

Енергоефективність і внутрішній мікроклімат будівель: динамічне моделювання для комплексної оптимізації

Артем Штирхун, студент¹ (ORCID: 0009-0008-8628-9111)

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

АНОТАЦІЯ

У роботі проведено аналіз впливу систем енергопостачання на мікроклімат у будівлях та їх енергоефективність. Основна увага приділяється динамічному моделюванню роботи газових котлів і теплових насосів для житлових будівель у кліматичних умовах України. Визначено, що використання теплового насоса забезпечує гнучкіший режим регулювання навантаження та краще підтримує стабільність температури внутрішнього повітря, уникаючи перегріву приміщень. Запропоновані підходи дають змогу проектувальникам і інженерам оптимізувати системи опалення для підвищення енергоефективності та комфортності середовища.

Ключові слова: енергоефективність, будівля, тепла динаміка, газовий котел, тепловий насос, мікроклімат.

1. ВСТУП

Сектор будівель споживає близько 35% енергії у світі та 40% у ЄС і США, що супроводжується значними викидами CO₂, частка яких зростатиме. Енергоефективність будівель залежить від теплоізоляції, роботи інженерних систем та кліматичних умов, а для її оцінки застосовують математичне моделювання й програмні комплекси. Імітаційні моделі, зокрема енергетичне моделювання будівель (BEM), дозволяють прогнозувати споживання енергії та оцінювати ефективність реконструкцій. У дослідженні створено методологію та енергодинамічну модель будівлі на базі MATLAB/Simulink для аналізу роботи систем енергопостачання. Модель враховує інерційність, адаптивність до умов експлуатації та відмінності температур у приміщеннях. Це забезпечує більш реалістичне відтворення роботи існуючих будівель порівняно з традиційними інструментами. Практичне значення полягає в наданні інженерам інструменту для підвищення ефективності енергосистем і комфорту користувачів [1].

2. МЕТА РОТОБИ

Розробити динамічні моделі систем енергопостачання будівель для дослідження впливу різних джерел тепла на енергоефективність та внутрішній мікроклімат, а також сформулювати практичні рекомендації для підвищення ефективності роботи інженерних систем.

3. ОСТОВНА ЧАСТИНА

3.1. Проблематика енергоефективності в будівлях

Сфера будівництва визнана найбільшим споживачем енергетичних ресурсів у світі, і на її частку припадає до 35% загального споживання енергії. У розвинених країнах, зокрема в ЄС і США, ця величина сягає 40%, а частка викидів CO₂ становить близько 36%. Прогнозні сценарії, сформовані Міжнародним енергетичним агентством, свідчать, що до 2050 року енергоспоживання в будівлях зросте майже на 50% у порівнянні з 2013 роком. Це створює серйозний виклик у контексті глобальних кліматичних змін

і потребує пошуку шляхів скорочення викидів та переходу до енергетично ощадних технологій.

Особливу складність становить те, що покращення комфортних умов проживання часто досягається за рахунок збільшення витрат енергії. Використання більшої кількості будівельних матеріалів для утеплення чи підвищення теплоізоляційних властивостей не завжди гарантує скорочення викидів протягом життєвого циклу будівлі. Це пов'язано з тим, що процеси виробництва матеріалів і конструкцій також вимагають енергії та супроводжуються додатковими викидами [2].

Ще однією проблемою є те, що більшість традиційних методів аналізу роботи будівельних систем базуються на квазістаціонарних розрахунках, де враховуються середні умови, але ігнорується динаміка. У реальних умовах експлуатації температура в приміщеннях коливається залежно від клімату, сонячної активності, теплової інерції огорожувальних конструкцій та роботи інженерних систем. Це призводить до неузгодженості розрахункових даних із фактичним енергоспоживанням. Таким чином, для досягнення поставлених цілей щодо енергоефективності потрібні нові підходи, що враховують часову змінність теплових процесів і дозволяють більш точно прогнозувати поведінку систем у різних сценаріях експлуатації.

3.2. Методи моделювання та їх відмінності

Дослідження енергоефективності будівель здебільшого базується на математичному моделюванні. У даній роботі створено динамічну модель у середовищі MATLAB/Simscapе, що дозволяє враховувати інерційність будівельних огорожень, коливання зовнішніх кліматичних параметрів та зміну теплових потоків у часі.

Порівняння з EnergyPlus показало, що динамічна модель є більш реалістичною для існуючих будівель, адже вона враховує нерівномірність температур між приміщеннями, теплову інерцію обладнання та можливі дисбаланси в системі. EnergyPlus орієнтований здебільшого на проектування, тоді як MATLAB/Simscapе дає змогу моделювати фактичні умови експлуатації [3].

3.3. Об'єкт моделювання

Об'єктом дослідження стала двокімнатна квартира економкласу в сучасному житловому будинку в Україні. Загальна площа приміщення становила 49,44 м², висота стелі – 2,7 м. Зовнішні стіни виконані з керамічної цегли

товщиною 40 см з додатковим утепленням мінеральною ватою 5 см. Вікна – двокамерні енергозберігаючі склопакети з аргоном. Орієнтація вікон – на схід і захід, що забезпечує значні сонячні теплові надходження у перехідні періоди. Для вентиляції застосовано природний повітрообмін із кратністю 0,6 год⁻¹. Кліматичні дані взяті з міжнародних погодних баз (IWEC). Таким чином, модель будівлі була максимально наближена до типових умов сучасного житла, що робить результати придатними для практичного застосування у проектуванні та модернізації систем опалення [1, 2].

