

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.2.5>

УДК 697.1

СУХОДУБ І. О., СЕРДЕЧНИЙ П. Ю.

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

АНАЛІЗ СЦЕНАРІЇВ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ГРОМАДСЬКИХ БУДІВЕЛЬ З ІНТЕГРАЦІЄЮ ВДЕ

Мета. Дослідження проектів підвищення рівня енергетичної ефективності громадських будівель з використанням спеціалізованого програмного забезпечення для динамічного енергетичного моделювання DesignBuilder/EnergyPlus для різних рівнів енергетичної ефективності та інтеграції нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії.

Методика. В процесі дослідження заявленої проблематики проведено аналіз актуальної нормативно-правової бази України, яка окреслює та регулює підходи до оцінки енергетичної ефективності будівель та наявні програмні комплекси, використано апробовані спеціалізовані програмні комплекси для динамічного енергетичного моделювання будівель (DesignBuilder/EnergyPlus) та нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії (PV*SOL premium, T*SOL).

Результати. У ході дослідницької роботи проаналізовано проекти з підвищення рівня енергетичної ефективності громадської будівлі з використанням різних сценаріїв / рівнів енергетичної ефективності та інтеграції нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії. Розглянуто наступні сценарії: фактичний, базовий, запропонований та покращений запропонований. Для кожного з сценаріїв проаналізовано показники споживання кінцевої та первинної енергії на потреби опалення, охолодження, освітлення, обладнання, вентилятори та насоси, ГВП, а також викиди CO₂ та потенціал заміщення енергії з ВДЕ. В результаті впровадження заходів, що передбачені в запропонованому сценарії, споживання кінцевої енергії може зменшитися на 58,6% у порівнянні з базовим випадком, в той час як покращений запропонований сценарій може збільшити ці показники до 62,6%. Коефіцієнт заміщення теплової енергії за рахунок ВДЕ може скласти 22%, для електричної – 16% (покращений запропонований сценарій).

Наукова новизна. Використано динамічне енергетичне моделювання для розрахунку рівня енергетичної ефективності громадської будівлі для різних сценаріїв, проведено моделювання інтеграції нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії при заміщенні теплової та електричної енергії.

Практична значимість. В результаті проведення заявленого дослідження визначено потенціал економії кінцевої та первинної енергії, викидів CO₂ при впровадженні різних сценаріїв проектів підвищення рівня енергетичної ефективності та інтеграції ВДЕ, що дозволяє приймати обґрунтовані технічні рішення при проведенні комплексної модернізації громадських будівель в Україні.

Ключові слова: енергетична ефективність будівель; енергетичне моделювання будівель; динамічні моделі; відновлювані джерела енергії; DesignBuilder/EnergyPlus.

Вступ. Основним правовим документом, що окреслює сферу ефективного енерговикористання будівель в Україні є закон «Про енергоефективність будівель», який визначає юридичні, соціально-економічні та організаційні принципи у галузі забезпечення енергетичної ефективності будівель і спрямований на зниження споживання енергії в будівлях [1]. Цей правовий акт формулює основні принципи державного впливу в цій області, а саме: гарантування встановленого рівня енергетичної ефективності будівель відповідно до всіх необхідних національних стандартів, правил і методик; оцінку скорочення викидів парникових газів у атмосферу; розробка національного плану щодо впровадження та будівництва будівель з мінімальним рівнем споживання енергії; створення сприятливих умов щодо інвестицій з метою реалізації заходів із підвищення рівня енергетичної ефективності будівель, проведення реновації та термомодернізації вже існуючих будівель та використання відновлюваних джерел енергії.

Визначення енергетичної ефективності будівель впроваджується за допомогою національної методики [2], яка гармонізована відповідно до європейських стандартів та вимог у галузі енергоефективності, з врахуванням особливостей локального клімату, призначення будівлі, її геометричних особливостей та характеристик інженерних систем, мікрокліматичних умов безпосередньо у будівлі.

Вимоги до показників енергоефективності будівель, теплотехнічних параметрів огорожувальних конструкцій (теплоізоляційної оболонки), показників енергоефективності інженерного обладнання будівель на етапах їх проектування та будівництва регламентуються відповідно до [3, 4]. Також в цих нормах наводяться критерії раціонального використання енергетичних ресурсів для опалення та охолодження будівель з метою забезпечення встановлених санітарно-гігієнічних параметрів мікроклімату у приміщеннях та забезпечення тривалої служби огорожувальних конструкцій під час експлуатації будівель.

Вимоги до проектування та рівня енергоефективності інженерних систем будівлі, зокрема систем опалення, вентиляції, кондиціонування та охолодження повітря будівель наведено в [5].

Енергетичне споживання будівлі визначається через розрахунковий або річний обсяг енергії, спожитий на опалення, враховуючи дотримання норм санітарно-гігієнічних параметрів згідно з [6]. Цей нормативний документ передбачає використання методу розрахунку енергоспоживання на основі градусо-днів (ГД). Цей метод дозволяє коригувати енергоспоживання на опалення у відповідності до середньостатистичних температур (фактичних значень) приміщень та ззовні, але в цілому є менш точним, ніж методи з врахуванням більш динамічних параметрів зовнішнього середовища та «внутрішніх» компонентів будівлі.

