

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Яценко Богдан Леонідович

УДК 504.06

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Оцінка впливу систем генерації та передачі електричної
енергії на довкілля та якість повітря**
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Яценко Б.Л.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Соколовський О.Ф.
(прізвище, ім'я, по батькові)

**к.т.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології**
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Яценко Б.Л. Оцінка впливу систем генерації та передачі електричної енергії на довкілля та якість повітря. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2026.

Мінімізувати екологічні ризики енергетичного сектору можливо шляхом інтегрованого підходу: пріоритет відновлюваним джерелам і енергоефективності, впровадження комплексних систем моніторингу й діагностики, строгі екологічні оцінки та відповідальне управління відходами. Збалансований підхід дозволить зменшити негативний вплив на довкілля й підвищити стійкість енергетичної інфраструктури.

Ключові слова. вплив енергосистем на довкілля, викиди ТЕС, викиди АЕС, викиди ГЕС, індекс якості повітря (AQI).

ABSTRACT

Yatsenko B.L. Assessing the Impact of Electricity Generation and Transmission Systems on the Environment and Air Quality. Qualification work for obtaining a Master's degree in specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics – Polissia National University, Zhytomyr, 2026.

Minimizing the environmental risks of the energy sector is possible through an integrated approach: prioritizing renewable sources and energy efficiency, implementing comprehensive monitoring and diagnostic systems, strict environmental assessments, and responsible waste management. A balanced approach will reduce the negative impact on the environment and increase the resilience of the energy infrastructure.

Keywords: impact of energy systems on the environment, thermal power plant emissions, nuclear power plant emissions, hydroelectric power plant emissions, air quality index (AQI).

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОЦІНКА ВПЛИВУ СИСТЕМ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ДОВКІЛЛЯ ТА ЯКІСТЬ ПОВІТРЯ	6
1.1. Вплив на природні ресурси	7
1.2. Водні ресурси	11
1.3. Земля та ґрунт	15
1.4. Вплив на дику природу	17
Висновок по першому розділу	18
РОЗДІЛ 2. ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ ВІД ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ПЕРЕДАЧІ ТА РОЗПОДІЛУ	20
2.1. Лінії електропередачі та розподілу.	21
2.2 Розподільчі пристрої (Комутаційні апарати)	25
2. 3. Силові трансформатори	25
2.4. Акумулятори.	28
Висновки по другому розділу	31
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ВИКИДІВ $ГСО_2$ -ЕКВ/КВТ·ГОД ДЛЯ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАЦІЇ	33
3.1. Методологія оцінки викидів парникових газів	33
3.2. Розрахунок викидів парникових газів	35
Висновки по третьому розділу	36
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	38
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	40

ВСТУП

Оцінка впливу систем генерації та передачі електричної енергії на довкілля та якість повітря є актуальною складовою сучасної енергетичної політики й екологічного менеджменту. Розвиток електроенергетичних мереж, зростання споживання та диверсифікація джерел енергії спричиняють комплексні екологічні наслідки, що впливають на атмосферу, водні та земельні екосистеми, а також на здоров'я населення. Водночас технологічні зміни, інтеграція відновлюваних джерел і модернізація інфраструктури відкривають можливості для мінімізації негативних впливів.

Метою роботи є систематичне виявлення і кількісна оцінка основних викидів та інших екологічних чинників, пов'язаних із виробництвом і передачею електричної енергії, а також аналіз їхнього внеску у погіршення якості повітря. Задачі включають огляд джерел шкідливих викидів (теплові електростанції, дизель-генератори, лінії передачі), оцінку розсіювання забруднюючих речовин, визначення ризиків для довкілля і здоров'я, а також розгляд технологічних та регуляторних заходів з пом'якшення впливу.

Комплексний підхід до оцінки передбачає застосування емісійних інвентарів, моделювання розповсюдження забруднювачів, аналіз життєвого циклу енергетичних систем та врахування соціально-економічних аспектів. Особлива увага приділяється порівнянню традиційних та відновлюваних джерел енергії з точки зору їхнього загального екологічного сліду та потенціалу покращення якості повітря.

Результати такої оцінки мають надати обґрунтування для прийняття стратегічних рішень щодо планування енергетичної інфраструктури, впровадження інноваційних технологій очищення викидів, підвищення енергоефективності та розробки екологічно орієнтованих політик, що сприятимуть зменшенню негативного впливу електроенергетики на довкілля і здоров'я населення.

Посилення екологічних норм, урбанізація та вимоги до сталого розвитку вимагають комплексної оцінки впливу енергосистем і розробки ефективних заходів моніторингу та мінімізації негативних наслідків. Тому дослідження оцінки впливу систем генерації та передачі електричної енергії на довкілля і якість повітря є своєчасним та **актуальним**.

Об'єкт дослідження: системи генерації та передачі електричної енергії: електростанції (теплові, газові, відновлювані), підстанції та лінії електропередачі.

Предмет дослідження: методи і показники оцінки впливу цих систем на довкілля та якість повітря, зокрема емісійні характеристики, розповсюдження забруднювачів, екологічні індикатори, системи моніторингу та заходи зменшення негативного впливу.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

1. Яценко Б.Л.

МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНКА ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ

Наукові читання – 2026: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 20 квітня 2026 р. Житомир: Поліський національний університет, 2026. Ч.2. 119 с.

2. Безсмертний Д.М., Яценко Б.Л.,

ВИМОГИ ДО КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ПРОМИСЛОВОМУ ПІДПРИЄМСТВІ

Наукові читання – 2026: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 20 квітня 2026 р. Житомир: Поліський національний університет, 2026. Ч.2. 119 с.

1 РОЗДІЛ

ОЦІНКА ВПЛИВУ СИСТЕМ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ДОВКІЛЛЯ ТА ЯКІСТЬ ПОВІТРЯ

Системи генерації електроенергії — від традиційних теплових і атомних електростанцій до відновлюваних джерел енергії — мають суттєвий вплив на довкілля та якість атмосферного повітря. Ступінь цього впливу визначається типом палива, технологічними характеристиками обладнання, ефективністю очистки викидів, а також масштабом і режимами експлуатації. Теплові електростанції, що спалюють вугілля, нафту чи газ, є джерелами оксидів азоту, сірки, часток сажі та продуктів неповного згоряння, що сприяє формуванню смогу, кислотних опадів і погіршенню стану здоров'я населення. Атомні станції хоч і не продукують традиційних атмосферних забруднювачів, створюють ризики пов'язані з радіоактивними відходами та потребують ретельного управління для запобігання довготривалим екологічним наслідкам.

Відновлювані джерела, зокрема вітрові та сонячні генератори, демонструють значно менший прямий вплив на якість повітря, проте можуть мати інші екологічні наслідки: зайняття земель, вплив на місцеві екосистеми й потребу у матеріалах для виробництва і утилізації обладнання. Біоенергетика поєднує потенціал зменшення викидів з ризиком неконтрольованих викидів шкідливих речовин залежно від якості палива та технології спалювання[1].

Оцінка впливу на довкілля повинна бути комплексною і базуватися на кількісному моніторингу викидів, моделюванні розповсюдження забруднювачів у атмосфері, аналізі життєвого циклу технологій та врахуванні соціально-економічних аспектів. Впровадження сучасних систем очищення викидів, підвищення енергоефективності, перехід на менш вуглецеві джерела енергії та розвиток мереж зберігання енергії зменшують негативні наслідки для повітря та клімату. Політика регулювання, стандарти викидів і стимулювання інновацій є критично важливими для забезпечення екологічної безпеки та якості життя.

Отже, оцінка впливу систем генерації на довкілля і якість повітря має бути багатоплановою, науково обґрунтованою і спрямованою на мінімізацію шкідливих викидів через поєднання технологічних рішень та ефективного регулювання.

1.1 Вплив на природні ресурси

Повітря. Електростанції, що працюють на вугіллі, нафті або природному газі, викидають забруднюючі речовини в атмосферу, що вимагає встановлення на станції обладнання для контролю забруднення з метою зменшення викидів. Багато з цих забруднюючих речовин, що викидаються електростанціями в повітря, були ідентифіковані та регулюються Українськими законами та стандартами з охорони навколишнього середовища.

Вплив повітряних викидів (забруднення повітря) від електростанції на населення регулюється в основному за допомогою двох наборів стандартів:

- Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами) (ДСП-201-97)[2].
- ДСТУ EN 14902:2018 Якість атмосферного повітря. Стандартний метод вимірювання вмісту *Pb, Cd, As* та *Ni* у фракції аерозольних частинок PM10 (EN 14902:2005, IDT)[3].

SO₂ є причиною кислотних опадів, широко відомих як "кислотні дощі", які можуть пошкоджувати рослинність і закислювати озера. Види, вразливі до кислотних умов, мають проблеми з розмноженням і, в деяких випадках, гинуть. NO_x (оксиди азоту) і леткі органічні сполуки (ЛОС) є компонентами утворення озону. Озон є основним компонентом смогу і може призвести до проблем з диханням та інших наслідків для навколишнього середовища. Тверді частинки (ТЧ) включають пил і дрібніші частинки з максимальним діаметром частинок 10 мікрон (ТЧ10). Потрібно 1000 мікрон, щоб дорівнювало 1 міліметру. Окрім стандартів викидів ТЧ10, існують стандарти для ТЧ2,5, надзвичайно малих частинок з діаметром від 2,5 до 10 мікрон. Доведено, що

дрібні тверді частинки викликають респіраторні проблеми, оскільки вони можуть проникати глибше в легені, ніж більші тверді частинки. Лише відносно невелика кількість дрібних твердих частинок безпосередньо викидається з джерел згоряння. Більш значною проблемою є викиди NO_x і SO_2 з електростанцій, які спалюють вугілля або природний газ. Ці сполуки є частиною складної хімічної реакції в атмосфері, яка утворює дрібні тверді частинки на основі нітратів і сульфатів. Більшість зусиль Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України щодо зменшення забруднення дрібними твердими частинками базуються на цілорічному контролі забруднюючих речовин NO_x і SO_2 .

