DOI 10.34185/1562-9945-5-166-2026-17
УДК 681.5:697.1

О.В. Бондаренко, А.В. Бубліков

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ПРИМІЩЕНЬ БУДІВЕЛЬ

Анотація. Підвищення енергетичної ефективності будівель потребує узгодження роботи систем опалення, вентиляції та кондиціювання з просторово-часовою організацією використання приміщень. Метою статті є систематизація сучасних підходів до врахування зайнятості, теплових режимів і характеристик приміщень та обґрунтування постановки задачі енергоефективного планування їх використання. Проаналізовано наукові публікації останніх років за напрямами визначення й прогнозування зайнятості приміщень, енергетичного моделювання, прогнозного керування мікрокліматом, оптимізації розкладів та гнучкого використання простору. Показано, що наявні рішення переважно вдосконалюють окремі функції: формують температурні уставки за заданим розкладом, оцінюють зайнятість або оптимізують розклад без індивідуалізованого прогнозу витрат на опалення. За результатами контент-аналізу статей встановлено високу представленість рішень щодо кількісної зайнятості приміщень і значно нижчу представленість щодо перехідних теплових режимів, індивідуальних енергетичних профілів та функціонального статусу приміщень; критерій питомих енерговитрат на людино-годину у вибірці взагалі не використано. Обґрунтовано доцільність інтегрованої системи підтримки прийняття рішень, яка поєднує прогноз енерговитрат, організаційні обмеження та координацію локальних систем керування. Сформульовано мету подальших досліджень, комплекс завдань, очікувані результати й напрями практичного застосування.
Ключові слова: енергетична ефективність, використання приміщень, планування, зайнятість, електричне опалення, прогнозування енерговитрат, система підтримки прийняття рішень, енергетичний профіль приміщення, людино-година.

Постановка проблеми. Будівлі є складними організаційно-технологічними об’єктами, у яких енергоспоживання визначається не лише характеристиками огороджувальних конструкцій та інженерного обладнання, а й фактичним способом використання простору. Для адміністративних, освітніх і громадських будівель характерні нерівномірна зайнятість приміщень, зміни складу груп, перерви між заходами, наявність однофункціональних і багатофункціональних приміщень. За таких умов однакова послуга – забезпечення нормативного мікроклімату для певної кількості людей протягом заданого часу – може потребувати різних витрат енергії залежно від обраного приміщення, моменту початку його використання та попереднього теплового стану.

© Бондаренко О.В., Бубліков А.В., 2026
Copyright for this paper by its authors. Use permitted under License CC BY 4.0.
ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Традиційна логіка експлуатації розділяє організаційне планування та автоматичне керування мікрокліматом. Розклад формують за часовими, місткісними й функціональними обмеженнями, після чого локальні системи опалення, вентиляції та кондиціювання (HVAC) відпрацьовують задані температурні режими. Навіть якщо керування враховує прогноз погоди або присутність людей, сам план використання приміщень залишається зовнішньою заданою величиною. Унаслідок цього не використовується можливість зменшити кількість прогрівань, сконцентрувати заходи в енергетично ефективних приміщеннях або вибрати простір, теплова динаміка якого краще відповідає тривалості й чисельності запланованої події.

Проблема особливо суттєва для будівель з електричним опаленням і зональним регулюванням. Перехід приміщення з економного до комфортного режиму створює додаткове навантаження, величина якого залежить від зовнішньої температури, потужності нагрівача, теплової інерції та тривалості простою. Отже, оцінювання лише усталених витрат або використання нормативного питомого показника на площу не дає достатньої інформації для порівняння альтернативних варіантів «група – приміщення – час». Потрібен прогноз повних витрат енергії на опалення, що охоплює попереднє прогрівання, підтримання температури під час зайнятості приміщення та залишкові теплові процеси після завершення використання.

Водночас організаційна ефективність не може бути зведена до мінімізації сумарної енергії будь-якою ціною. Рішення має зберігати місткість, функціональну придатність приміщень, допустимі часові вікна, вимоги до комфорту та можливість реалізації сформованого плану локальними системами керування. Тому задача має міжрівневий характер: на рівні планування визначають просторово-часове розміщення заходів, а на рівні оперативного керування забезпечують необхідну теплову підготовку приміщень і підтримання заданих параметрів мікроклімату.

Таким чином, актуальною є науково-прикладна задача переходу від фрагментарного врахування зайнятості приміщень в алгоритмах керування до інтегрованого планування використання приміщень за прогнозованими енергетичними наслідками. Її розв’язання потребує критичного зіставлення сучасних підходів, визначення функцій, які вже забезпечуються наявними системами, і встановлення складових, що мають бути об’єднані в єдиному контурі підтримки рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження енергоефективності будівель розвиваються за кількома взаємопов’язаними напрямами. Огляд керування, орієнтованого на користувача (occupant-centric), показує поступовий перехід від простого реагування на факт присутності до прогнозного керування, що враховує чисельність людей, індивідуальні вимоги до комфорту та невизначеність поведінки [1]. Огляд технологій прогнозування зайнятості приміщень дозволяє зробити висновок про систематичне застосування датчиків, камер, даних бездротових мереж Wi-Fi і Bluetooth та методів машинного навчання [2]. Технології оптимізації енергоспоживання будівель на основі даних об’єднують прогнозування, цифрові моделі, оптимізацію й автоматизацію, однак дослідники відзначають труднощі інтеграції різнорідних даних і перенесен-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

ня моделей між будівлями [3]. Для освітніх будівель окремо підкреслюється необхідність одночасного врахування технологічних рішень і поведінки користувачів [4].

