

ЕНЕРГЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ СУЧАСНОЮ БУДІВЛЕЮ ГУРТОЖИТКУ УНІВЕРСИТЕТУ ЗА РІЗНИМИ СЦЕНАРІЯМИ МОДЕРНІЗАЦІЇ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ

Будинки є найбільшим споживачем енергії в Європі. Тому будівельний сектор має вирішальне значення для досягнення енергетичних і кліматичних цілей ЄС. Перехід на будівництво будівель з майже нульовим рівнем споживання енергії (NZEB) передбачений Директивами Євросоюзу, де всі нові будівлі зводяться за цим стандартом з 2020 року, що передбачає обов'язкове впровадження нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії (НВДЕ). Підвищення енергоефективності існуючого фонду будівель до мінімальних вимог технічно можливе, але широке впровадження подібних проєктів потребує фінансової та організаційної підтримки, що закладено у довгострокові плани дій і стратегії модернізації будівельного фонду як в ЄС, так і в Україні. На противагу цьому, питання підвищення енергоефективності термомодернізованих та новозведених будівель все ще потребує пошуку нових рішень та технічного відпрацювання сценаріїв їх реалізації, особливо зважаючи на прийняті Україною міжнародні зобов'язання, в т.ч. щодо збільшення кількості NZEB будівель. Для залучення фінансування на комплексні проєкти модернізації потрібно проводити енергетичний аудит та виконувати детальні розрахунки технічної і економічної доцільності впровадження комплексу заходів з підвищення енергоефективності за різними сценаріями. Такі багатоваріантні розрахунки варто проводити за допомогою моделювання енергоспоживання будівель з урахуванням особливостей експлуатації будівель, характеристик огорожень, інженерних систем та джерел енергозабезпечення. У роботі на прикладі будівлі сучасного гуртожитку досліджуються сценарії подальшої енергоефективної модернізації будівлі у напрямку до NZEB. Дане питання є актуальним, адже з часом частка термомодернізованих будівель лише зростатиме. Це призводить до необхідності розробки рішень суттєвих енергоефективних поліпшень чи впровадження відновлюваних джерел енергії для забезпечення відповідності вимогам.

Метою роботи є аналіз можливостей підвищення енергоефективності будівлі новозбудованого гуртожитку університету КПІ ім.Ігоря Сікорського із застосуванням спеціалізованих програмних продуктів для розрахунків питомого енергоспоживання, визначення класу енергоефективності за різними сценаріями модернізації з використанням відновлюваних джерел енергії. Методи дослідження: метод порівняльного аналізу, динамічне моделювання, техніко-економічні розрахунки з використанням програмного забезпечення DesignBuilder, PVSol Premium, GeoTSol, MS Excel. Розглянуто відповідні нормативні документи України та ЄС, літературні джерела, статистичні дані та звіти щодо об'єкту дослідження.

Ключові слова: гуртожиток, моделювання енергоспоживання, сонячні панелі, теплові насоси.

Вступ

Будівельний сектор є великим споживачем енергоресурсів як в ЄС, так і в Україні. В ЄС прийнято план дій з реконструкції будівель та скорочення викидів, націлений на досягнення фондом будівель у ЄС кліматичної нейтральності до 2050 р. [1]. Перехід на будівництво будівель NZEB передбачений Директивами Євросоюзу, де всі нові будівлі зводяться за цим стандартом з 2020 року. Щоб підвищити енергетичну ефективність будівель, ЄС створив законодавчу базу, яка включає Директиву про енергетичну ефективність будівель [2] та Директиву про енергоефективність. Нові ініціативи в ЄС передбачають впровадження ZEB до 2030 року [3]. Питання підвищення енергоефективності у світі давно не розглядається як окреме завдання, а є необхідністю для виконання кліматичних зобов'язань міжнародної спільноти. Україна спрямована на адаптацію багатьох положень стратегії Європейський зелений курс (European Green Deal), включаючи декарбонізацію. Відповідно до Концепції зеленого енергетичного переходу України до 2050 року, визначальними напрямками «зеленого переходу» стають саме енергетичні (енергоефективність і відновлювані джерела енергії, посилення електрифікації різних галузей економіки, зменшення використання технологій на базі викопних видів палива) [4]. Відбувається гармонізація нормативно-правової бази України з законодавством ЄС, впроваджуються будівельні норми і стандарти.

Вимоги до енергоефективності будівель постійно зростають та переглядаються, тому для вже термомодернізованих та новозведених будівель існує потреба у пошуку нових рішень та технічного відпрацювання сценаріїв їх реалізації. Питання підвищення енергоефективності існуючого фонду будівель

в Україні до мінімальних вимог нормативних документів технічно вирішені і їх широке впровадження потребує фінансової та організаційної підтримки. На противагу цьому, питання підвищення енергоефективності термомодернізованих та новозведених будівель все ще потребує пошуку нових рішень та технічного відпрацювання сценаріїв їх реалізації. Новозбудовані або термомодернізовані об'єкти у прийнятті рішень подальшого підвищення їх енергоефективності мають свої особливості [4,5]:

- наявне утеплення огорожувальних конструкцій (додаткове утеплення для підвищення теплозахисту вище нормативних вимог, як правило є недоцільним з економічної та технічної точок зору);

- розміщення нового обладнання в обмежених габаритах або потреба спорудження додаткових прибудов для його розміщення;

- використання існуючих інженерних комунікацій, що не розраховані на роботу в енергоефективному режимі (високотемпературні опалювальні прилади, відсутність каналів вентиляції).