Ртуть (Hg) природно присутня в навколишньому середовищі в малих кількостях, проте антропогенні джерела значно підвищили її концентрації в повітрі та воді. Однією з основних категорій викидів ртуті є теплові електростанції, що спалюють вугілля. Ртуть є високо леткою: вона може переміщуватися атмосферою на великі відстані, багато разів осідати й знову підніматися в повітря, що надає цьому забруднювачу глобального характеру. Осадження ртуті у водойми відбувається з опадами, талими водами та поверхневим стоком, що призводить до локальних і регіональних проблем, навіть якщо джерело розташоване далеко.

У водних екосистемах мікроорганізми можуть перетворювати неорганічну ртуть на метил ртуть — форму, що легко накопичується в тканинах риби та інших організмів. Біомагніфікація метил ртуті в харчових ланцюгах спричинює підвищені рівні цього токсиканту у хижих видах риб, через що споживання контамінованої риби є основним шляхом впливу ртуті на людину. Потрапляючи до організму, ртуть здатна пошкоджувати нервову систему, причому найбільш уразливими є діти та плоди вагітних жінок, що може призвести до тривалих неврологічних дефіцитів.

У зв'язку з наведеним, моніторинг рівнів ртуті в водоймах та інформування населення про безпечні норми споживання риби є важливими

заходами захисту громадського здоров'я. Для зменшення ризиків необхідні як локальні зусилля зі скорочення викидів від промислових джерел, так і міжнародне співробітництво задля зниження глобального навантаження ртуті на довкілля.

Контроль викидів ртуті електростанціями, що працюють на викопному паливі, покращується. Можливо досягти скорочення викидів ртуті на 70–90 з гаком відсотків, використовуючи певні комбінації технологій контролю.

Важливо також знати про наявність чутливих екологічних ресурсів у районі, на який впливатимуть викиди електростанції. Наприклад, електростанція має розташовуватися далеко від будь-яких визначених природоохоронних територій, таких як національні ліси, на екологію, громадське використання та задоволення від яких може негативно вплинути забруднення повітря.

Українські стандарти викидів базуються на дослідженнях впливу на здоров'я. Щоб мінімізувати забруднюючі речовини, що викидаються в повітря, найкращі доступні технології контролю викидів часто стають обов'язковою вимогою для роботи електростанції. Навіть якщо викиди електростанції повинні відповідати стандартам викидів в атмосферу, більш чутливі особи можуть бути недостатньо захищені. Коли рівень забруднення повітря в районі зростає, більш вразливі особи, такі як люди похилого віку, хворі та дуже малі діти, можуть відчувати проблеми зі здоров'ям.

Глобальний клімат. Здатність планети утримувати сонячне тепло залежить від концентрації "парникових газів" (ПГ) в атмосфері. ПГ – це гази в атмосфері, які затримують тепло, як скло в теплиці, і допомагають підтримувати температуру планети достатньо теплою для виживання життя. Трьома основними ПГ, на які впливає людина, є вуглекислий газ CO_2 , метан (CH_4) і закис азоту (N_2O). Електростанції, що працюють на викопному паливі, такому як вугілля або природний газ, виробляють велику кількість CO_2 . З початку промислової революції, коли почалося масштабне споживання

викопного палива, концентрація CO₂ в атмосфері зросла більш ніж на 30 відсотків. Близько половини цього збільшення відбулося з 1970 року, і швидкість збільшення зросла з 2000 року. Вчені вважають, що збільшення концентрації ПГ сприяло додатковому потеплінню планети, і очікується, що подальше збільшення концентрації призведе до подальшого потепління та різноманітних глобальних кліматичних змін у найближчому майбутньому.

Збільшення концентрації CO₂ та інших парникових газів в атмосфері, як видається, вже має значний вплив на навколишнє середовище та здоров'я людей у багатьох місцях на планеті. Ці наслідки можуть включати підвищення рівня моря, танення льодовиків і полярних крижаних шапок, зміну океанських течій, кліматичні зміни та розширення ареалів поширення хвороби, що переносяться комахами, як у людей, так і в сільськогосподарських культур, збільшення лісових пожеж, зменшення снігового та крижаного покриву взимку та збільшення теплового стресу та смертності серед людей влітку.

Існує зростаючий всесвітній консенсус, який погоджується з Міжурядовою групою експертів зі зміни клімату (IPCC) щодо необхідності скорочення викидів ПГ. Як це зробити – досі є предметом дебатів. Одним із методів може бути захоплення CO₂ у вихлопній трубі та його відкладення у підземних геологічних формаціях. Поточні дослідження вивчають, де можуть знаходитися такі геологічні формації та як компенсувати високу вартість цього методу. Іншим методом, який розглядається, є посадка лісів для поглинання CO₂ та зв'язування вуглецю, що компенсує збільшення викидів CO₂. Однак, малоймовірно, що можна посадити достатньо дерев, щоб значно зменшити рівень ПГ в атмосфері, і, безумовно, не встигнути запобігти зміні клімату. Третій спосіб зменшення викидів ПГ полягав би у зменшенні виробництва електроенергії на електростанціях, що працюють на викопному паливі, за рахунок підвищення промислової, комерційної та житлової енергоефективності (або енергозбереження) та виробництва електроенергії з використанням відновлюваних джерел, таких як вітер, сонце або, можливо,

короткострокові системи електростанцій замкнутого циклу на біомасі. Разом з енергозбереженням та відновлюваними джерелами енергії, також досліджуються методи пошуку способів вилучення CO₂ з атмосфери. Практичність, доцільність та обґрунтованість усіх цих методів досліджуються[4].

1.2. Водні ресурси

Багато електростанцій використовують воду з озер, річок, міських водопостачальних систем або підземних водоносних горизонтів.

Поверхневі води часто використовують для охолодження станцій, а підземні — для технологічних процесів.

Охолоджувальні вежі часто застосовують для конденсації пари, що утворюється в роботі електростанції, відводячи тепло шляхом контакту вежі з повітрям або з окремим водопостачанням. Великі охолоджувальні вежі випаровують значні обсяги води в атмосферу. Випарувана вода втрачається для місцевого стоку або місцевого підземного водоносного горизонту. Зменшення базового стоку річок може негативно вплинути на морфологію русла, середовище існування, водні рослини й тваринні спільноти та види, а також сприяти росту водоростей і небажаних або інвазійних водних рослин. Озера можуть зазнавати подібного впливу. Департамент природних ресурсів уповноважений регулювати споживання води електростанціями.

Якщо воду використовують для вироблення пари для парових турбін або для охолодження пари з метою повторного використання в системі, воду часто забирають із підземних водоносних горизонтів. Відкачування великих обсягів підземних вод створює «конус пониження» навколо свердловини, знижуючи рівні води в водоносному горизонті на певну відстань від свердловини. Це може вплинути на продуктивність міських та інших сусідніх свердловин і може вплинути на життєздатність ресурсів, що залежать від підземних вод у районі, таких як озера, болота, джерела та річки [5].

Електростанції замінюють водопроникні ґрунти та підґрунті на непроникні поверхні, такі як дахи, бетонні майданчики та автостоянки.

Збільшення площі непроникних поверхонь зменшує площу, де вода може просочуватися в землю для поповнення водоносних горизонтів і запасів ґрунтових вод. Якщо вона затримується, її енергія повинна бути розсіяна, щоб вона могла проникнути у водоносний горизонт нижче. Якщо ж її перенаправляють у поверхневі води, втрачена вода також може мати негативний вплив на місцеві водоносні горизонти, які підтримують водно-болотні угіддя, джерела та базовий стік річок, а також може мати негативний вплив на водопостачання електростанції з ґрунтових вод.

Міністерство екології контролює споживання води великими електростанціями та може встановлювати умови дозволу на використання поверхневих вод, щоб захистити поверхневі води та біологічне різноманіття в періоди спеки та природно низького рівня води. Він також має процес отримання дозволів для свердловин великої потужності, щоб регулювати вилучення та споживання води з водоносних горизонтів, які забезпечують місцеві муніципальні свердловини. Продуктивність не муніципальних свердловин не захищена цим процесом отримання дозволів.

Якість води. Електростанції повинні кудись скидати або утилізувати технологічну воду. Місця скидання варіюються від потоків або озер до місцевих муніципальних каналізаційних систем, які зрештою скидають воду в потоки або озера. Щоб впоратися зі скиданням, поверхневі води або системи очищення каналізаційних вод повинні бути здатні поглинати воду, яка була змінена додаванням тепла, кислот або солей. Більші водойми або потоки можуть бути здатні прийняти більше цієї зміненої води через їх розмір і об'єм, або через те, що вони містять розчинені речовини, які можуть буферизувати додані хімікати, або ж ні. Їх здатність до цього потрібно буде моделювати та розраховувати.

Забруднення та забруднюючі речовини, що скидаються з електростанцій у поверхневі води, можуть призвести до негативних наслідків для якості води. Деякі електростанції використовують "прямоточне охолодження". У прямоточному охолодженні охолоджуюча вода забирається з

озера або річки і використовується для конденсації пари для повторного використання в системі. Вода, що використовується для охолодження, забирає тепло від пари, а потім повертається в озеро або річку з більш високою температурою. Вплив цієї технології може включати нагрівання озера або річки поблизу точки скидання, що потенційно впливає на чутливі до температури рослини, рибу, мікробну активність або хімічні та фізичні реакції у воді. Навіть з використанням градирень замість прямоточного охолодження, скинута технологічна вода, яка тепліша за температуру навколишнього середовища, може змінити місцевий склад рибного населення, спільноти водних макробезхребетних (комах) та спільноти водних рослин. Забруднюючі речовини поверхневих вод можуть поглинатися водними видами, що призводить до захворювань та забруднення риби[5].

Скидна вода електростанцій повинна бути очищена, відфільтрована та оброблена перед скиданням. Вона повинна бути відносно нейтральною та містити якомога менше тепла або ново розчинених речовин. Навіть після обробки в скидній воді електростанцій може залишатися незначна кількість забруднюючих речовин, таких як ртуть.

