

УДК 697.1

^{1,2}БІЛОУС І. Ю., ¹БУЯК Н. А., ¹БІРЮКОВ Д. В.,
¹ЯЦЕНКО О. І., ¹ШКЛЯР В. І., ¹ДУБРОВСЬКА В. В.

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

² Інститут загальної енергетики НАН України, Київ, Україна

ЕКСЕРГЕТИЧНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В БУДІВЛЯХ

Мета. Дослідження динамічних процесів в будівлях з використанням енергетичних та ексергетичних підходів.

Методика. За допомогою сіткової моделі типової квартири сучасної забудови в програмному середовищі Matlab на основі динамічної енергетичної моделі досліджено вплив роботи системи опалення на акумулювання енергії та ексергії оболонкою будівлі, як складної системи «джерело теплоти – людина – огороження будівлі»

Результати. За результатами імітаційного динамічного моделювань, проведено аналіз температурного розподілу у квартирі в залежності від кількості та локації встановлення датчиків контролю температури в приміщеннях системи опалення (контролер ON/OFF). На основі отриманих даних обґрунтовано встановлення датчиків температури в квартирі, що використовуються для налаштування системи автоматики котла автономної системи опалення. Виконано оцінку потоків ексергії, що акумулюється в різних елементах огорожень для різних точок відліку ексергії.

Наукова новизна. Обґрунтовано вибір точки відліку ексергії для оцінки потоків ексергії, що втрачається та акумулюється в різних елементах огорожень, що дозволяє більш якісно оцінювати коливання ексергії в огороженнях. Також визначено відмінність у споживанні енергії на потреби опалення при різних комбінаціях встановлення датчиків температури в приміщеннях, за якими працює контролер котла автономної системи опалення.

Практична значимість. Наведені результати досліджень доводять доцільність застосування динамічного енергетичного моделювання будівель для оцінки температурного стану зон квартири та теплоакумулюючі властивості огорожень будівлі. Проведені дослідження дають можливість для оптимального налаштування та регулювання роботи системи опалення.

Ключові слова: енергоспоживання; ексергія; внутрішня температура; математичне моделювання будівель.

Вступ. Будівлі є одним із основних споживачів первинних енергоресурсів у світі. Для країн з континентальним та різкоконтинентальним кліматом витрати на потреби опалення складають понад 85% витрат енергоносіїв.

Низький рівень регулювання температури в приміщенні є важливим питанням опалення приміщень для домогосподарств з центральним опаленням Китаю [1]. Стаття [1] присвячена розробці підходів динамічного регулювання температури повітря в приміщеннях. Запропонована авторами система в статті [1] дозволяє забезпечити теплотою групу будівель з однаковим температурним графіком споживання, здійснюючи контроль за допомогою однієї системи управління. Однак, для мешканців багатоквартирних будівель з автономною системою опалення (зазвичай, газовий або електричний котел) налагодження роботи автоматики системи опалення здійснюється без врахування ряду впливових факторів. Оцінка енергозберігаючого потенціалу для початкових шкіл з контролем температур, орієнтованих на відвідувачів, проведена в статті [2] для 96 шкіл різних кліматичних зон: було встановлено, що потенціал енергозбереження варіюється від 10,2 до 12,41% залежно від кліматичної зони у США. Системи енергетичного менеджменту в будівлях (BEMS) постійно привертають увагу як дієва система контролю будівлі [3, 4], яка потребує використання енергетичного моделювання будівель (BEM). Ці системи в даний час працюють з класичними алгоритмами управління, такими як включення-вимкнення, PID-регулювання (Proportional–integral–

derivative controller) та оптимальними процедурами запуску-зупинки. Теплова взаємодія між зонами будівлі та HVAC (Опалення, вентиляція та кондиціонування) призводить до функціонування, яке не можна точно контролювати за допомогою класичних методів управління [5]. Таким чином, вдосконалені системи керування, які можуть обробляти декілька входів і множинних виходів, є кращим підходом для контролю теплового стану будівель та теплового комфорту [6]. Крім цього, в умовах ефективного використання енергетичних ресурсів в напрямку досягненням NZEBs в системах HVAC особливої уваги потребує дослідження систем вентиляції [7, 8].

Еволюція і застосування ексергетичного підходу до будівель в цілому дозволить узгодити якість енергії, що споживається і генерується. Адже для задоволення потреб в опаленні та охолодженні будівель необхідний низький потенціал ексергії, оскільки температура в приміщеннях (близько 20°C) дуже близька до умов навколишнього середовища. Але зазвичай використовуються високоякісні джерела енергії, такі як викопне паливо, для задоволення цих невеликих потреб у ексергії. З економічної точки зору, ексергію слід використовувати переважно в промисловості для виробництва високоякісної продукції [9]. Першими роботами в напрямку exergy efficient design concept та human body exergy model були праці Shukuya [10–12].

Дослідження ексергетичних моделей теплового комфорту, визначення впливу термомодернізації та енергоефективних режимів опалення на показники теплового комфорту [6] відповідно до ексергетичного підходу дозволяють у комплексі розглянути будівлю як систему «джерело теплоти – людина – огороження будівлі» [13]. Ексергетичний та ексергоекономічний аналіз оболонки будівлі демонструє необхідність більш детального вивчення втрат ексергії в складових огорожень та оцінки величини закумульованої ексергії [8]. Питання акумулювання ексергії в огороженнях будівлі та ексергетична оцінка є не достатньо вивченими, особливо, якщо враховувати акумуляцію не тільки у зовнішніх, а й і у внутрішніх елементах.

Аналіз попередніх досліджень. В статті [14] проведено порівняльний аналіз контролерів типу ON/OFF та PID контролерів, які використовуються для контролю систем теплопостачання з точки зору забезпечення умов комфорту та енергоефективності будівель. Дослідження [14] показало, що використання Simulink/Matlab має високий потенціал для аналізу стратегій контролю, та з врахуванням теплових та інших характеристик будівлі. Найчастіше використовуються контролери типу ON/OFF через їх конструктивну простоту, хоча більшу економію коштів при енергозберігаючих режимах роботи та для забезпечення умов комфорту гарантують PID контролери. Результати моделювання [14] показали, що будівлі з високою тепловою масою можуть значно зменшити коливання температури повітря в приміщеннях, що призводить до економії енергоспоживання. Будівлі України відносяться до будівель з високою масивністю.

В статті [15] проведено аналіз енергоспоживання для приміщення з підігрівом підлоги, де місцеві регулятори ON/OFF найчастіше підтримують температуру внутрішнього повітря з поганою точністю. Відомо, що пропорційно-інтегральні (PI) контролери можуть точніше регулювати більшість процесів [15]. Для будинків з майже нульовим рівнем викидів (nZEB) водяні системи опалення мають більшу інерційність, а отже потребують більш точного налаштування. Аналіз проведений в програмному середовищі Matlab показав, що при відхиленні температури повітря на рівні $\pm 0,5$ K від заданого рівня споживання енергії, на опалення витрачається на 9–5% менше енергії при використанні PI контролерів порівняно з контролером ON/OFF.