До першого функціонального класу підходів до енергоефективного використання приміщень належать методи та засоби моніторингу і прогнозування їх зайнятості. У роботі [5] дані зайнятості приміщень офісів на тривалих часових інтервалах використано для виявлення змін режимів експлуатації та побудови прогнозів. Визначення зайнятості окремих приміщень за Wi-Fi probe-запитами та методами машинного навчання досліджено в [6]. Гібридні моделі, що поєднують гаусівські процеси з механістичним описом енергетичних процесів у будівлі, використано для прогнозування зайнятості приміщень у роботі [7]. Практична цінність цих підходів полягає в перетворенні зайнятості приміщень з нормативного профілю на вимірюваний або прогнозований сигнал. Проте результатом є оцінка присутності чи кількості людей, а не енергоефективний план їх розміщення.

Другий клас охоплює керування HVAC з урахуванням зайнятості приміщень. Експериментальне порівняння стратегій, орієнтованих на користувача, підтверджує можливість зменшення енергоспоживання без погіршення якості повітря та теплового комфорту [8]. У [9] ефективність системи керування на основі зайнятості приміщень оцінено в реальній офісній будівлі. Робота [10] показує, як дані інтелектуального лічильника і Wi-Fi можуть використовуватися для відновлення фактичних графіків роботи HVAC, а [11] поєднує прогноз внутрішніх теплонадходжень з оптимізацією за температурною уставкою. Спільна симуляція EnergyPlus–MATLAB із застосуванням рекурентної нейронної мережі з довгою короткочасною пам’яттю (LSTM) демонструє технічну можливість реалізації прогнозного керування у замкненому контурі [12]. У всіх цих випадках керованими величинами є температурні уставки, режими або потужність обладнання, тоді як розподіл заходів між приміщеннями задається наперед і не оптимізується.

У задачах періодичного опалення принципово важливим є врахування перехідних процесів. Метод оцінювання часу попереднього прогрівання з урахуванням невизначеностей моделі розглянуто в [13]. Він показує, що момент початку підготовки приміщення не можна коректно визначити лише за календарним правилом. Тривалість прогрівання та додаткова енергія залежать від поточного теплового стану і зовнішніх умов. Разом з тим навіть точне прогнозне керування локальною зоною не відповідає на організаційне питання: чи доцільно взагалі активувати цю зону, якщо захід може бути перенесений до іншого придатного приміщення.

Третій клас пов’язаний з енергетичним моделюванням і сценарним аналізом. Реалістичні профілі зайнятості приміщень суттєво змінюють оцінку енергоспоживання будівельних архетипів порівняно зі стандартними графіками [14]. Калібрована модель кампусу в [15] використана для аналізу гнучких режимів роботи та впливу керування, орієнтованого на зайнятість приміщень. Дослідження [16] демонструє, що планувальні рішення і конфігурація внутрішнього простору будівлі впливають на поведінку користувачів та енергетичні результати. Новіші роботи розглядають оптимізацію зонування гнучких офісів [17] і багатокритеріальне формування конфігурації гнучких

просторів [18]. Ці результати розширюють об’єкт оптимізації від обладнання до простору, проте часто вимагають детальної моделі всієї будівлі та не формують простого індивідуального профілю приміщення, придатного для оперативного перерахунку великої кількості варіантів розкладу.

Четвертий клас становлять енергоорієнтовані задачі формування розкладу. В [19] оптимізовано розклад занять з урахуванням енергоефективності будівлі та змінного теплового сприйняття студентів. Платформа спільної симуляції будівлі й алгоритму планування застосована для оптимізації використання аудиторій і приміщень самостійної роботи [20]. У моделі [21] енергетичні наслідки університетського розкладу досліджено з урахуванням клімату, параметрів будівлі та освітніх обмежень. Робота [22] поєднує оптимізацію розкладу з оцінюванням теплових відчуттів студентів. Ці праці доводять, що розклад може бути самостійним керувальним впливом, а не лише вхідними даними для HVAC.

Найближчими до задачі енергоефективного використання простору є підходи, які безпосередньо оптимізують розміщення людей. У роботі [23] запропоновано підхід до оптимізації використання простору будівлі, який ґрунтується на об’єднанні даних кількох сенсорів і спільному врахуванні поведінки користувачів та параметрів внутрішнього середовища. У [24] кількісно досліджено вплив числа людей на енергоспоживання будівлі з високою щільністю зайнятості. Однак наявність кількості людей у моделі ще не означає, що ефективність оцінюється відносно корисного результату використання приміщення. У проаналізованих постановках домінують сумарна енергія, вартість або комфорт, тоді як питомі витрати на забезпечену людино-годину не використовуються як критерій вибору плану.

Синтез результатів дає підстави розрізняти чотири функціональні рівні: моніторинг та ідентифікацію; моделювання і прогнозування; оперативне керування; планування та підтримку рішень. Усередині кожного рівня спостерігається розвиток функціональної повноти: від фіксованих графіків до прогнозу, від ізольованого контролю обладнання до координації зон, від традиційного розкладу до енергоорієнтованого планування. Проте між рівнями зберігаються розриви. Засоби моніторингу передають дані моделям і контролерам, а енергетичні моделі можуть оцінювати сценарії планування, але цілісний замкнений обмін між СППР і локальними системами керування представлений обмежено. Узагальнену карту підходів наведено на рис. 1.

Положення блоків на рис. 1 має категоріальний, а не метричний зміст: горизонтальна вісь відображає домінуючу функцію підходу, вертикальна – ступінь інтеграції енергетичних процесів із використанням приміщень. Суцільні стрілки показують розширення функцій у межах класу; штрихові – інформаційний або модельний зв’язок; двобічна стрілка – замкнений обмін між формуванням рішень і їх оперативною реалізацією. Така інтерпретація не ототожнює локальне прогнозне керування з плануванням усієї будівлі. Прогнозне керування HVAC оптимізує тепловий режим заданої зони, тоді як координоване оперативне керування має реалізовувати план, сформований СППР, і повертати фактичні дані для його уточнення.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Окремого пояснення потребує зв’язок енергетичного моделювання з енергоорієнтованим плануванням. Модель є не самостійною гілкою розвитку, а джерелом прогнозованої енергооцінки альтернатив. Саме тому на рисунку цей зв’язок подано інформаційною дугою. Аналогічно аналітика зайнятості приміщень може підтримувати як прогнозне керування, так і планування. Однак жоден з цих інформаційних потоків сам по собі не утворює СППР: потрібні цільовий критерій, організаційні обмеження, механізм порівняння допустимих планів і інтерфейс взаємодії з локальними контролерами.

