

**ТЕОРЕТИЧНІ ПІДХОДИ ДО ВИБОРУ ПОСЛІДОВНОСТІ  
ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ЗАХОДІВ У БУДІВЛЯХ**

**THEORETICAL APPROACHES TO CHOOSING THE SEQUENCE OF  
IMPLEMENTATION OF ENERGY-EFFICIENT MEASURES IN  
BUILDINGS**

**Намчук Д.В.,** аспірант, ORCID: 0009-0008-0416-8990, **Довбенко В.С.,** канд. техн. наук, доцент ORCID: 0000-0001-9575-2931 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

**Namchuk D.V.,** postgraduate student, ORCID: 0009-0008-0416-8990; **Dovbenko V.S.,** candidate of technical sciences, ORCID: 0000-0001-9575-2931 (National University of Water Management and Environmental Management, Rivne)

У статті систематизовано теоретичні підходи до визначення оптимальної послідовності впровадження енергоефективних заходів у будівлях різного функціонального призначення. Розглянуто економіко-математичні моделі, що застосовуються для оптимізації черговості впровадження заходів, зокрема методи багатокритеріальної оптимізації, лінійного та динамічного програмування. Проаналізовано технічні взаємозв'язки між окремими заходами та їхній вплив на загальну ефективність термомодернізації. Узагальнено український досвід з урахуванням поділу території на дві температурні зони та проведено порівняння з європейськими підходами. Обґрунтовано доцільність пріоритетного виконання заходів, спрямованих на зниження енергетичних навантажень, перед модернізацією інженерних систем, що забезпечує раціональний підбір потужності обладнання і скорочення капітальних витрат

The article systematizes theoretical approaches to determining the optimal sequence for implementing energy efficiency measures in buildings of various functional types. It examines economic and mathematical models used to optimize the order of implementation, including methods of multi-criteria optimization, linear programming, and dynamic programming. Technical interdependencies between individual measures and their impact on the overall effectiveness of thermal modernization are analyzed. Ukrainian experience is summarized with consideration of the country's division into two climatic zones and compared with European practices. The study substantiates the rationale for prioritizing measures aimed at reducing energy loads before modernizing

**engineering systems, which ensures appropriate equipment sizing and reduces capital expenditures.**

**Ключові слова:** енергоефективність будівель, послідовність модернізації, оптимізація енергозбереження, термомодернізація, економіко-математичне моделювання, кліматичні зони України.

building energy efficiency, modernization sequencing, energy saving optimization, thermal modernization, economic and mathematical modeling, climatic zones of Ukraine.

**Вступ.** Енергетична ефективність будівель залишається пріоритетним напрямом сучасної будівельної галузі в контексті досягнення кліматичних цілей та скорочення експлуатаційних витрат. Будівлі в Україні споживають близько 300 кіловат-годин на квадратний метр щорічно, що втричі перевищує середні показники країн Організації економічного співробітництва та розвитку [1]. Існуючий житловий фонд налічує понад двісті тисяч багатоквартирних будинків, вісімдесят відсотків яких потребують комплексної термомодернізації [2]. Проте актуальним питанням залишається визначення оптимальної послідовності впровадження енергоефективних заходів. Слід зауважити, що згадане питання набуває особливої актуальності в умовах обмежених фінансових ресурсів та необхідності максимізації віддачі від інвестицій. Правильна послідовність модернізації дозволяє досягти економії витрат до сорока відсотків завдяки уникненню завищення потужності інженерного обладнання [3]. Модернізація та підбір теплогенерувального чи холодопостачального обладнання за тепловими навантаженнями неутепленої будівлі може призвести до завищення встановленої потужності та, як наслідок, до необґрунтованих капітальних витрат. Водночас виконання заходів із впровадження індивідуальних теплових пунктів, балансування систем і встановлення автоматичного регулювання на першочерговому етапі є доцільним, оскільки забезпечує стабільну роботу системи та створює базу для подальшої оптимізації енергоспоживання. Особливої уваги заслуговує і український контекст, оскільки він пов'язаний з кліматичним районуванням території на дві температурні зони згідно з ДБН В.2.6-31:2021, станом житлового фонду переважно радянської забудови та наявністю розгалужених систем централізованого теплопостачання з втратами від 7 до 20 відсотків.