Будівництво електростанції призведе до утворення великих площ відкритого ґрунту. Якщо не вживати заходів, ґрунт і будь-які пов'язані з ним поживні речовини або забруднюючі речовини можуть бути змиті з будівельних майданчиків у прилеглі озера, річки та водно-болотні угіддя під час штормів або весняного танення снігу. Застосування передових методів управління ерозією може обмежити кількість осаду та забруднюючих речовин, які інакше були б змиті з території. План контролю ерозії на будівельному майданчику мінімізує ерозію ґрунту, замулення та перенесення забруднюючих речовин з будівельного майданчика під час і після штормів.

Будівництво електростанції створює проблеми, пов'язані з неконтрольованим відведенням дощової води після її спорудження. Вода, що стікає з дахів, парковок, вугільних складів та інших джерел, може переносити різноманітні забруднювачі у поверхневі води. Вимоги керівних документів

щодо дощової води включають розробку та впровадження плану управління дощовою водою, метою якого є мінімізація забруднюючих речовин та надмірної кількості дощової води, що покидає територію. Проект електростанції повинен мінімізувати ерозію ґрунту, замулювання та перенесення забруднюючих речовин під час штормів, регулює кількість та якість відведення дощової води з будівельних майданчиків та після завершення будівництва за допомогою своїх процесів отримання дозволів.

Забруднюючі речовини, що викидаються електростанціями, також можуть негативно впливати на поверхневі води. Атмосферне осадження азотних сполуки може призвести до або прискорити евтрофікацію озер. Це може спричинити масове розмноження водоростей, що може виснажити рівень кисню у воді, вбиваючи водні організми. Кислотні опади, спричинені забруднюючими речовинами, що викидаються електростанціями в повітря, також є проблемою у водних об'єктах, які природно більш кислі. Кислотні опади можуть спричинити зменшення кількості водних рослин і мікроорганізмів, що впливає на популяції та різноманітність видів риби. Ртуть також може осідати з атмосфери. Надлишок ртуті, що відкладається в певних типах озер, перетворився на метил ртуть і призвів до рекомендацій щодо споживання риби.

Болота. Болота зустрічаються в багатьох різних формах і виконують життєве важливі функції. Ці функції включають накопичення поверхневого стоку, відновлення ґрунтових вод, фільтрацію відкладів і забруднюючих речовин, слугування місцями нересту для деяких видів риби і забезпечення середовища проживання для дикої природи. Електростанції з великою площею забудови часто потребують засипання або осушення певних боліт. Навіть якщо болото не засипається або не осушується, будівельні роботи поблизу боліт можуть пошкодити болота кількома способами. Наприклад:

- Важка техніка може розчавлювати рослинність боліт, особливо ту, що росте на купинах.

- Болотні ґрунти, особливо дуже торф'янисті ґрунти, можуть легко ущільнювати, збільшуючи поверхневий стік і зменшуючи водо утримуючу здатність болота.

- Будівництво під'їзних доріг до електростанцій через болота може змінити кількість або напрямок потоку води, спричиняючи постійне пошкодження болотних ґрунтів і рослинності.

Ці та інші наслідки роботи електростанцій можуть серйозно вплинути на функціональні цінності боліт. Деякі приклади впливу: втрата видів болотних рослин, зменшення видового різноманіття, втрата середовища проживання, необхідного видам тварин для виживання, поширення інвазійних видів і зміна гідрологічного режиму болота.

Як правило, ділянки без боліт або без потенційного негативного впливу на болота є кращими для будівництва електростанцій. Ділянки з високоякісними болотами або великими болотами є менш бажаними через потенційний негативний вплив на болото та його функціональні цінності.

Потенційного негативного впливу на болота слід уникати.

1.3. Земля та ґрунт

Різні типи та конструкції електростанцій мають широкий діапазон вимог до площі земельної ділянки. Вугільні електростанції потребують землю не лише для котлів та турбін, але й для залізничних колій, вугільних складів та шлакових звалищ. Атомні електростанції можуть потребувати спеціальні ділянки для спеціалізованого сухого контейнерного зберігання відпрацьованих паливних стрижнів. Газові електростанції, як правило, потребують менше місця, ніж вугільні або атомні, але потребують великий газопровід і іноді великий резервуар з мазутом для резервного палива. Якщо електростанція виробляє пару, і пара продається іншим підприємствам поблизу (когенерація), необхідно буде встановити великий паропровід і вивести його за межі електростанції до споживача пари. Якщо передбачається розширення

запропонованої електростанції в майбутньому, площа земельної ділянки має бути достатньо великою для розміщення додаткових об'єктів.

Електростанції, які пропонуються для розміщення на ділянках, де вони локально сприймаються як "недоречні", можуть прагнути придбати додаткову землю як буферну зону. Навколишня буферна земля запобігатиме розміщенню нових сусідів надто близько до електростанції. Ця буферна зона може мінімізувати візуальні та шумові ефекти, збільшуючи відстань до найближчих будинків. Атомні електростанції великі площі, щоб створити буфер між електростанціями та навколишніми громадами. Буферна земля може також знадобитися для збільшення відстані між електростанцією та біологічно важливими природними спільнотами. Додаткова буферна земля збільшить площу землі, необхідну для проекту електростанції. Оскільки буферна земля підтримуватиметься як "природний" буфер, вплив на цю конкретну площу землі може бути досить позитивним, як консерваційний вплив[6].

Якщо станція будується на нерівній ділянці, можуть знадобитися масштабні земляні та будівельні роботи. Існує ризик ерозії ґрунту та замулення прилеглих водойм або водно-болотних угідь. Ґрунт потрібно буде перерозподілити або транспортувати в інше місце та належним чином утилізувати.

Рослинність. Вплив на рослинність може бути двох основних видів:

- Прямий вплив видалення або пошкодження рослинності під час будівництва.

- Непрямий вплив на рослинність від забруднення повітря або впливу на поверхневі води, спричиненого електростанцією.

Рослинні угруповання на будь-якій ділянці значною мірою залежать від: а) якості та родючості ґрунту, б) відносних висот і схилів, с) наявності вологи, d) сонячної радіації та f) ступеня та типу порушень на території. Нова електростанція може вплинути на рослинні угруповання, усуваючи їх або змінюючи один чи кілька з цих п'яти факторів, що може послабити

угруповання (наприклад, затінюючи їх або перенаправляючи стік води, щоб рослинне угруповання отримувало менше води).

Видалення або послаблення рослинності на ділянці електростанції може вплинути на рослинні угруповання в навколишньому ландшафті. Якщо постраждала рослинність є рідкісною, унікальною або місцево важливою, втрата її внеску в насіннєвий або генетичний фонд може вплинути на навколишні рослинні угруповання. Можуть бути негативні наслідки для комах, диких тварин або інших організмів, які залежать від рослинності як джерела їжі. Неаборигенні види рослин, завезені або поширені внаслідок будівельних робіт, можуть поширюватися та проникати в інші прилеглі природні рослинні угруповання.

Електростанції викидають у атмосферу забруднюючі речовини та водяну пару у вигляді туману, що може вплинути на ріст і виживання певних рослинних угруповань. Деякі забруднюючі речовини є токсинами або сприяють розвитку хвороби, які пошкоджують або знищують рослини. І навпаки, забруднюючі речовини можуть забезпечувати рослини поживними речовинами, як добрива з повітря. Туман від градирень може змінити режим вологості, так що деякі рослини матимуть конкурентну перевагу над іншими через відмінності в здатності використовувати вологу або протистояти грибковим захворюванням[7].

Рослинність у поверхневих водах також може бути порушена або втрачена внаслідок будівництва водозабірних або скидних споруд, видалення води (водозабір) для технологічних процесів електростанції або характеру стічних вод, що скидаються електростанцією у водойму.

1.4. Вплив на дику природу.

Вплив на рослинність може спричинити ланцюгову реакцію наслідків для дикої природи. Вплив на місцеву або мігруючу дику природу може відбутися, коли їхнє середовище існування та джерело їжі буде видалено або пошкоджено. Джерелом їжі може бути сама рослинність або комахи, тварини,

птахи чи організми, які покладаються на рослинність як на їжу. Місця гніздування та нори будуть зруйновані.

Будівництво нової електростанції може витіснити певні види дикої природи та залучити інші види. Може статися втрата середовища існування для степових або лісових видів, і може бути створено середовище існування для "крайових видів" та "видів-генералістів". Крайові види та види-генералісти можуть процвітати або виживати в середовищі існування, створеному будівельними порушеннями або новими будівлями та ландшафтом. Види, які покладалися конкретно на початкове природне середовище існування, можуть не вижити або можуть бути змушені покинути територію[8].

Мігруючі види, які залежали від початкового місцевого середовища існування для відпочинку, харчування або розмноження, повинні будуть знайти нові місця для цих видів діяльності. Птахи також можуть гинути безпосередньо, вдаряючись об високі конструкції електростанцій або нові лінії електропередачі.

Риби, мідії та інші водні організми у поверхневих водоймах і потоках також можуть постраждати від будівництва або експлуатації електростанції, особливо від будівництва та експлуатації водозабірних або скидних споруд, або від днопоглиблювальних робіт у районах розвантаження барж. Риби та інші водні організми можуть потрапляти у водозабірні системи. Склади вугілля та пил від вугілля можуть спричинити проблеми, якщо кислоти та розчинені токсичні метали потрапляють у поверхневі води. Втрата середовища існування для харчування, відпочинку або розмноження може зашкодити здатності річкових або озерних видів виживати.

Висновок до першого розділу.

Системи генерації енергії істотно впливають довкілля через викиди парникових газів, забруднення повітря і води, зміну ландшафтів та втрату біорізноманіття. Традиційні джерела — вугілля, нафта та газ — забезпечують високу енергетичну віддачу, але спричиняють значні викиди CO₂, сірчаних і

азотних оксидів, важких металів і золи, що призводить до кліматичних змін і проблем здоров'я населення. Гідроенергетика та великі дамби змінюють екосистеми річок, спричиняють затоплення територій і переміщення людей. Ядерна енергетика має низькі викиди парникових газів, але створює ризики аварій і проблеми довготривалого зберігання радіоактивних відходів.

Відновлювані джерела (сонце, вітер, геотермальна, біомаса) значно зменшують викиди та локальне забруднення, але потребують землі, матеріалів для виробництва (включно з рідкоземельними елементами) і мають вплив на місцеві екосистеми; їх інтеграція в мережу вимагає систем зберігання енергії та модернізації інфраструктури.

