

## Огляд інформаційних технологій управління енергоспоживанням систем розумного будинку

**Анотація.** У цій роботі проводиться огляд сучасних підходів і технологій у сфері управління системами опалення, вентиляції та кондиціювання повітря (HVAC - Heating, ventilation, and air conditioning). Огляд охоплює ключові концепції, такі як прогнозування теплового комфорту, машинне навчання системи, моделювання поведінки людей, їх вплив на розвиток галузі. Основна увага приділяється машинному навчанню системи, особливо в концепції прогнозування теплового режиму приміщень, що сприяє подальшому розвитку систем HVAC. Крім того, розглядаються майбутні перспективи та можливі виклики в реалізації цих технологій.

**Ключові слова** - HVAC, прогнозування теплового комфорту, машинне навчання, моделювання поведінки.

**Вступ та постановка проблеми.** В останні роки ефективне управління споживанням енергії в системах розумного будинку стало актуальною проблемою, особливо в сценаріях, коли доступ до первинних джерел енергії обмежений або перерваний. Оскільки розумні будинки все більше покладаються на інтегровані системи опалення, вентиляції та кондиціювання повітря, ці системи стали основними споживачами енергії в домогосподарствах. Отже, оптимізація їх роботи має вирішальне значення для підтримки комфорту та функціональності, особливо в умовах обмеженого енергопостачання.

Основні джерела енергії для більшості міських помешкань, а саме електроенергія та газ, що постачаються муніципальними мережами, не завжди є надійними, часто зазнають перебоїв через надзвичайні ситуації, аварії, пошкодження інфраструктури або планові відключення електроенергії. У такі часи розумні будинки повинні переходити на альтернативні джерела живлення, такі як резервні генератори або сонячні електростанції, щоб підтримувати основні системи життєзабезпечення. Однак ці альтернативні джерела часто забезпечують обмежену енергію, що вимагає ретельного встановлення пріоритетів і регулювання споживання енергії в домогосподарстві.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У системах HVAC постійно спостерігається активний розвиток, який відображається у ряді нових наукових праць. Одним із ключових напрямків є використання машинного навчання (ML) [3,4,5,6,9,10,11,12,13,14,15], яке показало значний прогрес у підвищенні теплового комфорту приміщень [6,9,10,11] та енергозбереженні [3,4,7,8,11,12,13,14,15].

Так у дослідженні [5], розглядається розробка цифрового двійника HVAC системи для розумних будинків, що використовують машинне навчання (ML) та інноваційні моделі управління електричними мережами. Метою дослідження є інтеграція сонячних фотоелектричних систем (PV) і контролерів СТА-2045 у розумні домашні системи HVAC для оптимізації споживання електроенергії. Цифровий двійник моделює роботу HVAC системи в реальному часі, дозволяючи передбачати й оптимізувати використання енергії, забезпечуючи ефективну інтеграцію з відновлюваними джерелами енергії, такими як сонячна енергія.

Стаття підкреслює важливість використання мета-моделі машинного навчання (ML) для ефективного управління енергоспоживанням в розподільчих системах електропостачання, особливо в умовах розумного будинку з альтернативними джерелами енергії та інтеграцією із загальними електромережами.

Інше дослідження [7], розглядає використання методів підкріплювального навчання для моделювання поведінки мешканців будівель. Дослідження фокусується на тому, як моделі поведінки мешканців можуть бути адаптовані для використання в різних системах управління HVAC через методи transfer learning (переносу знань).

Автори пропонують модель, яка навчається за допомогою підкріплювального навчання для розуміння та прогнозування поведінки мешканців у будівлях, зокрема їх впливу на споживання енергії та управління мікрокліматом приміщень. Головна ідея статті полягає в тому, що моделі, навчені на даних одного будинку, можуть бути перенесені та адаптовані до інших будинків з різними системами HVAC, що дозволить значно знизити енергоспоживання та підвищити ефективність управління будівлями.

Таким чином, дослідження демонструє підхід до крос-будинкового переносу навчання для підвищення ефективності роботи HVAC систем шляхом моделювання поведінки мешканців.

У статті [13] опублікованій у 2021 році, досліджується використання методів машинного навчання (ML) для оптимізації енергоспоживання систем HVAC на основі виявлення присутності людей у приміщеннях.

Основна ідея статті полягає в тому, що точне визначення присутності або відсутності людей у приміщеннях може суттєво зменшити енергоспоживання систем опалення, вентиляції та кондиціювання повітря. Автори пропонують застосування класифікаторів машинного навчання (ML) для визначення окупованості приміщень на основі різних сенсорних даних (наприклад, рух, температура, звуки).

У дослідженні використовуються різні алгоритми машинного навчання (ML), такі як Support Vector Machines (SVM), Random Forests та інші, щоб класифікувати наявність людей з високою точністю. Системи HVAC можуть бути автоматично адаптовані до цих даних, що дозволяє знижувати енергоспоживання, коли приміщення не використовується, або підлаштовувати умови до присутності людей.

У результаті, стаття демонструє, як машинне навчання (ML) може бути ефективно використане для оптимізації роботи HVAC систем через виявлення окупованості приміщень, що призводить до значного зниження витрат енергії та підвищення енергоефективності будівель.