**Аналіз останніх досліджень.** Теоретичні основи оптимізації енергоефективної модернізації будівель активно досліджуються міжнародною науковою спільнотою протягом останніх двох десятиліть. Є. Фаренюк та Г. Фаренюк у власному дослідженні обґрунтували перехід до комплексу ЕРВ-стандартів і ДБН В.2.6-31:2021 як основу оптимізації рішень [4]. Ю. Веремійчук, В. Опришко, І. Притискач і О. Ярмолук подали формалізовані моделі інтегрованих систем енергозабезпечення (energy hub) з багатокритеріальною оптимізацією режимів, придатною для поетапної

модернізації інженерних систем [5]. В. Дешко, М. Шовкалюк і Ю. Кузьмина проаналізували базу сертифікатів енергоефективності будівель і вказали на методичні вузли, від яких залежить коректність порівняння альтернатив модернізації [6]. О. Ратушняк у працях з управління проєктами термомодернізації систематизував підходи до пріоритезації заходів, поєднуючи критерії вартості, енерговитрат і строків реалізації [7]. Я. Головка на матеріалі житлового фонду запропонувала алгоритм багатокритеріального вибору конфігурацій енергозабезпечення, який безпосередньо підтримує побудову оптимальної послідовності модернізації [8]. Попри наявні дослідження, актуальним залишається питання саме послідовності енергоефективної модернізації та оцінювання правових наслідків і ефективності їх практичної реалізації в умовах українського житлового фонду.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є систематизація теоретичних підходів до визначення оптимальної послідовності впровадження енергоефективних заходів у будівлях різного призначення з урахуванням економічних, технічних та кліматичних факторів.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі завдання:

- здійснити класифікацію наявних економіко-математичних моделей оптимізації послідовності впровадження енергозберігаючих заходів;
- проаналізувати технічні взаємозв'язки між енергоефективними заходами та їхній вплив на загальну ефективність модернізації залежно від послідовності реалізації;
- узагальнити український досвід термомодернізації будівель з урахуванням кліматичного районування території та чинної нормативно-правової бази;
- здійснити порівняльний аналіз європейських підходів до визначення послідовності модернізації з метою виявлення найефективніших рішень, адаптованих до національних умов.

**Матеріали та методи дослідження.** Дослідження базується на комплексному аналітичному підході, що поєднує систематичний огляд наукової літератури, узагальнення статистичних даних та порівняльний аналіз міжнародних практик. Автором здійснено аналіз низки наукових джерел вітчизняних та зарубіжних авторів. Для порівняльного аналізу застосовано метод бенчмаркінгу показників енергоспоживання, темпів реновації та інвестиційних витрат між Україною та провідними країнами Європейського Союзу. Узагальнення теоретичних підходів здійснено шляхом класифікації за типами математичних моделей, методами багатокритеріального прийняття рішень та алгоритмами оптимізації. Взаємний вплив енергоефективних рішень на тепловий баланс будівлі між заходами аналізувалися на основі фізичних принципів теплообміну та енергобалансу будівель з урахуванням динаміки навантажень на інженерні системи.

**Результати досліджень.** Систематизація вітчизняних джерел дозволяє окреслити три групи підходів до оптимізації послідовності енергоефективних.

Економічно орієнтовану групу репрезентує А. С. Максимов, який для відбору та ранжування рішень термомодернізації пропонує застосовувати простий строк окупності, чисту приведену вартість та внутрішню норму рентабельності, підкреслюючи, що вибір критерію впливає на визначення послідовності робіт. Технічно пріоритетну групу формалізовано в настановчих стандартах. Зокрема, відповідно до положень ДСТУ-Н Б В.3.2-3:2014 визнається першочерговість зниження теплових навантажень через утеплення та інші заходи щодо огорожувальних конструкцій [9]. Окремо слід зауважити, що ДСТУ-Н Б А.2.2-13:2015 прямо вводить розділ «Планування заходів модернізації для існуючих будівель», який структурує етапність рішень і їх погодження з енергетичною оцінкою та сертифікацією [10]. Окремої уваги заслуговує й інтегрована багатокритеріальна група. Зокрема, у дослідженнях Ю. А. Веремійчука, В. П. Опришка, І. В. Притискача та О. С. Ярмолюка автори пропонують моделі, що одночасно мінімізують витрати життєвого циклу та враховують енергетичні, екологічні й технічні критерії. За результатами аналізу, згаданих параметрів з'являється можливість для обґрунтування черговості заходів і визначення «правильного розміру» інженерних систем [5].