Ключові рекомендації.

- Переорієнтація на відновлювані джерела та підвищення частки чистої енергії в балансі.
- Енергоефективність і зниження споживання як першочерговий інструмент зменшення впливу.
- Розвиток систем зберігання енергії та гнучких мереж для інтеграції змінних відновлюваних джерел.
- Строге екологічне оцінювання проектів (включно з життєвим циклом обладнання) і мінімізація впливу на біорізноманіття.
- Управління відходами (вуглецеві уловлювальні технології, безпечне зберігання ядерних відходів, переробка сонячних панелей і батарей).
- Підтримка соціальних заходів: участь громад, компенсації для постраждалих спільнот і планування переселень.

Збалансований перехід до чистих, ефективних і соціально відповідальних енергетичних систем із врахуванням локальних екологічних обмежень і технічних можливостей дозволить мінімізувати негативний вплив на довкілля та адаптуватися до змін клімату.

2 РОЗДІЛ

ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ ВІД ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ПЕРЕДАЧІ ТА РОЗПОДІЛУ

На рис. 2.1 схематично показано основні компоненти електричної мережі передачі та розподілу: високовольтні лінії електропередачі (ВЛЕП) транспортують електроенергію від електростанції до трансформатора, а за допомогою відповідних комутаційних пристроїв низьковольтні лінії електропередачі (НЛЕП) зрештою передають енергію під землею до міст. Загалом, така система вже оснащена різними датчиками моніторингу [9].

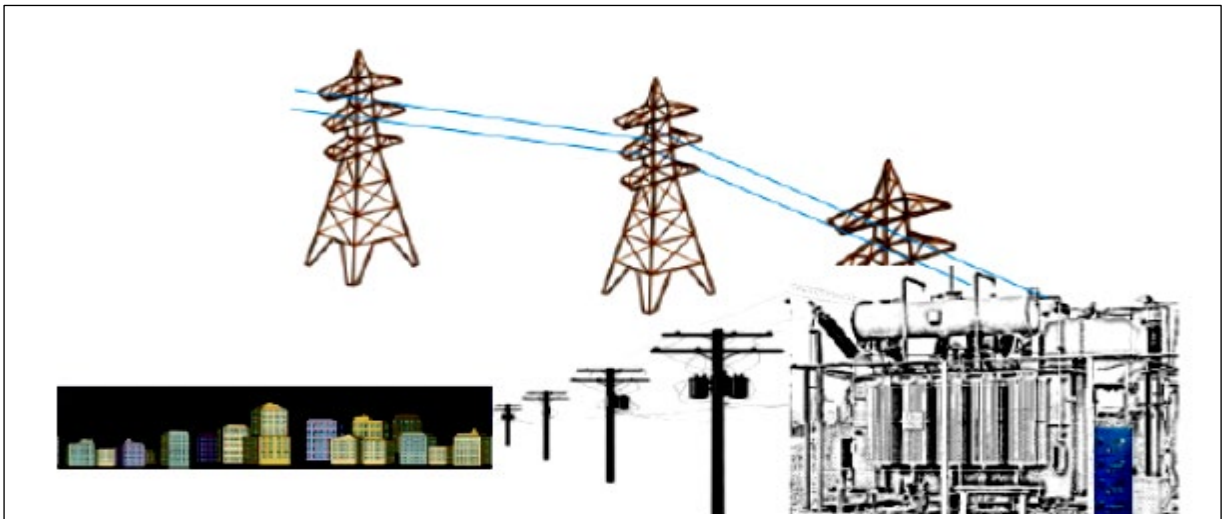


Рисунок 2. 1 Загальна структура електричної мережі передачі та розподілу з її основними компонентами: високовольтні лінії електропередачі (ВЛЕ), які транспортують електроенергію від електростанції до трансформатора, розподільчі шафи та низьковольтні лінії електропередачі (НЛЕ), що постачають енергію до міста.

Зазвичай вважається, що мережа такого типу характеризується практично нульовими викидами забруднюючих речовин у повітря під час її роботи, за винятком випадків, коли спостерігаються несправності в одному або декількох компонентах, що характеризують саму мережу. Відповідно, хімічні датчики використовуються лише для деяких конкретних компонентів. Буде представлено та обговорено наукову літературу, в якій повідомляється про те, як ці компоненти, протягом терміну експлуатації та у разі несправності,

можуть виділяти один або кілька газоподібних компонентів, з метою зрозуміти, чи можна концентрації викинутих забруднюючих речовин корелювати з конкретною несправністю.

2. 1. Лінії електропередачі та розподілу

Протягом терміну експлуатації лінії електропередачі та розподілу електроенергії її компоненти демонструють ознаки фізичної втоми внаслідок старіння, зносу в особливих умовах експлуатації або через конкретні непередбачені пошкодження. На даний момент в ЄС електрична мережа простягається на понад 100 км і, як очікується, значно збільшиться в довжину через прогнозовану масову електрифікацію. Через таке велике та широке поширення, лінії електропередачі та кабелі можна розглядати як найпоширеніше джерело забруднення повітря з точки зору токсичних викидів в атмосферу у випадках як перегріву, так і пожежі. Останнє, звичайно, є найбільш небезпечним. Наприклад, Бурджупаті та Арунджоті вивчали токсичні викиди, пов'язані з пожежами кабелів, і дійшли висновку, що навіть летальні концентрації CO, CO₂, HCHO, HCl та SO₂ можуть бути досягнуті під час горіння [10]. Основна проблема, очевидно, пов'язана зі спалюванням полімерів і різних добавок, які використовуються для виготовлення кабелів, причому спалювання пластикових компонентів добре відоме в літературі як джерело токсичних сполук у концентраціях, характерних для цього типу явища, які завжди дуже високі. Детальний перелік із 40 забруднюючих речовин, що виділяються під час такого горіння, наведено Ортнером і Хенслером [11]. Варто зазначити, що ця проблема також пов'язана з будь-якими компонентами на основі пластику, такими як пластикові шафи, які використовуються у всій мережі. У разі перегріву кабелів діоктилфталат (DOP) і 2-етилгексанол (2-EH) зазвичай виділяються задовго до початку горіння. Цікаво, що про підвищений ризик перегріву повідомлялося також для підземних кабелів, які використовуються для розподільних мереж, якщо вони частково походять від повітряних кабелів, особливо у випадку сонячної експозиції. З точки зору забруднення повітря, як у випадку перегріву, так і у

випадку горіння, найбільш придатним обладнанням для виявлення конкретних забруднювачів повітря є FTIR, XPS, газова хроматографія та інші подібні методи. Ці інструменти мають недолік - вони дорогі, складні та непридатні для безперервного аналізу, як зазначає Денслі в посиланні [12]. Однак, у випадку перегріву електричних кабелів нещодавно були запропоновані рішення на основі твердо тільних елементів, які дозволяють розробляти обладнання, придатне для більш розподіленого моніторингу. Тому ця техніка може бути корисною для запобігання пошкодженням від пожежі. Лю та співавтори порівнювали як комерційні, так і саморобні матриці датчиків з тією ж метою - виявлення DOP, 2-ЕН та бензолу. Крім того, в цьому дослідженні концентрації цільових газів не повідомляються. Робота робить висновок, подібно до Хана та співавторів, що досліджувана техніка дозволяє виявляти DOP та 2ЕН задовго до займання електричних кабелів. Подібний висновок був зроблений Кноблаухом та співавторами [13], які вивчали твердо тільну матрицю датчиків на основі SnO_2 з різними добавками. Показано, що застосована система здатна виявляти токсичні компоненти (CO, пропілен) ще до того, як кабелі покажуть зміни кольору через перегрів. З точки зору концентрацій, що викидаються, одне з небагатьох відповідних досліджень стосується викидів токсичних газів із старіючих електричних кабелів, що використовуються на атомних електростанціях (і, отже, підпадають під особливо суворі правила). Це дослідження показує, як у випадку двадцятирічних старіючих конструкцій вимірюються концентрації CO, HCl та HBr, які перевищують допустимі межі, тоді як у випадку SO_2 спостерігається відчутне збільшення викидів газу з часом. На закінчення, значне збільшення загального індексу токсичності, запропонованого для досліджуваної системи, може бути виміряно в будь-якому випадку. Передавальні мережі мають особливі властивості, пов'язані з їх високовольтним режимом роботи. Високовольтні лінії електропередачі (ВВЛЕП) фактично можуть поводитися як джерело заряджених аерозолів та іонів. Зокрема, коронні ефекти у ВВ лінії постійного струму зазвичай генерують атомарний кисень та інші радикали, включаючи OH або іони, в

основному через іонізацію молекул азоту та їх сполуки. Осадження твердих частинок або бруду зазвичай посилює ефект і, отже, виробництво іонів. Виробництво іонів та аерозолів створює екологічні проблеми та проблеми безпеки, оскільки воно може збільшити кількість забруднюючих речовин, які можна вдихнути, у безпосередньо опромінених популяціях, включаючи працівників з технічного обслуговування ВВЛЕП [14]. Нещодавно Юнг та ін. провели вимірювальну кампанію у 2019 році, щоб встановити кореляції між концентраціями аерозолів та оперативними параметрами поблизу ВВЛЕП. Їхні результати підтвердили, що виміряні концентрації корелюють з оперативними умовами і, зокрема, з струмом та магнітними полями, тоді як висока кореляція була виявлена між концентраціями дрібних твердих частинок (рівних або менших за 10 мкм) та вологістю. Варто зазначити, що в екстремальних погодних умовах пружне розтягування або руйнування через втому провідників, стовпів, траверсів або навколишніх об'єктів (дерев) виявились причиною виникнення лісових пожеж, генеруючи летючі речовини, виявлення яких може діяти як сигнал тривоги. Через коронний ефект ВВЛЕП є джерелами атмосферних забруднювачів, таких як озон та оксиди азоту. Тому мережі передачі електроенергії можна розглядати як сукупність з'єднаних лінійних джерел забруднення повітря. Надзвичайно важко кількісно оцінити фактичний абсолютний (а отже, і відносний) вплив на зафіксовані рівні забруднення, які можуть змінюватися локально в просторі та часі через накопичення та транспортні схеми, залежно від погодних та топографічних умов [15]. Еламський та ін. показали, що рівні озону поблизу ліній електропередачі 220 кВ на 2 ppb (показник «ppb» (частини на мільярд) є одиницею вимірювання концентрації, яка позначає кількість частин складової речовини на мільярд частин загальної суміші) вищі, ніж фонові записи, тоді як середній надлишок від 2,5 ppb до 4,6 ppb був зафіксований на декількох ділянках поблизу ліній електропередачі 500 кВ. Вони також спробували загальну оцінку, показавши, що викиди ліній електропередачі високої напруги протягом 1990-х років могли глобальне становити $400\text{--}600 \times 10^3$ тон/рік, принаймні 0,1% утворення