Методологія, запропонована європейським стандартом EN ISO 13790, який застосовується в Україні як [7], визначає підходи до розрахункового методу оцінки щорічного енергоспоживання для опалення та охолодження. Стандарт окреслює дві основні методології для розрахунку енергоспоживання при опаленні та охолодженні: квазістаціонарний метод (розрахунок на тривалість, наприклад, місяць чи опалювальний період) та динамічний метод (розрахунок за короткий проміжок часу, зазвичай одну годину).

Спрощений погодинний метод дозволяє відслідковувати зміну енергопотреб в залежності від часових інтервалів, що полегшує визначення комфортних умов у приміщенні. До недоліків наведеного методу можна віднести той аспект, що не враховуються всі компоненти, які споживають енергію, такі як гаряча вода, вентиляція та освітлення.

Вище наведені компоненти враховуються в [2]. Методика розрахунку є основою системного підходу до забезпечення енергоефективності досліджуваних будівель. Вона включає аналіз таких аспектів, як теплопередача трансмісією та вентиляцією зони опалювання чи охолодження будівлі, внутрішні та сонячні теплові навантаження, річну енергопотребу для утримання заданих температур у будівлі, а також річне енергоспоживання на опалення та охолодження, гарячу воду, освітлення та вентиляцію.

Найбільш детальнішим методом дослідження ефективності роботи енергетичних систем будівель є використання динамічних моделей. Через достатню складність таких методів актуальнішим є використання при аналізі енергоефективності спеціального програмного забезпечення. Станом на зараз найбільш поширеними та популярними наступні програмні продукти: IDA ICE, IES VE, DesignBuilder, eQuest, EnergyPlus, DOE-2.

Динамічне моделювання дає змогу аналізувати значний спектр показників енергоефективності та теплового комфорту у будівлях та легко відслідковувати рівень енергоспоживання будівель в залежності від зміни різних вхідних факторів. Серед найпоширеніших заходів з енергозбереження які приймаються в Україні є заміна застарілих

віконних конструкцій на нові. Вплив такого покращення був проаналізований у [8] саме за допомогою програмного забезпечення з динамічного моделювання. Додатковою перевагою програм з динамічного моделювання є можливість врахування впливу пасивних елементів на енергопотребу та енергоспоживання будівлі, таких як затінення вікон [9].

DOE-2 представляє собою широко використовуваний безкоштовний програмний продукт для проведення енергетичного аналізу будівель. Цей інструмент здатний прогнозувати річне використання енергії та витрати для будь-якого типу будівлі, для чого використовується деталізований опис плану будівлі, огорожувальних конструкцій, графіків роботи інженерних систем (ОВК, освітлення і т. д.) у поєднанні з погодними даними для проведення годинних моделювань рівня енергоспоживання будівлі. Особливістю DOE-2 є те, що ця програма вимагає високого рівня досвіду для ефективного використання всіх її можливостей, але водночас надає дослідникам і експертам відповідно значну гнучкість [10].

eQUEST, як повноцінна інтерактивна реалізація DOE-2, вирізняється зручним графічним інтерфейсом та додатковими функціями, які автоматизують складні завдання та спрощують взаємодію користувача з DOE-2. Програма надає можливість імпорту геометрії будівлі з готових архітектурних моделей або створення оболонки будівлі власноруч. Програма дає змогу вводити дані у спрощеному та детальному форматі [11].

EnergyPlus, який базується на кращих підходах моделювання DOE-2 та BLAST, є програмним продуктом, що використовує фізично засновані моделі для опису теплового та масового балансу в будівлі. Кожна програма включає велику кількість підпрограм, які спільно працюють для моделювання енергетичних потоків у будівлі. EnergyPlus здійснює комплексне моделювання за допомогою трьох основних компонентів: модуль теплового і масового балансу, модуль симуляції систем будівлі та сторонній інтерфейс для створення геометрії будівлі [12, 13].

IDA ICE – це комплексне програмне забезпечення для моделювання енергоефективності будівель, яке дозволяє користувачам моделювати та симулювати різні аспекти будівельної фізики, включаючи системи опалення, охолодження, вентиляції та кондиціонування повітря. Воно включає детальні теплові та енергетичні моделі для оцінки внутрішнього клімату, споживання енергії та екологічного впливу будівель. Програма дозволяє проводити динамічні симуляції, які враховують взаємодію різних компонентів та систем будівлі протягом часу. Крім того, IDA ICE підтримує параметричні дослідження та оптимізацію, що робить його цінним для дослідників, що працюють над дизайном сталих будівель та аналізом енергоефективності [14].

IES VE – це універсальний програмний пакет для аналізу енергоефективності та моделювання енергетичної ефективності будівель. Серед основних його можливостей варто виокремити аналіз енергоспоживання будівлі за різних умов для його оптимізації, оцінка інтеграції відновлювальних джерел енергії, викидів вуглецю та аналізу життєвого циклу. Також даний програмний продукт дозволяє ефективно досліджувати кілька сценаріїв проекту та проводити аналіз чутливості до різних факторів [15].