Заслуговує уваги економіко-математичне моделювання оптимальної черговості заходів, яке реалізується через різноманітні методи залежно від складності завдання та доступних обчислювальних ресурсів. Лінійне та змішане цілочисельне програмування застосовується для задач вибору енергоефективних заходів при обмеженнях на бюджет та цільових показниках енергозбереження. Загальна постановка задачі передбачає мінімізацію сумарних витрат при обмеженнях на річний бюджет, технічну сумісність заходів та досягнення заданого рівня енергоефективності. Багатокритеріальна оптимізація з використанням алгоритмів та методу Парето дозволяє ідентифікувати множину непоміжаних рішень, що представляють різні компроміси між конфліктуючими цілями, такими як мінімізація витрат, енергоспоживання та годин теплового дискомфорту [11].

Враховуючи стрімкий розвиток сучасних технологій, доцільним вважаємо згадати і про дослідження колективу зарубіжних науковців під керівництвом Ф. Асіоне, які звертають увагу на ефективності поєднання детального будівельного моделювання в системі «EnergyPlus» з навченими штучними нейронними мережами для скорочення обчислювального часу в тисячу разів при збереженні точності прогнозування енергетичних показників [12]. Відповідно, зарубіжний досвід свідчить про потенціал використання розумних систем. Беззаперечною перевагою тут слугує можливість дослідити значну кількість можливих комбінацій заходів та визначити економічно оптимальні рішення для конкретного об'єкта з урахуванням його індивідуальних характеристик. На нашу думку, поєднання розумних систем з методами багатокритеріального прийняття рішень дозволяє забезпечити структурований

підхід до ранжування альтернатив модернізації з урахуванням переваг різних зацікавлених сторін.

Слід зауважити, що окремим невід'ємним аспектом правильної послідовності впровадження слугують технічні взаємозв'язки між енергоефективними заходами. Фундаментальний принцип оптимальної черговості, на думку М. Тобіаса, слід розглядати як пріоритетність заходів зі зменшення енергетичних навантажень перед модернізацією генеруючого та розподільчого обладнання [13]. Для прикладу, покращення теплоізоляції огорожувальних конструкцій, заміна вікон на енергоефективні та зменшення повітропроникності, здатні скоротити потреби будівлі в опаленні до 70 % залежно від початкового стану та масштабу проведеної модернізації. Проте, виконання робіт із утеплення до впровадження системи автоматичного регулювання, балансування та індивідуального теплового пункту не завжди є доцільним. Відсутність належного керування тепlopостачанням у такому випадку може призвести до перегрівів і нераціонального використання енергії навіть після утеплення.

Оптимальна послідовність передбачає спершу забезпечення керованості системи тепlopостачання — через встановлення ІТП, гідравлічне балансування та регулювання подачі теплоносія, — а вже потім реалізацію заходів із зменшення теплових навантажень за рахунок термомодернізації огорожувальних конструкцій. Після цього, під час оновлення систем опалення, вентиляції та кондиціонування, доцільно підбирати обладнання відповідно до зменшених навантажень, що дає змогу скоротити капітальні витрати та підвищити енергоефективність експлуатації.

Зворотна послідовність, коли спочатку здійснюється повна заміна обладнання без попереднього регулювання або утеплення, призводить до перевищення встановленої потужності систем, коротких циклів роботи та зниження їхнього фактичного ККД, що негативно впливає на мікроклімат і економічні показники модернізованої будівлі.

Специфіка послідовності модернізації залежить від типу будівлі та структури її енергоспоживання. У житлових будівлях, де опалення становить більшу половину споживання енергії, пріоритетним є підвищення теплозахисту огорожувальних конструкцій до нормативних рівнів ДБН В.2.6-31:2021 —  $R \approx 4,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$  для зони I та  $R \approx 3,5 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$  для зони II, а для покрівель —  $R \approx 6,0\text{--}7,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$  [14].