тропосферного озону в результаті фотохімічних процесів. Місцевий вплив також досліджувався в інших дослідженнях. Кочіорва та співавтори кількісно оцінили потенційне додаткове надходження забруднюючих речовин у районі ВВЛЕП за допомогою спеціальних вимірювальних кампаній. Було виявлено, що пікові концентрації озону та оксидів азоту перевищують рівні, виміряні в навколишніх фонових областях, на 13% та 30% відповідно [14]. Цікаво, що погодинні моделі концентрації повідомляли про аномальні піки вночі. Вимірювання озону поблизу двох ліній електропередачі 330 кВ, розташованих паралельно одна одній, виявили надлишок 2% атмосферного озону поблизу ліній [15]. Відомо, що брудні або несправні ізолятори є випадками виникнення дуги, що може спричинити збільшення викидів озону. Іонізований озон, в свою чергу, може знизити ізоляційні властивості повітря, спричиняючи прямий розряд фази на фазу або фази на металевий корпус зі значними ризиками інфраструктурних ушкоджень, націлених на розподільчі вузли. Виявлення високих рівнів озону можна вважати тривожним станом, що сигналізує про майбутні несправності. На рис. 2.2 подано графічне зображення найважливіших проблем забруднення, що стосуються ліній електропередачі. Зліва показані основні забруднювачі, що спостерігаються у випадку перегріву кабелів або коронного ефекту, а справа показаний випадок горіння кабелів [16].

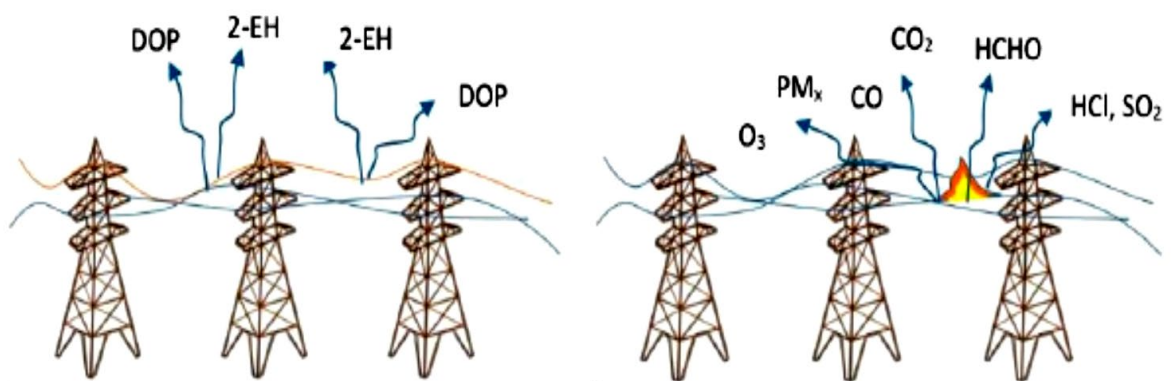


Рисунок 2.2 Викиди забруднюючих речовин у випадку перегріву ліній електропередачі і коронного ефекту (ліворуч) та горіння кабелів (праворуч).

2. 2. Розподільчі пристрої (Комутаційні апарати)

Хоча зв'язок між озоном та електричним розрядом добре відомий у сфері технічного обслуговування електротехніки, використання інструментів моніторингу летючих речовин або твердих частинок в компонентах передачі та розподілу електроенергії обмежене. Вартим уваги прикладом є дослідження 2020 року, проведені Какаром [17]. У ньому було розроблено IoT-систему на основі датчиків озону для моніторингу розподільчих пристроїв. Аномальні умови виявляються та виявляються для застосування в прогностичному обслуговуванні. Цю можливість можна використовувати для активації та оптимізації дій з обслуговування компонентів розподільчих пристроїв. З іншого боку, через його прямий вплив на блукаючі струми в ізоляторах (що також враховано в рекомендаціях щодо проектування IEC68150 [18,19]), аналіз забруднення повітря і, зокрема, вимірювання концентрації аерозолів також використовувалися в [20] для оцінки стану та прогнозування ушкоджень у високовольтних роз'єднувачах, що було розглянуто в [20,21].

2. 3. Силові трансформатори

Силові трансформатори є критично важливими вузлами електричної мережі. Очікується, що ці, як правило, дуже надійні системи матимуть корисний термін експлуатації понад 25 років, якщо робоча температура підтримується в межах 65°C та 95 °C, але його можна продовжити до 60 років, якщо ці умови дотримуються і регулярно проводиться належне технічне обслуговування. Газоутворення в трансформаторах є важливим процесом, пов'язаним зі звичайною роботою. Тому це важливий показник стану їхнього здоров'я.

Фактично, для трансформаторів, занурених в масло та силікон, незначні пошкодження різних частин цього інфраструктурного вузла можуть призвести до збільшення розчинених газів, які можна виявити задовго до виникнення критичної несправності. Під час нормальної роботи в масло виділяються різні сполуки, включаючи водень (H_2), метан (CH_4), ацетилен (C_2H_2), етилен (C_2H_4),

етан (C_2H_6), монооксид вуглецю (CO) і діоксид вуглецю (CO_2), більшість з яких містяться в низьких концентраціях. Швидке збільшення їх абсолютної або відносної концентрації є аномальними подіями, які можуть сигналізувати про наближення несправності. Теплові ушкодження, розряди, тривалий вплив електромагнітних полів і наявність води в маслі сприяють крекінгу і непередбачуваним хімічним реакціям, що, в свою чергу, генерують H_2 , CO і VOC (леткі органічні сполуки), які розчиняються в самій оліві, і концентрації яких пов'язані з температурою, як показано в таблиці 1 [22]. Отже, безперервний моніторинг суміші розчинених газів за допомогою DGA (аналіз розчинених газів) може бути потужним інструментом для застосування предикативного обслуговування для цих компонентів. Хімічні датчики, включаючи газові датчики, також були використані для безперервного моніторингу силових трансформаторів, а стандарти IEEE на основі нечіткої логіки або машинного навчання були запропоновані для розпізнавання типу несправності та їх походження, таких як надмірне тепло, електрична дуга або явища розряду. За певних умов у масло виділяються специфічні сполуки, які є наслідком певних типів ушкоджень. Наприклад, фурфурол виділяється через старіння ізоляційного паперу (обмотки). Отже, вміст фурфуролу або його проксі (в першу чергу CO та CO_2 та їх співвідношення) можна використовувати для отримання оцінки ступеня полімеризації ізоляції обмотки, щоб спрогнозувати термін служби трансформатора, як це було зроблено в [22,23], або стан трансформатора. Погіршення ізоляції також може бути виявлено за допомогою викидів чадного газу. Ацетилен може бути проксі-сигналом перегріву, часткового розряду або навіть дугового розряду (що, у свою чергу, також може спричинити перегрів).

Залежно від розчинності цільового газу, виявлення ушкоджень найкраще спостерігати за допомогою газових сенсорів або шляхом відбору проб масла з резервуару, його газової камери або газової камери самого трансформатора.

Фактично, водень, ймовірно, легко вийде з трансформатора і може бути знайдений у значних концентраціях у газовій камері трансформатора.

Таблиця 1. H_2 , CO та легкі органічні сполуки (VOC), спостережувані під час роботи трансформатора, концентрації яких пов'язані з температурою та типом дефекту[24].

Газ	Тип дефекту	<250 °C	250 °C < t < 350 °C	> 350 °C
H_2	Пробій, дуговий розряд	Низька	Середня (зростає)	Висока
C_2H_4	Температурний дефект	Відсутня	Низька	Висока
CO	Температурний дефект, целюлоза	Відсутня	Низька	Висока
C_2H_4	Дуговий розряд	Відсутня	Відсутня	Висока
CH_4	Пробій	Низька	Висока	Низька
C_2H_6	Пробій	Відсутня	Висока	Низька

Однак, таке виявлення не дасть інформації про місце його утворення. Азот, CO та метан, які також мають низьку розчинність у маслі, натомість пов'язані з наявністю як термічних, так і електричних ушкоджень [25], і їх присутність можна виявити у газовій камері трансформатора. Моніторинг викидів газу в ізоляційних рідинах або викидів з газової камери вважається критично важливим питанням для збереження цих цінних активів. Щодо неконтрольованих викидів, вже було показано, що розподілені газові датчики можуть бути ефективним підходом для їх моніторингу. У дослідженні Minglei було використано та лабораторно протестоване комплексне рішення, що слідує цьому підходу, для моніторингу викидів водню. На рис. 2.3 зображено газові викиди, які можна знайти в середовищі трансформатора і чиї відносні концентрації можна співвідносити з конкретними ушкодженнями.

