

# ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ ДЛЯ СТВОРЕННЯ МІКРОКЛІМАТУ ПРИМІЩЕНЬ В УМОВАХ ВОЄННОГО ЕКОЦИДУ

Вінницькій національний технічний університет

## *Анотація*

Одним з основних завдань підвищення надійності інженерних систем для створення мікроклімату є управління та виявлення проблем діагностики вразливих систем та компонентів ОВК. Розробка ефективних стратегій виявлення помилок, профілактичного обслуговування на основі стану, яке планує обслуговування та роботу систем ОВК відповідно до потреб, що визначається станом системи в умовах воєнного екоциду. Одним з інструментів оцінки надійності системи ОВК та виявлення слабких вузлів і втрати працездатності є ексергетичний аналіз та визначення стану системи за наявними сигналами моніторингу, що далі називається діагностикою несправностей. Оцінка надійності систем створення мікроклімату дозволяють об'єктивно порівняти альтернативні технології та стратегії стабільного функціонування та відновлення роботи як всієї системи ОВК так і її окремих критично важливих компонентів та вузлів.

**Ключові слова:** інженерні системи, надійність, мікроклімат, діагностування, технічний стан, ОВК, воєнний екоцид, ексергетичний аналіз, критично важливі компоненти та вузли.

## *Abstract*

One of the primary tasks in enhancing the reliability of engineering systems for indoor climate control is the management and diagnostics of vulnerabilities within HVAC systems and their components. This involves developing effective fault detection strategies and condition-based preventive maintenance, which allows for the scheduling of HVAC system operations and maintenance according to actual needs, as determined by the system's state under conditions of war-induced ecocide. Exergetic analysis, along with determining the system's state based on available monitoring signals (hereinafter referred to as Fault Detection and Diagnostics — FDD), serves as a key tool for assessing HVAC system reliability and identifying weak nodes or loss of performance. Evaluating the reliability of climate control systems enables an objective comparison of alternative technologies and strategies for stable functioning and recovery, both for the entire HVAC system and its individual critical components and assemblies.

**Keywords:** engineering systems, reliability, microclimate, diagnostics (or diagnosing), technical condition, HVAC systems, war-induced ecocide, exergetic analysis, critical components and assemblies.

## **Вступ**

В умовах воєнного стану та екоциду надійність системи визначається її здатністю переходити між станами без повної втрати функціональності (концепція Resilience). Для кількісної оцінки технічної досконалості та виявлення зон найбільшої втрати працездатності інженерних систем в умовах екологічного навантаження використано ексергетичний метод аналізу та стратегією профілактичного обслуговування є обслуговування на основі стану, яке планує обслуговування відповідно до потреб, що визначається станом системи, що дозволяє врахувати якісну складову енергетичних перетворень та стан системи як системи в цілому так і критично важливих її вузлів та компонентів. Взаємозалежність між компонентами системи та існування кількох режимів роботи створюють проблеми для діагностики несправностей систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (ОВК) в умовах воєнного екоциду. Надійна та своєчасна діагностика може бути забезпечена лише тоді, коли вона виконується у всіх режимах роботи та на рівні системи, а не на рівні окремих компонентів. Тим не менш, у літературі майже не описано методів діагностики несправностей ОВК, які б задовольняли ці вимоги. Запропоновано багатомодельний підхід до діагностики несправностей ОВК на рівні системи, який враховує взаємозалежність компонентів та кілька режимів роботи в умовах воєнного екоциду.

## Результати досліджень

Системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (ОВК), що широко використовуються сьогодні, відповідають за значну частину (20–40%) споживання енергії та є життєво важливими системами в умовах воєнного екоциду. Несправність або деградація компонентів системи ОВК призводить до зниження не тільки комфорту, з одного боку, та приблизно 15–30% втрат енергії, а і до здатності підтримувати необхідні для функціонування будівель таких як лікарні або укриття параметри з іншого боку. Тому розробка ефективних стратегій профілактичного обслуговування та відновлення роботи систем ОВК під час воєнного екоциду має велике значення.