Тому основною сферою прикладання зусиль з підвищення енергоефективності таких будівель є запровадження відновлюваних джерел енергії для забезпечення функціонування будівлі, а також заходів з забезпечення ефективної експлуатації інженерних систем та обладнання [4-6].

Для аналізу показників енергоспоживання будівель доцільним є застосування енергетичного моделювання [7] для вибору технічних рішень під час реалізації проєктів модернізації. Для вибору нетрадиційних і відновлювальних джерел фахівці застосовують спеціалізовані програмні продукти [8,9].

Метою даного дослідження є оцінювання можливостей підвищення енергоефективності будівлі новозбудованого студентського гуртожитку, зокрема, використання відновлюваних джерел енергії для теплопостачання будівлі, а також аналіз техніко-економічних та екологічних переваг модернізації за різними сценаріями модернізації у напрямку до будівель з нульовим споживанням енергії. Дослідження проводилося в рамках виконання магістерської дисертації [5].

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання: проведення енергетичного дослідження будівлі гуртожитку із оцінкою існуючого стану; аналіз можливостей підвищення показників енергоефективності будівлі; створення моделі будівлі в DesignBuilder з різними рівнями теплозахисту; динамічне моделювання з оцінкою потреби будівлі в опаленні при різних рівнях теплового захисту; визначення класу енергоефективності; оцінка можливостей використання відновлюваної енергії, розробка стартап-проєкту.

Об'єкт дослідження – будівля гуртожитку №5 КПІ ім. Ігоря Сікорського, розміщена за адресою м.Київ, вул. Олекси Тихого, 5.

Предмет дослідження – процеси енергоспоживання та підвищення енергоефективності будівлі, в тому числі з використанням відновлюваних джерел енергії.

Методи дослідження: порівняльний аналіз, SWOT-аналіз; розрахунково-аналітичний та статистико-економічний методи; для виконання розрахунків використано програмне забезпечення: DesignBuilder, PVSol Premium, GeoTSol, MS Excel. Розглянуто відповідні нормативні документи України та ЄС, літературні джерела, статистичні дані та звіти щодо об'єкту дослідження.

Наукова новизна роботи полягає в дослідженні різних підходів подальшої енергомодернізації новозбудованих будівель, з застосуванням динамічного енергетичного моделювання за різними сценаріями термомодернізації із застосуванням НВДЕ у напрямку до NZEB будівель.

Матеріал і результати досліджень

Дослідження виконувалося в декілька етапів: енергообстеження гуртожитку, в тому числі за допомогою приладового забезпечення, аналіз даних і аналітичні розрахунки в MS Excel, SWOT-аналіз, динамічне моделювання в DesignBuilder; моделювання сонячних панелей і теплових насосів в PVSol Premium, GeoTSol. Запропоновано стартап-проєкт за результатами дослідження.

Енергетичне обстеження будівлі гуртожитку

Студентський гуртожиток для аспірантів та іноземних студентів введено в експлуатацію у 2021 році; вже після цього в Україні прийнято нові вимоги до теплозахисту та рівня енергоефективності будівель [10-12]. Гуртожиток обладнаний кімнатами на три особи й кімнатами сімейного типу, кількість квартир - 128. Будівля гуртожитку збудована каскадом висотністю 9 та 11 поверхів та має цокольний та технічний поверхи; загальна площа будівлі складає 8667 м², опалювальний об'єм - 23490 м³. На цокольному поверсі будівлі розміщено укріття, господарські кімнати, приміщення індивідуального тепlopункту, електрощитової, вузла вводу холодного водопостачання. На першому поверсі розміщені адміністративні приміщення та кафетерій. Теплові навантаження: на опалення 0,189 Гкал/год, на припливно-витяжну вентиляцію 0,022 Гкал/год, на ГВП 0,089 Гкал/год. Система охолодження відсутня. В ІТП встановлено вузол обліку теплової енергії Multical-603, передбачене дистанційне знімання показів з тепло лічильника через GSM модем. Вузол обліку теплової енергії забезпечує облік на потреби опалення, ГВП та вентиляції. ІТП обладнано апаратом магнітної обробки води. Система опалення залежна, двотрубна з поквартирним розведенням на секційні радіатори, з авторегулюванням в сучасному тепловому пункті. Проєктом передбачено встановлення автоматичних регуляторів температури на радіаторах, однак такі відсутні на об'єкті. Цокольний поверх будівлі опалювальний [5,6].

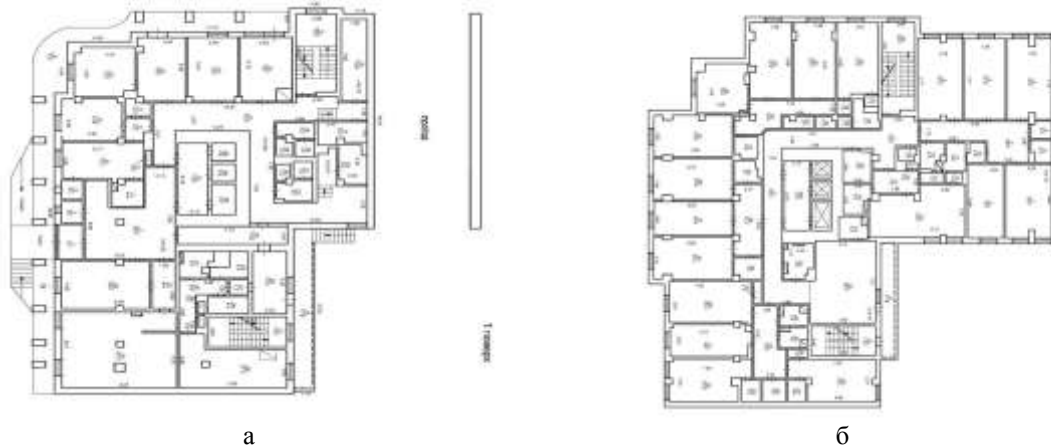


Рисунок 1 – План будівлі: а) 1 поверх, б) 2-11 поверхи [5].