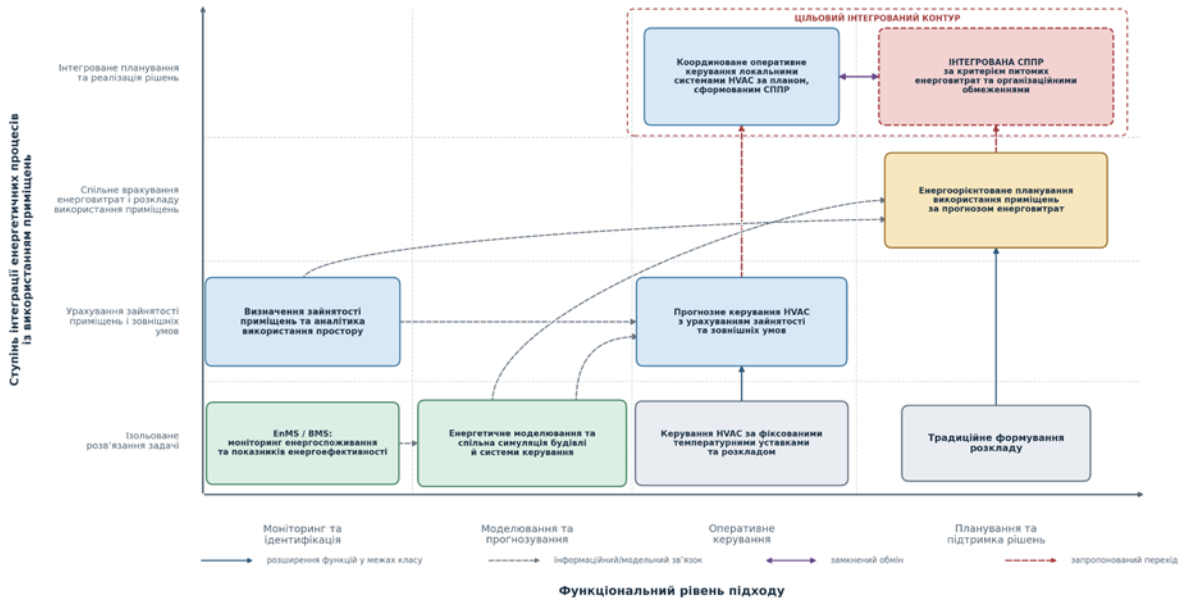


Рисунок 1 – Позиціонування та напрями розвитку підходів до енергоефективного використання приміщень в будівлі

Для кількісного уточнення виявленої прогалини проведено контент-аналіз 20 унікальних первинних наукових статей 2022–2025 років [5–24]. Оглядові праці [1–4] використано для формування класифікації та пошуку первинних досліджень, але не включено до знаменника, щоб не дублювати результати робіт, уже охоплених оглядами. Для кожного чинника застосовано шкалу: повне врахування – 1; часткове – 0,5; відсутність – 0. Індекс представленості визначено як відношення суми оцінок до кількості первинних статей, помножене на 100 %. Така процедура характеризує не якість окремої статті, а частоту інтегрального врахування відповідного чинника у вибірці.

Результати, наведені на рис. 2, свідчать про нерівномірність урахування досліджуваних чинників у сучасних постановках задач енергоефективного використання приміщень. Кількісна зайнятість приміщень має індекс 80,0 %, оскільки число людей або профіль зайнятості приміщень широко застосовують у моделях і контролерах. Температурний режим враховано на рівні 42,5 %, а формування плану використання приміщень – 32,5 %. Перехідні теплові режими представлені на 25,0 %, індивідуалізований енергетичний профіль приміщення – на 20,0 %. Функціональний статус приміщення як керована ознака планування має лише 5,0 %. Питомі енерговитрати на людино-годину не використано в жодній з 20 первинних праць у якості цільового критерію планування.

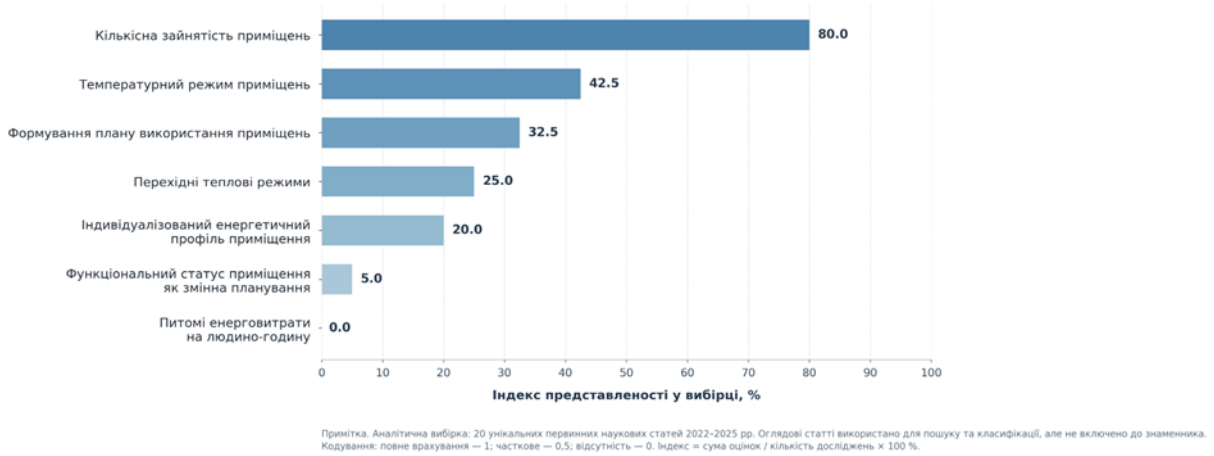


Рисунок 2 – Представленість чинників енергоефективного планування у вибірці сучасних досліджень