Окрім машинного навчання (ML), велике значення для проведення досліджень має моделювання систем HVAC для діагностики несправностей [2]. Автори представляють методи та підходи до створення моделей HVAC систем, які допомагають виявляти та діагностувати потенційні несправності в їх роботі. Метою є підвищення надійності та ефективності таких систем через застосування інструментів діагностики, що дозволяють вчасно виявляти проблеми та оптимізувати роботу HVAC-систем у реальних умовах.

У статті вітчизняних науковців [1], аналізуються умови мікроклімату та безпека експлуатації систем теплопостачання під час аварійних відключень. Основна увага приділяється визначенню критичних умов, за яких комфорт мікроклімату може погіршитися до небезпечних рівнів, що може вплинути на здоров'я людей та безпечну експлуатацію приміщень. Авторами досліджуються можливі ризики та наслідки таких аварій, а також розглядаються варіанти мінімізації цих ризиків для забезпечення безпеки та ефективної роботи систем опалення під час непередбачених ситуацій.

**Висновки.** У цій тезі було розглянуто сучасні підходи та дослідження в системах HVAC. Проведений аналіз показав, що основні тенденції в цій сфері спрямовані на підвищення комфорту та енергозбереження. Застосування машинного навчання (ML) демонструє значний потенціал для подальшого розвитку, особливо у прогнозуванні стану мікроклімату приміщень при аварійному режимі роботи систем HVAC.

Проте існує низка викликів, які потребують подальших досліджень та вдосконалення, таких як визначення пріоритезації систем HVAC, побудова сцен аварійних режимів, алгоритм вибору джерела первинного теплопостачання. Майбутні дослідження повинні бути

зосереджені саме на вище згаданих проблемах, щоб забезпечити ефективне вирішення цих проблем та вдосконалення існуючих рішень.

#### **Використані джерела.**

1. *Беліков А.С., Железняков Є.О. Визначення критичних умов мікроклімату та безпеки експлуатації систем теплопостачання при аварійних відключеннях теплопостачання. Системи управління, навігації та зв'язку. 2023. № 4. DOI:10.26906/SUNZ.2023.4.147*
2. *Aibing Q., Ze Y., Qiangwei D., Jianlan L., Liangliang S., Jingsong W. Modeling of HVAC Systems for Fault Diagnosis. 2020. DOI:10.1109/ACCESS.2020.3015526*
3. *Boutahri Y., Tilioua A. Machine learning-based predictive model for thermal comfort and energy optimization in smart buildings. Results in Engineering. 2024. 22 p. 102148. DOI:10.1016/j.rineng.2024.102148.*
4. *Mistry V. Smart Thermostats: Revolutionizing HVAC Control in Building Automation. International Journal of Science and Research (IJSR). 2022. 11. DOI:10.21275/SR24203203502.*
5. *Alden R., Jones E., Poore S., Ionel D. Smart Home HVAC Digital Twin ML Meta-model for Electric Power Distribution Systems with Solar PV and CTA-2045 Controls. IEEE Transactions on Industry Applications. 2024. PP. 1-12. DOI:10.1109/TIA.2024.3458941.*
6. *Bai Y., Liu K., Wang Y. Comparative analysis of thermal preference prediction performance in different conditions using ensemble learning models based on ASHRAE Comfort Database II. Build. Environ. 2022. № 223. 109462, DOI:10.1016/j.buildenv.2022.109462.*
7. *Deng Z., Chen Q. Reinforcement learning of occupant behavior model for crossbuilding transfer learning to various HVAC control systems. Energy Build. 2021. № 238. 110860. DOI:10.1016/j.enbuild.2021.110860.*
8. *Vakiloroaya V., Samali B., Fakhar A., Pishghadam K. A review of different strategies for HVAC energy saving. Energy Convers. Manag. 2014. № 77. PP. 738–754. DOI:10.1016/j.enconman.2013.10.023.*
9. *Zhang W., Wen Y., Tseng K.J. Demystifying thermal comfort in smart buildings: an interpretable machine learning approach. IEEE Internet Things J. 2021. № 8 (10). PP. 8021–8031. DOI:10.1109/JIOT.2020.3042783.*
10. *Chaudhuri T., Soh Y.C., Hua L., Li H., Xie L. Machine learning driven personal comfort prediction by wearable sensing of pulse rate and skin temperature. Build. Environ. 2020. № 170. 106615. DOI:10.1016/j.buildenv.2019.106615.*
11. *Cosma A.C., Simha R. Machine learning method for real-time non-invasive prediction of individual thermal preference in transient conditions. Build. Environ. 2019. № 148. PP. 372–383. DOI:10.1016/j.buildenv.2018.11.017.*
12. *Nabavi A., Saluz U., Wolf M., Geyer P. HVAC System Performance Modeling Using Component-Based Machine Learning. 2024. DOI:10.26868/25222708.2023.1531.*
13. *Sharma V., Singh A. Optimizing HVAC Energy Consumption through Occupancy Detection with Machine Learning based Classifiers. 2021. DOI:10.13140/RG.2.2.19927.48808.*
14. *Faiz M., Sajid M., Sial S., Javed K., Ayaz Y. Energy modeling and predictive control of environmental quality for building energy management using machine learning. 2023. № 74. PP. 381-395. DOI:10.1016/j.esd.2023.04.017.*
15. *Ogundiran J., Asadi E., Gameiro da Silva M. A Systematic Review on the Use of AI for Energy Efficiency and Indoor Environmental Quality in Buildings. Sustainability. 2024. № 16. 3627 p. DOI:10.3390/su16093627.*