DesignBuilder є програмним інструментом, який оперує на ядрі симулятора EnergyPlus, серед функціоналу якого можна виокремити здатність аналізу викидів вуглецю, рівнів освітлення та комфорту, а також вимірювання і контроль рівня споживання енергії. DesignBuilder порівнює альтернативні конструкції будівель, використовуючи швидкий спосіб, заснований на функціях та методі порівняння результатів різних аналізів. DesignBuilder поєднує швидко тривимірне моделювання будівель з динамічним моделюванням енергії [16].

При подальшому дослідженні планується використання саме програми DesignBuilder, що має розрахункове ядро EnergyPlus. До недоліків використання цього програмного забезпечення можна віднести розбіжність кліматичних даних з чинним нормативом [17], а в

методиці розрахунку не враховуються напряму втрати в ІТП, в трубопроводах, опалювальних приладів. Всі перелічені вище фактори ускладнюють порівняння результатів енергетичного моделювання з національною методикою визначення енергетичної ефективності будівель [2].

Постановка завдання:

- 1) проаналізувати наявні програмні комплекси, що можуть бути використані для енергетичного моделювання будівель, та обрати відповідні програми для проведення аналізу;
- 2) створення енергетичної моделі громадської будівлі в програмному середовищі DesignBuilder/EnergyPlus;
- 3) калібрування та верифікації моделі у відповідності до історичного енергоспоживання;
- 4) створення енергетичних моделей будівлі для сценаріїв: базовий, запропонований, покращений запропонований;
- 5) провести аналіз показників ефективності енерговикористання для вказаних сценаріїв;
- 6) провести аналіз інтеграції ВДЕ для громадської будівлі.

Об'єкт дослідження. Об'єктом енергетичного моделювання є будівля середньої загальноосвітньої школи м. Києва. Будівля побудована на початку другої половини ХХ ст. за типовим проектом. Будівля складається з чотириповерхової та двох одноповерхових секцій.

У школі навчається та працює близько 600 учнів та 70 робітників відповідно.

Система опалення та гарячого водопостачання є централізованими. Система опалення будівлі закрита, однотрубна з верхнім розведенням теплоносія. Наявні чавунні радіатори. Терморегулюючі головки на приладах опалення відсутні. Подача теплоносія по стоякам опалення є розбалансованою, через що є значна наявність повітряних карманів. Індивідуальний тепловий пункт (ІТП) знаходиться в гарному стані та був реконструйованим. Застосовується залежна схеми приєднання з центральними мережами, використовується триходовий клапаном та циркуляційні насоси. Наявне автоматичне погодозалежне регулювання температури подачі теплоносія.

Подача води централізована з загальноміських магістральних мереж. В будівлі була запроєктована система вентиляції з видаленням та нагнітанням повітря. Під час дослідження будівлі визначено, що система вентиляції не функціонує належним чином і, відповідно, приміщення будівлі вентилуються в у природній спосіб через відкриття вікон та інфільтрацію.

Загальна площа будівлі становить 7386,8 м², а загальний об'єм становить 23399,7 м³. Висота поверху становить 3,0 м. Зовнішні стіни виконані з порожнистої керамічної цегли на цементно-піщаному розчині, та є неутеплені. Частина вікон металопластикові, інша – дерев'яні. Наявні також скляні блоки. Перекриття залізобетонні. В неопалювальному горищі переkritтя утеплені шаром керамзиту. Суміщене переkritтя - без теплової ізоляції. Серед обладнання що споживає електричну енергію: насоси, прилади освітлення, офісна та побутова техніка.

Енергетичне моделювання виконувалось у програмному середовищі DesignBuilder/EnergyPlus. Першим кроком створено фактичну (actual) модель будівлі школи (рис. 1), в якій відображено фактичні параметри теплової оболонки будівлі, інженерних систем та фактичних умов експлуатації, а саме: недотримання рівня нормативних температур в приміщеннях та відсутність системи механічної вентиляції). Як ресурс кліматичних даних використовувався кліматичний файл погоди IWEC з годинним кроком дискретизації даних для м. Київ. Графік зайнятості будівлі був підібраний відповідно до [2] та становить 10 год/день з врахування вихідних та святкових днів. Фактична модель була відкалібрована відповідно до даних фактичного енергоспоживання за останні три роки.