В роботі [16] було досліджено використання енергії для радіаторних систем опалення та систем теплої підлоги в поєднанні з ON/OFF та PI контролерами за допомогою програмного

пакету IDA ICE. Для оцінки енергетичних показників систем було проведено калібрування моделей радіаторів та контролерів за результатами експериментальних вимірів на випробувальному комплексі nZEB (репрезентативна кімната) поблизу Талліннського технологічного університету на початку 2018 року. Моделювання показало, що для старих будівель PI регулятор, на відміну від ON/OFF, дозволяє заощадити 6 % енергії на опалення, для nZEB – 12% [16].

Потрібно відмітити, що в статті [17] проведено співставлення використання PI/PID контролерів з контролером увімкнення/вимкнення за точністю регулювання, а також за енергоспоживанням для лікарні. Відзначено, що PI/PID контролери перевершують контролер увімкнення/вимкнення, але водночас являються менш надійними. Контролери увімкнення/вимкнення набагато менш чутливі до змін параметрів системи, що призводить до їх більшої надійності [17].

Постановка завдання. Метою даного дослідження є застосування енергетичних та ексергетичних підходів для дослідження динамічних процесів в будівлях. В ході роботи вирішені наступні задачі:

- створення динамічних моделей квартири з поділом на зони в програмному середовищі Matlab;
- верифікація та налаштування моделі на основі порівняльного аналізу з результатами моделювання в EnergyPlus та ДСТУ Б А.2.2-12:2015;
- порівняння результатів моделювання при встановленні датчиків контролю температури повітря, за якими відбувається робота контролера, в різних кімнатах квартири;
- обґрунтування вибору точки відліку ексергії для оцінки потоків ексергії, що втрачаються та акумулюються в різних елементах огорожень.

Об'єкт дослідження. Для дослідження енергетичних характеристик будівлі було створено енергетичну модель типової двокімнатної квартири 5 поверхового будинку сучасної забудови, яка відповідає вимогам 2013 року та знаходиться в м. Києві, на основі програмного продукту Matlab [18]. Загальна площа квартири 49,44 м². Динамічна модель в програмному середовищі Matlab створена з використанням підсистеми інструментів Simulink [18], яка в свою чергу використовує Simscape. За допомогою Simscape можна швидко створювати моделі фізичних систем у середовищі Simulink та моделі фізичних компонентів на основі фізичних зв'язків, які безпосередньо інтегруються з блок-схемами моделювання. Програмне середовище Matlab дозволяє проектувати системи управління з врахуванням фізичних систем в Simulink. На рис. 1 наведена схема квартири та взаємозв'язок кімнат/зон квартири в Simulink.

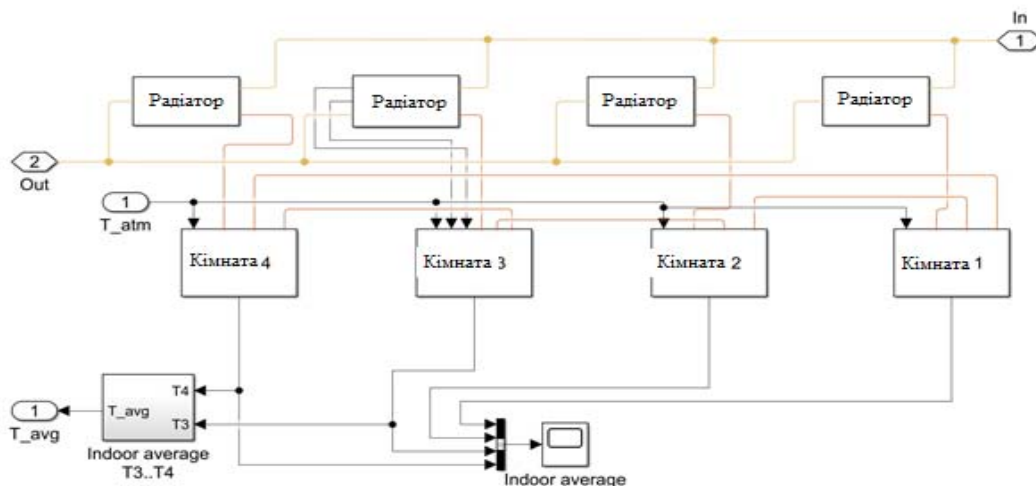


Рис. 1. Теплоенергетична модель квартири

Регулювання системи теплозабезпечення квартири відбувається шляхом ввімкнення/вимкнення автономного газового котла дотримуючись постійної витрати теплоносія, температура подачі теплоносія може досягати 90°C в найбільш холодний період року. ON/OFF контролер не має проміжних станів – повністю увімкнений або повністю вимкнений. Ця схема регулювання є достатньо типовою для автономного опалення багатоквартирних будівель в Україні. Теплова потужність газового котла становить 3,5 кВт, ККД – 79%. Витрата теплоносія в системі опалення становить 0,1 кг/с. Внутрішня температура повітря підтримується на рівні 20°C , діапазон коливань температури повітря в житлових приміщеннях становить $20,1^{\circ}\text{C} \dots 19,5^{\circ}\text{C}$ [8]. Система управління котлом базується на показаннях датчиків контролю температури в приміщенні, які встановлені в двох житлових кімнатах квартири, та використовує якісне регулювання. Для детального аналізу було виділено одну житлову кімнату (room 3 на рис. 2) загальною площею $14,5 \text{ m}^2$, яка має одну зовнішню стіну та вікно (східна орієнтація огорожень), дві стіни – внутрішні міжкімнатні, одна внутрішня міжквартирна та внутрішні міжповерхові перекриття, так як квартира знаходиться на 4 поверсі 5 поверхової будівлі. Сіткова модель цієї кімнати в програмному середовищі Matlab наведена на рис. 2.