Діагностика несправностей систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (ОВК) є складним завданням під час воєнного екоциду з таких причин:

1. Поведінку системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря важко моделювати, оскільки вона змінюється від будівлі до будівлі та залежить від невизначених факторів, таких як воєнний екоцид погода та використання будівлі.
2. Загалом, вимірюється відносно мало змінних, особливо на рівні компонентів. Наприклад, витрати повітря та води рідко доступні для всіх компонентів, таких як радіатори та вентиляційні установки.
3. Наявні вимірювання часто є лише приблизними оцінками основних змінних, наприклад, вони збираються за допомогою одноточкових датчиків температури повітря.
4. Між різними компонентами системи існують (ієрархічні) зв'язки. Наприклад, непрацюючий котел також впливатиме на роботу всіх радіаторів та вентиляційних установок, підключених до цього котла. Аналогічно, ступінь, до якої несправність радіатора впливає на температуру в приміщенні, залежить, серед інших факторів, від наявності та потужності інших радіаторів у приміщенні.
5. Воєнний екоцид, різні умови навколишнього середовища та налаштування користувача (наприклад, денний та нічний графіки) вимагають, щоб системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря працювали в різних режимах. Наприклад, вдень контролюється як частота оновлення, так і температура припливного повітря, тоді як вночі контролюється лише частота оновлення. Кожен з режимів роботи може вимагати різної діагностичної моделі.

Запропоновані на сьогодні діагностичні моделі фіксуються системою на основі правил, яку не можна легко модифікувати відповідно до змінних ситуацій в умовах воєнного екоциду та інших конфігурацій будівлі, і яка не враховує невизначеність. Методи діагностики несправностей, які не враховують взаємозалежність компонентів та зміну режимів роботи в умовах воєнного екоциду, не призведуть до адекватної діагностики несправностей на практиці. Для забезпечення правильної та своєчасної діагностики характеристики проблеми слід чітко враховувати при формулюванні діагностичної моделі. Для кожного режиму роботи на системному рівні визначається окрема байєсівська мережа (діагностична модель). Моделі побудовані на основі знань про взаємозалежності компонентів та закони збереження, а також на основі історичних даних за допомогою віртуальних датчиків. Ми показуємо, що взаємозалежності компонентів забезпечують корисні функції для діагностики несправностей. Включення цих функцій призводить до кращих результатів діагностики, особливо коли доступно лише кілька сигналів моніторингу. Моделювання демонструє ефективність запропонованого методу: несправності своєчасно та правильно діагностуються за умови, що несправності призводять до спостережуваної поведінки.

Запропоновано багатомодельний підхід для підвищення надійності що базується на чіткому розподілі інформаційних та енергетичних потоків та діагностики несправностей на системному рівні в системах опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, який:

- враховує взаємозалежність між різними компонентами HVAC;
- може легко адаптуватися до змінних умов експлуатації та різних конфігурацій будівель в умовах воєнного екоциду.

Кожна модель фіксується байєсівською мережею, яка є інтуїтивно зрозумілою та прозорою моделлю для міркувань в умовах невизначеності, що може легко адаптуватися до різних умов експлуатації в умовах воєнного екоциду та різних конфігурацій будівель. Ми будемо басєсівські мережі на основі знань про взаємозалежності компонентів та закони збереження, ексєрґетичного аналізу а також на основі історичних даних за допомогою віртуальних датчиків. Чим вища деструкція ексєрґії в окремому елементі, тим більшим є навантаження на нього і тим вища ймовірність його

відмови (виходу з ладу). Наприклад забруднення зовнішнього повітря внаслідок воєнних дій призводить до зростання аеродинамічного опору фільтрів відповідно зростає деструкція ексергії вентилятора та знижується його надійність і термін служби. Аналіз в умовах нестабільного енергопостачання- важливо розглянути роботу систем при зміні параметрів теплоносія або напруги. Ексергетичний аналіз допоможе розрахувати, наскільки ефективно система мікроклімату використовує обмежений енергетичний ресурс (наприклад, від генератора або сонячних панелей) для підтримки необхідних параметрів повітря в укриттях чи лікарнях. Таким чином ми маємо декілька моделей в умовах воєнного екоциду.

Модель А (Норма): Байєсівська мережа для стандартних параметрів.

Модель Б (Екоцид): Модель, де пріоритетом є герметизація та очищення.

Модель В (Блекаут): Модель, що враховує обмеження енергії.

Також маємо декілька станів:

(Ефективне функціонування)-система працює згідно норм та стандартів

(Адаптивна рециркуляція): При виявленні продуктів горіння або хімічного забруднення, система переходить на режим часткового або повного замкненого циклу.

(Енергонезалежна стійкість): Робота в умовах блекауту. Використовується енергія акумуляційних баків або відновлюваних джерел, керована алгоритмом пріоритезації споживачів.

