

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАКЕТІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ЗАХОДІВ ДЛЯ ГРОМАДСЬКИХ БУДІВЕЛЬ

Стаття присвячена проблематиці підвищення енергетичної ефективності громадських будівель, що утримуються за рахунок державного та/або місцевих бюджетів. Запропоновано застосування оптимізаційного моделювання для визначення оптимальних пакетів енергоефективних заходів за критерієм максимуму досягнутої економії паливно-енергетичних ресурсів. Апробація математичної моделі на реальних даних показала свою практичну цінність – у залежності від заданого бюджетного обмеження визначено оптимальні пакети енергоефективних заходів для громадських будівель (на прикладі м. Запоріжжя). За результатами обчислювальних експериментів виявлено енергоефективні заходи із найкращим та найгіршим співвідношеннями показників вартості впровадження та досягнутої економії паливно-енергетичних ресурсів. Показано вплив додаткових обмежень на формування оптимального пакету енергоефективних заходів для прийняття обґрунтованих та раціональних рішень щодо інвестування у проекти підвищення енергетичної ефективності громадських будівель.

Ключові слова: паливно-енергетичні ресурси, енергетична ефективність будівель, оптимізаційне моделювання, енергоефективні заходи.

Вступ. Підвищення енергетичної ефективності в усіх секторах економіки та на всіх етапах від виробництва до кінцевого споживання енергії є пріоритетним напрямком енергетичної політики держави та невід'ємною складовою євроінтеграції України [1]. Національним планом дій з енергоефективності на період до 2030 року передбачено досягти суттєвого скорочення споживання енергії та викидів парникових газів внаслідок реалізації енергоефективних заходів (ЕЕЗ) – дій технічного, організаційного, економічного, інформаційного характеру або їх сукупності, результатом яких є підвищення енергетичної ефективності (зниження питомих витрат), яке можна виміряти або розрахувати [2]. Зокрема, у секторі будівель очікується економія первинної енергії – 3 855 тис. т. н. е., економія кінцевої енергії – 2 758 тис. т. н. е., скорочення викидів парникових газів – 3 501 тис. т CO₂-екв. на рік [3].

Збройна агресія Російської Федерації проти України, і особливо, атаки на об'єкти енергетичної інфраструктури змінюють кількісні показники планів та стратегій, розроблених до 2022 року, але разом із тим, лише загострюють актуальність проблеми скорочення споживання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР). Якщо впродовж 2015-2021 років органи місцевого самоврядування дбали про зменшення обсягів використання ПЕР, передусім, для скорочення видатків на їх закупівлю, то із 2022-го проблема високої енергоемності сектору житлових і громадських будівель розглядається також у контексті загроз енергетичній безпеці України.

Триває робота над планом заходів післявоєнного відновлення [4]; будівництво нових будівель із близьким до нульового рівнем споживання енергії та термомодернізація існуючих споруд розглядаються як основні шляхи підвищення енергоефективності в секторі будівель. Закон України «Про енергетичну ефективність» [2] та Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» містять положення про довгострокову стратегію термомодернізації будівель, що має поширюватися на житлові та громадські будівлі усіх форм власності. Проект цієї стратегії на період до 2050 року проходить стадію громадського обговорення [5], значна увага в стратегії приділяється саме громадським будівлям, що утримуються за рахунок державного та/або місцевих бюджетів.

З огляду на кількість громадських будівель, що потребують термомодернізації, плани впровадження ЕЕЗ реалізовуватимуться поетапно, в межах наявного бюджету, як це і відбувалося впродовж останніх років. Для органів державної влади та місцевого самоврядування, як власників значного фонду громадських будівель, питання пріоритетності ЕЕЗ та пошуку оптимальних рішень щодо інвестування у проекти підвищення енергетичної ефективності видаються особливо складними.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. У [6] автори розглядають ранжування ЕЕЗ за їх пріоритетністю та пропонують замовникові обрати один із альтернативних пакетів ЕЕЗ, що відрізняються обсягом необхідних інвестицій. Так, для одного об'єкта енергетичного аудиту, розглянутого в цій роботі, ранжування ЕЕЗ дає хороші результати, проте прийняття рішень щодо пріоритетності ЕЕЗ в ситуації десятків і сотень будівель суттєво ускладнюється і вимагає досконалої аналітики. В [7]

запропоновано спеціалізований програмний комплекс для так званого рангового аналізу потенціалу енергозбереження об'єктів бюджетної сфери. Ранговим аналізом автори називають дослідження техноценозу енергоспоживання із оптимізацією за критеріями вибору форми гіперболічних H -розподілів. Детальніше методика в даному дослідженні не представлена, тому неможливо здійснити її апробацію на власних початкових даних для порівняння одержаних результатів.

