УДК 628.8:519.87

Г.С. Ратушняк
С.В. Замковий

МЕТОДИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ ДЛЯ СТВОРЕННЯ МІКРОКЛІМАТУ ПРИМІЩЕНЬ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуто проблему математичного моделювання надійності систем для створення мікроклімату приміщень з урахуванням факторів, що впливають на ці процеси, в умовах та під впливом воєнного екоциду. Підкреслено що метод повинен враховувати різноманітні параметри для використання математичної моделі надійності систем ОВК в синтезі автоматичних та інтелектуальних систем керування, обладнання, призначення будівлі, взаємозалежності компонентів системи і впливу воєнного екоциду. Математична модель повинна передбачати можливість зміни властивостей та параметрів обладнання особливо під дією факторів впливу воєнного екоциду таких як механічне навантаження, перебої з енергопостачанням або його відсутність тривалий час, неможливість вчасного та якісного обслуговування.

Існуючі методи математичного моделювання надійності інженерних систем мають такі недоліки як недостатня універсальність, складність та недостатня точність. Акцентована увага на використанні гібридних математичних моделей які мають бути універсальними, та простими у використанні для інтелектуальної підтримки управлінських рішень.

Ключові слова*: воєнний екоцид, інженерні системи, математичне моделювання, надійність, ОВК*

Abstract

The problem of mathematical modeling of the reliability of indoor microclimate systems is considered, taking into account the factors influencing these processes under the conditions and impact of military ecocide. It is emphasized that the method must account for various parameters to apply the mathematical model of HVAC system reliability in the synthesis of automatic and intelligent control systems, equipment, building purpose, interdependence of system components, and the impact of military ecocide. The mathematical model must provide for the possibility of changes in equipment properties and parameters, particularly under the influence of military ecocide factors such as mechanical loads, power supply disruptions or prolonged power outages, and the impossibility of timely and high-quality maintenance. Existing methods of mathematical reliability modeling of engineering systems have drawbacks such as insufficient universality, complexity, and inadequate accuracy. Emphasis is placed on the use of hybrid mathematical models, which must be universal and easy to use for intelligent decision-making support.

Keywords*: military ecocide, engineering systems, mathematical modeling, reliability, HVAC.*

Вступ

Від належного функціонування інженерних систем для створення мікроклімату приміщень залежить не тільки ефективність енергозбереження, якість повітря але і безпека людей та персоналу особливо в умовах воєнного екоциду [1]. Моделювання надійності інженерних систем для створення мікроклімату приміщень є важливими науково-практичним завданням, що передбачає необхідність розробки точних та надійних математичних моделей, які можуть бути використанні при проєктуванні, діагностиці та експлуатації інженерних систем. Це особливо важливо в контексті постійно змінюючихся умов проєктування, виробництва компонентів систем ОВК та зміни вимог до надійності систем ОВК, систем керування та їх енергоефективності.

Зважаючи на велику кількість факторів, які впливають на надійність інженерних систем для створення мікроклімату приміщень, та на різноманіття методів математичного моделювання, необхідно розробити універсальну та відносно гнучку модель, яка б могла швидко адаптуватися до різних початкових умов, умов що виникають в процесі експлуатації та під дією воєнного екоциду [2].

В умовах воєнного стану та екоциду надійність інженерних системи визначається її здатністю переходити між станами без повної втрати функціональності. Метою дослідження є обгрунтування методів математичного моделювання для аналізу чинників, що впливають на надійність систем ОВК та сприяють підвищенню ефективності прийняття управлінського рішення у процесі оцінювання та прогнозування технічного стану інженерних систем створення мікроклімату.

Результати досліджень

Системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (ОВК) відповідають за значну частину споживання енергії та є життєво важливими системами в умовах воєнного екоциду. Несправність або деградація компонентів системи ОВК призводить до зниження не тільки комфорту та приблизно 15 - 30% втрат енергії, до зменшення здатності підтримувати необхідні параметри для функціонування житлових будівель лікарні або укриття [3]. Надійність - властивість збереження структури інженерних системи, незважаючи на втрату окремих її елементів, їх заміни або дублювання [4]. Енергетична надійність характеризується здатністю системи підтримувати задані параметри енергоефективності особливо в умовах воєнного екоциду.