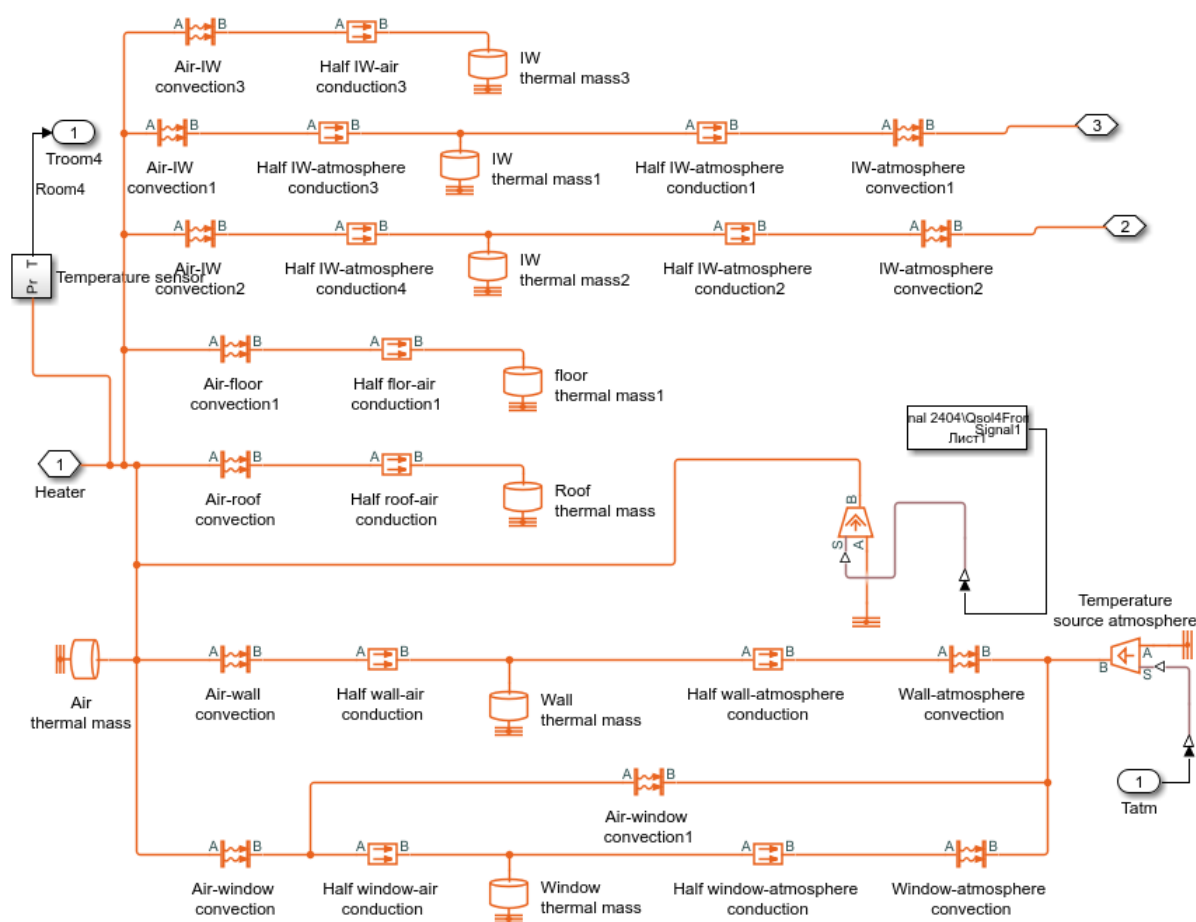


Рис. 2. Сіткова модель кімнати створена в програмному середовищі Matlab

Несуча частина зовнішньої стіни виконана з червоної пустотілої цегли товщиною 0,4 м, утеплена мінеральною ватою – 0,05 м. Внутрішні і зовнішні непрозорі огороження відносяться до масивних огорожень з високими теплоакумуючими властивостями. Вентиляція природна з кратністю повітрообміну $0,6 \text{ год}^{-1}$. У дослідженні використовувалися

погодинні кліматичні дані типового року з міжнародного файлу погоди IWEC [21] для умов міста Києва. Сонячні теплонадходження в погодному файлі IWEC представлені у вигляді global horizontal, diffuse horizontal, direct normal. Для перерахунку сонячних теплонадходжень, які надходять в зону кімнати, використано програмний продукт EnergyPlus [7], який дозволяє враховувати відбиття сонячної радіації від поверхонь огорожень та ґрунту, і оптичні коефіцієнти пропускання сонячної радіації, який становить 0,55 [7]. Погодинні кліматичні дані представлені в статті [8].

Математична модель дозволяє проводити енергетичний аналіз будівлі, визначати споживання енергії, погодинні дані за такими параметрами, як температура повітря в приміщеннях, середня радіаційна температура, температура поверхонь всіх огорожень, розподіл температури в середині огорожень. Модель дозволяє враховувати: перетоки між кімнатами квартири, які виникають внаслідок сонячних теплонадходжень залежно від орієнтації та площі застелення; особливості регулювання котла; теплоакумуючі властивості внутрішніх та зовнішніх огорожень, тощо. На основі енергетичних балансів кімнати при заданих погодинних зовнішніх кліматичних умовах проводиться моделювання функціонування системи, яке підтримує температуру внутрішнього повітря в заданих межах.

Особливістю аналізу є те, що розглядається динамічна енергетична та ексергетична модель приміщення квартири з різним часовим кроком, з врахуванням накопичення енергії і ексергії у зовнішніх та внутрішніх огороженнях, теплових потоків між ними та сонячної радіації. Для включення даної моделі в складну систему «джерело теплоти – людина – огорожа будівлі» була оцінена можливість використання різних ексергетичних реперів для розрахунку. Також, попередньо було проведено обґрунтування встановлення датчиків контролю температури, на основі сигналів яких працює автоматика котла системи опалення.

Результати дослідження. Для проєктних умов проведений підбір опалювальних приладів на основі математичної моделі, створеної в програмному середовищі Matlab, де враховано тип опалювальних приладів, площа, маса, тепло-інерційні особливості приладу. Під проєктними умовами, відповідно до стандарту ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [19], для міста Києва прийнята температура зовнішнього повітря мінус 22°C та відсутні сонячні теплонадходження. Температура внутрішнього повітря, відповідно до стандарту ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [20], становить 20°C. Встановлено, що потужність опалювальних приладів в кімнатах квартири наступна: спальня 1 / room 4 – 500 Вт, спальня 2 / room 3 – 1200 Вт, кухня / room 2 – 880 Вт, загальні місця (ванна, коридор) / room 1 – 320 Вт.

У річному розрізі різниця результатів моделювання при постійній температурі повітря в квартирі за двома розглянутими моделями за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [20] та Matlab становить 13%, за еталонну обрано динамічну модель, створену в програмному середовищі Matlab. Менша різниця в результатах спостерігається для міжсезоння (жовтень, квітень) – близько 30 кВт/год, для інших більш холодних місяців – 80...140 кВт/год.

Для перевірки математичної моделі квартири, створеної в програмному середовищі Matlab, проведено співставлення результатів з результатами моделювання в програмному середовищі EnergyPlus з використанням погодинного погодного файлу IWEC [21] в обох моделях. Розглянуті сіткові динамічні моделі враховують теплоінерційні властивості кожного огороження окремо. З математичного моделювання в програмному середовищі Matlab випливає, що загальне теплоспоживання квартири розподіляється: спальня 1 / room 4 – 17%, спальня 2 / room 3 – 40%, кухня / room 2 – 31%, загальні місця / room 1 – 12%. У спальні 1, спальні 2 встановлені сталеві радіатори, на кухні – сталевий радіатор та водяна тепла підлога, у місцях загального користування – водяна тепла підлога та сушарка для рушників.

Робота котла регулюється по середній температурі повітря в кімнатах квартири і в залежності від цього при постійній витраті води в системі опалення змінюється її температура,

що призводить до того, що погодинна температура повітря в різних кімнатах під впливом різних теплопритоків змінюється від 18 до 24°C, при збереженні середньої температури повітря на рівні $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ в програмному середовищі Matlab.

В реальній практиці контроль підтримання заданої температури повітря в квартирі може здійснюватися за значеннями температури повітря у репрезентативних кімнатах: для малогабаритного типового житла це 1–2 точки встановлення датчиків контролю температури повітря, за показами яких контролер подає сигнал на котел для його ввімкнення/вимкнення. Зазвичай, датчики встановлюються в кімнатах, де мешканці перебувають значну частину часу, тобто в спальнях або вітальні. В даному дослідженні розглянуто три різні варіанти встановлення датчиків температури: 1) два датчики: в спальні 1 та спальні 2; 2) в спальні 1; 3) в спальні 2.