Нульове значення останнього показника не означає, що дослідники ігнорують користувачів: навпаки, зайнятість приміщень є найбільш представленим чинником. Прогалина полягає в іншому – кількість людей переважно використовується як збурення, джерело теплонадходжень або умова комфорту, а не як нормувальна величина корисного результату експлуатації. Це розмежування принципове. Два плани з близьким сумарним споживанням можуть суттєво відрізнятися за кількістю забезпечених людино-годин, а отже, за ефективністю використання енергії та простору.

Так само низька представленість функціонального статусу приміщення не означає відсутності організаційних обмежень у задачах розкладу. Університетські моделі детально враховують місткість, доступність і сумісність занять з аудиторіями [19–22]. Проте статус «однофункціональне – багатофункціональне» рідко розглядається як змінна політики використання будівлі, яка визначає допустиму гнучкість перерозподілу груп. Для практичної СППР це важливо: система не повинна пропонувати формально енергоощадне, але організаційно неприйнятне переміщення груп людей.

Отже, невирішеною залишається задача інтегрованого планування, у якій для кожного допустимого призначення приміщення прогнозуються індивідуальні витрати енергії з урахуванням початкового теплового стану та переходів між режимами; енергетичний результат співвідноситься з кількістю забезпечених людино-годин; організаційні обмеження визначають допустиму множину планів; сформований план передається локальним системам HVAC для координованої реалізації. Саме ця сукупність ознак, а не окремий алгоритм прогнозування або оптимізації, визначає новий напрям досліджень.

Мета досліджень. Метою досліджень є підвищення енергетичної ефективності використання приміщень будівель шляхом обґрунтування принципів інтегрованого планування їх просторово-часової зайнятості за прогнозованими питомими витратами електричної енергії на опалення та організаційними обмеженнями.

Досягнення мети потребує переходу від оцінювання окремих режимів HVAC до системної постановки, в якій план використання приміщень розглядається як керований

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

фактор енергоспоживання, а локальні системи керування – як виконавчий рівень сформованих рішень. При цьому не йдеться про заміну автоматичного регулювання організаційним плануванням: обидва рівні мають функціонувати узгоджено і обмінюватися прогнозними та фактичними даними.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для формалізації невирішеної задачі будівлю доцільно подати як множину приміщень $R = \{r_1, \ldots, r_m\}$, кожне з яких характеризується місткістю, функціональним статусом, допустимими видами використання, параметрами локальної системи опалення та індивідуальною енергетичною моделлю. На горизонті планування задано множину заходів $A = \{a_1, \ldots, a_n\}$. Для кожного заходу відомі кількість учасників, тривалість, допустимі часові інтервали, вимоги до обладнання й мікроклімату. Рішення X визначає відповідність «захід – приміщення – час» і пов'язаний з нею графік переходів локальних систем між економним і комфортним температурними режимами.

Допустимість плану визначається організаційними обмеженнями. До них належать неперетин заходів у одному приміщенні; достатня місткість; відповідність функціонального призначення й оснащення; доступність приміщення і учасників; обмеження на переміщення; мінімальні інтервали між заходами; збереження закріплення однофункціональних приміщень. Частина обмежень є жорсткою і не може порушуватися, інша може задаватися штрафами або пріоритетами. Такий поділ потрібен, щоб енергетичний критерій не витісняв основне призначення будівлі.

Енергетичну оцінку альтернативи слід формувати на рівні окремого приміщення. Для призначення заходу a_i у приміщення r_j прогнозована енергія опалення має залежати від початкової внутрішньої температури, прогнозу зовнішньої температури, тривалості попереднього прогрівання, заданої комфортної уставки, кількості людей, внутрішніх теплонадходжень, теплової інерції та потужності нагрівача. Вхідним впливом динамічної моделі є електрична або теплова потужність, а витрати енергії визначають інтегруванням потужності на часовому інтервалі. Це термінологічне розмежування запобігає некоректному використанню енергії як миттєвого входу моделі.

Індивідуалізований енергетичний профіль приміщення має забезпечувати швидке оцінювання великої кількості сценаріїв. На відміну від нормативного показника кВт·год/м², такий профіль повинен відображати реальну динаміку конкретного об'єкта: кількість людей в приміщенні, швидкість нагрівання, теплові втрати за різних зовнішніх умов, витрати в усталеному комфортному режимі та енергію переходу після простою. Джерелом параметрів можуть бути дані активного експерименту, коли локальний регулятор формує тестову зміну потужності або уставки, а система реєструє реакцію температури, зовнішні умови та споживання.

Для плану X сумарна прогнозована енергія опалення $E_h(X)$ визначається сумою витрат усіх активованих приміщень на горизонті прогнозування. Корисний результат використання будівлі доцільно подати кількістю забезпечених людино-годин $H(X)$, тобто сумою добутків фактичної кількості учасників на тривалість їх перебування у комфортних умовах. Тоді питомий показник енергетичної ефективності має вигляд:

$$I_e(X) = E_h(X) / H(X) \rightarrow min.$$

Якщо множина заходів, чисельність груп і тривалість використання суворо фіксовані, $H(X)$ є сталою, і мінімізація $I_e(X)$ математично еквівалентна мінімізації сумарної енергії. У цьому випадку питомий показник не змінює оптимальний план, але надає нормовану метрику для порівняння будівель, днів та рівнів завантаження. Якщо ж допускаються альтернативні формати проведення заходів, неповна фактична явка, об'єднання груп або різна тривалість використання, знаменник змінюється і критерій набуває самостійного оптимізаційного змісту. Тому його застосування має супроводжуватися явним визначенням множини дозволених організаційних рішень.

