [Online]. – Available from: http://klima.ku.dk/sustainability_lectures/inger_andersen/.
- [43] R. Plch, O. Pechacek, V. Vala, R. Pokorny, P. Bednar, P. Cudlin, “Energy, carbon and economic balance of Norway spruce monocultures and near-natural forests”. *Proceedings of the 3rd annual Global Change and Resilience Conference*.
- [44] R. Stojanov, Z. Zalud, P. Cudlin, A. Farda, O. Urban, M. Trnka, *Brno: Global Change and Resilience Center*, 2013, pp. 12-15.
- [45] M. Goedkoop, *The Eco-indicator 95 (NOH report 9514)*. Pre Consultants, Amersfoort, The Netherlands, 1995.
- [46] D. Van de Meent, J. Bakker, O. Klepper, “Potentially affected fraction as an indicator of toxic stress, application of aquatic and terrestrial ecosystems in the Netherlands”. *18th Annual Meeting of SETAC*, November 1997, San Francisco.
- [47] R. Muller-Wenk, *Depletion of abiotic resources weighted on the base of “virtual” impacts of lower grade deposits in future*. IWO Diskussionsbeitrag Nr. 57, Universitat St. Gallen: Switzerland, 1998.
- [48] T. Kollner, N. Jungbluth, “Life cycle impact assesement for land use”. *Third SETAC World Congress*, May 21-25, 2000, Brighton, UK.
- [49] P. F. Chapman, F. Roberts, *Metal resources and energy*. Butterworths Monographs in Materials, Boston, 1983.