Будівля гуртожитку підключена до ТП 3642. За ступенем надійності електропостачання будівля відноситься до II категорії. Напруга підключення до зовнішніх мереж складає 380В. Система внутрішнього електропостачання трифазна з глухозаземленою нейтраллю. Внутрішня проводка в будівлі виконана мідним кабелем марки ВВГнг 3*2,5 (силове обладнання) та 3*1,5 (освітлювальне обладнання). На об'єкті реалізовано технічний облік електроспоживання з використанням електронних електролічильників типу НІК. У якості освітлювальних приладів використано світлодіодні світильники для місць загального користування та світильники з енергозберігаючими лампами для житлових кімнат. Для забезпечення економії електричної енергії в місцях загального користування передбачене використання датчиків руху.

Структурний розподіл теплоспоживання в помісячному розрізі наведено на рис.2.

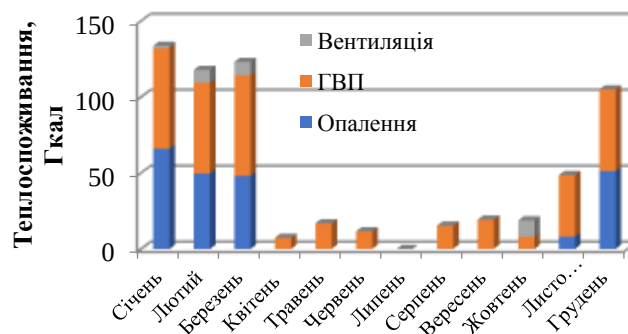


Рисунок 2 – Помісячне теплоспоживання гуртожитку №5

Визначення теплотехнічних характеристик та енергоспоживання будівлі

Для визначення енергопотребі та енергоспоживання використовується ДСТУ 9190:2022 [11], при цьому враховуються зовнішні кліматичні умови [12] і умови внутрішнього мікроклімату, конструктивні особливості огорожень, умови експлуатації і аналізуються тепловтрати через огорожувальні конструкції, вентиляцію, інфільтрацію повітря, теплові надходження від сонця і внутрішніх джерел; враховуються характеристики інженерних систем та ефективність роботи генеруючого обладнання.

Основні показники енергетичних втрат будівлі визначаються на основі теплопередачі непрозорих (стіни, дах, підлога на ґрунті) та прозорих (вікна, балконні двері) огорожень.

Геометричні характеристики, розміри і параметри інженерних мереж, характеристики обладнання обиралися за проектною документацією і уточнювалися під час енергетичного обстеження. Опір теплопередачі світлопрозорих огорожень прийнято рівним 0,75 (м²·К)/Вт. Склад стін (основний фасад вище 2 поверху): облицювальна мозаїчна штукатурка, мінеральна вата 150 мм, керамічна цегла 300 мм, штукатурка. Склад підлоги цокольного поверху: облицювальна плитка на клею, армована стяжка, гідроізоляція, технотекс, обмазувальна бітумна гідроізоляція, монолітна бетонна заливка товщиною 1300 мм. Склад перекриття над проїздом та над виступаючою частиною другого поверху з боку центрального фасаду: чистова підлога, армована стяжка, поліетиленова плівка, монолітна бетонна плита 200 мм, мінераловатні плити товщиною 150 мм, багатшарова декоративна штукатурка. Узагальнені коефіцієнти теплопередачі трансмісією H_D , H_U визначалися за методикою [11], характеристики матеріалів обрано із [13]. Хоча будівля досить сучасна, проте на сьогоднішній день приведені опори теплопередачі окремих існуючих огорожень не відповідають діючим нормативним вимогам [10], див. табл. 1.