У публікаціях [8, 9] запропоновано декілька постановок задач оптимального вибору ЕЕЗ для існуючих будівель. У [8] автори розглядають окремо три різні критерії оптимізації – максимальне скорочення: енергоспоживання (1), видатків на оплату за спожиті енергоресурси (2), викидів парникових газів (3); та порівнюють результати оптимізації для одного та для декількох часових періодів інвестування. У [9] застосовано багатокритеріальну оптимізацію для визначення оптимального плану інвестування у ЕЕЗ для деякого фонду будівель; головні недоліки запропонованого підходу пов'язані із оцінюванням впливовості кожного ЕЕЗ та із визначенням вагових коефіцієнтів цільових функцій.

За результатами аналізу наукових публікацій можна стверджувати, що в Україні питання пошуку оптимальних рішень щодо інвестування у проекти підвищення енергетичної ефективності громадських будівель не вивчалось на достатньому рівні, враховуючи практичну важливість цієї проблематики.

Завдяки реформі децентралізації з 2014 року значна частина повноважень та фінансування перейшли до органів місцевого самоврядування, що разом зі зростанням тарифів на ПЕР стимулювало інвестиції в термомодернізацію громадських будівель. Крім власних коштів органи місцевого самоврядування залучають і інші джерела фінансування, зокрема, кредити за спеціальними програмами Світового Банку, Європейського Інвестиційного Банку, Європейського Банку Реконструкції та Розвитку, а також грантову підтримку фонду Східноєвропейського партнерства з енергоефективності та довкілля, Інвестиційної платформи сусідства Європейського Союзу. Більше 300 українських міст долучилися до проекту Європейського Союзу «Угода Мерів – Схід», частина з них вже розробили довгострокові плани дій зі сталого енергетичного розвитку, що включають реалізацію ЕЕЗ для громадських будівель.

Аналіз публічних звітів про проведення енергетичних аудитів громадських будівель та техніко-економічних обґрунтувань впровадження ЕЕЗ показав, що енергоконсалтингові компанії в Україні пропонують типові альтернативні пакети заходів з різним потенціалом енергозбереження та обсягом необхідних інвестицій, базуючись, переважно, на власному експертному досвіді.

Мета роботи – розроблення і апробація економіко-математичної моделі оптимального вибору ЕЕЗ за критерієм досягнутої економії ПЕР на даних техніко-економічного обґрунтування ЕЕЗ для громадських будівель одного з міст України; за результатами обчислювальних експериментів сформувані типові рекомендації щодо визначення оптимальних пакетів ЕЕЗ для сукупності громадських будівель.

Для досягнення зазначеної мети було виконано ряд завдань, що будуть послідовно розглянуті в основній частині цієї роботи, а саме: обрати початкові дані для апробації оптимізаційної моделі; описати економіко-математичну модель оптимального вибору ЕЕЗ для сукупності громадських будівель; провести обчислювальні експерименти для визначення оптимальних пакетів ЕЕЗ за умов різних обсягів бюджету та проаналізувати результати моделювання з точки зору прийняття подальших рішень щодо інвестування у проекти підвищення енергетичної ефективності громадських будівель.

1. Початкові дані для апробації оптимізаційної моделі

У якості початкових даних для апробації оптимізаційної моделі використано результати техніко-економічного обґрунтування ЕЕЗ для громадських будівель м. Запоріжжя, опубліковані на офіційному сайті Запорізької міської ради [10]. З огляду на технічні обмеження використаних обчислювальних засобів, у модель було включено частину наявних початкових даних, а саме інформацію про впровадження ЕЕЗ у 15-ти із 40-а громадських будівель; усі обрані будівлі – дошкільні навчальні заклади (ДНЗ), що дозволило скоротити перелік типових ЕЕЗ для однієї будівлі до 13-ти. Для зручності сприйняття інформації початкові дані було представлено у вигляді матриці, що має 15 рядків – за кількістю будівель та 13 стовпців – за максимальною кількістю ЕЕЗ для однієї будівлі. Таким чином, було сформовано дві матриці: дані про обсяг інвестицій, необхідних для впровадження ЕЕЗ (1) та дані очікуваної економії ПЕР (2).