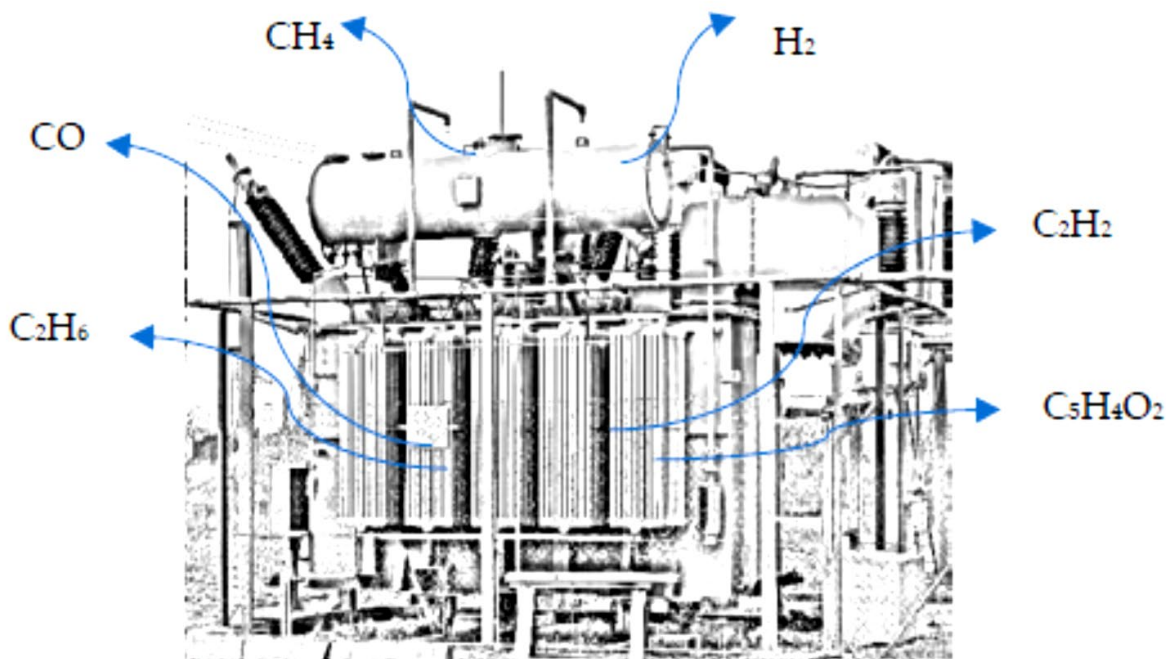


Рисунок 2.3 H_2 , метан, CO та різні легкі органічні сполуки (VOC), які виявляються в середовищі електричного трансформатора.

2.4. Акумулятори.

В сучасних енергосистемах акумулятори є базовим обладнанням, що забезпечує інерцію для балансу системи за наявності розподілених і змінних джерел енергії. На жаль, вони схильні до катастрофічних ушкоджень, що призводять до пожеж і, рідше, до вибухів. В автомобільній промисловості нові правила тепер зобов'язують сигналізувати про небезпеку для пасажирів автомобіля за кілька хвилин до можливої небезпечної події [26]. Після початку пожежі може бути особливо важко загасити її, коли розмір системи зберігання значний через велику дугу живлення постійного струму. Найпоширенішими причинами є електричні або механічні розгони, спричинені перезарядженням, не до зарядженням або навіть короткими замиканнями, викликаними підключеними пристроями, включаючи інвертори. Шкідливі або небезпечні гази виділяються до початку пожежі або на її початкових стадіях під час термічних розгонів. Серед них HF у великих обсягах, який може бути смертельним при викиді в замкнутих приміщеннях, чадний газ, метан і VOC.

Таблиця 2. Аномальні газові викиди електричних акумуляторів.

Очікуваний газ/літаючі викиди	Відповідна подія
HF (Фтор воднева кислота)	Тепловий розгін, придушена пожежа та вибух
H ₂ (Водень)	Небажаний електроліз, тепловий розгін
CO (Оксид вуглецю)	Тепловий розгін, пожежа та вибух
CO ₂ (Вуглекислий газ)	Тепловий розгін, пожежа та вибух
EMC (етилметилкарбонат)	Втрата електроліту або випаровування, тепловий розгін, придушена пожежа та вибух, не придушена пожежа та вибух (сліди)
DMC (діетилметилкарбонат)	Втрата електроліту або випаровування, тепловий розгін, придушена пожежа та вибух, не придушена пожежа та вибух (сліди)
EC (етилен карбонат)	Втрата електроліту або випаровування, тепловий розгін, не придушена пожежа та вибух (сліди), придушена пожежа та вибух
DEC (діетилкарбонат)	Втрата електроліту або випаровування, не придушена пожежа та вибух (сліди), придушена пожежа та вибух
C ₂ H ₄ (Етилен)	Тепловий розгін
CH ₄ (Метан)	Тепловий розгін
C ₂ H ₆ (Етан)	Тепловий розгін
C ₂ H ₂ (Ацетилен)	Тепловий розгін

Очікуваний газ/літаючі викиди	Відповідна подія
C_4H_{10} (Бутан)	Тепловий розгін
C_6H_6 (Бензол)	Не придушена пожежа та вибух (сліди), придушена пожежа та вибух
$C_6H_5CH_3$ (Толуен)	Не придушена пожежа та вибух (сліди), придушена пожежа та вибух

Етилен карбонат, етилметилкарбонат, діетилкарбонат, диметилкарбонат і пропілен карбонат можна знайти у літій-іонних акумуляторах, що виділяють гази з електролітів, і вважаються найважливішими. Фактичне займання може призвести до окислення більшості цих компонентів до нешкідливих побічних продуктів згоряння; однак, оскільки займання слід уникати будь-якими способами, запобігання займання може призвести до того, що вони досягнуть концентрацій, які легко призводять до летальних наслідків для людей, які їх вдихають [27,28,29]. Навіть до того, як може початися термічний розгін, було продемонстровано, що викиди CO_2 можуть сигналізувати про цю неминучу небезпечну подію, і хімічні датчики можна використовувати для тривоги та визначення необхідності вентиляції. Збільшення концентрації водню також можна розглядати як ранній попередник термічного розгону через небажаний електроліз разом із парою електроліту та газами, що утворюються внаслідок дегазації несправних літій-іонних акумуляторів ближче до термічних розгонів [30]. Через різноманітність викидів рекомендується використовувати хімічний мульти сенсорний пристрій у поєднанні з програмним забезпеченням розпізнавання образів для покращення продуктивності виявлення, відхилення хибно позитивних результатів і уникнення небажаних перешкод. У таблиці 2 підсумовано газові викиди, про які досі повідомляли різні автори, та основні події, що їх викликають.

На Рис. 2.4 представлено графічне зображення газових викидів у несправних акумуляторах.

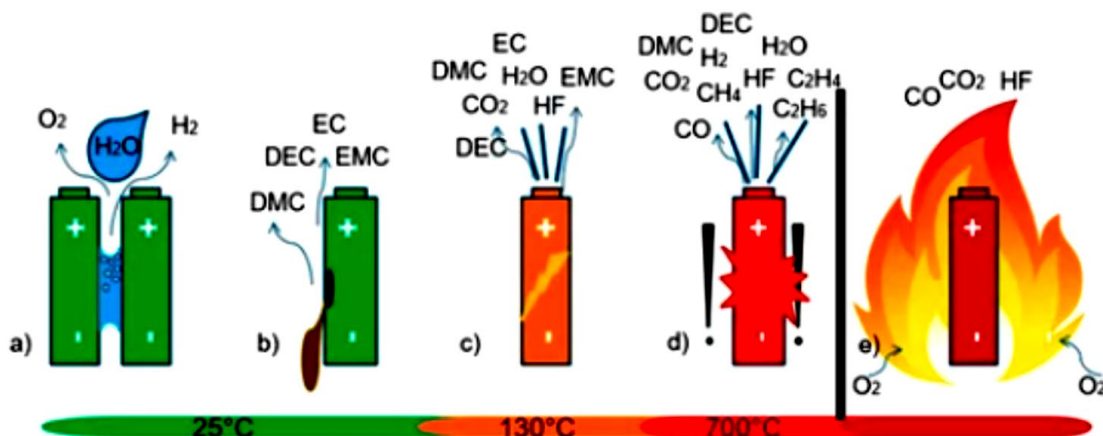


Рисунок 2.4 Викиди газів у пошкоджених акумуляторах до небажаного електролізу (а), при механічному пошкодженні (b), і під час теплового розгону (с, d), як представлено та зображено в [31]. Також розглянуто випадок остаточного займання (е). Значення акронімів див. у Таблиці 2.

Висновок до другого розділу

У розділі показані джерела й типи забруднення повітря, пов'язані з елементами мереж передачі та розподілу електроенергії:

- Загальна характеристика: зазвичай мережі не викидають шкідливих газів у нормальному режимі; викиди з'являються при пошкодженні, старінні або пожежах. Для виявлення використовують як дорогі лабораторні методи (FTIR, GC, XPS), так і дешевші твердо тільні сенсорні матриці для розподіленого моніторингу.
- Лінії передачі й розподілу: перегрів і горіння кабелів виділяють широкий спектр токсичних газів (CO, CO₂, HCHO, HCl, SO₂ та ін.), а коронні розряди генерують озон, іони та аерозолі. Коронні ефекти та забруднені ізолятори підвищують локальні концентрації O₃ і NO_x; у пікові моменти перевищення можуть досягати кілька ppb–десятків відсотків над фоном.
- Комутаційні апарати: моніторинг озону й аерозолів може використовуватись для раннього виявлення аномалій і прогнозного обслуговування (IoT-рішення на основі датчиків O₃).

– Силові трансформатори: у нормі в маслі та газовій фазі присутні низькі концентрації H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , CO , CO_2 ; різке зростання конкретних газів (наприклад, H_2 , C_2H_2 , CO) сигналізує про термічні або електричні дефекти. DGA — ключовий метод діагностики; розподілені газові сенсори — перспективний варіант для безперервного моніторингу.

– Акумулятори: при термічному розгоні, механічних пошкодженнях або займаннях викидаються HF , H_2 , CO , CO_2 та органічні компоненти електролітів (EMC , DMC , EC , DEC тощо); мультисенсорні системи з розпізнаванням образів рекомендовано для раннього виявлення та зменшення хибних спрацювань.

Загальний висновок: елементи мереж передачі та розподілу можуть стати джерелами значних локальних викидів при ушкодженнях або пожежах; комбінація розподілених твердо тільних сенсорів, цільових газових датчиків і DGA дає перспективу для раннього виявлення дефектів і запобігання аваріям та забрудненню.