Таблиця 1 – Узагальнені коефіцієнти теплопередачі трансмісії

№з/п	Тип ОК	Огороджувальна конструкція	Площа, Аі, м²	Приведений опір теплопередачі, м²·К/Вт	U-фактор, Вт/(м²·К)	коефіцієнти		Н _{х,н} , Вт/К
						b _{т,х,н}	b _{т,х,с}	
1	Зовнішні стіни цокольного поверху тип - 1	Зовнішні стіни (без вікон), в тому числі орієнтовані на:	285,8605	4,906	0,204	1,0	1,0	58,3
		Пн-Сх	77,969					
		Пд-Сх	64,925					
		Пд-Зх	79,8975					
		Пн-Зх	63,069					
2	Зовнішні стіни першого поверху тип - 2	Зовнішні стіни (без вікон), в тому числі орієнтовані на:	334,48	3,440	0,291	1,0	1,0	97,2
		Пн-Сх	106,179					
		Пд-Сх	79,2					
		Пд-Зх	83,173					
		Пн-Зх	65,928					
3	Зовнішні стіни другого і решти поверхів тип - 3	Зовнішні стіни (без вікон), в тому числі орієнтовані на:	3680,209	3,894	0,257	1,0	1,0	945,0
		Пн-Сх	977,78					
		Пд-Сх	946,8					
		Пд-Зх	862,843					
		Пн-Зх	892,786					
4	Перекриття над проїздом тип - 1	перекриття над проїздом	49,7122	4,609	0,217	1,0	1,0	11,61
5	Перекриття над проїздом тип - 2	перекриття над проїздом	201,4	3,690	0,271	1,0	1,0	44,05
6	Дахове перекриття	горищне перекриття неопалюваного горища	735,0	5,986	0,167	0,9	0,0	121,41
7	Вікна	Вікна, в тому числі орієнтовані на:	418,748	0,700	1,429	1,0	1,0	598,2
		Пн-Сх	18,571					
		Пд-Сх	89,1					
		Пд-Зх	155,207					
		Пн-Зх	155,87					
8	Двері	Двері, в тому числі орієнтовані на:	107,691	0,700	1,429	1,0	1,0	153,8
		Пн-Сх	82,477					
		Пд-Сх	0					
		Пд-Зх	9,557					
		Пн-Зх	15,657					
9	Підлога	Підлога на ґрунті	559,7	7,912	0,126			153,8
							$\sum H_{x,n}$	2100,4

Енергоспоживання на потреби опалення, охолодження, вентиляції, ГВП, освітлення розраховано за методикою стандарту ДСТУ 9190:2022 [11]. Під час розрахунку прийнято умови мікроклімату: внутрішня розрахункова температура 20°C, в черговому режимі – 17°C (на опалення), 26°C (на охолодження); графік опалення та охолодження - 112 год/тиждень. Величину повітрообміну при вентиляції, з урахуванням інфільтрації, прийнято на рівні мінімального значення кратності повітрообміну за [14]: $n=0,8 \text{ год}^{-1} \square 0,8 = 0,64 \text{ год}^{-1}$. Загальний показник питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні:

$$EP_{\text{use}} = (EP_{H,\text{use}} + EP_{C,\text{use}}) / A_f = (521809,57 + 5067,21) / 8667 = 60,79 \text{ кВт} \square \text{год} / \text{м}^2.$$

Граничне значення енергоспоживання 75 кВт·год/м² [14], отже будівля гуртожитку має клас енергоефективності – С. Співвідношення трансмісійних та вентиляційних тепловтрат (31%:69%).

Результати розрахунку тепловтрат наведено в табл.2.

Таблиця 2 – Результати розрахунку тепловтрат через огорожувальні конструкції за ДСТУ 9190:2022

Найменування	кВт·год/рік	%
Тепловтрати через стіни	93241	52
Тепловтрати через перекриття	15003	9
Тепловтрати через підлогу на ґрунті	5993	3
Тепловтрати через вікна	50685	29
Тепловтрати через двері	13035	7

Хоча теплотехнічні характеристики огорожень не відповідають новим вимогам, економічно не доцільно проводити повторне утеплення та заміну вікон даної будівлі, оскільки клас енергоефективності залишається в межах допустимих норм. Доцільніше оцінити можливість використання відновлюваних джерел енергії, а також провести заходи для автоматичного регулювання процесів енергоспоживання, включаючи системи опалення, ГВП, освітлення. Також доцільно розглянути захід зі встановлення припливно-витяжної вентиляції з рекуперацією теплоти витяжного повітря, зокрема в приміщеннях місць загального користування, оскільки втрати з вентиляцією складають майже 70% від загальних тепловтрат.

Енергетичне моделювання різних сценаріїв

Для визначення найкращих комбінацій сценаріїв енергоефективної модернізації будівлі проведено енергетичне моделювання будівлі за допомогою програмного продукту DesignBuilder. Програма дозволяє виконати енергетичний аналіз, а також надає цифрове представлення всіх фізичних і функціональних елементів будівлі у 3D моделі [5]. На рис. 3 показано зовнішній вигляд побудованої моделі. Досліджувані заходи стосуються в першу чергу енергоефективної модернізації інженерних систем будівлі.

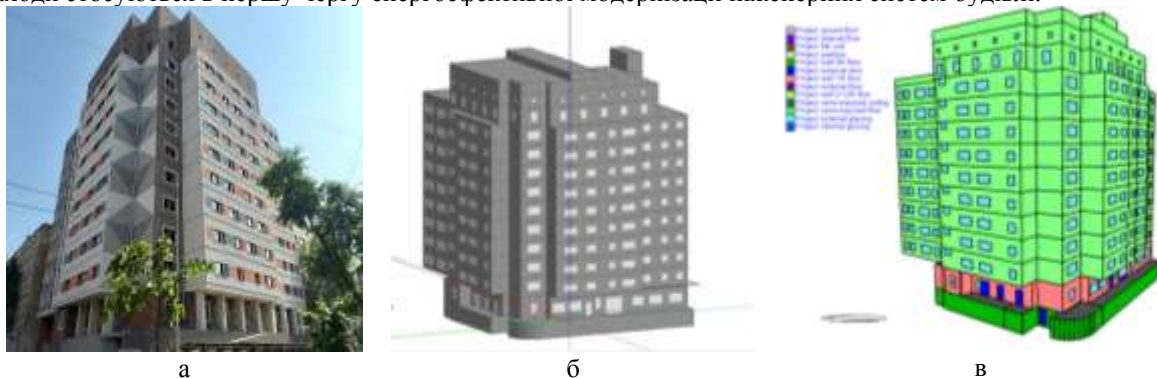


Рисунок 4 – Моделювання енергетичних характеристик в програмному продукті DesignBuilder
а) зовнішній вигляд фасаду будівлі; б) 3D модель; в) виділення окремих поверхонь огорожень

Запропоновано розглянути наступні варіанти енергоефективної модернізації будівлі:

- встановлення: місцевого авторегулювання подачі теплоносія на прилади системи опалення; запровадження графіку автоматичного регулювання подачі теплоносія до системи опалення; системи віддаленого моніторингу енергетичних та температурних параметрів у будівлі;
- влаштування рекуперації теплоти витяжного повітря у будівлі;
- використання теплового насоса для часткового покриття потреби в охолодженні та опаленні;
- встановлення фотоелектричних панелей на даху будівлі для часткового покриття потреби в електричній енергії.