Загальний перелік типових ЕЕЗ для будівель ДНЗ наведений у табл. 1, але оскільки враховувалися особливості існуючого стану огорожувальних конструкцій та інженерних мереж кожної будівлі окремо, то в деяких ЕЕЗ для конкретної будівлі не було потреби. Наприклад, ЕЕЗ 16 – влаштування ізоляції трубопроводів системи гарячого водопостачання, розглядався лише для 8 будівель, у інших ДНЗ цей захід уже було реалізовано.

Кожен типовий ЕЕЗ має різний потенціал енергозбереження для різних будівель, очікувана економія ПЕР оцінена відносно базового рівня енергоспоживання у кВт·год./рік. електричної або теплової енергії.

Таблиця 1 – Перелік типових ЕЕЗ для дитячих навчальних закладів, розглянутих у моделі

Шифр типового ЕЕЗ	Коротка характеристика ЕЕЗ	Кількість ДНЗ, для яких розглядався ЕЕЗ, од.	Вартість впровадження, тис. грн.	
			Всього	min÷max
ЕЕЗ 1	Утеплення зовнішніх стін	15	22 044,5	511,9÷2 709,1
ЕЕЗ 2	Заміна (утеплення) вхідних дверей	13	363,1	5,5 ÷ 59,0
ЕЕЗ 3	Утеплення покрівлі	15	10 865,2	227,4 ÷ 1 018,4
ЕЕЗ 4	Утеплення підлоги	9	4 517,6	286,1 ÷ 685,1
ЕЕЗ 5	Заміна старих вікон та балконних блоків на металопластикові з подвійним склопакетом	15	11 324,1	249,5 ÷ 1 089,8
ЕЕЗ 6	Заміна ламп розжарювання внутрішнього освітлення	15	442,4	5,1 ÷ 84,6
ЕЕЗ 7	Заміна ламп вуличного освітлення	13	37,8	0,3 ÷ 12,6
ЕЕЗ 8	Влаштування зарядіаторних теплових рефлекторів	12	136,3	2,3 ÷ 38,4
ЕЕЗ 10	Встановлення ручних балансувальних вентилів з попереднім налаштуванням	10	2 008,9	79,3 ÷ 305,3
ЕЕЗ 11	Встановлення автоматичного вузла подачі теплової енергії	15	2 460,5	146,7 ÷ 280,7
ЕЕЗ 12	Реконструкція системи опалення	15	22 086,4	515,1 ÷ 2 402,0
ЕЕЗ 15	Влаштування ізоляції трубопроводів системи опалення	10	651,6	9,6 ÷ 119,6
ЕЕЗ 16	Влаштування ізоляції трубопроводів системи гарячого водопостачання	8	122,4	7,5 ÷ 26,8

2. Економіко-математична модель оптимального вибору ЕЕЗ для громадських будівель

Модель будь-якої задачі оптимізації має єдину узагальнену структуру, що складається із таких частин: план – вектор або матриця шуканих змінних; цільова функція, що описує критерій визначення плану; обмеження на невідомі плану та граничні умови [11].

Оскільки кожен ЕЕЗ розглядається як неподільна одиниця (або включається до оптимального пакету, або ні), то задача оптимального вибору ЕЕЗ відноситься до класу задач цілочислового лінійного програмування і у своїй постановці фактично повторює класичну задачу «про пакування рюкзака».

Шуканий оптимальний пакет ЕЕЗ (план) – прямокутна матриця $X = \{x_{ij}\}$, де $i = 1, \dots, n$ – індекс типу ЕЕЗ; $j = 1, \dots, m$ – індекс будівлі. Відповідно, n – загальна кількість типових ЕЕЗ; m – загальна кількість будівель.