3 РОЗДІЛ

РОЗРАХУНОК ВИКИДІВ CO_2 -ЕКВ/КВТ·ГОД ДЛЯ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАЦІЇ

3.1. Методологія оцінка викидів парникових газів

Оцінка викидів парникових газів у перерахунку на грам-еквівалент вуглекислого газу на кіловат-годину (CO_2 -екв/кВт·год) є ключовим інструментом для моніторингу вуглецевої інтенсивності виробництва електроенергії та формування політик декарбонізації. Такий розрахунок дозволяє порівнювати різні джерела генерації, визначати ефективність заходів зі зменшення викидів і надавати підґрунтя для систем торгівлі викидами, тарифоутворення та звітності[32].

Методологічно розрахунок базується на визначенні кількості парникових газів, що виділяються при виробництві та постачанні одиниці електричної енергії, із урахуванням життєвого циклу (від видобутку й транспортування палива до експлуатації та виведення з експлуатації обладнання). Основні складові включають: прямі викиди CO_2 , CH_4 та N_2O під час спалювання палива; емісії, пов'язані з видобутком, транспортуванням і переробкою палива; а також непрямі викиди від виробництва обладнання та інфраструктури. Кожен парниковий газ перераховується у CO_2 -еквіваленти за допомогою показників потенціалу глобального потепління (GWP) за прийнятим часовим горизонтом (зазвичай 100 років).

Практичний алгоритм включає такі кроки: 1) збір даних про витрати палива й його склад для конкретної електростанції або міксу енергосистеми; 2) застосування факторів викидів (наприклад, кг CO_2 на одиницю спалюваного палива) для розрахунку прямих викидів; 3) додавання емісій Life-Cycle, якщо необхідно, з використанням стандартизованих коефіцієнтів; 4) сумування всіх викидів і ділення на вироблену електроенергію (кВт·год) для отримання показника CO_2 — екв/кВт·год. Рекомендується використовувати затверджені національні або міжнародні фактори викидів (IPCC, IEA, EN

Standard) і проводити чутливий аналіз для невизначеності у даних і допущеннях[33].

Отриманий показник застосовується для звітності підприємств, розрахунку вуглецевих коефіцієнтів електроенергії для споживачів, оцінки впливу впровадження відновлюваних джерел і енергоефективності. Висока точність вимагає прозорості джерел даних, регулярного оновлення факторів викидів і врахування змін у паливній структурі та технологіях. Сукупне застосування стандартизованих методики та місцевих даних забезпечує надійніші результати, що важливо для наукових досліджень, регуляторних рішень і кліматичних обов'язків.

Основні законодавчі та нормативні акти (станом на початок 2026 року):

- Закон України «Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів» (№ 377-IX від 12.12.2019): Фундаментальний закон, що встановлює правові основи для обліку викидів ПГ[34].

- Закон України № 4187-IX (від 08.01.2025): Закон, який відновив обов'язкову роботу системи моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів, призупинену через повномасштабне вторгнення[35].

- Постанова КМУ № 880 (від 23.09.2020): Затверджує перелік видів діяльності, викиди ПГ від яких підлягають обов'язковому МЗВ[36].

- Постанова КМУ № 960 (від 23.09.2020): Затверджує Порядок здійснення моніторингу та звітності щодо викидів парникових газів[37].

- Постанова КМУ № 156 (від 05.02.2026): Затверджує загальнодержавні зважені коефіцієнти викидів парникових газів, що утворюються внаслідок споживання кінцевої енергії. Це дозволяє підприємствам використовувати реальні дані енергосистеми України для розрахунку вуглецевого сліду продукції[38].

- Наказ Мін довкілля № 938 (від 09.05.2025): Затверджує Методику розрахунку загальнодержавних зважених коефіцієнтів[39].

3.2. Розрахунок викидів парникових газів

Приклад розрахунку викидів парникових газів для Бурштинської ТЕС[40]. Виконаю за типовими даними: вугілля, 10 000 т/рік, включаючи CO_2 , CH_4 і N_2O .

Вхідні дані (припущення):

- Тип палива: кам'яне вугілля.
- Обсяг спалення: 10 000 т/рік.
- Середній вміст вуглецю в вугіллі: 60% по масі (0,60) — типовий для енергетичного вугілля.
- Молярна маса $C = 12$ г/моль, $CO_2 = 44$ г/моль.
- Фракція окиснення вуглецю при спалюванні: 0,99 (99%).
- Глобальні потенціали потепління (GWP100, IPCC AR5): $CO_2 = 1$, $CH_4 = 28$, $N_2O = 265$.
- Емісійні коефіцієнти для нестабільних компонентів (типові дефолтні значення IPCC для вугільних ТЕС, на тонну спаленого палива):
 - a. CP_4 : 1,0 кг CH_4 /т палива.
 - b. N_2O : 0,5 кг N_2O /т палива.

(примітка: ці значення приблизні; для точного обліку слід використовувати локальні/фактичні коефіцієнти)

Розрахунок CO_2 (метод через вміст вуглецю):

1. Маса вуглецю в спаленому паливі $= 10\,000\text{ т} \times 0,60 = 6\,000\text{ т C}$.
 2. Маса C , яка окислюється $\rightarrow$ враховуємо коефіцієнт окиснення:
 $6\,000\text{ т} \times 0,99 = 5\,940\text{ т C}$, що перетворюється в CO_2 .
 3. Переведення $C \rightarrow CO_2$:
маса $CO_2 = \text{маса } C \times (M(CO_2)/M(C)) = 5\,940\text{ т} \times (44/12) = 5\,940 \times 3,6667 \approx 21\,780\text{ т } CO_2$.
- Отже, $CO_2 \approx 21\,780$ т/рік.

Розрахунок CH_4 і N_2O (прямим множенням емісійних коефіцієнтів):

1. CH_4 : $1,0\text{ кг } CH_4/\text{т} \times 10\,000\text{ т} = 10\,000\text{ кг} = 10\text{ т } CH_4/\text{рік}$

$$2. N_2O: 0,5 \text{ кг } N_2O/T \times 10\,000 \text{ T} = 5\,000 \text{ кг} = 5 \text{ T } N_2O/\text{рік}$$

Переведення в CO₂-еквівалент (GWP):

$$1. CH_4 \text{ в } CO_2\text{-екв.: } 10 \text{ T} \times 28 = 280 \text{ T } CO_2\text{-екв.}$$

$$2. N_2O \text{ в } CO_2\text{-екв.: } 5 \text{ T} \times 265 = 1\,325 \text{ T } CO_2\text{-екв.}$$

Загальні викиди в CO₂-еквіваленті:

$$CO_2 (21\,780 \text{ T}) + CH_4\text{-екв} (280 \text{ T}) + N_2O\text{-екв} (1\,325 \text{ T}) = 23\,385 \text{ T } CO_2\text{-екв. /рік}$$

Підсумок:

$$1. CO_2 \approx 21\,780 \text{ T/рік}$$

$$2. CH_4 \approx 10 \text{ T/рік} (\approx 280 \text{ T } CO_2\text{-екв.})$$

$$3. N_2O \approx 5 \text{ T/рік} (\approx 1\,325 \text{ T } CO_2\text{-екв.})$$

$$4. \text{ Загальні викиди } \approx 23\,385 \text{ T } CO_2\text{-екв. /рік}$$

Висновок до третього розділу

Оцінка викидів парникових газів у перерахунку на грам-еквівалент вуглекислого газу на кіловат-годину ($гCO_2$ — екв/кВт · год) є практично необхідним інструментом для вимірювання вуглецевої інтенсивності електрогенерації та обґрунтування політик декарбонізації. Такий показник дозволяє порівнювати технології й енергетичні мікси, визначати ефективність заходів зі скорочення викидів, формувати правила торфоутворенням, системи звітності та механізми торгівлі викидами.

Методологічно розрахунок будується на повному або частковому життєвому циклі виробництва та постачання електроенергії. До основних складових належать прямі викиди (переважно CO_2 , а також CH_4 і N_2O) під час спалювання палива, емісії, пов'язані з видобутком, транспортуванням і переробкою палива, а також непрямі викиди, пов'язані з виробництвом обладнання та інфраструктури. Кожен парниковий газ приводиться до CO_2 -еквівалента за допомогою показників потенціалу глобального потепління (GWP) для прийнятого часового горизонту (зазвичай 100 років).

Практичний алгоритм розрахунку:

1. Збір даних про витрати палива, його склад і теплотворну здатність для конкретної електростанції або енергосистемного міксу.
2. Застосування факторів викидів (наприклад, кг CO_2 на одиницю палива) для обчислення прямих викидів.
3. Додавання життєвого циклу (LCA) — емісій від видобутку, транспортування, переробки та виробництва обладнання — за допомогою стандартизованих коефіцієнтів, якщо це необхідно.
4. Переведення всіх парникових газів у CO_2 -еквіваленти через GWP і сумування абсолютних емісій.
5. Ділення сумарних CO_2 -еквівалентів на загальний обсяг виробленої електроенергії (кВт · год) для отримання показника г CO_2 -екв/кВт · год.
6. Проведення аналізу невизначеності й чутливого аналізу щодо ключових параметрів (факторів викидів, вмісту вуглецю, коефіцієнта окиснення тощо).

Практичне застосування показника г CO_2 -екв/кВт · год охоплює: корпоративну звітність і верифікацію, розрахунок вуглецевого сліду продукції, оцінку впливу інтеграції відновлюваних джерел і енергоефективності, а також посилення політик щодо скорочення викидів. Для отримання надійних результатів необхідна синергія стандартизованої методики і місцевих даних, що забезпечує достовірність, порівнянність і придатність розрахунків для наукових, регуляторних і кліматичних цілей.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Системи генерації енергії мають значний вплив на довкілля, зумовлений як прямими викидами шкідливих речовин, так і трансформаціями екосистем. Викопні джерела (вугілля, нафта, газ) забезпечують високу енергетичну віддачу, проте спричиняють великі викиди CO_2 , оксидів сірки й азоту, важких металів і золи, що призводить до глобальних кліматичних змін і негативно впливає на здоров'я населення. Великі гідроенергетичні проекти змінюють річкові екосистеми, викликають затоплення територій і соціальні переміщення. Ядерна енергетика характеризується низьким рівнем парникових викидів, але несе ризики аварій і проблеми довготривалого зберігання радіоактивних відходів. Відновлювані джерела (сонце, вітер, геотермальна енергія, біомаса) суттєво знижують викиди та місцеве забруднення, але потребують територій, матеріалів (включно з рідкоземельними елементами) і можуть впливати на біорізноманіття; інтеграція змінних джерел вимагає розвитку систем зберігання енергії та модернізації мереж. Рекомендовано переорієнтацію на відновлювані джерела, підвищення енергоефективності, розвиток накопичувачів і гнучких мереж, обов'язкове екологічне оцінювання з урахуванням життєвого циклу обладнання, управління відходами й соціальна підтримка постраждалих громад. Збалансований перехід до чистих, ефективних і соціально відповідальних енергетичних систем з урахуванням локальних обмежень дозволить мінімізувати негативні наслідки та підвищити адаптивність до кліматичних змін.