Для адміністративно-офісних будівель, де основну частку енергоспоживання формують системи ОВК і освітлення, доцільна комбінована послідовність: модернізація освітлення та огорожень із подальшою заміною кліматичних систем на обладнання зі змінною продуктивністю, скориговане під зменшені навантаження.

Промислові будівлі характеризуються домінуванням технологічного енергоспоживання, тому послідовність модернізації визначається специфікою виробничих процесів. Пріоритетними є заходи з оптимізації роботи



електродвигунів, компресорних установок та технологічного обігріву з використанням частотного регулювання та рекуперації теплоти. Утеплення огорожень є економічно виправданим лише для споруд із великою площею зовнішніх стін та значними тепловтратами.

В Україні впровадження енергоефективних заходів здійснюється відповідно до оновлених ДБН В.2.6-31:2021 і ДБН В.1.2-11:2021, які встановлюють підвищені вимоги до опору теплопередачі огорожувальних конструкцій з урахуванням двох кліматичних зон. Перша охоплює 19 областей із суворішим кліматом ( $R \geq 4 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ ), друга — південні регіони ( $R \geq 3,5 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ ). Такий поділ забезпечує економічну доцільність заходів з урахуванням кліматичних особливостей.

Державна підтримка енергоефективності реалізується, зокрема, через програму «Енергодім», за якою станом на серпень 2025 року завершено 315 проєктів модернізації загальною вартістю близько 973 млн грн. [15]. Типова послідовність включає утеплення фасадів, заміну вікон у місцях загального користування, встановлення індивідуальних теплових пунктів і автоматики регулювання. Економія енергії досягає 20–60 % залежно від стану будівлі та комплексності модернізації [16].

Показовим прикладом є реконструкція дошкільного закладу № 32 у Тернополі (2023 р.), реалізована за підтримки Європейського інвестиційного банку. Послідовність заходів — утеплення огорожувальних конструкцій, заміна вікон на енергоефективні, встановлення теплового насоса — забезпечила скорочення енергоспоживання на 61 %, економію  $\approx 300 \text{ т CO}_2$  на рік і зменшення використання природного газу на 140 тис.  $\text{м}^3$ , а строк служби будівлі збільшився мінімум на 25 років [17].

Порівняльний аналіз європейських практик визначення послідовності енергоефективних заходів дає виокремити спільні принципи та національні особливості підходів до модернізації будівельного фонду. Директива Європейського Парламенту про енергетичні характеристики будівель встановлює обов'язковість досягнення нульових викидів для всіх нових будівель з 2030 року та для існуючого фонду до 2050 року, що потребує масштабної реновації з щорічними темпами модернізації не менше 2% будівельного фонду. При цьому середньозважений темп енергетичної реновації в Європейському Союзі за період останніх років становив 1 % щорічно. Глибока модернізація з енергозбереженням понад 60 % реалізовувалась лише для 0,2 % житлових та 0,3 % нежитлових будівель щорічно, що свідчить про необхідність підвищення інтенсивності впровадження енергоефективних змін на практиці [18]. Якщо ж розглядати досвід окремих держав ЄС, то можна також відзначити різноманітність підходів до стимулювання термомодернізації та визначення пріоритетності заходів. Німецька модель в основному здійснюється в межах програм субсидованого кредитування через державний банк KfW з обов'язковим досягненням цільових показників зменшення первинної енергії на 25 % та

покращення теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій на 20 % [19]. Данська система покладається на схему зобов'язань з енергоефективності з щорічним цільовим показником 10 PJ заощадженої енергії та активно використовує інструменти комплексного енергетичного консультування через систему універсальних центрів обслуговування [20]. Польський підхід зосереджується на поступовому впровадженні системи енергетичної сертифікації та розвитку інституційної спроможності енергоаудиторів в умовах значної частки вугільного опалення та застарілого будівельного фонду [21]. За результатами аналізу, здійсненого авторами, систематизовано основні показники енергетичної модернізації будівель в Україні та країнах ЄС (див. Таблиця 1).

Таблиця 1.