У програмному середовищі DesignBuilder було створено базову (baseline) модель будівлі гуртожитку з фактичними характеристиками інженерних систем і огорожувальних конструкцій та умов експлуатації, що відповідає нормативам (оскільки відсутня достатньо повна інформація періоду фактичної експлуатації будівлі). Результати моделювання енергопотреб та енергоспоживання будівлі для базової та запропонованої моделей у DesignBuilder наведено в табл. 3. Клас енергоефективності наведено з ілюстративною метою для порівняння сценаріїв, оскільки методика розрахунку в DesignBuilder [7] дещо відрізняється від методики ДСТУ [11], за результатами застосування якої має визначатися клас (зокрема, в програмному продукті опалювальна площа визначається за зовнішніми обмірами).

Модель запропонованого енерговикористання розглядає такі сценарії енергоефективної модернізації:

Сценарій 1. Запровадження графіку регулювання опалення та системи енергомоніторингу;

Сценарій 2. Впровадження рекуперації теплоти витяжного повітря;

Сценарій 3. Впровадження одночасно графіку регулювання опалення та рекуперації теплоти витяжного повітря.

Таблиця 3 – Результати моделювання у програмному продукті DesignBuilder

№	Найменування показника/сценарію	Базова модель, кВт·год/рік	Пропонована модель, кВт·год/рік		
			Сценарій 1	Сценарій 2	Сценарій 3
1	Енергопотреба для опалення, кВт·год/рік	306 601,67	299 120,08	72 357,95	60 446,13
2	Енергопотреба для охолодження, кВт·год/рік	96 223,32	96 223,32	95 658,38	95 658,25
3	Енергопотреба для гарячого водопостачання, кВт·год/рік	256 414,11	256 414,11	256 414,11	256 414,11
4	Питоме енергоспоживання на опалення, охолодження, EP_{use} , кВт·год/м ²	46,29	45,32	15,69	14,13
5	Δ (від базової моделі), %	-	-2,11	-66,12	-69,48
6	Клас енергоефективності	B	B	A	A

Аналіз можливостей використання нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії

В таблиці 4 для досліджуваної будівлі проаналізовано принципову можливість застосування відновлюваних джерел енергії для енергопостачання будівлі гуртожитку, отриманої з різних джерел.

Таблиця 4 – Види відновлюваних джерел та можливість їх застосування в гуртожитку №5

№з/п	Вид відновлюваного джерела енергії	Наявність можливості застосування	Потенціал використання	Примітка
1	2	3	4	5
1	Сонячна енергія	✓	Сонячні панелі та сонячні колектори	Розміщення на: даху будівлі, вертикальних огорожувальних конструкціях
2	Вітрова енергія	✓	Вітро-електростанція	Розміщення на: даху будівлі
3	Аеротермальна енергія	✓	Теплові насоси повітря/повітря, повітря/вода	Розміщення: - зовнішні блоки – на даху будівлі - внутрішні блоки – стельова система опалення/охолодж. першого поверху та місць загального користування.
4	Геотермальна енергія	✗	✗	Щільність міської забудови не дозволяє розмістити достатній ґрунтовий контур
5	Гідротермальна енергія	✗	✗	Впровадження потребує влаштування низки свердловин та отримання ліцензії на користування надрами
6	Енергія біомаси (за винятком деревини)	✗	✗	Розміщення будівлі в центральному районі міста зі щільною забудовою, а також близькість розміщення до залізниці, що несе екологічне навантаження є екологічною перешкодою для створення потужностей на біомасі. Додатково, транспортна логістика та необхідність створення запасу палива є перешкодою до позитивного рішення
7	Енергія газу з органічних відходів	✗	✗	Відсутня достатня кількість відходів. Хоча такий вид ресурсу може бути розглянутий для університету цілому та міг би бути реалізований на одному з господарських майданчиків університету
8	Енергія газу каналізаційно-очисних станцій	✗	✗	Потребує погодження з ПрАТ «АК «Київводоканал». Власні очисні каналізаційні споруди відсутні
9	Енергія біогазів	✗	✗	✗
10	Гідроенергія	✗	✗	✗

Примітка: ✓ - існує можливість застосування; ✗ - відсутня можливість застосування

Зважаючи на аналіз можливості і доцільності застосування різних джерел відновлюваної енергії для досліджуваної будівлі розглядаються наступні сценарії:

Сценарій 4. Впровадження фотовольтаїчної системи на даху будівлі.

Сценарій 5. Впровадження теплонасосної системи повітря-повітря.

Сценарій 6. Впровадження фотовольтаїчної системи та теплонасосної системи повітря-повітря.