Результати модельного розрахунку наведені на рис. 3 [8]. З нього видно, що при кількісному регулюванні опалення та при відсутності інерційності в опалювальних приладах за математичною моделлю створеною в програмному середовищі EnergyPlus, маємо найменший результат споживання теплоти на потреби опалення будівлі. Для умов України характерним є використання контролерів ON/OFF для автономних систем опалення, тому в залежності від кількості та розташування датчиків контролю температури, температура в приміщеннях може змінюватися в межах $\pm 3\%$. Результати моделювання в середовищі Matlab відрізняються на 4...10% від результатів моделювання в EnergyPlus.



Позначки: room 1-4 – датчик контролю температури повітря за яким відбувається спрацювання контролера в програмі Matlab встановлений в кімнаті 1-4; room 3-4 – датчик в кімнаті 3-4; room 3 – датчик в кімнаті 3; room 4 – датчик в кімнаті 4; EP – моделювання в програмному продукті EnergyPlus.

Рис. 3. Енергоспоживання теплової енергії на обігрів приміщень квартири

За таких умов регулювання середнє навантаження на газовий котел становить: датчики у всіх кімнатах – 1073 Вт; в спальні 1 та 2 – 1058 Вт; в спальні 2 / room 3 – 1100 Вт; в спальні 1 / room 4 – 1010 Вт. В EnergyPlus – 965 Вт.

На рис. 4 представлено погодинні результати моделювання для опалювального сезону в програмних середовищах Matlab та EnergyPlus. Результати моделювання енергоспоживання теплової енергії в Matlab мають більший діапазон коливання навантаження системи опалення, що є характерним для реальних умов роботи. Тенденції зміни навантаження на систему опалення квартири за результатами моделювання в Matlab та EnergyPlus однакові. Максимальне відхилення результатів моделювань за двома динамічними математичними моделями становить до 0,5 кВт, а середнє відхилення – 0,1 кВт.

Для квітня спостерігається висока сонячна активність, яка пояснює, що для цього періоду середня температура повітря в репрезентативних приміщеннях/групах приміщень, де встановлені датчики, перевищує заведене в контролер значення діапазону зміни внутрішньої температури, тобто в момент повного короткострокового відімкнення опалення (в моменти пікової сонячної активності) за рахунок надлишку сонячних теплонадходжень зростає внутрішня температура повітря в кімнатах квартири.

На рис. 5 наведено навантаження на автономну систему опалення квартири для періоду 10-14 січня для якого характерна не висока сонячна активність та зовнішня температура в діапазоні $-10 \dots -2^{\circ}\text{C}$. Пониження графіку добової зміни навантаження характерне для періодів сонячних теплонадходжень. Моделювання в EnergyPlus показує плавне зменшення навантаження на систему опалення в пікові години надходження сонячної радіації, а потім його плавне зростання. В Matlab було проведено чотири серії моделювань для різних локацій встановлення датчиків контролю температури. Для розглянутої квартири кімната 3 є найбільшою, що в свою чергу при встановленні датчика контролю температури повітря тільки в цій кімнаті призводить до менших коливань навантаження, порівняно з аналогічною ситуацією встановлення датчика контролю в кімнаті 4 (має розміри до 10 m^2), яка є вдвічі меншою за площею та великим коефіцієнтом засклення. Для інших комбінацій встановлення датчиків контролю температури повітря в квартирі графіки зміни навантаження будуть коливатися в діапазоні зміни навантаження у випадку встановлення одного датчика в кімнаті 4 та 3.

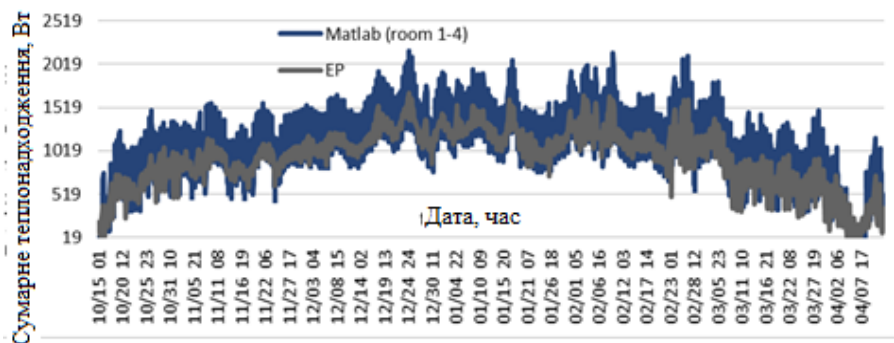


Рис. 4. Навантаження на систему опалення квартири для опалювального сезону

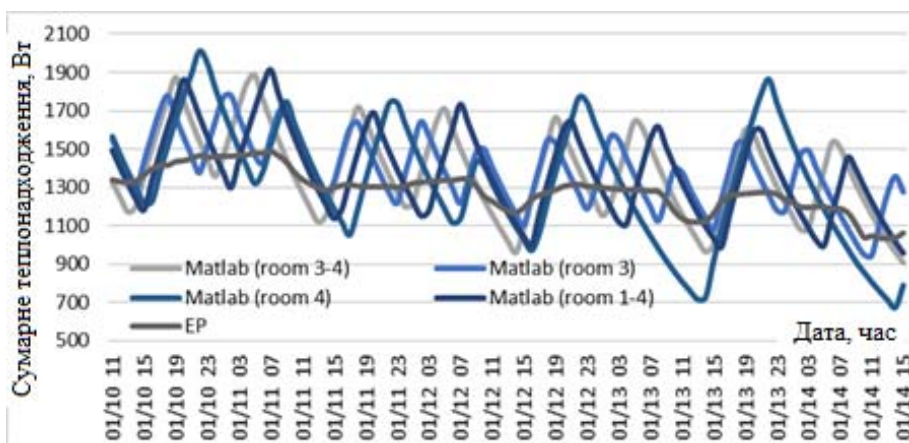


Рис. 5. Навантаження на систему опалення квартири для різних варіантів регулювання системи опалення

В період сонячної активності спостерігається зниження навантаження на систему опалення для різних варіантів регулювання. При якісному регулюванні та роботі газового котла з контролером типу ON/OFF, та з урахуванням теплової інерційності інженерних мереж, спостерігаються значні коливання навантаження на систему опалення, які тривають від 3 до 10 годин в світлу пору доби. При встановленні датчика контролю температури в кімнаті 4, яка характеризується наявністю великої площі засклення (що призводить до значних сонячних теплонадходжень в приміщення в світлий час доби), а також переважна площа огорожень кімнати – внутрішні огороження, призводить до тривалих відключень автономного газового

котла, що обумовлює характер зниження навантаження на рис. 5. Сценарій, коли датчики регулювання температури встановлені у великих кімнатах квартири з двома зовнішніми стінами/більшою площею зовнішніх стін, призводить до значно коротших інтервалів між відключеннями котла [8].