Елементи мереж передачі й розподілу зазвичай не є джерелом шкідливих газів у нормальному режимі, але при пошкодженнях, старінні чи пожежах можуть генерувати значні локальні викиди. Перегрів і горіння кабелів виділяють широкий спектр токсичних газів (CO , CO_2 , $HCHO$, HCl , SO_2 , тощо), тоді як коронні розряди виробляють озон, іони й аерозолі, підвищуючи локальні концентрації O_3 , і NO_x . Комутаційні апарати й акумулятори при

аваріях виділяють озон, HF , H_2 , CO , органічні компоненти електролітів і інші токсичні сполуки. Для діагностики трансформаторів DGA залишається ключовим методом; розподілені тверді сенсори, цільові газові датчики і мультисенсорні системи з розпізнаванням образів є перспективними для раннього виявлення дефектів, прогностного обслуговування та запобігання аваріям і забрудненню. Необхідні комплексні системи моніторингу, адаптовані до специфіки інфраструктури, а також стандарти й процедури реагування для зниження ризиків.

Оцінка викидів пар у контексті енергетичних систем має враховувати джерела випаровування і термічних деградації матеріалів, аналітичні методи виявлення та кількісної оцінки, а також потенційний вплив на здоров'я й довкілля. Для повноти оцінки слід застосовувати підходи життєвого циклу, поєднуючи лабораторні методи й розподілений сенсорний моніторинг, що дозволить своєчасно виявляти аномалії, мінімізувати викиди та забезпечити безпечну експлуатацію енергетичної інфраструктури.

Мінімізувати екологічні ризики енергетичного сектору можливо шляхом інтегрованого підходу: пріоритет відновлюваним джерелам і енергоефективності, розвиток накопичувачів і гнучких мереж, впровадження комплексних систем моніторингу й діагностики, строгі екологічні оцінки та відповідальне управління відходами, а також соціальні заходи для захисту громад. Такий збалансований підхід дозволить зменшити негативний вплив на довкілля й підвищити стійкість енергетичної інфраструктури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ У ХХІ СТОЛІТТІ 22–24 травня 2024 року КИЇВ матеріали ХХV міжнародної науково-практичної конференції
2. ДСП-201-97 Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами)
3. ДСТУ EN 14902:2018 Якість атмосферного повітря. Стандартний метод вимірювання вмісту *Pb, Cd, As* та *Ni* у фракції аерозольних частинок PM10 (EN 14902:2005, IDT)
4. Зміна клімату в Україні та світі: причини, наслідки та рішення для протидії https://ecoaction.org.ua/zmina-klimatu-ua-ta-svit.html?gad_source
5. Водні ресурси.
https://vue.gov.ua/%D0%92%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%96_%D1%80%D0%B5%D1%81%D1%83%D1%80%D1%81%D0%B8
6. Оцінка забруднення ґрунтів важкими металами у зоні впливу теплових електростанцій <https://journals.uran.ua/geoeeco/article/view/204915>
7. Екологічні ризики будівництва вітрових електростанцій в Україні/
<https://uk.wikipedia.org/wiki>
8. Т.П. НЕЧАЄВА, С.В. ШУЛЬЖЕНКО, Д.П. САС, М.В. ПАРАСЮК
Фактори екологічного впливу електроенергетичних об'єктів на довкілля (Інститут загальної енергетики НАН України, Київ) ПРОБЛЕМИ ЗАГАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ • 18/2008 www.ienergy.kiev.ua
9. Swain, A.; Abdellatif, E.; Mousa, A.; Pong, P.W.T. Sensor Technologies for Transmission and Distribution Systems: A Review of the Latest Developments. *Energies* 2022, 15, 7339.
10. Burjupati, R.; Arunjothi, R. Lethal combustion product evaluation of polymeric materials used in power cables. In Proceedings of the 9th International Conference on Insulated Power Cables, Paris, France, 21–25 June 2015.
11. von Kunststoffbränden, B. Bei Einer Störung des Bestimmungsgemasen

Betriebs Entstehende Stoffe nach den Anhängen II–IV der 12. BImSchV, Tab. 3.1 pag. 19. Available online: <https://www.lfu.bayern.de/luft/doc/kunststoffbraende.pdf> (accessed on 4 December 2023). (In German).

12. Densley, J. Ageing mechanisms and diagnostics for power cables—An overview. *IEEE Electr. Insul. Mag.* 2001, 17, 14–22.

13. Liu, Y.; Geyik, U.; Kobald, A.; Yang, A.; Wang, X.; Weimar, U.; Rong, M.; Bârsan, N. Overheat diagnosis of power cable based on gas sensors: Device/material exploration. *Sens. Actuators B Chem.* 2022, 350, 130837.

14. Fewes, A.P.; Henshaw, D.L.; Keitch, P.; Close, J.J.; Wilding, R.J. Increased exposure to pollutant aerosols under high voltage power lines. *Int. J. Radiat. Biol.* 1999, 75, 1505–1521.

15. Bekesiene, S.; Meidute-Kavaliauskiene, I.; Vasiliauskiene, V. Accurate Prediction of Concentration Changes in Ozone as an Air Pollutant by Multiple Linear Regression and Artificial Neural Networks. *Mathematics* 2021, 9, 356.

16. Voluntaries, V.; Šerevičienė, V.; Girgždiene, R. Ozone concentration variations near high-voltage transmission lines. *J. Environ. Eng. Landsc. Manag.* 2009, 17, 28–35.

17. Kakar, M. IOT Applications in Distribution Substations Review and New Approaches. Master's Thesis, Polytechnic of Milan, Milan, Italy, 2020. Available online: <https://hdl.handle.net/10589/167163>

18. IEC TR 61850-1:2013; Communication Networks and Systems for Power Utility Automation—Part 1: Introduction and Overview. IEC: Geneva, Switzerland, 2013.

19. Блукаючи струми та боротьба з ними
<https://studfile.net/preview/15357183/page:3/>

20. Saraceni, R. HV Disconnecter: Smart Integration and Real Time Monitoring of Pollution for Predictive Maintenance in APM Ecosystem. Master's Thesis, Polytechnic of Milan, Milan, Italy, 2021. Available online: <https://thesis.unipd.it/handle/20.500.12608/28985> (accessed on 6 January 2024).

21. Методичні розробки для виконання самотійної роботи з навчальної

дисципліни «Техніка високих напруг» для здобувачів рівня вищої освіти перший (бакалаврський) ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної форми навчання. Семенов А. Полтава: ПДАУ, 2025. 51

22. Alsumaidae, Y.A.M.; Yaw, C.T.; Koh, S.P.; Tiong, S.K.; Chen, C.P.; Ali, K. Review of Medium-Voltage Switchgear Fault Detection in a Condition-Based Monitoring System by Using Deep Learning. *Energies* 2022, 15, 6762.

23. Який термін служби трансформатора. <https://ua.electric-test.com/info/what-is-the-service-life-of-the-transformer-73727788.html>

24. Patel, M.K.; Patel, A.M. Simulation and Analysis of DGA Analysis for Power Transformer Using Advanced Control Methods. *Asian J. Converg. Technol.* 2021, 7, 102–109.

25. Prasajo, R.A.; Diwyacitta, K.; Suwarno; Gumilang, H. Transformer Paper Expected Life Estimation Using ANFIS Based on Oil Characteristics and Dissolved Gases (Case Study: Indonesian Transformers). *Energies* 2017, 10, 1135.

26. GB 38031-2020; Electric Vehicles Traction Battery Safety Requirements. China National Standardization Administration Committee: Beijing, China, 2020.

27. Cai, T.; Valecha, P.; Tran, E.; Engle, B.; Stephanopoulos, A.; Siegel, J. Detection of Li-ion battery failure and venting with Carbon Dioxide sensors. *Transportation* 2021, 7, 100100.

28. https://www.researchgate.net/publication/390683452_Vikidi_parnikovih_gaziv_vid_sistemi_generuvanna_energii_na_vikopanomu_palivi

29. Посібник з оцінки викидів парникових газів, пов'язаних із конфліктами <https://ecoaction.org.ua/otsinka-vykydiv-parnykovykh-haziv-z-konfliktamy2025.html>

30. Essl, C.; Seifert, L.; Rabe, M.; Fuchs, A. Early Detection of Failing Automotive Batteries Using Gas Sensors. *Batterie* 2021, 7, 25.

31. Закон України «Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів» (№ 377-IX від 12.12.2019).

32. Методичні рекомендації з оцінки викидів парникових газів за видами

діяльності установок.

https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/671_Metodychni.pdf

33. Оцінка зниження викидів парникових газів вугільним сектором України для виконання міжнародних кліматичних угод
https://www.researchgate.net/publication/369032243_OCINKA_ZNIZENNA_VIKIDIV_PARNIKOVIH_GAZIV_VUGILNIM_SEKTOROM_UKRAINI_DLA_VIKONANNA_MIZNARODNIH_KLIMATICHNIH_UGOD

34. Закон України «Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів» (№ 377-IX від 12.12.2019):

35. Закон України № 4187-IX (від 08.01.2025).

36. Постанова КМУ № 880 (від 23.09.2020).

37. Постанова КМУ № 960 (від 23.09.2020).

38. Постанова КМУ № 156 (від 05.02.2026).

39. Наказ Мін довкілля № 938 (від 09.05.2025).

40. Використання золи виносу Бурштинської ТЕС в технології виробництва автоклавного газобетону <file:///C:/Users/user/Downloads/2602-%D0%A2%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%82%20%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%82%D1%96-2946-1-10-20210610.pdf>