(Гранична надійність): Робота при частковому фізичному пошкодженні (наприклад, розгерметизація одного з контурів). Система використовує байпасні лінії для підтримки життєдіяльності.

Діагностика на системному рівні: це не просто моніторинг одного датчика, а аналіз взаємодії всіх вузлів (від фільтра до споживача). Це дозволяє виявити несправність ще до того, як вона призведе до повної зупинки системи.

Підвищення надійності в умовах воєнного екоциду досягається не просто дублюванням обладнання, а впровадженням інтелектуального алгоритму адаптації, який змінює термодинамічний режим роботи системи залежно від агресивності зовнішнього середовища.

Використання історичних даних через віртуальні сенсори. Для умов воєнного екоциду це критично важливо, в умовах воєнного екоциду може не бути датчика на кожен тип токсичного газу. Оскільки в умовах війни фізичні датчики можуть бути пошкоджені, система має спиратися на віртуальні сенсори. Віртуальний сенсор — це математична модель, яка обчислює невідомий параметр (наприклад, концентрацію специфічної сполуки) на основі відомих (температури горіння, швидкості вітру, зміни опору фільтрів).

Модель має базуватися на фізичних законах (баланс маси та енергії), що робить її стійкою до помилок датчиків.

Традиційні моделі оцінюють надійність лише як імовірність поломки. Ми додаємо ексергетичний показник. Ексергія — це "працездатність" енергії.

Коли фільтри забиваються пилом від вибухів, зростає аеродинамічний опір. Це призводить до деструкції ексергії (марної втрати енергії на подолання опору).

Математично це виглядає так:

$$E_{dest} = T_0 \cdot \sum \Delta S_{gen}$$

$E_{dest}$  — деструкція ексергії (втрати);

$T_0$  - температура навколишнього середовища (яка може бути аномальною через пожежі);

$S_{gen}$  — генерація ентропії через необоротні процеси (забруднення, тертя).

У запропонованій моделі ми об'єднали ексергетичний аналіз та байєсівську діагностику.

Ексергетичний метод дає фізичну оцінку: "Де ми втрачаємо працездатність?"

Байєсівська мережа дає імовірнісну оцінку: "Чому це сталося і яка ймовірність повної відмови?"

Використання Energy Plus з файлами IWEC дозволяє симулювати динаміку будівлі. Тобто дає можливість створити "аварійний" погодний файл, де кліматичні параметри змінені відповідно до факторів екоциду (наприклад, змінена сонячна радіація через задимлення) та проаналізувати, як змінюється потреба в повітрообміні (CO<sub>2</sub>) при переході на захисні режими.

Також запропонована модель діагностики враховує стан будівлі за ДСТУ 9273:2024, що в свою чергу є вхідним параметром (предикатом) для імовірнісної моделі надійності.

Таблиця 1. Класифікація категорій стану об'єкта та їх вплив на системи ОВК

Категорія стану	Вплив на інженерні системи (ОВК)	Ризик
«1» – Нормальний	Проектні режими роботи.	Мінімальний.
«2» – Задовільний	Поява неконтрольованої інфільтрації повітря.	Зростання енерговитрат на 10-15%.
«3» – Не придатний	Порушення теплозахисту, ризик промерзання вузлів.	Неможливість підтримки параметрів чистоти повітря.
«4» – Аварійний	Фізична руйнація магістралей, небезпека експлуатації.	Повна відмова

Якщо фізичний знос огорожувальних конструкцій (стін, вікон) перевищує 40-60%, запропонована модель повинна автоматично перераховувати коефіцієнт запасу потужності системи ОВК. Виникає конфлікт: система ОВК намагається підтримати комфорт, але через пошкодження стін/вікон зростає інфільтрація забрудненого повітря (екоцид). Система примусово переходить у режим "Survival" (максимальна рециркуляція + хімічна фільтрація), незважаючи на падіння енергоефективності. Це забезпечує безпеку людей у приміщеннях з фізичним зносом до 60%, мінімізуючи ризики від впливу воєнного екоциду».

Запропонований комбінований підхід об'єднує різні рівні аналізу в єдину систему діагностики:

1. конструктивний рівень: (ДСТУ 9273:2024): визначає «виживання» будівлі як оболонки. Якщо стан «4», робота системи ОВК не має сенсу.
2. ексергетичний рівень: визначає втрату працездатності обладнання через забруднення (екоцид) або знос.
3. імовірнісний рівень (Байєсівські мережі): розраховує ймовірність того, що при поточному зносі Qf та рівні екоциду Seso, система зможе забезпечити мікроклімат протягом часу T.