Пропонована постановка не повинна заохочувати штучне збільшення щільності людей або скорочення комфортного періоду. Температурні межі, якість повітря, максимальна заповнюваність і нормативні вимоги мають бути обмеженнями. За необхідності задача може бути багатокритеріальною: поряд з питомими енерговитратами враховують відхилення від базового розкладу, кількість переміщень, ризик порушення комфорту та стійкість плану до похибок прогнозу. Вибір вагових коефіцієнтів повинен бути прозорим для особи, яка приймає рішення.

Інтегрований контур має працювати циклічно. Системи енергетичного менеджменту та диспетчеризації будівлі (EnMS/BMS) надають вимірювання температури, потужності й фактичної зайнятості. Модуль ідентифікації оновлює параметри енергетичних профілів. Модуль прогнозування формує оцінки зовнішніх умов, зайнятості й енерговитрат альтернатив. Оптимізаційний модуль порівнює допустимі плани та подає рекомендацію. Після затвердження план перетворюється на графіки комфортних режимів для локальних систем HVAC. Фактичне виконання і відхилення повертаються до СППР, що забезпечує оперативне перепланування.

Зв'язок із локальними регуляторами є необхідною умовою практичної повноти. Рекомендація щодо перенесення заходу не забезпечить економії, якщо старе приміщення продовжить опалюватися за попереднім графіком або нове не буде завчасно підготовлене. Водночас СППР не повинна замінювати швидкодійний контур регулювання температури: вона задає графіки та цільові режими на вищому рівні, а локальні контролери компенсують короткочасні збурення і забезпечують комфорт.

Прогноз погоди створює одну з основних невизначеностей. Похибка зовнішньої температури змінює оцінку часу прогрівання і може змінити ранжування альтернативних приміщень. Тому прогнозована енергія має супроводжуватися інтервалом невизначеності або сценаріями. Для оперативного застосування доцільний ковзний горизонт прогнозування: план формується на наступну добу, а після оновлення прогнозу та фактичних даних перераховується лише та частина, яку ще можна змінити без організаційних втрат.

Критичним є й питання масштабу. Детальна спільна симуляція всієї будівлі може давати високу фізичну точність, але бути надмірно повільною для оцінювання тисяч комбінацій розкладу. Надто спрощені питомі коефіцієнти, навпаки, не відтворюють перехідні режими. Перспективним є дворівневий підхід: калібрована детальна модель ви-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

користовується для верифікації, дослідження сценаріїв і формування даних, а в оптимізаційному циклі застосовуються компактні динамічні моделі або сурогатні залежності окремих приміщень.

Сформульована задача визначає такі основні завдання досліджень:

1. формалізувати будівлю як організаційно-технологічний об’єкт планування, визначити змінні рішення, критерій питомих енерговитрат і систему жорстких та м’яких обмежень;

2. розробити засади отримання індивідуальних динамічних енергетичних характеристик приміщень за вимірюваннями активного експерименту та оцінити їхню відтворюваність;

3. сформувати підхід до прогнозування витрат електричної енергії на опалення з урахуванням погоди, початкового теплового стану, зайнятості та переходів між економним і комфортним режимами;

4. обґрунтувати клас методів оптимізації, придатний для задачі розподілу груп і заходів між приміщеннями за організаційних обмежень та необхідності оперативного перерахунку;

5. визначити функціональну архітектуру СППР і протокол її взаємодії з EnMS/BMS, засобами організаційного планування та локальними системами HVAC;

6. розробити методику порівняльного дослідження базового й оптимізованого планів та оцінити чутливість енергетичного ефекту до похибок прогнозу, параметрів моделей і фактичної явки користувачів.

Очікуваним науковим результатом є узгоджена постановка задачі енергоефективного планування використання приміщень, у якій енергетична модель не відокремлена від організаційних рішень, а кількісна зайнятість пов’язана з корисним результатом експлуатації через людино-години. На цій основі очікується отримання процедур ідентифікації та прогнозування, принципів оптимізаційного вибору плану й закономірностей впливу невизначеності вихідних даних на ефективність рекомендацій.

Прогнозований практичний результат полягає у створенні передумов для СППР, придатної до впровадження в адміністративних, освітніх і громадських будівлях із зональним електричним опаленням. Користувач системи має отримувати не автоматичну безумовну зміну розкладу, а ранжований набір організаційно допустимих варіантів із прогнозом енерговитрат, питомим показником, очікуваною економією відносно базового плану та поясненням чинників, що визначили рекомендацію.

Практична значущість також пов’язана з використанням наявної інфраструктури. Для початкового рівня реалізації достатні дані температурних датчиків, індивідуального або зонального обліку електроенергії, календаря використання та прогнозу погоди. Дані про зайнятість можуть надходити з систем контролю доступу, Wi-Fi-аналітики, датчиків присутності або підтвердженої кількості учасників. Модульна побудова дає змогу поетапно підвищувати точність без одночасної повної модернізації будівлі.

Ефект застосування СППР має оцінюватися не лише відсотком економії. Необхідно враховувати показники дотримання комфортних умов, кількість змін базового розкладу, частоту прогрівань, тривалість формування та оперативного перерахунку плану,

стійкість рекомендацій і питомі витрати енергії на людино-годину. Така система показників унеможливлює ситуацію, коли формально найменше енергоспоживання досягається за рахунок неприйнятних організаційних рішень або погіршення умов перебування людей.