Математичне моделювання дозволяє дослідити процеси явищ в інженерних системах, що мають різний фізичний зміст, але описуваних однаковими математичними співвідношеннями. Для моделювання надійності систем ОВК застосовують стохастичне моделювання, яке дозволяє створювати математичні моделі, що враховують випадковість, невизначеність та ймовірнісні процеси.

На відміну від інших інженерних систем моделювання надійності ОВК включає поняття «часткової відмови». Наприклад, якщо в чилері зламався один із чотирьох компресорів, система не зупиняється повністю, а втрачає 25% потужності. Математично це моделюється через багатостайні системи надійності (Multi-state systems).

Математичне моделювання інженерних систем для створення мікроклімату приміщень є складним завданням під час воєнного екоциду з таких причин:

- недостатня універсальність (багато моделей розроблені для особливостей специфіки технологічних процесів і не можуть бути адаптовані до інших);
- складність (деякі моделі занадто складні для практичного використання в автоматизованих і інтелектуальних системах керування);
- недостатня точність (деякі моделі не дають достатньо точної відповідності експериментальним даним[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 [6]. Кожен з режимів роботи може вимагати різної діагностичної моделі. Одним із найскладніших завдань щодо систем ОВК є моделювання технологічного обладнання (установок) через їхню складну природу, так як енергія, яку споживає система ОВК, становить близько 30-50% від загального енергоспоживання будівлі та від 10% до 20% від загального споживання енергії у розвинених країнах [7].

З розвитком цифровізації (Industry 4.0) підходи до моделювання надійності трансформуються за такими трендами:

- цифрові двійники (Digital Twins) (поєднання математичної моделі з реальними даними від сенсорів SCADA або BMS-систем будівель через протоколи автоматизації, що дозволяє прогнозувати відмову конкретного елемента інженерної системи в реальному часі (Predictive Maintenance);
- інтеграція з Building Information Modeling (BIM)(математичні розрахунки безвідмовності інтегруються безпосередньо в 3D - моделі будівель для оцінки надійності об’єкту життєвого циклу (LCC - Life Cycle Costing) ще на етапі проєктування[8]);
- енергетична надійність (поєднання розрахунку безвідмовності з енергоефективністю (сучасні дослідження інтегрують моделі надійності безпосередньо у динамічні симулятори будівель (наприклад, EnergyPlus) для оцінки ризиків недотримання мікроклімату за стандартами EN ISO 52016-1);
- прогностичне обслуговування (Predictive Maintenanc e) (використання методів машинного навчання (Machine Learning) та нейромереж для прогнозування залишку корисного ресурсу (RUL - Remaining Useful Life) елементів ОВК на основі аналізу параметрів вібрації, струму та температурних трендів тощо);
- використання алгоритмів ройового інтелекту та пошуку за зразком (алгоритм Хука-Дживса, H-J алгоритм) [9].

Під час моделювання з використанням деградаційних моделей на противагу абстрактної статистики використовуються закони фізики, термодинаміки та механіки. Наприклад, для систем ОВК актуальними є:

- моделі зносу підшипників вентиляторів (за формулами втомного руйнування).
- моделі корозії теплообмінних поверхонь.
- моделі витоку холодоагенту.

Баєсівський підхід (Bayesian Network / Bayesian Inference) у моделюванні надійності систем ОВК наразі є одним із найперспективніших методів. Його головна перевага - можливість оцінювати надійність в умовах дефіциту статистичних даних або невизначеності(вплив воєнного екоциду), поєднуючи експертні знання з реальними даними експлуатації. На відміну від класичної (частотної) статистики, де надійність вважається фіксованою величиною, Баєсівський підхід розглядає показники надійності як випадкові величини з власним розподілом імовірностей.