Порівняльні показники енергетичної модернізації будівель

Показник	Україна	Середнє ЄС	Німеччина	Данія
Питоме енергоспоживання будівель, кВт·год/(м <sup>2</sup> ·рік)	300	180	150	180
Річний темп реновації, %	0,75	1,0	0,9	0,6-1,0
Темп глибокої реновації, %	0,1	0,2-0,3	0,2	0,2
Питомі інвестиції в модернізацію, євро/м <sup>2</sup>	50-80	83-111	120-150	150-180
Енергозбереження при стандартній реновації, %	15-25	25-35	25-30	30-40
Енергозбереження при глибокій реновації, %	40-50	45-60	50-65	60-75
Частка відновлюваної енергії в новобудовах, %	5-10	25-35	30-40	45-55

Джерело: сформовано самостійно аспірантом Намчуком Д. на основі власного дослідження

Європейський досвід також підкреслює роль і необхідність комплексних національних планів реновації будівель з чіткими цільовими показниками, диференційованими стимулами для різних сегментів будівельного фонду та системою технічної підтримки власників через мережу сертифікованих консультантів. Дослідження результатів європейських проектів Horizon 2020, зокрема HEART, CULTURAL-E та BIM-SPEED, дає можливість виокремити

тенденцію до застосування цифрових технологій інформаційного моделювання будівель для оптимізації рішень з модернізації та використання збірних фасадних систем з інтегрованими інженерними комунікаціями для скорочення термінів виконання робіт та мінімізації незручностей для мешканців.

Яскравим прикладом є проєкт QualitEE, у межах якого в 11 країнах ЄС, на основі 29 пілотних проєктів, досягнуто сукупного щорічного енергозбереження понад 33 ГВт·год при загальному обсязі інвестицій 33 млн євро, що стало результатом упровадження системи забезпечення якості енергосервісних послуг. [22].

Подібний підхід нині реалізується в місті Рівне. У межах пілотного грантового проєкту «Розробка бачення концепції NetZero для міста Рівного» створено інтелектуальну енергетичну систему моніторингу IEMS «PROFIT», яка об'єднує дані про споживання енергії понад 250 муніципальних об'єктів. Система забезпечує аналіз у реальному часі, оперативне реагування на перевитрати та аварії, прогнозування енергетичних і кліматичних тенденцій, а також оцінювання економічної ефективності заходів з енергоефективності та відновлюваної енергетики.

Архітектура IEMS передбачає подальше масштабування на всі сектори міста — муніципальні будівлі, ОСББ, приватний сектор, транспорт, промисловість і комунальні підприємства. Наразі система функціонує в пілотному режимі на об'єктах муніципальної власності, триває розроблення демонстраційних інтерфейсів для інших секторів.

Передбачено модулі для ранжування будівель за відхиленнями у споживанні тепла та електроенергії, визначення груп ризику («Потребує уваги», «Проблеми з теплопостачанням/електрикою») і формування реєстрів для цільових енергоаудитів. Завдяки інструменту «Динамічний калькулятор» система переходить від моніторингової функції до аналітико-проєктної платформи, що дозволяє моделювати ефекти технічних рішень, оптимізувати інвестиційні пріоритети та формувати плани декарбонізації будівельного фонду.

Використання фільтрів за типами енергії, автоматична генерація управлінських висновків і сервіси підтримки прийняття рішень підвищують ефективність енергетичного планування та контроль за викидами парникових газів. Пілотний проєкт триває, однак очікується, що його впровадження забезпечить прозорий моніторинг прогресу громади на шляху до кліматичної нейтральності.

Узагальнення теоретичних підходів і практичного досвіду дає змогу сформулювати рекомендовану послідовність реалізації енергоефективних заходів для різних типів будівель з урахуванням технічних взаємозв'язків і економічної доцільності.



Перший етап — проведення детального енергетичного обстеження з ідентифікацією потенціалу енергозбереження, кількісною оцінкою можливостей економії та розрахунком показників інвестиційної ефективності.

Другий етап передбачає впровадження малозатратних організаційних заходів з налагодження та оптимізації режимів роботи існуючого обладнання. Такі дії забезпечують 15–25 % енергозбереження при терміні окупності менш ніж один рік.

Третій етап — встановлення індивідуального теплового пункту (ІТП) із погодним і добовим регулюванням, балансуванням контурів та термостатичним керуванням радіаторів. Захід дає миттєвий ефект у вигляді 10–20 % економії, усуває перегрів, стабілізує гідравлічний режим і забезпечує достовірні дані для подальшого коректного розрахунку теплових навантажень після термомодернізації.