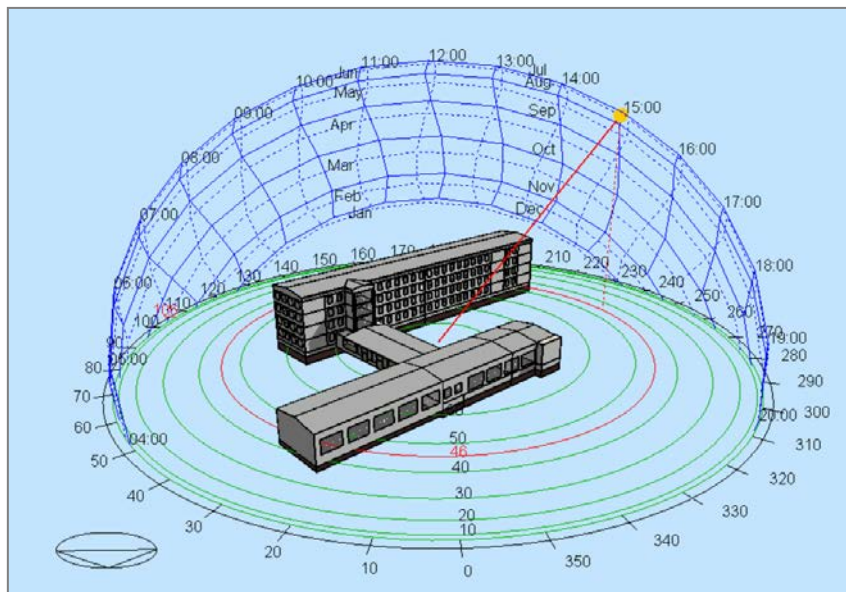


Рис. 1. Модель досліджуваної будівлі у DesignBuilder

Другим етапом дослідження фактичну модель було налаштовано під базовий (baseline) рівень енергоспоживання. Були задані показники теплового комфорту та рівень повітрообміну з використанням системи механічної вентиляції відповідно до мінімального рівня чинних нормативних документів [2, 5].

Третім етапом дослідження було підготовлено модель з запропонованим (proposed) рівнем енергоспоживання. В цій моделі термічний опір огорожувальних конструкцій було задано відповідно до чинних вимог [3], а також впроваджено утилізацію теплоти вихідного повітря в системах механічної вентиляції. Використовувався режим чергового опалення в періоди коли будівля незайнята.

Завершальним етапом дослідження було опрацьовано запропонований з покращенням (enhanced proposed) сценарій енергоспоживання. Термічний опір огорожувальних конструкцій був збільшений на 20% від характеристик застосованих у запропонованому сценаріїв. Також була підвищена ефективність системи утилізації теплоти вихідного повітря систем механічної вентиляції з врахуванням наявної (sensible) та прихованої (latent) теплоти. А також було проаналізовано рівень потенціалу заміщення спожитої енергії при використанні відновлювальних джерел енергії – фотоелектричних панелей та сонячних колекторів, розміщених на даху будівлі [18].

В таблиці 1 наведено опис теплотехнічних характеристик основних огорожувальних конструкцій будівлі школи при різних досліджуваних сценаріях.

Таблиця 1

Характеристики огорожувальних конструкцій будівлі

Показник	Значення			
	Actual	Baseline	Proposed	Enhanced proposed
1	2	3	4	5
Інфільтрація, (год ⁻¹)	0,31	0,1	0,1	0,1
Опір теплопередачі огорожувальних конструкцій R, м ² К/ Вт				
Зовнішня стіна, δ=0,798 м	1,25		4,0	4,8

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5
Зовнішня стіна, $\delta=0,685$ м	1,05		4,0	4,8
Перекриття неопалювального горища, $\delta=0,545$ м	1,41		6,0	7,2
Суміщене перекриття, $\delta=0,627$ м	0,8		7	8,4
Перекриття неопалювального підвалу, $\delta=0,535$ м	0,76		5,0	6,0
Світлопрозорі конструкції (середньозважене)	0,445		0,9	1,08
Вхідні двері (середньозважене)	0,446		0,70	0,84
Опалювальний підвал (стіни)	Неутеплено		Вертикальне утеплення ізоляцією $\delta=100$ мм на 2 м нижче рівня ґрунту	
Підлога до ґрунту	Неутеплено		Утеплення ізоляцією 50 мм на 0,5 м нижче рівня ґрунту	

В таблиці 2 наведено опис прийнятих показників процесів діяльності пов'язаною з людьми у будівлі.

Таблиця 2

Загальні показники діяльності людей та внутрішніх теплонадходжень у будівлі

Показник	Значення			
	Actual	Baseline	Proposed	Enhanced proposed
1	2	3	4	5
Щільність заповнення людьми, людей/м ²	0,095			
Фактор приведеної метаболічної активності	0,9 – легка офісна робота			
Ізоляція одягу взимку/влітку, clo	1/0,5			
Базова температура у будівлі у період роботи, °C	17	20		
Базова температура у будівлі у неробочий час, °C	17			
Базова температура режиму охолодження, °C	-	24		
Температура чергового режиму охолодження, °C	-	27		
Питома потужність електрообладнання, Вт/ м ²	1,24	6		
Питома потужність системи освітлення, Вт/ м ²	3,6	7		

В таблиці 3 наведено опис прийнятих показників процесів опалення, вентиляції, кондиціонування та ГВП у будівлі.

Таблиця 3

Загальна інформація параметрів інженерних систем енергетичної моделі

Показник	Значення			
	Actual	Baseline	Proposed	Enhanced proposed
1	2	3	4	5
Нормативне споживання гарячої води, л/(м ² ·день)	0,275	0,896		
Коеф сезонної ефективності системи ГВП	0,85			
Нормативна кратність повітрообміну системи механічної вентиляції, год ⁻¹	-	1,5		
Коефіцієнт сезонної ефективності системи опалення	0,7		0,85	
Коеф сезонної ефективності системи охолодження	-	2,25		
Коефіцієнт ефективності рекуперації теплоти, явної (<i>sensible</i>) <hr/> прихованої (<i>latent</i>)	-		$\frac{0,65}{-}$	$\frac{0,75}{0,75}$