Висновки. Аналіз сучасних досліджень показав, що підходи до підвищення енергетичної ефективності будівель розвиваються від ізольованого керування інженерним обладнанням у напрямі використання прогнозів зайнятості, цифрових моделей і гнучкого планування використання приміщень. Проте основні класи рішень залишаються функціонально розділеними: системи моніторингу визначають зайнятість, прогнозні контролери оптимізують HVAC за жорстко заданим планом, енергетичні моделі оцінюють сценарії, а системи планування розкладу переважно зосереджені на організаційній допустимості.

Контент-аналіз більше 20 нещодавно опублікованих статей за цим напрямом підтвердив, що кількісна зайнятість приміщень є добре представленим чинником, але перехідні теплові режими, індивідуалізовані енергетичні профілі й функціональний статус приміщень інтегруються значно рідше. Критерій питомих енерговитрат на людино-годину у вибірці джерел взагалі не виявлено. Водночас цей результат не свідчить про ігнорування присутності людей, а вказує на те, що енергетичні витрати не співвідносяться з корисним результатом експлуатації будівлі – кількістю людино-годин використання приміщень із забезпеченням нормативних умов мікроклімату.

Обґрунтовано постановку задачі, в якій план «захід – приміщення – час» є керованим чинником, для кожної альтернативи прогнозуються витрати на попереднє прогрівання і підтримання комфорту, а допустимість визначається організаційними та технологічними обмеженнями. Питомий критерій має застосовуватися критично: за сталої кількості людино-годин він еквівалентний мінімізації сумарної енергії, але забезпечує порівнянність різних рівнів завантаження. Якщо кількість людино-годин є змінною та залежить від обраного плану, мінімізація питомих енерговитрат уже не зводиться до мінімізації сумарного енергоспоживання і становить окрему оптимізаційну задачу.

Сформульовано мету подальших досліджень – підвищення енергетичної ефективності використання приміщень шляхом інтегрованого планування їх зайнятості за прогнозованими питомими витратами електричної енергії на опалення. Визначено завдання формалізації, ідентифікації, прогнозування, оптимізації, побудови функціональної архітектури СППР та оцінювання стійкості рішень.

Практична значимість результатів досліджень полягає у створенні СППР, яка не підмінює диспетчера або локальні регулятори, а забезпечує їх узгоджену роботу: формує енергетично обґрунтовані варіанти використання приміщень, передає затверджені графіки системам HVAC і уточнює рекомендації за фактичними даними. Це створює можливість використовувати організаційне планування приміщень в будівлі як додатковий ресурс енергозбереження, який не потребує значних витрат на впровадження.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

ЛІТЕРАТУРА

1. Yuan Y., Song C., Gao L., Zeng K., Chen Y. A review of current research on occupant-centric control for improving comfort and energy efficiency. Building Simulation. 2024. Vol. 17, No. 10. P. 1675–1692. DOI: https://doi.org/10.1007/s12273-024-1170-1.

2. Khan I., Zedadra O., Guerrieri A., Spezzano G. Occupancy Prediction in IoT-Enabled Smart Buildings: Technologies, Methods, and Future Directions. Sensors. 2024. Vol. 24, No. 11. Art. 3276. DOI: https://doi.org/10.3390/s24113276.

3. Billanes J.D., Ma Z.G., Jørgensen B.N. Data-Driven Technologies for Energy Optimization in Smart Buildings: A Scoping Review. Energies. 2025. Vol. 18, No. 2. Art. 290. DOI: https://doi.org/10.3390/en18020290.

4. Chaer I., Ozarisoy B., Elnour Ismail M. A., Salari S., Ye Z. Energy efficiency in educational buildings: A systematic review of smart technology integration and occupant behaviour. Building and Environment. 2025. Vol. 280. Art. 113132. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113132.

5. Motuzienė V., Bielskus J., Lapinskienė V., Rynkun G., Bernatavičienė J. Office buildings occupancy analysis and prediction associated with the impact of the COVID-19 pandemic. Sustainable Cities and Society. 2022. Vol. 77. Art. 103557. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103557.

6. Zelený O., Fryza T., Bravenec T., Azizi S., Nair G. Detection of Room Occupancy in Smart Buildings. Radioengineering. 2024. Vol. 33, No. 3. P. 432–441. DOI: https://doi.org/10.13164/re.2024.0432.

7. Wietzke T., Gall J., Graichen K. Occupancy Prediction for Building Energy Systems with Latent Force Models. Energy and Buildings. 2024. Vol. 307. Art. 113968. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.113968.

8. Kong M., Dong B., Zhang R., O'Neill Z. HVAC energy savings, thermal comfort and air quality for occupant-centric control through a side-by-side experimental study. Applied Energy. 2022. Vol. 306. Art. 117987. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117987.

9. Lin G., Casillas A., Sheng M., Granderson J. Performance Evaluation of an Occupancy-Based HVAC Control System in an Office Building. Energies. 2023. Vol. 16, No. 20. Art. 7088. DOI: https://doi.org/10.3390/en16207088.

10. Nweye K., Nagy Z. MARTINI: Smart meter driven estimation of HVAC schedules and energy savings based on Wi-Fi sensing and clustering. Applied Energy. 2022. Vol. 316. Art. 118980. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118980.

11. Wang Z., Calautit J., Wei S., Tien P. W., Xia L. Real-time building heat gains prediction and optimization of HVAC setpoint: An integrated framework. Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 49. Art. 104103. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104103.

12. Cong Y., Hou L., Wu Y., Ma Y., Leiviskä K. Development of a Coupled EnergyPlus–MATLAB Simulation Based on LSTM for Predictive Control of HVAC System. Mathematical Problems in Engineering. 2022. Vol. 2022. Art. 5912967. DOI: https://doi.org/10.1155/2022/5912967.