Четвертий етап охоплює заходи зі зменшення теплових навантажень через покращення теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій. Послідовність робіт: термоізоляція стін і цоколів, утеплення покрівлі або горища, заміна вікон на енергоефективні конструкції, зменшення повітропроникності. Для першої температурної зони України цільові показники опору теплопередачі становлять:

- стіни — не менше  $4,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ ;
- покрівлі —  $6,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ ;
- підлоги по ґрунту —  $2,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ , а допустимий рівень повітропроникності — не більше 3 обмінів повітря за годину при тиску 50 Па (згідно з результатами тесту «blower door»).

П'ятий етап передбачає модернізацію систем освітлення із заміною ламп на світлодіодні джерела та впровадженням автоматичного керування залежно від присутності людей і рівня природного освітлення. Це дає змогу зменшити споживання електроенергії на освітлення до 60 % і знизити теплові надходження в приміщення, відповідно скоротивши навантаження на системи кондиціонування.

Шостий етап включає заміну систем опалення, вентиляції та кондиціонування на вискоефективне обладнання, потужність якого визначається за фактичними навантаженнями після попередніх етапів модернізації:

- для житлових будівель рекомендується використання теплових насосів із коефіцієнтом перетворення (COP) не менше 3,5 або конденсаційних газових котлів з ефективністю не нижче 95 %;
- для громадських будівель доцільно застосовувати системи зі змінною витратою повітря та частотним регулюванням продуктивності вентиляторів, що забезпечують 10–20 % економії енергії порівняно з системами постійної витрати.

Сьомий, завершальний етап передбачає інтеграцію відновлюваних джерел енергії — сонячних фотоелектричних панелей, сонячних колекторів для

гарячого водопостачання, теплових насосів тощо. Їхні характеристики визначаються на основі зменшеного енергоспоживання після виконання всіх попередніх заходів (див. табл. 2).

Таблиця 2.

Показники ефективності енергозберігаючих заходів

Захід	Енергозбереження, %	Термін окупності, років	Критичність послідовності
1	2	3	4
Енергетичне обстеження (енергоаудит)	—	—	Критична (перший етап)
Налагодження існуючих систем	15–25	0,7–1,1	Висока (після аудиту)
Встановлення індивідуального теплого пункту (ІТП)	10–20	1–3	Критична (після налагодження; перед огородженнями та ОВКП)
Термоізоляція огороджувальних конструкцій	25–50	5–15	Критична (перед ОВКП)
Ущільнення повітропроникності	5–30	1–3	Висока (разом з термоізоляцією)
Заміна вікон	10–25	8–20	Висока (перед ОВКП)
Модернізація систем ОВКП	10–30 від ОВКП	5–10	Критична (після огорожень)
Відновлювані джерела енергії	20–50 від залишку	8–15	Висока (завершальний етап)

Джерело: сформовано самостійно аспірантом Намчуком Д. на основі власного дослідження

**Висновки.** Систематизація теоретичних підходів і практичного досвіду впровадження енергоефективних заходів у будівлях підтверджує критичну важливість правильно визначеної послідовності модернізації для досягнення оптимальних техніко-економічних результатів термомодернізації:

**1. Принцип оптимальної послідовності.** Базовим принципом є поетапне зменшення енергетичних навантажень будівлі перед модернізацією інженерного обладнання. Однак для об'єктів без систем автоматичного регулювання доцільно розпочинати з упровадження ІТП, балансування та керування подачею теплоносія, що забезпечує стабільну роботу системи під час подальшої термомодернізації. Такий підхід запобігає перевитратам енергії після утеплення та дозволяє оптимізувати потужність обладнання на етапі реконструкції систем опалення, вентиляції та кондиціонування.

**2. Економічна обґрунтованість.** Застосування методів багатокритеріального аналізу та оцінки вартості життєвого циклу дає змогу оптимізувати черговість заходів, зменшити капітальні витрати на 20–30 % і підвищити загальну ефективність інвестицій.