Цільова функція – сумарна економія ПЕР, досягнута в результаті реалізації ЕЕЗ для сукупності громадських будівель, критерій – максимум:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d_{ij} x_{ij} \rightarrow \max, \quad (1)$$

де d_{ij} – обсяг збереження ПЕР від впровадження i -го типу ЕЕЗ для j -ї будівлі, кВт·год./рік.

Обмеження – сума витрат на впровадження усіх ЕЕЗ пакету не перевищує заданий бюджет B :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \leq B, \quad (2)$$

де c_{ij} – витрати на впровадження i -го ЕЕЗ для j -ї будівлі, грн.

Граничні умови або тип значень шуканих змінних:

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, \quad (3)$$

тобто, змінні, за якими формується оптимальний пакет ЕЕЗ, можуть приймати лише два значення: 1, якщо ЕЕЗ для певної будівлі включається у пакет, 0 – у протилежному випадку.

3.Обчислювальні експерименти для визначення оптимальних пакетів ЕЕЗ за умов різних обсягів бюджету та аналіз результатів моделювання

Для обчислювальних експериментів було застосовано стандартну надбудову MS Excel – Розв’язувач (Excel Solver), яка дозволяє розв’язувати оптимізаційні задачі, у даній роботі задачі цілочислового лінійного програмування. Стандартна надбудова Розв’язувач опрацьовує до 200 змінних, проте її розробник, компанія Frontline Systems пропонує комерційні рішення і для задач значно більшої розмірності [12].

Результатом розв’язання поставленої оптимізаційної задачі є перелік ЕЕЗ, реалізація яких забезпечить максимальну економію ПЕР, із врахуванням доступного обсягу бюджету. У табл. 2 наведено фрагмент розв’язку задачі за умови бюджету обсягом $B = 20$ млн. грн.; оптимальний план включає 94 ЕЕЗ із загальним потенціалом економії ПЕР 2 750 тис. кВт-год./рік.

Таблиця 2 – Фрагмент оптимального пакету ЕЕЗ за умови бюджету обсягом 20 млн. грн.

	ЕЕЗ 1	ЕЕЗ 2	ЕЕЗ 3	ЕЕЗ 4	ЕЕЗ 5	ЕЕЗ 6	ЕЕЗ 7	ЕЕЗ 8	ЕЕЗ 10	ЕЕЗ 11	ЕЕЗ 12	ЕЕЗ 15	ЕЕЗ 16
ДНЗ №293	1	-	0	0	0	1	-	1	1	1	0	1	-
ДНЗ №171	1	0	0	-	0	0	1	1	-	1	0	-	-
ДНЗ №175	0	1	0	0	0	0	1	-	1	1	0	1	1
...	...												
ДНЗ №161	1	-	0	-	0	0	1	1	-	1	0	-	-

Для узагальненої оцінки оптимальних пакетів ЕЕЗ проведено 20 обчислювальних експериментів для різних значень бюджетного обмеження B , від мінімального ($B = 0,5$ млн. грн.) до максимального ($B = 80$ млн. грн.); їх результати представлено на рис. 1. Очевидно, що зі збільшенням обсягу інвестицій у ЕЕЗ збільшується обсяг досягнутої економії ПЕР. Так, за умови, що обсяг інвестицій у ЕЕЗ складає 80 млн. грн., фактично без бюджетного обмеження, до пакету увійдуть усі 165 доступних ЕЕЗ і буде досягнуто економії ПЕР 5 324 тис. кВт-год./рік. Але як можна побачити із рис 1, для умов обсягу бюджету до 5 млн. грн. графік зростає більш стрімко, тобто значної економії ПЕР можна досягти реалізувавши ЕЕЗ із найкращим співвідношенням показників вартості впровадження та досягнутої економії ПЕР.