На рис. 6 показано зміну середньої температури повітря в квартирі для різних варіантів розташування датчиків регулювання температури, за результатами моделювання в програмному середовищі Matlab.

Температура в приміщенні підтримується на рівні 20°C в діапазоні відхилення – 0,5...+0,1°C від базового рівня. Верхня межа регулювання дещо нижча за нижню межу регулювання. Такий діапазон регулювання обумовлений інерційністю системи опалення. З метою забезпечення комфортних умов (уникнення перегріву) та енергоефективного використання теплової енергії було встановлено вищевказаний діапазон підтримання внутрішньої температури. У програмному середовищі EnergyPlus система опалення є безінерційною, а температура в приміщенні підтримується відповідно до заданого значення 20 °C за допомогою терморегулятора на опалювальному приладі.

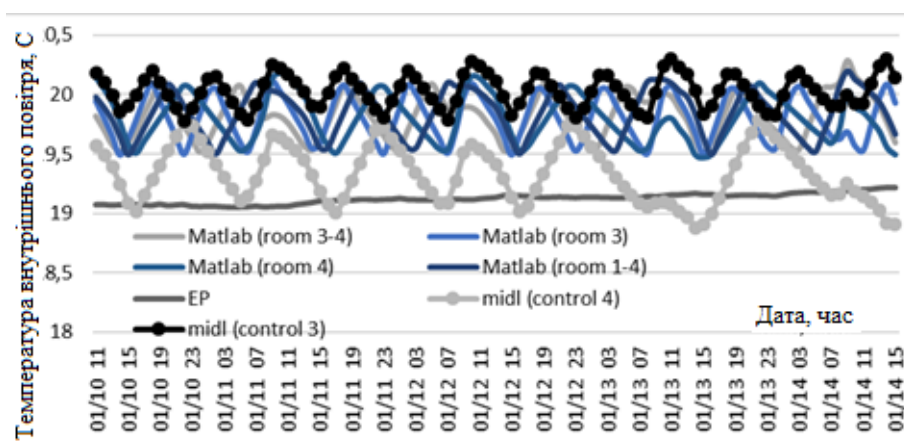


Рис. 6. Середня температура повітря в кімнатах квартири, де встановлені датчики контролю та в квартирі в цілому при різних варіантах регулювання системи опалення

На рис. 6 наведено середню температуру повітря в квартирі за результатами моделювання в програмному середовищі EnergyPlus, яка знаходиться на рівні 20°C. Середня температура повітря в квартирі (середнє значення по чотирьох кімнатах) за результатами моделювання в програмному середовищі Matlab при встановленні датчика температури в кімнаті 4 становить 19,1°C – найнижча, порівняно з іншими варіантами моделювання, при встановленні датчика в кімнаті 3 (найбільша кімната квартири з 2 зовнішніми стінами) – 20,2°C (найбільше значення).

В табл. 1 представлено відхилення температури повітря в кімнатах (зонах) від середньої температури повітря в квартирі для опалювального періоду та різних локаціях встановлення датчиків контролю температури, що передає сигнал на контролер. Отримані результати моделювання показують, що середня температура повітря в квартирі становить: датчики встановлені у всіх кімнатах (room 1-4) – 19,9°C; датчики встановлені у двох спальнях (room 3-4) – 19,7°C; датчик встановлений у room 3 – 20,2°C; датчик встановлений у room 4 – 19,2°C.

З результатів моделювання випливає, що доцільним є встановлення датчика температури повітря в кімнаті 3. Для цієї кімнати проведено детальний ексергетичний аналіз. Результати енергетичного моделювання кімнати 3 наведені на рис. 7. Температури огорожень кімнати 3 протягом опалювального періоду, а також зміна температури навколишнього середовища показані на рис. 7а. Температури внутрішніх огорожень, даху та

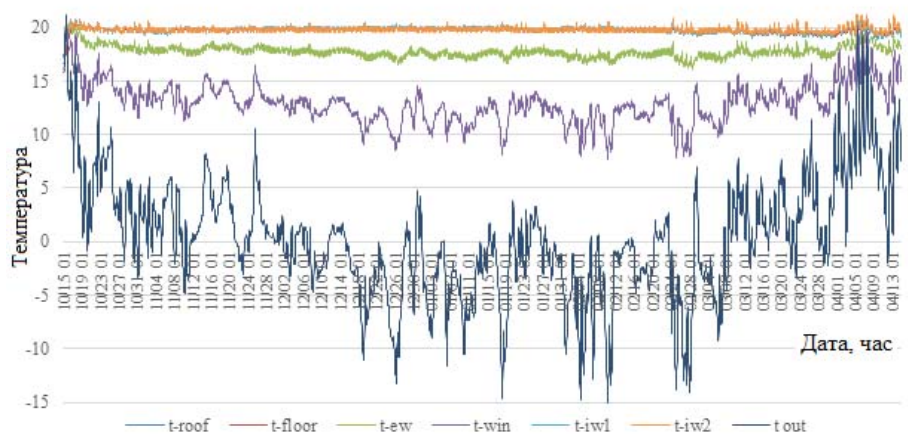
підлоги коливаються близько до кімнатної температури, найнижчу температуру має зовнішня стіна – біля 16°C , а вікна – 7°C , температура навколишнього середовища найнижча – мінус 15°C . Динаміка зміни теплових надходжень від системи опалення до кімнати 3 протягом опалювального сезону наведена на рис. 7б.

Таблиця 1

Відхилення температури повітря в кімнаті від середнього

Місце встановлення датчика	Номер кімнати	Відхилення від середнього значення, $^{\circ}\text{C}$		
		середнє	мак	мін
room 1-4	room 1	0,3	0,9	-0,3
	room 2	-0,2	0,6	-3,5
	room 3	0,2	1,3	-1,4
	room 4	-1,1	0,1	-6,1
room 3-4	room 1	0,5	1,3	-0,2
	room 2	-0,1	1,1	-3,6
	room 3	0,4	1,7	-1,2
	room 4	-0,9	0,1	-5,7
room 3	room 1	0,0	0,4	-0,3
	room 2	-0,6	0,1	-4,2
	room 3	-0,2	0,2	-2,1
	room 4	-1,4	0,1	-6,6
room 4	room 1	1,0	2,4	-0,2
	room 2	0,5	2,5	-2,1
	room 3	0,9	3,1	-1,0
	room 4	-0,3	0,3	-4,6

а)



б)