Результати дослідження. Результати моделювання річного рівня споживання кінцевої енергії на опалення, освітлення, обладнання, насосів та вентиляторів та ГВП для всіх чотирьох досліджуваних сценаріїв будівлі наведені на рис. 2. Як видно з рисунку, опалення очікувано є найбільшою складовою енергоспоживання будівлі. Потреба при базовому сценарії вища за фактичний через те, що показники комфортності у будівлі (температура та вентиляція) приведені до мінімальних вимог чинних нормативних актів. Саме тому рекомендується проводити порівняння запропонованого та покращеного запропонованого сценаріїв саме з базовим. Енергопотреба на опалення знижується на 84,0% для запропонованого та на 89,9% для покращеного запропонованого сценаріїв. При впровадженні заходів з енергозбереження зростає споживання електричної енергії, що пов'язано зі збільшенням енергопотреб на охолодження. Так, потреба енергії на охолодження зростає на 77,3% для запропонованого і на 89% для покращеного запропонованого сценаріїв.

Для порівняння показників з урахуванням загального впливу на оточуюче середовище було застосовано фактори переводу кінцевої енергії в первинну відповідно до [19], яка має бути вироблена об'єктом генерації. Річне споживання первинної енергії наведено на рис. 3.

З отриманих результатів річного енергоспоживання видно, що при приведенні показників кінцевого енергоспоживання до рівня первинної енергії – пропорції систем що використовують централізоване тепlopостачання співпадають між собою, а систем, які використовують електроенергію кардинально змінюються, через те, що збільшується споживання енергії необхідної для охолодження будівлі, а також через той факт, що питомі показники споживання енергії на освітлення та обладнання були приведені у відповідність до норм [2]. Загальний потенціал зниження енергоспоживання на потреби опалення та охолодження може сягати до 60%.

Для зручності аналізу результатів річне споживання первинної енергії було приведено до опалювальної площі будівлі. Результати наведено на рис. 4.



Рис. 2. Річне споживання кінцевої енергії громадської будівлі



Рис. 3. Річне споживання первинної енергії громадської будівлі

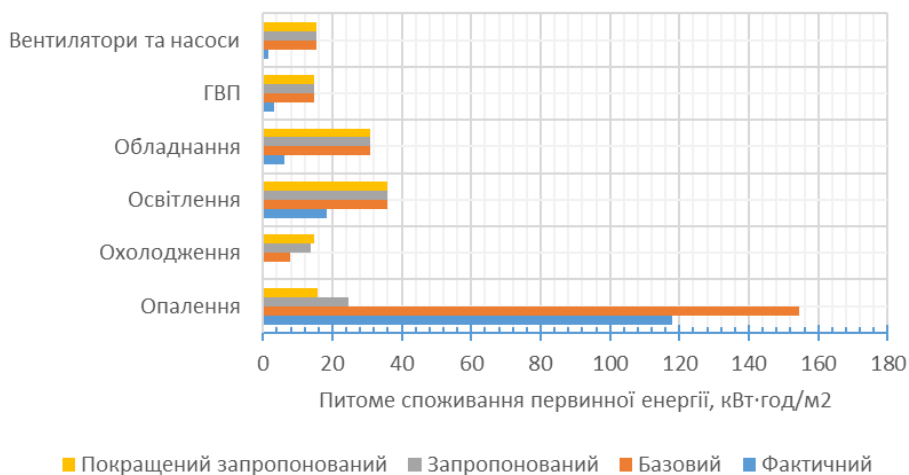


Рис. 4. Річне питоме споживання первинної енергії

Також було проведено оцінку рівня викидів парникових газів (CO₂) відповідно до [19]. Спостерігається скорочення викидів парникових газів 50,9% для запропонованого та 54,3% для покращеного запропонованого сценаріїв споживання енергії відносно базового рівня. Результати зображено на рис. 5.

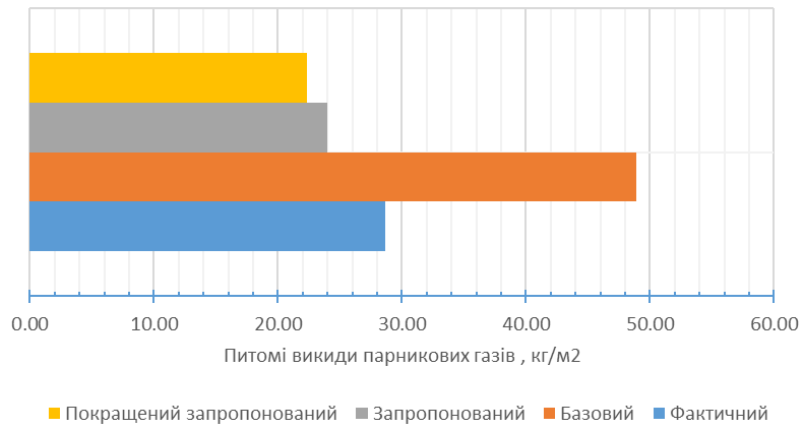


Рис. 5. Річні питомі викиди парникових газів

Можливий потенціал заміщення спожитої теплової та електричної енергії за рахунок використання сонячних колекторів на потреби ГВП та дахової фотоелектричної станції наведено на рис. 6 та 7 відповідно.