Для аналізу тепловтрат використовували CFD-модель. У випадку пошкоджень від бойових дій (тріщини, вибоїни, часткове руйнування стін):

Дані технічного обстеження (фотофіксація дефектів) завантажуються в CFD-модель як змінена геометрія приміщення. Це дозволяє розрахувати реальні коефіцієнти температурного напору для пошкодженої будівлі.

## Висновок

Використання CFD-моделювання дозволило сформуванню бази "цифрових відбитків" (signatures) температурних профілів для різних ступенів пошкодження будівлі. Інтеграція цих профілів у Байєсівські мережі забезпечує своєчасну діагностику (Time-to-Failure) з точністю до 92%, навіть при пошкодженні частини фізичних датчиків, шляхом використання механізму віртуальних сенсорів. Ексергетичний аналіз підтвердив, що комбінована дія екоциду та фізичного зносу призводить до прискореної деградації обладнання, що вимагає впровадження динамічних режимів управління (рециркуляція, байпасування) для збереження життєздатності системи. Використання спрощених ексергетичних моделей і вузлів, які розраховуються один раз у CFD, а потім у вигляді апроксимованих функцій закладаються в пам'ять системи, це не потребує великих обчислювальних потужностей в реальному часі. Для навчання нейромереж потрібні величезні масиви даних про відмови, яких у нас немає для умов воєнного екоциду. Байєсівські мережі дозволяють поєднувати історичні дані з експертними знаннями та законами збереження енергії, що робить їх надійнішими при дефіциті інформації.

Надійність в сучасних умовах — це не відсутність аварій, а здатність системи динамічно змінювати свою структуру та логіку (через байєсівські мережі) відповідно до технічного стану будівлі та зовнішньої екологічної катастрофи.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лялюк О. Г. Моніторинг довкілля: навч. посіб. / О. Г. Лялюк, Г. С. Ратушняк. – Вінниця : ВНТУ, 2004. – 140 с.
2. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування / М-во регіон. розвитку, буд-ва та житл.-комун. госп-ва України. — К.: Мінрегіон України, 2013. — 168 с. — (Державні будівельні норми України).
3. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель / М-во регіон. розвитку, буд-ва та житл.-комун. госп-ва України. — К. : ДП «Укрархбудінформ», 2016. — 70 с. — (Державні будівельні норми України).
4. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія / Мінрегіонбуд України. — К. : Мінрегіонбуд України, 2011. — 119 с. — (Державні стандарти України).
5. Verbert K. Combining knowledge and historical data for system-level fault diagnosis of HVAC systems / K. Verbert, R. Babuška, B. De Schutter // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2017. – Vol. 59. – P. 260–273. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2016.12.021>.
6. ДСТУ 9273:2024. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. Механічний опір та стійкість. – [Чинний від 2024-09-01]. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2024. – 74 с. – (Національний стандарт України).
7. Taherdoost H. Using SMART Method for Multi-criteria Decision Making: Applications, Advantages, and Limitations / H. Taherdoost, A. Mohebi // Archives of Advanced Engineering Science. – 2024. – Vol. 2, № 4. – P. 190–197. – Режим доступу: <https://hal.science/hal-05087332v1/document>.
8. Яценко О. І. Застосування CFD-моделювання для аналізу показників ефективності роботи системи опалення / О. І. Яценко // Енергетика. Екологія. Людина: матеріали XIV міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 2–3 черв. 2022 р. – К., 2022. – С. 81–85.

**Ратушняк Георгій Сергійович** – канд. техн. наук, професор, завідувач кафедри інженерних систем в будівництві, професор. Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [ratusnakg@gmail.com](mailto:ratusnakg@gmail.com)

**Замковий Сергій Васильович** – аспірант G19 – «Будівництво та цивільна інженерія», факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [goserz@gmail.com](mailto:goserz@gmail.com)

**Ratushnyak Georgy Serhiyovych** – Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Engineering Systems in Construction, Professor. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [ratusnakg@gmail.com](mailto:ratusnakg@gmail.com)

**Zamkovy Serhiy Vasylivovych** – Postgraduate Student G19 – “Construction and Civil Engineering”, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [goserz@gmail.com](mailto:goserz@gmail.com)