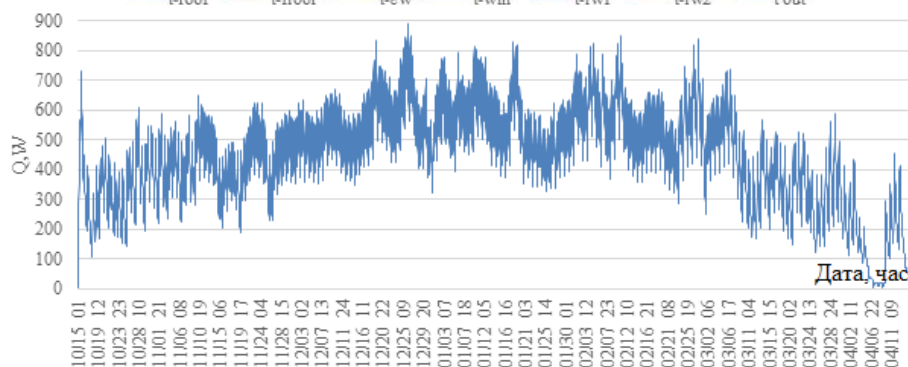
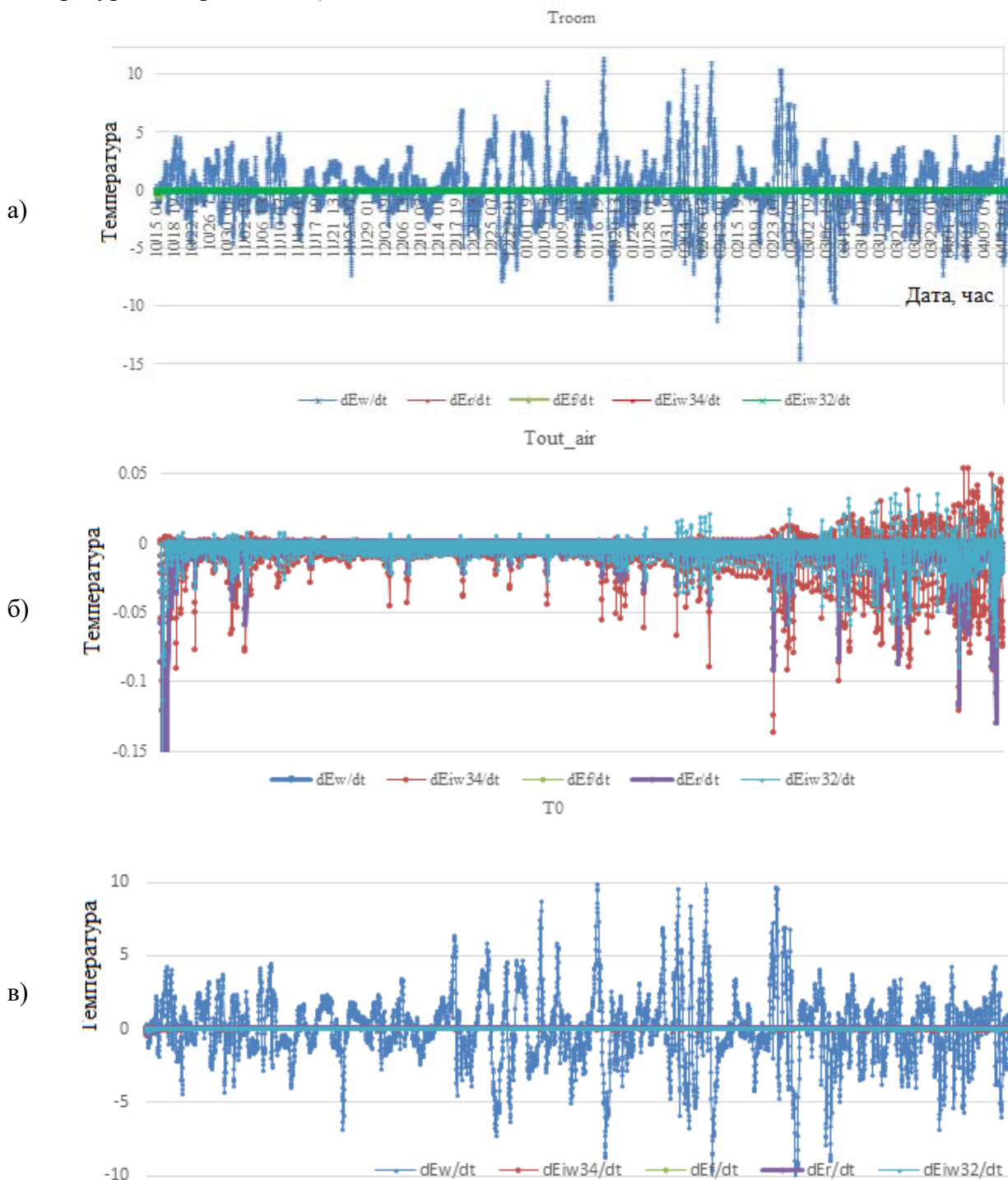


Рис. 7. Зміна температури огорожень кімнати, зовнішньої температури та навантаження на систему опалення протягом опалювального періоду

На основі динамічного енергетичного моделювання з використанням відповідних розрахункових співвідношень ексергії (відповідно до викладеної методології в статті [22]) оцінено значення накопиченої ексергії в огорожувальних конструкціях для різних точок відліку ексергії (рис. 8: а – точка відліку ексергії внутрішня температура повітря, б – зовнішня температура повітря, в – 0°C).



Позначки: dE_w/dt – накопичення ексергії в зовнішніх стінах; dE_{iw34}/dt – накопичення ексергії у внутрішній стіні, яка розділяє кімнату 3 та 4; dE_{iw32}/dt – накопичення ексергії у внутрішній стіні, яка розділяє кімнату 3 та 2; dE_f/dt – накопичення ексергії підлогою; dE_r/dt – накопичення ексергії в перекритті.

Рис. 8. Накопичення ексергії в елементах огорожі для різних орієнтирів

На рис. 8а показано коливання накопиченої ексергії для контрольної точки кімнатної температури, яка підтримується сталою близько 20°C , але є деякі коливання. Амплітуда накопиченої ексергії для внутрішніх оболонок мінімальна, що також відповідає тенденціям щодо відхилень температури. Добова амплітуда коливання для зовнішньої стіни становить 10 Вт, для внутрішніх стін – 0,15, та 0,14 Вт для стелі та підлоги.

Якщо точкою відліку є температура навколишнього середовища (рис. 8б), то амплітуда коливань зменшується, а частота зростає. Добова амплітуда коливання для зовнішніх стін становить 0,13 Вт, для внутрішніх стін – 0,13, а для стелі та підлоги – 0,14 Вт.

Для контрольної точки 0°C результати подібні до першого варіанту. Добова амплітуда коливання для зовнішніх стін становить 8 Вт, для внутрішніх стін – 0,08, для стелі та підлоги близько 0,12 Вт.

Висновки. В статті створено динамічну сіткову модель двокімнатної квартири в програмному середовищі Matlab з використанням підсистем інструментів Simulink, а також в EnergyPlus. Результати моделювання енергоспоживання теплової енергії в Matlab мають більший діапазон коливання навантаження системи опалення, що є характерним для реальних умов роботи системи. Характер зміни навантаження на систему опалення квартири за результатами моделювання в Matlab та EnergyPlus однаковий. Зменшення навантаження на опалення характерне для періодів сонячних теплонадходжень в зону квартири. Моделювання в EnergyPlus показує плавну зміну навантаження на систему опалення зі зменшенням навантаженням в пікові години, а потім з плавним його наростанням. В Matlab було проведено чотири серії моделювань для різної кількості датчиків контролю температури і локації їх встановлення. Різний період зміни навантаження на систему опалення залежить від взаємозв'язку між місцем встановлення датчика в кімнатах квартири та їх тепловим навантаженням відносно загального навантаження квартири. Для розглянутої квартири кімната 3 є найбільшою, що призводить при встановленні датчика контролю температури повітря тільки в цій кімнаті до менших коливань навантаження, порівняно з аналогічною ситуацією встановлення датчика контролю в кімнаті 4, яка є вдвічі меншою за площею та з великим коефіцієнтом засклення. Незалежно від типу контролера, важливим є кількість та місце встановлення датчиків контролю температури, які не лише обумовлюють роботу системи опалення квартири, але й загальне забезпечення комфорту в усій квартирі.