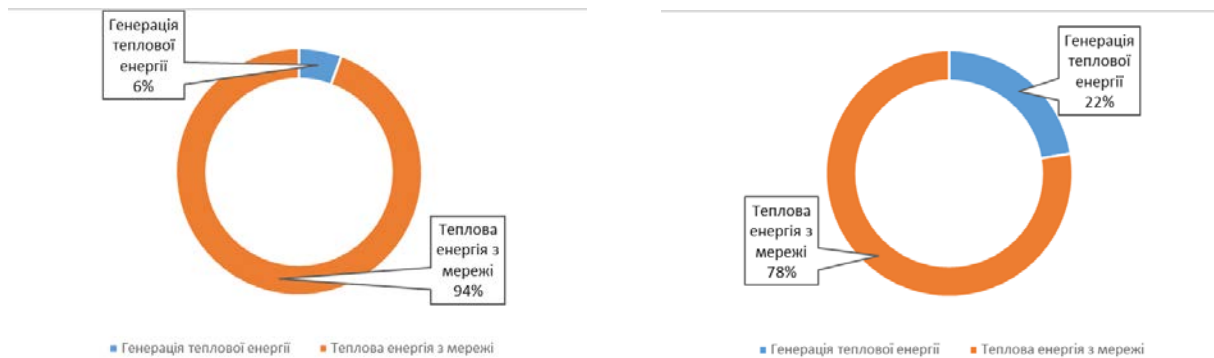


Рис. 6. Потенціал заміщення споживання теплової енергії за рахунок ВДЕ (сонячні колектори на ГВП): а) фактичний сценарій, б) покращений запропонований сценарій

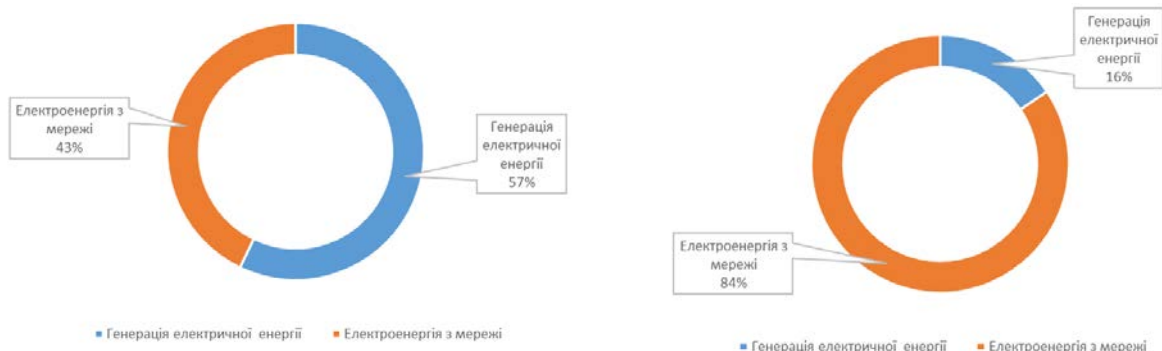


Рис. 7. Потенціал заміщення споживання електричної енергії за рахунок ВДЕ (дахова сонячна електростанція): а) фактичний сценарій, б) покращений запропонований сценарій

Висновки. В статті наведено дослідження сценаріїв підвищення рівня енергетичної ефективності та інтеграції ВДЕ для громадської будівлі у м. Київ з використанням спеціалізованого програмних продуктів для динамічного енергетичного моделювання будівель (DesignBuilder/EnergyPlus) та нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії (PV*SOL premium, T*SOL). Розглядалися чотири сценарії для будівлі: фактичний, базовий, запропонований та покращений запропонований. Запропонований сценарій передбачав дотримання поточних вимог до характеристик оболонки будівлі та впровадження рекуперації теплоти в системах вентиляції, в той час як покращений запропонований – покращення опору теплопередачі на 20% у порівнянні з вимогами, встановлення більш ефективної системи вентиляції з рекуперацією та впровадження ВДЕ на потреби ГВП та електроспоживання. В результаті впровадження заходів, що передбачені в запропонованому сценарії, споживання кінцевої енергії може зменшитися на 58,6% у порівнянні з базовим випадком, в той час як покращений запропонований сценарій може збільшити ці показники до 62,6%. Коефіцієнт заміщення теплової енергії за рахунок ВДЕ може скласти 22%, для електричної – 16% (покращений запропонований сценарій).

В подальшому планується детальне дослідження характеристик оболонки будівлі з врахування теплопровідних включень та їх вплив на енергетичні характеристики будівлі.