Для вказаних сценаріїв з відновлюваними джерелами енергії використано програмне середовище PVSol Premium (для моделювання фотоелектростанції) та GeoTSol (для моделювання системи з тепловими насосами). За базову модель були використані результати динамічного моделювання споживання з DesignBuilder.

У зв'язку з необхідністю отримання ліцензії, у разі продажу надлишку електроенергії в мережу, розглядається варіант створення автономної фотоелектричної системи, що задовольнятиме лише власний попит на електричну енергію. У випадку надлишку виробленої енергії вона резервуватиметься в акумуляторних батареях.

Фотоелектричну систему запропоновано розмістити на даху будівлі (66 модулів, див. рисунок 5). Оскільки по периметру даху влаштований парапет на висоту 1,5 м, то для уникнення затінення сонячні панелі необхідно підняти на висоту 1,5 м над дахом. Результати моделювання наведено в табл.

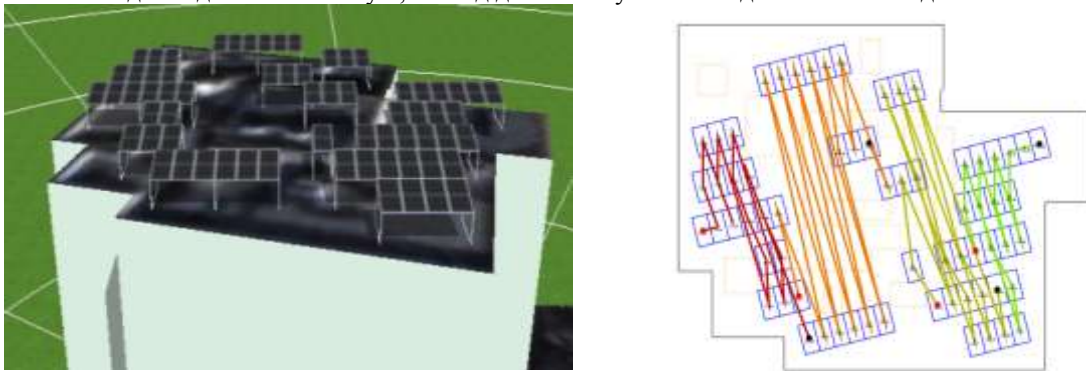


Рисунок 4 – Моделювання фотовольтаїчних систем
а) загальний вигляд розміщення сонячних панелей; б) план розміщення модулів

Таблиця 5 – Результати моделювання у PVSol Premium

PV система		Одиниця вимірювання
Потужність PV генератора	36,3	кВт·пік
Очікувана річна генерація PV генератора	28 614	кВт·год
Коефіцієнт продуктивності (PR)	89,6%	%
Уникнення викидів CO ₂ *	12 819	кг/рік
Рівень самодостатності		
Загальне електроспоживання будівлі	80 025	кВт·год/рік
Покрите мережею	51 894	кВт·год/рік
Рівень самодостатності	35,7	%

*Примітка: Під час розрахунку скорочення викидів використано перевідний коефіцієнт 0,448 тон/МВт·год (рекомендації Міжнародного енергетичного агентства IEA [16]).

В програмному комплексі GEOT*SOL проведено моделювання забезпечення потреби в тепловій енергії з використанням теплового насоса для двох варіантів: повітряний або ґрунтовий тепловий насос; визначений термін окупності заходу становить близько 15 років.

Для моделювання теплових насосів використано дані про річне теплоспоживання об'єктом для потреб опалення для базової моделі з DesignBuilder 310 Гкал. Відповідно до помісячних фактичних даних по теплоспоживанню для потреб вносимо дані до програми. У такому разі теплове навантаження системи складає 233 кВт. Керуючись цим значенням обираємо з бази даних програми повітряний тепловий насос Dimplex – Glen Dimplex Deutschland GmbH з номінальною тепловою потужністю 40 кВт, а також обираємо режим роботи з додатковим джерелом теплової енергії від централізованої мережі потужністю 220 кВт.

Керуючись значенням теплового навантаження будівлі обираємо з бази даних програми ґрунтовий тепловий насос Dimplex – Glen Dimplex Deutschland GmbH з номінальною тепловою потужністю 90 кВт, а також обираємо режим роботи з додатковим джерелом теплової енергії від централізованої мережі потужністю 150 кВт. Для роботи насоса в такому режимі потрібна наявність 35 свердловин глибиною 96м.

Таблиця 6 – Порівняння показників роботи теплових насосів за результатами моделювання

Найменування показника	Значення показника	
	Повітряний	Грунтовий
Теплопостачання від теплового насоса	96 367 кВт*год (27%)	234 831 кВт*год (65%)
Теплопостачання від додаткового джерела теплоти	264 343 кВт*год (73%)	125 879 кВт*год (35%)
SPF теплового насоса	3,53	4,5
SPF системи з тепловим насосом	1,58	2,8

Практичне впровадження ґрунтового колектора для даного об'єкту мало ймовірне через густину існуючої забудови, необхідність отримання для юридичних осіб дозволів на буріння свердловин тощо. Тому у якості рекомендації до впровадження запропоновано використовувати теплові насоси типу повітря-повітря з покриттям дефіциту в тепловій енергії від централізованого джерела.