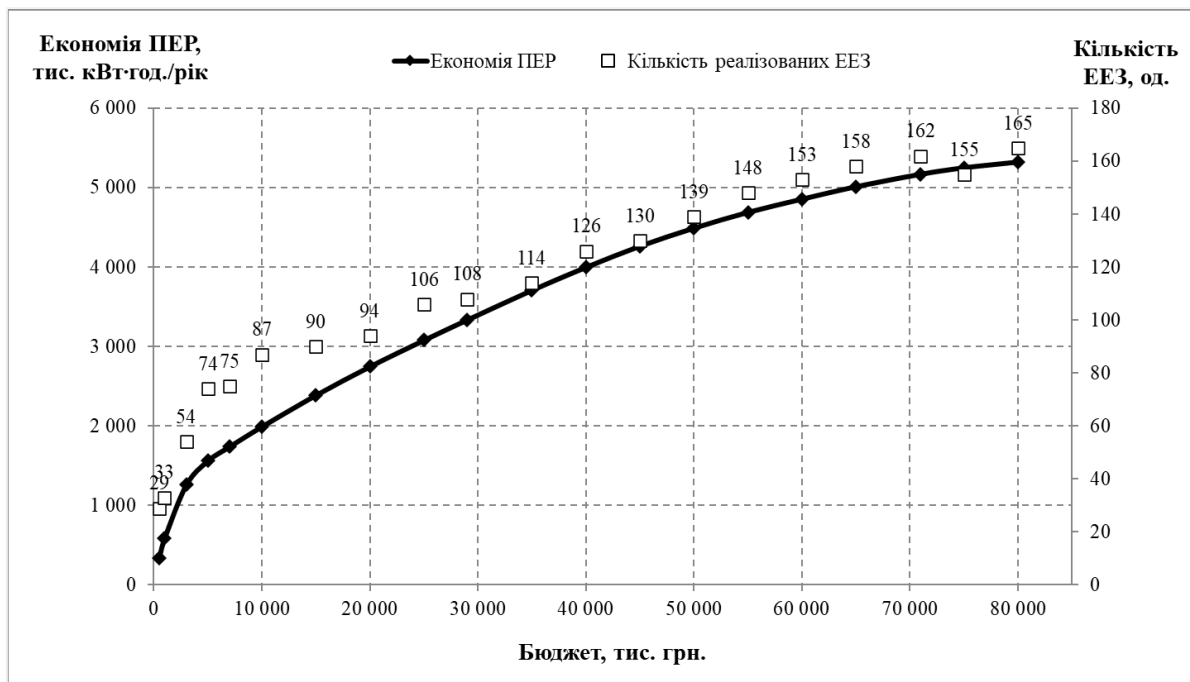


Рисунок 1 – Результати моделювання досягнутої економії ПЕР внаслідок реалізації ЕЕЗ у залежності від бюджетного обмеження

Щоб визначити, які з розглянутих ЕЕЗ можна віднести до категорій «найкращі»/«найгірші» за співвідношенням показників вартості впровадження та досягнутої економії ПЕР, результати моделювання представлено у вигляді табл. 3. Числа від 1 до 20 показують кількість потраплянь ЕЕЗ у оптимальний пакет, тобто 20 – означає, що за результатами розв’язання оптимізаційних задач ЕЕЗ включається до оптимального пакету для усіх 20-ти варіантів бюджетного обмеження; 1 – тільки в ситуації відсутності

бюджетного обмеження як такого. У табл. 3 виділено «найкращі» ЕЕЗ із числовою оцінкою 18-20: ЕЕЗ 7, ЕЕЗ 8, ЕЕЗ 11, ЕЕЗ 15 та ЕЕЗ 16. До «найгірших» ЕЕЗ віднесено ті, що мають числову оцінку 1-6, це ЕЕЗ 4 та ЕЕЗ 12. Проте, як показали обчислювальні експерименти, для більшості ЕЕЗ рішення про його включення до оптимального пакету необхідно приймати в залежності від результатів техніко-економічних розрахунків, виконаних для конкретної будівлі та із врахуванням загального бюджетного обмеження.

Таблиця 3 – Результати 20-ти обчислювальних експериментів з різними бюджетними обмеженнями

	ЕЕЗ 1	ЕЕЗ 2	ЕЕЗ 3	ЕЕЗ 4	ЕЕЗ 5	ЕЕЗ 6	ЕЕЗ 7	ЕЕЗ 8	ЕЕЗ 10	ЕЕЗ 11	ЕЕЗ 12	ЕЕЗ 15	ЕЕЗ 16
ДНЗ №293	13	-	9	4	7	18	-	18	13	18	2	17	-
ДНЗ №171	13	14	9	-	12	9	20	19	-	18	6	-	-
ДНЗ №175	11	20	10	5	9	9	19	-	16	18	1	17	17
...	...												
ДНЗ №161	14	-	7	-	7	13	19	20	-	18	6	-	-