Для детального аналізу ексерго-енергетичних характеристик огорожень будівлі було обрано житлову кімнату 3, де проведено погодинний модельний розрахунок зміни внутрішньої температури, теплового навантаження на систему опалення, робота системи керування котла опалення, акумуляційні властивості огорожень та величину перетоків між суміжними приміщеннями квартири. В розглянутій квартирі величина навантаження на систему опалення досліджуваної кімнати не перевищує 900 Вт для найхолоднішого зимового періоду відповідно до кліматичних даних типового року погодного файлу IWEC для м. Київ. Добові коливання на систему опалення при постійній температурі повітря в приміщенні становлять 100...260 Вт, найбільший діапазон коливань характерний для перехідних періодів. Створена модель дозволяє враховувати теплоаккумуляційні властивості як внутрішніх так і зовнішніх огорожень. У роботі проведено ексергетичний аналіз потоків ексергії, що накопичувалась на протязі опалювального періоду в огороженнях будівлі, та деструкції ексергії для різних точок відліку. Доведено, що акумулювання ексергії у внутрішніх огороженнях потребує урахування у загальному балансі.

Показано, що вибір температури точки відліку ексергії впливає на значення амплітуди коливань накопиченої ексергії. Так, для температури повітря в приміщенні значення амплітуди коливань накопиченої ексергії у внутрішніх і зовнішніх огороженнях суттєво різняться. Для навколишньої температури різниця в амплітуді нівелюється. Для 0°C

результати схожі, очевидно тому, що середня температура повітря опалювального сезону в Києві близька до 0 °С. У свою чергу, вибір точки відліку не має такого суттєвого впливу на коливання деструкції ексергії. Значення характеристик закумульованої ексергії в огороженнях при використанні переривчастого опалення буде предметом подальших досліджень.

References

1. Lu, G., Zhou, X., Yan, J., Yan, G. (2021). A temperature and time-sharing dynamic control approach for space heating of buildings in district heating system. *Energy*, Vol. 221.
2. Ye, Y., Chen, Y., Zhang, J., Pang, Z., O'Neill, Z., Dong, B., Cheng, H. (2021) Energy-saving potential evaluation for primary schools with occupant-centric controls. *Applied Energy*, Vol. 293, 116854.
3. Perera, D. W. U., Halstensen, M., Skeie, N. O. (2015). Prediction of space heating energy consumption in cabins based on multivariate regression modelling. *International Journal of Modeling and Optimization*, Vol. 5, No. 6, P. 385–392.
4. Perera, D. W. U., Winkler, D., Skeie, N. O. (2016). Multi-floor building heating in MATLAB and Modelica environments. *Applied Energy*, Vol. 171, P. 4–57.
5. Perera, D. W. U., Pfeiffer, C., Skeie, N. O. (2014). Control of temperature and energy consumption in buildings. *International Journal of Energy and Environment*, Vol. 5, No. 4, P. 471–484.
6. Deshko, V., Buyak, N., Bilous, I., Shevchenko, O. (2020). The Impact of Energy-Efficient Heating Modes on Human Body Exergy Consumption in Public Buildings. *2020 IEEE 7th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY SMART SYSTEMS*. Kyiv, Ukraine, May 12–14, 2020.
7. Deshko, V., Bilous, I., Sukhodub, I., Yatsenko, O. (2021). Evaluation of energy use for heating in residential building under the influence of air exchange modes. *Journal of Building Engineering*, 42, 103020.
8. Deshko, V., Bilous, I., Biriukov, D., Yatsenko, O. (2021). Transient Energy Models of Housing Facilities Operation. *Rocznik Ochrona Środowiska*, Vol. 23, P. 539–551.
9. Hepbasli, A. (2021). Low exergy (LowEx) heating and cooling systems for sustainable buildings and societies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16(1), P. 73–104.

Література

1. Lu G., Zhou X., Yan J., Yan G. A temperature and time-sharing dynamic control approach for space heating of buildings in district heating system. *Energy*. 2021. Vol. 221.
2. Ye Y., Chen Y., Zhang J., Pang Z., O'Neill Z., Dong B., Cheng H. Energy-saving potential evaluation for primary schools with occupant-centric controls. *Applied Energy*. 2021. Vol. 293, 116854.
3. Perera D. W. U., Halstensen M., Skeie N. O. Prediction of space heating energy consumption in cabins based on multivariate regression modelling. *International Journal of Modeling and Optimization*. 2015. Vol. 5, No. 6. P. 385–392.
4. Perera D. W. U., Winkler D., Skeie N. O. Multi-floor building heating in MATLAB and Modelica environments. *Applied Energy*. 2016. Vol. 171. P. 4–57.
5. Perera D. W. U., Pfeiffer C., Skeie N. O. Control of temperature and energy consumption in buildings. *International Journal of Energy and Environment*. 2014. Vol. 5, No. 4. P. 471–484.
6. Deshko V., Buyak N., Bilous I., Shevchenko O. The Impact of Energy-Efficient Heating Modes on Human Body Exergy Consumption in Public Buildings. *2020 IEEE 7th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY SMART SYSTEMS*. Kyiv, Ukraine, May 12–14, 2020.
7. Deshko V., Bilous I., Sukhodub I., Yatsenko O. Evaluation of energy use for heating in residential building under the influence of air exchange modes. *Journal of Building Engineering*. 2021. № 42, 103020.
8. Deshko V., Bilous I., Biriukov D., Yatsenko O. Transient Energy Models of Housing Facilities Operation. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2021. Vol. 23. P. 539–551.
9. Hepbasli A. Low exergy (LowEx) heating and cooling systems for sustainable buildings and societies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16 (1). P. 73–104.