13. Sun S., Wang J., Li R., Sun Q. Preheating time estimation in intermittent heating with hot-water radiators by considering model uncertainties. Building and Environment. 2022. Vol. 226. Art. 109734. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109734.
14. Sood D., Alhindawi I., Ali U., McGrath J. A., Byrne M. A., Finn D., O'Donnell J. Simulation-based evaluation of occupancy on energy consumption of multi-scale residential building archetypes. Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 75. Art. 106872.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106872.
15. Mosteiro-Romero M., Miller C., Chong A., Stouffs R. Elastic buildings: Calibrated district-scale simulation of occupant-flexible campus operation for hybrid work optimization. Building and Environment. 2023. Vol. 237. Art. 110318.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110318.
16. Uddin M. N., Chi H.-L., Wei H.-H., Lee M., Ni M. Influence of interior layouts on occupant energy-saving behaviour in buildings: An integrated approach using Agent-Based Modelling, System Dynamics and Building Information Modelling. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 161. Art. 112382.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112382.
17. Ono E., Chong A., Lam K. P. Occupant-centric zoning design framework for flexible workplaces: Impact of occupancy modeling and building operation. Building and Environment. 2025. Vol. 267. Art. 112294.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112294.
18. Lyu H., Herring D., Chen H., Zhou S., Zhang J., Wang L., Zuo Z., Andrews J., Kočvara M., Spill F., Ninic J., Wang S. A data-driven multi-objective optimisation framework for energy efficiency and thermal comfort in flexible building spaces. Energy and Buildings. 2025. Vol. 346. Art. 116100. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116100.
19. Luo X., Sun Y., Liu X., Gao Y., Sun H., Liu Y. Course timetable optimization for a university teaching building considering the building energy efficiency and time-varying thermal perception of students. Building and Environment. 2022. Vol. 219. Art. 109175.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109175.
20. Liu Y., Ming H., Luo X., Hu L. Timetabling optimization of classrooms and self-study rooms in university teaching buildings based on the building controls virtual test bed platform considering energy efficiency. Building Simulation. 2023. Vol. 16, No. 2. P. 263–277.
DOI: https://doi.org/10.1007/s12273-022-0938-4.
21. Fathi A., Hajialigol P., Ahmadloo A., Yousefi H., Salehi M. Energy-Based University Timetabling Model as a Function of Class, Climate, and Building Conditions Subject to Educational Constraints. Journal of Energy Management and Technology. 2023. Vol. 7, No. 4. P. 264–273. DOI: https://doi.org/10.22109/JEMT.2023.394931.1446.
22. Jiang Y., Luo X. Optimization of university timetables considering students' thermal sensation in classrooms. Energy and Built Environment. 2025. Vol. 6, No. 5. P. 834–846. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2024.03.007.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

23. Zhou Y., Wang Y., Li C., Ding L., Yang Z. Energy-efficiency oriented occupancy space optimization in buildings: A data-driven approach based on multi-sensor fusion considering behavior-environment integration. Energy. 2024. Vol. 299. Art. 131396.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131396.
24. Alfalah B., Shahrestani M., Shao L. Measuring the Impact of Occupancy Numbers on Energy Consumption in a High-Density Building. Buildings. 2025. Vol. 15, No. 19. Art. 3598. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings15193598.

REFERENCES

1. Yuan, Y., Song, C., Gao, L., Zeng, K., & Chen, Y. (2024). A review of current research on occupant-centric control for improving comfort and energy efficiency. Building Simulation, 17(10), 1675–1692. https://doi.org/10.1007/s12273-024-1170-1
2. Khan, I., Zedadra, O., Guerrieri, A., & Spezzano, G. (2024). Occupancy prediction in IoT-enabled smart buildings: Technologies, methods, and future directions. Sensors, 24(11), 3276. https://doi.org/10.3390/s24113276
3. Billanes, J. D., Ma, Z. G., & Jørgensen, B. N. (2025). Data-driven technologies for energy optimization in smart buildings: A scoping review. Energies, 18(2), 290. https://doi.org/10.3390/en18020290
4. Chaer, I., Ozarisoy, B., Elnour Ismail, M. A., Salari, S., & Ye, Z. (2025). Energy efficiency in educational buildings: A systematic review of smart technology integration and occupant behaviour. Building and Environment, 280, 113132.
https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113132
5. Motuzienė, V., Bielskus, J., Lapinskienė, V., Rynkun, G., & Bernatavičienė, J. (2022). Office buildings occupancy analysis and prediction associated with the impact of the COVID-19 pandemic. Sustainable Cities and Society, 77, 103557.
https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103557
6. Zelený, O., Fryza, T., Bravenec, T., Azizi, S., & Nair, G. (2024). Detection of room occupancy in smart buildings. Radioengineering, 33(3), 432–441.
https://doi.org/10.13164/re.2024.0432
7. Wietzke, T., Gall, J., & Graichen, K. (2024). Occupancy prediction for building energy systems with latent force models. Energy and Buildings, 307, 113968.
https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.113968
8. Kong, M., Dong, B., Zhang, R., & O'Neill, Z. (2022). HVAC energy savings, thermal comfort and air quality for occupant-centric control through a side-by-side experimental study. Applied Energy, 306, 117987. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117987
9. Lin, G., Casillas, A., Sheng, M., & Granderson, J. (2023). Performance evaluation of an occupancy-based HVAC control system in an office building. Energies, 16(20), 7088.
https://doi.org/10.3390/en16207088
10. Nweye, K., & Nagy, Z. (2022). MARTINI: Smart meter driven estimation of HVAC schedules and energy savings based on Wi-Fi sensing and clustering. Applied Energy, 316, 118980. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118980