У практичному застосуванні оптимізаційного моделювання ключову роль відіграє можливість проводити обчислювальні експерименти і попередньо оцінювати наслідки прийнятих рішень. Наприклад, необхідно прийняти рішення щодо інвестування у проекти підвищення енергетичної ефективності громадських будівель із бюджетом $B = 5$ млн. грн. Запропонована модель визначає оптимальний пакет із 74 ЕЕЗ, що потребують інвестицій у 4 997 тис. грн. і забезпечують економію ПЕР 1 563 тис. кВт·год./рік. (табл. 4). Як бачимо з табл. 4, цей оптимальний пакет (Пакет 0) включає увесь потенціал типових ЕЕЗ, що були віднесені до «найкращих»: ЕЕЗ 7, ЕЕЗ 8, ЕЕЗ 11, ЕЕЗ 15 та ЕЕЗ 16. Але для остаточного рішення щодо інвестування в ЕЕЗ доцільно провести додаткові обчислювальні експерименти.

Таблиця 4 – Варіанти формування оптимальних пакетів ЕЕЗ за умови бюджету обсягом 5 млн. грн.

Характеристика пакету ЕЕЗ		Пакети ЕЕЗ				
		Пакет без бюджетного обмеження	Пакет 0: оптимальний	Пакет 1: виключено ЕЕЗ 1-ЕЕЗ 5	Пакет 2: включено ЕЕЗ 10	Пакет 3: включено ЕЕЗ 6, ЕЕЗ 7
Кількість будівель, для яких доступний ЕЕЗ, од.	ЕЕЗ 1	15	1	0	0	1
	ЕЕЗ 2	13	7	0	2	7
	ЕЕЗ 3	15	1	0	0	0
	ЕЕЗ 4	9	0	0	0	0
	ЕЕЗ 5	15	1	0	0	1
	ЕЕЗ 6	15	3	7	2	15
	ЕЕЗ 7	13	13	13	13	13
	ЕЕЗ 8	12	12	12	11	12
	ЕЕЗ 10	10	3	8	10	2
	ЕЕЗ 11	15	15	15	13	15
	ЕЕЗ 12	15	0	0	0	0
	ЕЕЗ 15	10	10	10	9	10
	ЕЕЗ 16	8	8	8	8	8
Кількість ЕЕЗ у пакеті, од.		165	74	73	68	84
Вартість пакету, тис. грн.		77 061	4 997	4 998	4 999	4 999
Очікувана економія ПЕР, кВт·год./рік		5 324	1 563	1 484	1 412	1 547

Якщо, скажімо, утеплення огорожувальних конструкцій (ЕЕЗ 1-ЕЕЗ 5) заплановано здійснити в наступних періодах, то зазначена умова стає додатковим обмеженням у оптимізаційній моделі, і наявний бюджет ($B = 5$ млн. грн.) оптимально розподіляється між іншими ЕЕЗ (Пакет 1). Інша ситуація: для залучення споживачів до регулювання попиту на теплову енергію у пакет обов'язково включається ЕЕЗ 10 – встановлення ручних балансувальних вентилів з попереднім налаштуванням; розв'язком оптимізаційної задачі стає Пакет 2. Або задається умова про необхідність реалізувати ЕЕЗ, спрямовані на скорочення

споживання електричної енергії (ЕЕЗ 6 та ЕЕЗ 7) – Пакет 3 як відповідь на цей запит. І звичайно, якщо додаткове обмеження призведе до перевищення заданого бюджету, наприклад, включення до пакету ЕЕЗ 1 – утеплення зовнішніх стін усіх будівель потребує 22 044,5 тис. грн. (табл. 1), то оптимізаційна задача не матиме розв'язків. Очікувана економія ПЕР у результаті інвестування в Пакети 1-3 буде меншою, порівняно із оптимальним пакетом, проте можливо, для практичних цілей така поступка буде прийнятною.