3.4. Досліджувані джерела теплопостачання

Було змодельовано роботу двох варіантів індивідуального теплопостачання:

- Газового котла – найбільш поширеного джерела тепла в Україні, що відзначається простотою керування та відносною дешевизною палива, але має меншу гнучкість у зміні навантаження.
- Теплового насоса «повітря–вода» – сучасної системи, яка забезпечує вищий коефіцієнт корисної дії, особливо у міжсезоння, та здатна ефективно регулювати навантаження.

Результати показали, що тепловий насос може знизити миттєву потужність системи до 40% у порівнянні з газовим котлом. При цьому частота його вмикань приблизно у 4 рази більша, що може впливати на знос обладнання, але позитивно відображається на стабільності температури. Постає питання короткострокового акумулювання тепла для забезпечення рівномірної роботи теплового насосу.

3.5. Особливості температурного режиму

У моделі досліджувалась робота системи опалення із встановленням датчиків температури у різних кімнатах. Виявлено, що положення датчика суттєво впливає на показники: відхилення між кімнатами може становити $\pm 3\%$. Для невеликих квартир це означає, що температура у спальнях чи вітальні може відрізнятись від контрольованої на 0,2–0,4 °С. Подібне явище характерне для систем із простими ON/OFF контролерами, які поширені в Україні.

Аналіз також показав, що у перехідні періоди (жовтень, квітень) температура в приміщеннях може перевищувати встановлене значення через сонячні теплові надходження. У цей час повітря прогрівалось до 23 °С, що змушувало систему опалення вимикатись. У зимовий період коливання були меншими, і середня різниця складала близько 0,2 °С.

3.6. Порівняння результатів роботи котла та теплового насоса

Річний аналіз показав, що загальне споживання енергії в обох варіантах подібне: від 8 кВт·год/м² у перехідні місяці до 25 кВт·год/м² у січні. Водночас, якість регулювання температури була вищою у теплового насоса. Він забезпечував більш плавні коливання температури і краще реагував на зміну зовнішніх умов, тоді як газовий котел демонстрував більшу інерційність і допускав періоди перегріву. Це особливо відчутно у міжсезоння, коли сонячна радіація суттєво впливає на тепловий баланс.

3.7. Практична цінність дослідження

Запропоноване моделювання має значний практичний потенціал. По-перше, воно дозволяє визначити оптимальні параметри роботи системи опалення з урахуванням реальних кліматичних коливань. По-друге, воно дає змогу

інженерам оцінити роботу обладнання при різних умовах експлуатації та обрати найраціональніший варіант джерела тепла. Для України, де значна частка будівель має автономні системи з газовими котлами, впровадження теплових насосів може забезпечити суттєве зниження пікових навантажень та покращення мікроклімату.

Однак дослідження виявило й обмеження. Найбільша проблема – значні витрати часу на розрахунки: симуляція одного року роботи квартири із тепловим насосом у MATLAB може тривати до 7 діб. Це обмежує використання таких моделей у масовій практиці. Тому актуальним напрямом подальших робіт є оптимізація алгоритмів та використання методів штучного інтелекту для скорочення часу розрахунків без втрати точності.

3.8. Узагальнення результатів

Отримані дані підтвердили, що динамічне моделювання є більш інформативним інструментом, ніж традиційні статичні методики. Воно дозволяє оцінювати не лише річне споживання енергії, а й детально аналізувати поведінку системи в окремі періоди – від різких холодів до весняних відлиг. Такий підхід відкриває можливості для точного прогнозування комфорту мешканців, економії ресурсів і зменшення викидів у довкілля.

4. ВИСНОВКИ

Виконане дослідження показало, що динамічне моделювання є дієвим підходом для оцінки роботи систем енергопостачання будівель. Газові котли та теплові насоси мають близькі річні показники споживання енергії, проте теплові насоси виявились ефективнішими у підтриманні стабільного мікроклімату. Це створює підґрунтя для більш широкого впровадження теплових насосів у житлових будівлях України та формує основу для оптимізації систем опалення з урахуванням сучасних вимог енергоефективності та динамічної зміни тепловтрат та теплонадходжень впродовж доби. Також постає задача розробки схеми теплопостачання на базі теплових насосів з короткостроковим акумулюванням тепла для індивідуального опалення квартир.

Список літератури

- [1] Deshko V., Lu T., Cholewa T. Energy modeling and efficiency of building systems. – Kyiv: Technical Press, 2021. – 412 с.
- [2] Zaporozhets A., Kovalko V., Novoseltsev O. Indoor air quality and energy performance of buildings. – Lublin: EcoEnergy, 2023. – 368 с.
- [3] Han J., Kon O., Bae H. Dynamic control of district heating systems: simulation and applications. – Berlin: Springer, 2024. – 295 с.

Робота виконана під керівництвом канд.техн.наук Анни Москвітіної.