Сучасні тренди математичного моделювання надійності інженерних систем для створення мікроклімату приміщень наступні: дослідження зміщуються від статичного розрахунку надійності до створення динамічних моделей, які працюють паралельно з будівлею та сигналізують про деградацію обладнання в реальному часі; врахування впливу надійності ОВК на енергоефективність, оскільки системи ОВК споживають до 40% енергії будівель [9]; врахування невизначеності параметрів клімату, воєнного екоциду методом стохастичного моделювання щоб перевірити чи впорається система ОВК із піковими навантаженнями (аномальна спека/холод, блекаути) без критичних відмов.

Висновок

Сучасні математичні моделі з оцінювання надійності інженерних систем зміщуються в бік гібридних динамічних моделей, які поєднують обидва підходи, а саме аналітичний та емпіричний, дозволяючи отримати баланс між точністю та обчислювальною складністю. Це робить їх найбільш перспективними для моделювання складних інженерних систем особливо з розвитком сучасних технологій, штучного інтелекту та використанням ройового інтелекту для інтелектуальної підтримки прийняття рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ратушняк Г. С., Панкевич О. Д., Панкевич В. В. Вибір віконних конструкцій житлових будівель з урахуванням безпекової ситуації : монографія [цифр. копія]. Вінниця : ВНТУ, 2026. 142 с. DOI: https://doi.org/10.31649/617.8163.94.5.
2. Ратушняк Г. С., Ободянська О. І. Управління змістом проєктів із забезпечення надійності зовнішніх газорозподільних мереж: монографія. Вінниця : ВНТУ, 2014. 128 с.
3. Fault detection and diagnostics for HVAC systems using heat meter data, statistical features, and data mining / S. Vasman, I. Sukhanov, M. Thalfeldt, E. Petlenkov. *Energy and Buildings*. 2026. Vol. 360. Art. 117343. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2026.117343.
4. Обод І. І., Заволодько Г. Е., Свид І. В. Математичне моделювання систем : навч. посіб. / за ред. І. І. Обода. Харків : НТУ «ХПІ», 2019. 267 с.
5. Гутовський Д. В., Жученко О. А. Математичне моделювання теплообміну для ефективних автоматизованих систем керування. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*. 2024. № 2 (23). УДК 519.6.
6. Джеджула В. В. Інтелектуальна система енергоефективного керування мікрокліматом операційних блоків закладів охорони здоров'я в умовах обмеженого енергозабезпечення. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2026. № 1. С. 179–184. DOI: https://doi.org/10.31649/2311-1429-2026-1-179-184.
7. Dawood S. M., Hatami A., Homod R. Z. HVAC system modeling and control methods: a review and case study. *Journal of Energy Management and Technology*. 2022. Vol. 6, No. 1. P. 1–12. DOI: https://doi.org/10.22109/jemt.2022.298902.1324.
8. Нелюба Д. М., Гонтар М. М. Розроблення математичної моделі системи опалення, вентиляції та кондиціювання повітря як об'єкта керування. *Математичні моделі та методи*. Полтава : ПолтНТУ ім. Ю. Кондратюка. УДК 514.853.
9. Modeling and optimization of a passive building HVAC system based on improved PSO and H-J Algorithm / J. Li, M. Wang, P. Fang et al. *Energy Reports*. 2024. Vol. 11. P. 2378–2389. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.02.011.

Ратушняк Георгій Сергійович – професор, завідувач кафедри інженерних систем у будівництві, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: ratusnakg@gmail.com ORCID 0000-0001-9656-5150

Замковий Сергій – аспірант, кафедра інженерних систем у будівництві, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: gosergz@gmail.com ORCID: 0009-0005-9727-0844

Heorhii Serhiiovych Ratushniak – Professor, Head of the Department of Engineering Systems in Construction, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: ratusnakg@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9656-5150

Serhii Zamkovyi – PhD Student, Department of Engineering Systems in Construction, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: gosergz@gmail.com, ORCID: 0009-0005-9727-0844