Таким чином, запропонована оптимізаційна модель є своєрідною «лабораторією», яка дозволяє за результатами обчислювальних експериментів краще зрозуміти об'єкт дослідження і відповідно приймати більш обгрунтовані та раціональні рішення щодо інвестування в ЕЕЗ для громадських будівель.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У роботі показана важливість пошуку оптимальних рішень щодо інвестування у проекти підвищення енергетичної ефективності громадських будівель в Україні. Апробація математичної моделі оптимального вибору ЕЕЗ за критерієм максимуму досягнутої економії ПЕР на реальних даних показала свою практичну цінність. Разом із тим, за умови наявності відповідних початкових даних, доцільно розглянути аналогічну оптимізаційну задачу за критерієм досягнутого скорочення видатків на оплату за спожиті енергетичні ресурси, а також оцінити можливості застосування багатокритеріальних оптимізаційних моделей.

Список використаних джерел:

1. Енергетична ефективність України. Кращі проектні ідеї: Проект «Професіоналізація та стабілізація енергетичного менеджменту в Україні» / Уклад.: С.П. Денисюк, О.В. Коцар, Ю.В. Чернецька. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. 79 с.
2. Закон України «Про енергетичну ефективність» від 21.10.2021 р. № 1818-IX (у редакції від 03.08.2022 р.). Відомості Верховної Ради України, 2022, № 2, ст.8. База даних «Законодавство України». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text>.
3. Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 29 грудня 2021 р. № 1803-р. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-nacionalnij-plan-dij-z-energoefektivnosti-na-period-do-2030-t291221>.
4. Проект Плану відновлення України: Матеріали робочої групи «Будівництво, містобудування, модернізація міст та регіонів України». Національна рада з відновлення України від наслідків війни. Липень, 2022. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/construction-urban-planning-modernization-of-cities-and-regions.pdf>.
5. Проект розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Довгострокової стратегії термомодернізації будівель на період до 2050 року та Концепції Загальнодержавної економічної цільової програми підтримки термомодернізації будівель на 2022-2030 роки» від 02.08.2022. URL: <https://www.minregion.gov.ua/base-law/grom-convers/elektronni-konsultatsiyi-z-gromadskisty/rozkporjadzhennya-kabinetu-ministriv-ukrayiny-pro-shvalennya-dovgostrokovoyi-strategiyi-termomodernizaciyi-budivel-na-period-do-2050-roku-ta-konczepczyi-zagalnodержavnoyi-ekonomichnoyi-2>.
6. Плешков П.Г., Серебреніков С.Р., Петрова К.Г., Саваленко І.В., Сіріков О.І. Проблеми визначення ефективності та ранжування енергоощадних заходів на об'єктах бюджетної сфери. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. Вип. 1 (32). С. 166-172. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1\(32\).166-172](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).166-172).
7. Василенко В.І. Інформаційне забезпечення впровадження енергозберігаючих заходів в бюджетних установах міста з використанням рангового аналізу. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки*. 2019. № 1 (130). С. 9-17. URL: <https://doi.org/DOI:10.30857/1813-6796.2019.1.1>.
8. Tan B., Yavuz Y., Otay E.N., Camlibel E. Optimal selection of energy efficiency measures for energy sustainability of existing buildings. *Computers & Operations Research*. 2016. Vol. 66. P. 258-271. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.01.013>.
9. Carli R., Dotoli M., Pellegrino R., Ranieri L. A Decision Making Technique to Optimize a Buildings' Stock Energy Efficiency. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2017. Vol. 47. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7407645>.
10. Попереднє техніко-економічне обгрунтування впровадження заходів з енергозбереження та підвищення рівня енергоефективності 40 бюджетних будівель м. Запоріжжя. Розробник: Енергоконсалтингова компанія «АЙТІКОН», 2017. 106 с. URL: https://zp.gov.ua/upload/editor/poperedne_teo_m-zaporizhzhya_kf.pdf.
11. Кузьмичов А.І. Оптимізаційні методи і моделі. Моделювання засобами MS Excel: навчальний посібник. К.: Видавництво Ліра-К, 2021. 215 с.
12. Standard Excel Solver – Dealing with Problem Size Limits. *Frontline Systems*. URL: <https://www.solver.com/standard-excel-solver-dealing-problem-size-limits>.