References

Література

1. Pro enerhetychnu efektyvnist budivel: Zakon Ukrainy [On energy efficiency of buildings: Law of Ukraine dated June 22, 2017 No. 2118-VIII]. *Holos Ukrainy*, 22/07/2017, № 134 [in Ukrainian].
1. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22.06.2017 р. №2118-VIII. *Голос України*. 22.07.2017. № 134.
2. DSTU 9190:2022. Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannia pid chas opalennia, okholodzhennia, ventyliatsii, osvittlennia ta hariachoho vodopostachannia [Energy Efficiency of Buildings. Calculation Method of Energy Consumption for Heating, Cooling, Ventilation, Lighting, and Hot Water Supply]. Kyiv: State Enterprise "UkrNDNC". 199 p. [in Ukrainian].
2. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. На заміну ДСТУ Б А.2.2-12:2015; чинний від 2023-03-01. Вид. офіц. Київ: ДП "УкрНДНЦ", 2022. 199 с.
3. DBN V.2.6-31:2021. Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel [Thermal Insulation and Energy Efficiency of Buildings]. Kyiv: State Enterprise "Ukrarhbudinform". 23 p. [in Ukrainian].
3. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. На заміну ДБН В.2.6-31:2016; чинний від 2022-09-01. Вид. офіц. Київ: ДП "Укрархбудінформ", 2021. 23 с.
4. Pro zatverdzhennia Minimalnykh vymoh do enerhetychnoi efektyvnosti budivel: nakaz Ministerstva rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy [Approval of Minimum Requirements for Energy Efficiency of Buildings: Order of the Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine dated 27.10.2020 № 260]. *Ofitsiinyi visnyk Ukrainy = Official Gazette of Ukraine*, 2021, № 1, P. 408 [in Ukrainian].
4. Про затвердження Мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель: наказ Міністерства розвитку громад та територій України від 27.10.2020 р. № 260. *Офіційний вісник України*. 2021. № 1. С. 408.
5. DBN V.2.5-67:2013. Opalennia, ventyliatsiia ta kondytsiuvannia [Heating, Ventilation, and Air Conditioning]. Kyiv: Ukrarhbudinform. 149 p. [in Ukrainian].
5. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціювання. Чинний від 2014-01-01. Вид. офіц. Київ: ДП "Укрархбудінформ", 2013. 149 с.
6. DSTU_N B A.2.2.5:2007. roektuvannia. Nastanova z rozroblennia ta skladannia enerhetychnoho pasporta budynkiv pry novomu budivnytstvi ta rekonstruktsii
6. ДСТУ_Н Б А.2.2.5:2007. Проектування. Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорта будинків при

- [Designing. Guidelines for the Development and Compilation of Energy Passports of Buildings for New Construction and Reconstruction]. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction, Housing and Communal Services of Ukraine. 44 p. [in Ukrainian].
7. DSTU B EN ISO 13790:2011. Enerhoefektyvnist budivel. Rozrakhunok enerhospozhyvannia pry opalenni ta okholodzhenni [Energy Efficiency of Buildings. Calculation of Energy Consumption for Heating and Cooling]. Kyiv: NDIKB. 229 p. [in Ukrainian].
8. Buyak, N., Deshko, V., Bilous, I., Gureev, M., Holubenko, O. (2020). Assessment of the window replacement influence on building energy consumption and human thermal comfort on the basis of dynamic modeling. *Refrigeration Engineering and Technology*, 55(5–6), 282–292. <https://doi.org/10.15673/ret.v55i5-6.1656>.
9. Bilous, I., Deshko, V., Buyak, N., Sapunov, A. (2024). Vplyv zatinnennia vikon na enerhopotrebu ta riven teplovoho komfortu v litnii period dlia doshkilnoho navchalnoho zakladu [Influence of Window Shading on Energy Consumption and Thermal Comfort Level in the Summer Period for a Preschool Educational Institution]. *Refrigeration Engineering and Technology*, 59(4). DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i4.2734> [in Ukrainian].
10. DOE-2. Building Energy Use and Cost Analysis Tool. URL: <http://doe2.com/DOE2/index.html>.
11. DOE-2. eQUEST the Quick Energy Simulation Tool. URL: <https://www.doe2.com/equest/>
12. Crawley, D. B., Lawrie, L. K. et al. (2001). EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33, 319–331.
13. Crawley, D. B., Lawrie, L. K. et al. (2001). EnergyPlus: new capabilities in a whole-building energy simulation program. *Seventh International IBPSA Conference* (August 13-15, 2001, Rio de Janeiro).
14. IDA ICE Simulation Software. URL: <https://www.equa.se/en/ida-ice>.
15. IES VE Simulation Software. URL: <https://www.iesve.com/software/virtual-environment>.
16. DesignBuilder Software Package. URL: <https://designbuilder.co.uk/software/product-overview>.
17. DSTU-N B V.1.1–27:2010. Budivselna klimatohiia [Building Climatology]. Kyiv: Ukrarhbudinform. 123 p. [in Ukrainian].
18. Deshko, V. I., Sukhodub, I. O., Serdechny, P. Y. (2019). Vykorystannia enerhetychnoho modeliuvannia budivel pry novomu budivnicstvi ta rekonstrukcii. Uvedeno vperше; чинний від 2008.07.01. К.: Мінрегіонбуд України, 2008. 44 с.
7. ДСТУ Б EN ISO 13790:2011. Енергоефективність будівель. Розрахунок енергоспоживання при опаленні та охолодженні. На заміну ГОСТ 26629.85; чинний з 01.01.2013. К.: НДІБК, 2011. 229 с.
8. Buyak N., Deshko V., Bilous I., Gureev M., Holubenko O. Assessment of the window replacement influence on building energy consumption and human thermal comfort on the basis of dynamic modeling. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2020. No. 55 (5–6). P. 282–292. <https://doi.org/10.15673/ret.v55i5-6.1656>.
9. Білоус І., Дешко В., Буяк Н., Сапунов А. Вплив затінення вікон на енергопотребу та рівень теплового комфорту в літній період для дошкільного навчального закладу. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2024. № 59(4). <https://doi.org/10.15673/ret.v59i4.2734>.
10. Building Energy Use and Cost Analysis Tool. DOE-2. URL: <http://doe2.com/DOE2/index.html>.
11. eQUEST the QUick Energy Simulation Tool. DOE-2. URL: <https://www.doe2.com/equest/>
12. Crawley D. B., Lawrie L. K. et al. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*. 2001. Vol. 33. P. 319–331.
13. Crawley D. B., Lawrie L. K. et al. EnergyPlus: new capabilities in a whole-building energy simulation program. *Seventh International IBPSA Conference* (August 13-15, 2001, Rio de Janeiro).
14. IDA ICE Simulation Software. URL: <https://www.equa.se/en/ida-ice>.
15. IES VE Simulation Software. URL: <https://www.iesve.com/software/virtual-environment>.
16. DesignBuilder Software Package. URL: <https://designbuilder.co.uk/software/product-overview>.
17. ДСТУ-Н Б В.1.1–27:2010. Будівельна кліматологія: чинний від 2011-11-01. Вид. офіц. Київ: Укрархбудінформ, 2011. 123 с.
18. Дешко В. І., Суходуб І. О., Сердечний П. Ю. Використання енергетичного