Виконано техніко-економічну оцінку заходів з підвищення енергоефективності та обґрунтовано доцільність впровадження заходів за сценаріями 1 та 2, оскільки вони мають прийнятні терміни окупності (простий термін окупності близько 5,5 років) та забезпечують суттєву економію теплової енергії. Щодо заходів за сценарієм 4, то з економічних міркувань він є доцільним при значенні тарифу на електроенергію вище 15 грн/кВт*год. Захід за сценарієм 5 та 6, за діючими тарифами виявилися не рентабельними, оскільки мають термін окупності більше 15 років. До його розгляду варто повернутися після підвищення тарифів.

Стартап-проект: система віддаленого моніторингу

Ідея проекту полягає у створенні середовища для керування нерухомістю (Facility management). Продукт окрім властивостей збору, накопичення, аналізу інформації, управління обладнанням формує повноцінне місце енергоменеджера, а також може бути інтегроване до інших систем управління.

Мета– зменшення енергоспоживання шляхом створення сучасної системи енергоменеджменту, автоматизації збору, обробки, зберігання та представлення інформації відповідним службам у зручному для оцінки та прийняття рішень вигляді. Конкретна ціль проекту– створити систему віддаленого енергомоніторингу та управління енерговикористанням об'єктів та провести її пілотне впровадження в гуртожитку №5. Зручним доповненням продукту є мобільний додаток.

Ціннісні пропозиції, які пропонує стартап проект наступні:

- енергомоніторинг; моніторинг параметрів в середині приміщень та технологічних процесів (температура, CO₂, відновна вологість, тиск, витрата тощо);
- автоматизоване робоче місце енергоменеджера;
- керування нерухомістю (Facility management).

Споживча цінність стартап проекту полягає у наступному: покращення задоволення існуючих потреб щодо аналізу та моніторингу енергоспоживання; формування та задоволення нових потреб щодо керування нерухомістю включаючи повний цикл завдань Facility management з особливою увагою до питань енергетичного менеджменту. Нижче в табл. 7 представлено матрицю SWOT-аналізу.

Таблиця 5.4 – Матриця SWOT-аналізу

Сильні сторони (S): – сучасна ідея, відповідає Зеленому курсу ЄС, а також ЗУ «Про енергоефективність» – дозволяє скоротити витрати від 10% – може бути інтегрована з іншими системами/приладами/датчиками – підтримка клієнтів, мобільний додаток – власні датчики, бездротова технологія	Слабкі сторони (W): – вартість обладнання – невелика команда – потреба у додатковому навчанні членів команди – відсутність власної виробничої бази для збирання приладів
Можливості (O): – вихід на міжнародний ринок – розширення функціоналу	Загрози (T): – нестабільний курс гривні – невизначеність у зв'язку з військовим станом і затримка інвестицій міжнародних партнерів

Висновки: виконано енергообстеження будівлі гуртожитку університету та енергетичне моделювання енергоспоживання. Виявлено значний потенціал подальшої енергоефективної модернізації новозбудованих будівель в напрямку досягнення енергоефективності на рівні будівель з близьким до нульового енергоспоживання. Впровадження заходів призведе до скорочення теплоспоживання для потреб опалення, заміщення електричної енергії у системі електропостачання відновлювальними джерелами енергії. Зниження споживання енергоресурсів сприяє непрямому зменшенню викидів парникових газів на джерелі генерації енергії. Запропоновано створення інноваційного продукту з управління нерухомістю, що включає питання енергомоніторингу та керування інженерними системами.

Список використаної літератури

1. О.Гарасевич. Що треба знати про нову редакцію Директиви ЄС про енергетичну ефективність будівель. АЕМУ, 2024. Режим доступу: <https://enefcities.org.ua/novyny/scho-treba-znaty-pro-novu-redaktsiyu-dyrektyvy-yes-pro-energetychnu-efektyvnist-budivel/>
2. Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj>
3. П. Шамілов. Огляд вимог nZEB В Європі. Аналітичний звіт. – К.: Опора, 2024, 59 с. Режим доступу: https://rehouse.org.ua/sites/default/files/1.zvit_nzeb.pdf
4. Шевченко О.М., Шевченко Д.І. Енергетичне моделювання варіантів підвищення енергоефективності будівлі після термомодернізації/Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики. У 2-х т. : Матеріали XX Міжнар. наук.-практ. конф. молод. вчених і студ., м. Київ, 25-28 квітня 2023 р. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», с. 220-221.
5. Шевченко Д.І. Підвищення енергоефективності гуртожитку №5 КПІ ім. Ігоря Сікорського за рахунок використання енергії з альтернативних джерел / Магістерська дисертація за спец. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – К.: КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2023 – 171с. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/66590>
6. Шевченко Д.І., Шевченко О.М., Шовкалюк М.М. Моделювання енергоспоживання сучасної будівлі гуртожитку університету за різними сценаріями підвищення енергоефективності з використанням програмних засобів // Збірник наук. праць X Міжнародної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'24», [Київ, 26-27 листопада 2024 р.], с.167-169.
7. DesignBuilder Simulation + CFD Training Guide. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.designbuilder.co.uk/training/online-learning/tutorials>.
8. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Математичні моделі будівель для оцінки енергоспоживання. Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць. 2014. № 80. С. 68 – 72.
9. Онлайн калькулятор вироблення електричної енергії CEC Photovoltaic geographical information system. Режим доступу: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.
10. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель.
11. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання.
12. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія.
13. ДСТУ 9191:2022 Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель.
14. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція, кондиціонування
15. Про затвердження Мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 27.10.2020. №260. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20>.
16. CO2-Emission from Fuel Combustion 2016, pp. 122-124. Режим доступу: https://www.oecd-ilibrary.org/energy/co2-emissions-from-fuel-combustion-2016_co2_fuel-2016-en