10. Shukuya, M. (1994). Energy, entropy, exergy and space heating systems. *Proc. 3rd int. conf. healthy buildings* (p. 369–374).
11. Shukuya, M. (1996). Warm exergy and cool energy. *Annual meeting, building science section* (p. 453–454).
12. Schmidt, D. (2004). Methodology for the Modelling of thermally activated building components in low exergy design. Ph.D. Thesis. Kungliga Tekniska Högskolan. The Royal Institute of Technology, Department of Civil and Architectural Engineering, Division of Building Technology, SE-100 44 Stockholm, Sweden; May 2004.
13. Deshko, V., Buyak, N., Voloshchuk, V. (2019). Reference state for the evaluation of energy efficiency of the system “heat source – human – building envelope”. *ECOS 2019 – Proceedings of the 32nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. P. 2287–2300.
14. Saleh, A., Mosa, M. (2016). Analysis of control strategies and simulation of heating systems using Simulink/Matlab potential. *Journal of Thermal Engineering*, Vol. 2, Iss. 5, P. 921–927.
15. Kull, T. M., Thalfeldt, M., Kurnitski, J. (2020). PI parameter influence on underfloor heating energy consumption and setpoint tracking in NZEBs. *Energies*, Vol. 13, Iss. 8, 2068.
16. Vösa, K.-V., Ferrantelli, A., Kurnitski, J. (2019). Annual performance analysis of heat emission in radiator and underfloor heating systems in the European reference room. *E3S Web Conf.* 2019, 111.
17. Kaymaz, E. (1995). Adaptive environmental control for optimal energy consumption in hospitals. *Proceedings of the 8th IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems* (p. 165–172). Lubbock, TX, USA; 43511.
18. MATLAB – MathWorks – MATLAB & Simulink. The official home of MATLAB software. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
19. DSTU-N B V.1.1-27:2010 Будівельна кліматологія [Building climatology]. Kyiv, 2011. 127 p. [in Ukrainian].
20. DSTU B A.2.2-12:2015 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні [Energy efficiency of buildings. The method of calculating energy consumption for heating, cooling, ventilation, lighting and hot water

10. Shukuya M. Energy, entropy, exergy and space heating systems. *Proc. 3rd int. conf. healthy buildings*. 1994. P. 369–374.
11. Shukuya M. Warm exergy and cool energy. *Annual meeting, building science section*. 1996. P. 453–454.
12. Schmidt D. Methodology for the Modelling of thermally activated building components in low exergy design. Ph.D. Thesis. Kungliga Tekniska Högskolan. The Royal Institute of Technology, Department of Civil and Architectural Engineering, Division of Building Technology, SE-100 44 Stockholm, Sweden; May 2004.
13. Deshko V., Buyak N., Voloshchuk V. Reference state for the evaluation of energy efficiency of the system “heat source – human – building envelope”. *ECOS 2019 – Proceedings of the 32nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. 2019. P. 2287–2300.
14. Saleh A., Mosa M. Analysis of control strategies and simulation of heating systems using Simulink/Matlab potential. *Journal of Thermal Engineering*. 2016. Vol. 2, Iss. 5. P. 921–927.
15. Kull T. M., Thalfeldt M., Kurnitski J. PI parameter influence on underfloor heating energy consumption and setpoint tracking in NZEBs. *Energies*. 2020. Vol. 13, Iss. 8, 2068.
16. Vösa K.-V., Ferrantelli A., Kurnitski J. Annual performance analysis of heat emission in radiator and underfloor heating systems in the European reference room. *E3S Web Conf.* 2019, 111.
17. Kaymaz E. Adaptive environmental control for optimal energy consumption in hospitals. *Proceedings of the 8th IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems*. 1995. P. 165–172. Lubbock, TX, USA; 43511.
18. MATLAB – MathWorks – MATLAB & Simulink. The official home of MATLAB software. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
19. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 Будівельна кліматологія. К., 2011. 127 с.
20. ДСТУ Б А.2.2-12:2015 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні. Уведений вперше;

supply]. Introduced for the first time; valid from 01.01.2015. Kyiv: Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2016. 205 p. [in Ukrainian].

21. ASHRAE International Weather for Energy Calculation (IWEC) files. URL: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/ashrae-international-weather-files-for-energy-calculations-2-0-iwec2>.

22. Buyak, N., Deshko, V., Bilous, I., Voloshchuk, V., Biriukov, D. (2022). Applying dynamic energy and exergy analysis to a building envelope. *7th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering CPOTE 2022*, 20–23 September 2022, Poland (p. 807–819).

чинний від 2015.01.01. К.: Мінрегіонбуд України, 2016. 205 с.

21. ASHRAE International Weather for Energy Calculation (IWEC) files. URL: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/ashrae-international-weather-files-for-energy-calculations-2-0-iwec2>.

22. Buyak N., Deshko V., Bilous I., Voloshchuk V., Biriukov D. Applying dynamic energy and exergy analysis to a building envelope. *7th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering CPOTE 2022*, 20–23 September 2022, Poland. P. 807–819.

BILOUS INNA

Candidate of Technical Sciences, Docent
Department of Heat and Alternative Power Engineering,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6640-103X>
Scopus Author ID: 57194104035
ResearcherID: J-7070-2017
E-mail: biloys_inna@ukr.net

BIRIUKOV DMYTRO

Assistant lecturer,
Department of Heat and Alternative Power Engineering,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1926-6821>
Scopus Author ID: 57562298500
E-mail: biriukov.dmytro@iit.kpi.ua

SHKLYAR VIKTOR

Candidate of Technical Sciences, Docent
Department of Heat and Alternative Power Engineering,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6879-7501>
Scopus Author ID: 6701387095
ResearcherID: J-4011-2017
E-mail: shklyar_vi@ukr.net

BUYAK NADIA

Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer,
Department of Heat and Alternative Power Engineering,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0597-6945>
Scopus Author ID: 57192821169
ResearcherID: S-2915-2019
E-mail: korovaj.te@gmail.com

YATSENKO OLENA

Assistant lecturer
Department of Heat and Alternative Power Engineering,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8001-5987>
Scopus Author ID: 57226536764
ResearcherID: ACV-8484-2022
E-mail: loco-motion@ukr.net

DUBROVSKA VIKTORIYA

Candidate of Technical Sciences, Docent
Department of Heat and Alternative Power Engineering,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4765-0484>
Scopus Author ID: 6603969762
ResearcherID: J-7315-2017
E-mail: dubrovska_vv@ukr.net

BILOUS I. Yu., BUYAK N. A., BIRIUKOV D. V., YATSENKO O. I., SHKLYAR V., DUBROVSKA V. V.

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine

EXERGETIC AND ENERGETIC TRANSIENT PROCESSES IN BUILDINGS

Purpose. Application of energy and exergy approaches for the study of dynamic processes in buildings.

Methodology. Using a grid model of a typical apartment of modern buildings to study the impact of the heating system on the accumulation of energy and exergy by the building envelope as a complex system "heat source – man – building envelope", based on a dynamic energy model of the apartment created in the Matlab software environment.

Findings. According to the results of numerical simulations, the temperature distribution in the apartment was analyzed depending on the number and location of temperature control sensors in the rooms of the heating system (ON/OFF controller). Based on the data obtained, the installation of temperature sensors in the apartment used to set up the automation system of the boiler of the autonomous heating system was justified. The estimation of exergy flows accumulated in different elements of the enclosures for different exergy reference points was carried out.

Originality. The choice of the exergy reference point for estimating the flows of exergy lost and accumulated in different elements of the enclosures is substantiated, which allows a better assessment of exergy fluctuations in the enclosures. Also, determined the difference in energy consumption for heating at different combinations of installation of temperature sensors in the rooms on which the controller of the boiler of the autonomous heating system operates.

Practical value. The results of the research prove to determine the feasibility of using dynamic energy modeling of buildings to assess the temperature state of the apartment zones and the heat-accumulating properties of the building envelope. The conducted research allows to substantiate and correctly adjust the operation of the heating system.

Keywords: energy consumption; exergy; internal temperature; mathematical modeling of buildings.