rozrobtsi proektiv z pidvyshchennia enerhoefektyvnosti [Using Building Energy Modeling in Projects for Increasing Energy Efficiency]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Seriia Tekhnichni nauky = Bulletin of Kyiv National University of Technologies and Design. Technical Sciences Series*, 4(136), 86–96 [in Ukrainian].

19. Pro zatverdzhennia Metodyky vyznachennia enerhetychnoi efektyvnosti budivel: nakaz Ministerstva rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy [Approval of the Methodology for Determining the Energy Efficiency of Buildings: Order of the Ministry of Regional Development, Construction, and Housing and Communal Services of Ukraine dated 11.07.2018 № 169]. *Ofitsiyni visnyk Ukrainy = Official Gazette of Ukraine*, 2018, № 55, P. 301 [in Ukrainian].

модельовання будівель при розробці проєктів з підвищення енергоефективності. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки*. 2019. № 4 (136). С. 86–96.

19. Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель: наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 р. № 169. *Офіційний вісник України*. 2018. № 55. С. 301.

SUKHODUB IRYNA

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Department of Heat and Alternative Power Engineering,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-5895-1306>
Scopus Author ID: 57140834000
ResearcherID: I-9788-2017
E-mail: ira_krot@ukr.net*

SERDECHNYI PAVLO

*Postgraduate,
Department of Heat and Alternative Power Engineering,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9557-6800>
E-mail: p.serdechnyi@gmail.com*

SUKHODUB I. O., SERDECHNYI P. Yu.

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

ANALYSIS OF SCENARIOS FOR INCREASING THE LEVEL OF ENERGY EFFICIENCY OF PUBLIC BUILDINGS WITH INTEGRATION OF RES

Purpose. *The study aims to investigate projects aimed at increasing the level of energy efficiency of public buildings using specialized software for dynamic energy modeling, DesignBuilder/EnergyPlus, for various levels of energy efficiency and integration of non-traditional and renewable energy sources.*

Methodology. *In the process of researching the stated problem, the current regulatory framework of Ukraine, which describes and regulates approaches to assessing the energy efficiency of buildings and available software complexes, were analyzed. Proven specialized software for dynamic energy modeling of buildings (DesignBuilder/EnergyPlus) and non-traditional and renewable energy sources (PVSOL premium, TSOL) were used.*

Findings. *During the research work, projects aimed at increasing the level of energy efficiency of a public building using different scenarios/levels of energy efficiency and integration of non-traditional and renewable energy sources were analyzed. The following scenarios were considered: actual, baseline, proposed, and enhanced proposed. For each scenario, indicators of final and primary energy consumption for heating, cooling, lighting, equipment, fans and pumps, hot water supply, as well as CO₂ emissions and the potential for energy substitution from RES were analyzed. As a result of the implementation of measures provided for in the proposed scenario, the consumption of final energy can decrease by 58.6% compared to the baseline case, while the enhanced proposed scenario can increase these indicators to 62.6%. The coefficient of substitution of thermal energy by RES can be 22%, for electricity – 16% (enhanced proposed scenario).*

Scientific novelty. Dynamic energy modeling was used to calculate the level of energy efficiency of a public building for different scenarios, and modeling of the integration of non-traditional and renewable energy sources when replacing thermal and electrical energy was conducted.

Practical value. As a result of the conducted research, the potential for saving final and primary energy, CO₂ emissions when implementing various scenarios of projects aimed at increasing the level of energy efficiency and integrating RES was determined, allowing to make informed technical decisions during the comprehensive modernization of public buildings in Ukraine.

Keywords: building energy efficiency; building energy modeling; dynamic models; renewable energy sources; DesignBuilder/EnergyPlus.