Yu. Chernetska, Ph. D., Sen. Teach., ORCID 0000-0001-6821-3211

O. Borychenko., Ph. D., Assoc. Prof.; ORCID 0000-0002-6127-2945

A. Yehorenko. Master, ORCID 0000-0002-2008-9490

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

DETERMINATION OF OPTIMAL PACKAGES OF ENERGY EFFICIENT MEASURES FOR PUBLIC BUILDINGS

The paper is devoted to the problem of improving the energy efficiency of public buildings maintained with funds from the state and/or local budgets. Optimization modeling is proposed as an instrument to determine the optimal packages of energy efficiency measures according to the criterion of maximum achieved savings of fuel and energy resources. Approximation of the mathematical model on actual data has shown its practical value - depending on a given budget, the optimal packages of energy efficiency measures for public buildings (on the example of Zaporizhzhia city) are determined. Based on the results of computational experiments, energy efficiency measures with the best and worst ratios of implementation costs and achieved savings of fuel and energy resources were identified. The impact of additional constraints on the composition of an optimal package of energy efficiency measures was shown to make informed and rational decisions on investing in energy efficiency improvement projects for public buildings.

Keywords: fuel and energy resources, energy efficiency of buildings, optimization modeling, energy efficiency measures.

References

1. Energy efficiency of Ukraine. Best project ideas: Project «Professionalization and stabilization of energy management in Ukraine» / S.P. Denisyuk, O.V. Kotsar, Yu.V. Chernetska. K.: «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» 79 p.

2. Law of Ukraine «On Energy Efficiency» dated October 21, 2021 No. 1818-IX (as amended on August 3, 2022). Information of the Verkhovna Rada of Ukraine, 2022, No. 2, Article 8. Database «Legislation of Ukraine». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text>.

3. On the National Energy Efficiency Action Plan for the period until 2030: Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of December 29, 2021 No. 1803-r. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-nacionalnij-plan-dij-z-energoefektivnosti-na-period-do-2030-t291221>.

4. Project of the Recovery Plan of Ukraine: Materials of the working group «Construction, urban planning, modernization of cities and regions of Ukraine». The National Council for the Recovery of Ukraine from the Consequences of the War. July, 2022. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/construction-urban-planning-modernization-of-cities-and-regions.pdf>.

5. Draft order of the Cabinet of Ministers of Ukraine «On the approval of the Long-term strategy for the thermal modernization of buildings for the period until 2050 and the Concept of the National economic target program for the support of the thermal modernization of buildings for the years 2022-2030» dated August 2, 2022. URL: <https://www.minregion.gov.ua/base-law/grom-convers/elektronni-konsultatsiyi-z-gromadskistyvu/proekt-rozporядz-hennya-kabinetu-ministriv-ukrayiny-pro-shvalennya-dovgostrokovoyi-strategiyi-termomodernizaciyi-budivel-na-period-do-2050-roku-ta-konczepczyi-zagalnodierzhavnyi-ekonomichnyi-2>.

6. Pleshkov P.G., Serebrenikov S.R., Petrova K.G., Savalenko I.V., Sirikov O.I. Problems of determining the efficiency and ranking of energy-saving measures at the objects of the budget sphere. *Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*. 2019. Issue 1 (32). P. 166-172. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1\(32\).166-172](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).166-172).

7. Vasylenko V.I. Information support for the implementation of energy-saving measures in budget institutions of the city using rank analysis. *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. Technical Science Series*. 2019. No. 1 (130). P. 9-17. URL: <https://doi.org/DOI:10.30857/1813-6796.2019.1.1>.

8. Tan B., Yavuz Y., Otay E.N., Camlibel E. Optimal selection of energy efficiency measures for energy sustainability of existing buildings. *Computers & Operations Research*. 2016. Vol. 66. P. 258-271. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.01.013>.

9. Carli R., Dotoli M., Pellegrino R., Ranieri L. A Decision Making Technique to Optimize a Buildings' Stock Energy Efficiency. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2017. Vol. 47. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7407645>.

10. Kuzmychov A.I. Optimization methods and models. Modeling using MS Excel: a tutorial. K.: Lira-K Publishing House, 2021. 215 p.

11. Standard Excel Solver – Dealing with Problem Size Limits. *Frontline Systems*. URL: <https://www.solver.com/standard-excel-solver-dealing-problem-size-limits>.

Надійшла 16.11.2022

Received 16.11.2022