11. Wang, Z., Calautit, J., Wei, S., Tien, P. W., & Xia, L. (2022). Real-time building heat gains prediction and optimization of HVAC setpoint: An integrated framework. Journal of Building Engineering, 49, 104103. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104103
12. Cong, Y., Hou, L., Wu, Y., Ma, Y., & Leiviskä, K. (2022). Development of a coupled EnergyPlus–MATLAB simulation based on LSTM for predictive control of HVAC system. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 5912967.
https://doi.org/10.1155/2022/5912967
13. Sun, S., Wang, J., Li, R., & Sun, Q. (2022). Preheating time estimation in intermittent heating with hot-water radiators by considering model uncertainties. Building and Environment, 226, 109734. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109734
14. Sood, D., Alhindawi, I., Ali, U., McGrath, J. A., Byrne, M. A., Finn, D., & O'Donnell, J. (2023). Simulation-based evaluation of occupancy on energy consumption of multi-scale residential building archetypes. Journal of Building Engineering, 75, 106872. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106872
15. Mosteiro-Romero, M., Miller, C., Chong, A., & Stouffs, R. (2023). Elastic buildings: Calibrated district-scale simulation of occupant-flexible campus operation for hybrid work optimization. Building and Environment, 237, 110318.
https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110318
16. Uddin, M. N., Chi, H.-L., Wei, H.-H., Lee, M., & Ni, M. (2022). Influence of interior layouts on occupant energy-saving behaviour in buildings: An integrated approach using agent-based modelling, system dynamics and building information modelling. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 161, 112382. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112382
17. Ono, E., Chong, A., & Lam, K. P. (2025). Occupant-centric zoning design framework for flexible workplaces: Impact of occupancy modeling and building operation. Building and Environment, 267, 112294. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112294
18. Lyu, H., Herring, D., Chen, H., Zhou, S., Zhang, J., Wang, L., Zuo, Z., Andrews, J., Kočvara, M., Spill, F., Ninic, J., & Wang, S. (2025). A data-driven multi-objective optimisation framework for energy efficiency and thermal comfort in flexible building spaces. Energy and Buildings, 346, 116100. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116100
19. Luo, X., Sun, Y., Liu, X., Gao, Y., Sun, H., & Liu, Y. (2022). Course timetable optimization for a university teaching building considering the building energy efficiency and time-varying thermal perception of students. Building and Environment, 219, 109175.
https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109175
20. Liu, Y., Ming, H., Luo, X., & Hu, L. (2023). Timetabling optimization of classrooms and self-study rooms in university teaching buildings based on the building controls virtual test bed platform considering energy efficiency. Building Simulation, 16(2), 263–277.
https://doi.org/10.1007/s12273-022-0938-4
21. Fathi, A., Hajialigol, P., Ahmadloo, A., Yousefi, H., & Salehi, M. (2023). Energy-based university timetabling model as a function of class, climate, and building conditions subject to educational constraints. Journal of Energy Management and Technology, 7(4), 264–273.
https://doi.org/10.22109/JEMT.2023.394931.1446

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

22. Jiang, Y., & Luo, X. (2025). Optimization of university timetables considering students' thermal sensation in classrooms. Energy and Built Environment, 6(5), 834–846. https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2024.03.007
23. Zhou, Y., Wang, Y., Li, C., Ding, L., & Yang, Z. (2024). Energy-efficiency oriented occupancy space optimization in buildings: A data-driven approach based on multi-sensor fusion considering behavior-environment integration. Energy, 299, 131396. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131396
24. Alfalah, B., Shahrestani, M., & Shao, L. (2025). Measuring the impact of occupancy numbers on energy consumption in a high-density building. Buildings, 15(19), 3598. https://doi.org/10.3390/buildings15193598

Received 22.06.2026.
Accepted 25.08.2026.
Published 30.10.2026

Analysis of modern approaches to energy-efficient planning of building space use

Abstract. Improving building energy efficiency requires coordination between HVAC operation and the spatial-temporal organisation of room use. This paper systematises recent approaches to occupancy sensing and prediction, building energy modelling, predictive HVAC control, energy-aware timetabling, and flexible-space optimisation. The analysis covers peer-reviewed research published in 2022–2025. Four review papers were used to construct the classification and identify primary studies; twenty unique primary articles were coded without double counting. The qualitative map shows that monitoring, modelling, operational control, and organisational planning have mostly developed as separate functional classes. Existing systems commonly treat the room-use schedule as an external input: local controllers adapt temperature setpoints to occupancy and weather, while scheduling tools usually optimise organisational feasibility or total energy without a room-specific forecast of heating transitions. The content analysis indicates that quantitative room occupancy is considered in 80.0% of the sample, temperature mode in 42.5%, plan generation in 32.5%, transient thermal modes in 25.0%, and an individual room energy profile in 20.0%. Functional room status is treated as a planning variable in only 5.0%, and specific energy consumption per person-hour is not used as a planning objective. Based on these findings, an integrated research direction is formulated. A building is represented as a set of rooms with capacity, functional constraints, local HVAC characteristics, and individual dynamic energy profiles. Candidate assignments of events to rooms and time slots are evaluated by forecast heating energy, including preheating and comfort-maintenance periods, while organisational and comfort constraints define the feasible set. The proposed performance indicator relates heating energy to the delivered person-hours. When person-hours are fixed, this criterion is equivalent to total-energy minimisation but remains useful for comparing different loading levels; when useful output varies, it has an independent optimisation meaning. The research objective, six tasks, expected scientific results, and practical role of an integrated decision support system coordinating local HVAC controllers are defined.

Keywords: energy efficiency, space use, planning, occupancy, electric heating, energy forecasting, decision support system, room energy profile, person-hour.

Бондаренко Олександр – здобувач групи АРа-25-10 НТУ “Дніпровська політехніка”.
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7867-3366
Бубліков Андрій Вікторович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем НТУ “Дніпровська політехніка”.
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3015-6754

Bondarenko Oleksandr – graduate student of the group APa-25-10, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7867-3366
Bublikov Andrii Viktorovych – Dr.-Ing., Professor, Head of the Department of cyberphysical and information-measuring systems, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,.
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3015-6754

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)