O. Shevchenko¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0001-9304-5432

D. Shevchenko¹, Master student, ORCID 0009-0004-9048-5837

M. Shovkaliuk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-1898-3493

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

**ENERGY MODELING OF ENERGY CONSUMPTION BY A MODERN
UNIVERSITY BUILDING UNDER VARIOUS SCENARIOS OF ENGINEERING
SYSTEMS MODERNIZATION**

Buildings are the largest energy consumers in Europe. The construction sector is therefore crucial for achieving the EU's energy and climate goals. The transition to nearly zero-energy buildings (NZEB) is foreseen by the EU Directives, where all new buildings are to be built according to this standard from 2020, which requires the mandatory introduction of non-traditional and renewable energy sources (NVDE). Improving the energy efficiency of the existing building stock to the minimum requirements is technically possible, but the widespread implementation of such measures requires financial and organizational support, which is included in long-term plans and strategies for the modernization of the building stock in both the EU and Ukraine. In contrast, the issue of increasing the energy efficiency of thermally modernized and newly constructed buildings still requires the search for new solutions and technical development of their implementation scenarios, especially given the

international commitments adopted by Ukraine, including an increase in the number of NZEB buildings. To attract funding for complex modernization projects, it is necessary to conduct an energy audit and perform detailed calculations of the technical and economic feasibility of implementing a set of measures to increase energy efficiency under flawless scenarios. Such multivariate calculations should be carried out using modeling of building energy consumption, taking into account the features of building use, characteristics of enclosures, engineering systems and energy supply sources. In the work, scenarios for further energy-efficient modernization of the building towards NZEB are studied using the example of a modern dormitory building. This issue is relevant, since over time the share of thermally modernized buildings will only increase. This is necessary before the need to develop solutions for significant energy-efficient improvements or the introduction of renewable energy sources to ensure compliance with the requirements.

The method of work is the possibility of analyzing the increase in energy efficiency of buildings in a newly built dormitory of the KPI University. Igor Sikorsky using specialized software products for calculating specific energy consumption, determining the energy efficiency class according to general scenarios of modernization using renewable energy. Research methods: comparative analysis method, dynamic modeling, technical and economic calculations using DesignBuilder, PVSol Premium, GeoTSol, MS Excel software. Relevant regulatory documents of Ukraine and the EU, literary sources, statistical data and reports on the research object were considered.

Keywords: dormitory, energy consumption modeling, solar panels, heat pumps

References

1. O. Garasevych. What you need to know about the new version of the EU Directive on the Energy Performance of Buildings. AEMU, 2024. Access mode: <https://enefcities.org.ua/novyny/scho-treba-znaty-pro-novu-redaktsiyu-dyrektyvy-yes-pro-energetychnu-efektyvnist-budivel/>
2. Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj>
3. P. Shamilov. Review of nZEB requirements in Europe. Analytical report. – K.: Opora, 2024, 59 p. Access mode: https://rehouse.org.ua/sites/default/files/1.zvit_nzeb.pdf
4. Shevchenko O.M., Shevchenko D.I. Energy modeling of options for increasing the energy efficiency of a building after thermal modernization/Current problems of scientific support of energy. In 2 vols.: Materials of the XX International Scientific-Practical Conference of Young Scientists and Students, Kyiv, April 25-28, 2023 – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Publishing House “Polytechnics”, p. 220-221.
5. Shevchenko D.I. Increasing the energy efficiency of dormitory No. 5 Kyiv Polytechnic Institute Igor Sikorsky due to the use of energy from alternative sources / Master's thesis in speciality 141 Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2023 – 171p. Access mode: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/66590>
6. Shevchenko D.I., Shevchenko O.M., Shovkalyuk M.M. Modeling energy consumption of a modern university dormitory building according to different scenarios of increasing energy efficiency using software // Collection of scientific papers of the 10th International Conference “Energy Management: State and Development Prospects – PEMS’24”, [Kyiv, November 26-27, 2024], pp.167-169.
7. DesignBuilder Simulation + CFD Training Guide. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.designbuilder.co.uk/training/online-learning/tutorials>.
8. Deshko V.I., Bilous I.Yu. Mathematical models of buildings for energy consumption assessment. Building structures: Interdepartmental scientific and technical collection of scientific papers. 2014. No. 80. P. 68 – 72.
9. Online calculator of electric energy generation of photovoltaic power plant Photovoltaic geographical information system. Access mode: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.
10. DBN V.2.6-31:2021 Thermal insulation and energy efficiency of buildings
11. DSTU 9190:2022. Energy efficiency of buildings. Method for calculating energy consumption during heating, cooling, ventilation, lighting and hot water supply.
12. DSTU-N B V.1.1–27:2010. Protection against dangerous geological processes, harmful operational influences, and fire. Building climatology.
13. DSTU 9191:2022 Methods for selecting thermal insulation material for building insulation. Kyiv, 2022, 63 p.
14. DBN V.2.5-67:2013 Heating, ventilation, air conditioning.
15. On approval of the Minimum requirements for the energy efficiency of buildings: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine dated 10/27/2020. No. 260. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20>.
16. CO₂-Emission from Fuel Combustion 2016, pp. 122-124. Режим доступу: https://www.oecd-ilibrary.org/energy/co2-emissions-from-fuel-combustion-2016_co2_fuel-2016-en

Надійшла: 13.03.2025

Received: 13.03.2025