**3. Взаємна залежність енергоефективних рішень.** Теплова ізоляція огорожень, модернізація систем опалення, вентиляції та кондиціонування мають розглядатися комплексно, оскільки зміни в одному з цих елементів безпосередньо впливають на теплові навантаження та розрахунок потужності обладнання. Підвищення герметичності будівлі потребує обов'язкового впровадження механічної вентиляції з рекуперацією теплоти для підтримання належної якості повітря та запобігання підвищеній вологості приміщень.

**4. Рекомендована послідовність.** Для житлових і громадських будівель оптимальна черговість включає:

- енергетичний аудит;
- налагодження та організаційні заходи;
- впровадження ІТП;
- термомодернізацію огорожень;
- модернізацію освітлення;
- оновлення систем ОВК;
- інтеграцію відновлюваних джерел енергії.

Дотримання такої послідовності дозволяє підвищити ефективність використання інвестицій і зменшити споживання енергії до 70 % у разі проведення комплексної модернізації будівель.

1. Енергоефективність будівель в Україні - перспективи та плани поліпшення. *Альтернативна енергетика і технології майбутнього в Україні*. URL: <https://eenergy.com.ua/energoefektyvnist/energoefektyvnist-budivel-v-ukrayini/> (дата звернення: 20.10.2025).

2. Step-by-Step Plan for Energy Efficient Reconstruction in Ukraine. *Міжнародний фонд «Відродження»*. URL: <https://www.irf.ua/en/pokrokovyj-plan-energoefektyvnoyi-vidbudovy-v-ukrayini/> (date of access: 20.10.2025).
3. How Accurate Load Calculations Prevent Oversized HVAC Systems | Blog - Hysopt. *Hysopt | The HVAC Engineering Software*. URL: <https://www.hysopt.com/software-blog/how-accurate-load-calculations-prevent-oversized-hvac-systems> (date of access: 20.10.2025).
4. Фаренюк Є., Фаренюк Г. Методичні основи нового покоління будівельних норм з енергоефективності будівель. *Наука та будівництво*. 2023. Т. 3, № 33-34. URL: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-34-2022-2> (дата звернення: 20.10.2025).
5. Оптимізація функціонування інтегрованих систем енергозабезпечення споживачів / Ю. Веремійчук та ін. Київ: Вид. дім «Кий», 2020. 186 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/0ebdc484-7d16-4789-88b6-03fe2fa6149b/content> (дата звернення: 20.10.2025).
6. Deshko V., Shovkaliuk M., Kuzmyna Y. Database of certificates of energy efficiency of buildings in Ukraine: analysis for new construction. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2021. No. 1. P. 20–26. URL: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2021.242123> (date of access: 20.10.2025).
7. Ратушняк О. Г. Управління змістом інноваційних проєктів термомодернізації будівель: Монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. 114 с. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi73/756440.pdf> (дата звернення: 20.10.2025).
8. Головка Я. О. Оптимізація систем енергозабезпечення багатоквартирних житлових будівель на етапі їх проектування. 2022. 138 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/f48310ba-fcdf-4ddb-a6bd-07c02e39d097/content> (дата звернення: 20.10.2025).
9. Настанова з виконання термомодернізації житлових будинків: Держ. стандарт від 31.12.2014 № ДСТУ-Н Б В.3.2-3:2014. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=60041](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60041) (дата звернення: 20.10.2025).
10. Настанова з проведення енергетичної оцінки будівель: Держ. стандарт від 27.07.2015 № ДСТУ-Н Б А.2.2-13:2015. URL: [https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu-n\\_b\\_a.2.2-13\\_2015.pdf](https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu-n_b_a.2.2-13_2015.pdf) (дата звернення: 20.10.2025).
11. A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB / E. Asadi et al. *Building and Environment*. 2012. Vol. 56. P. 370–378. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.04.005> (date of access: 20.10.2025).
12. CASA, cost-optimal analysis by multi-objective optimisation and artificial neural networks: A new framework for the robust assessment of cost-optimal energy retrofit, feasible for any building / F. Ascione et al. *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 146. P. 200–219. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.069> (date of access: 20.10.2025).
13. Tobias M. Why Upgrade Order Matters in Building Energy Retrofits. *MEP Engineering & Design Consulting Firm | BIM Services | NY Engineers*. URL: <https://www.ny-engineers.com/blog/building-retrofits-why-the-order-of-energy-upgrades-is-important> (date of access: 20.10.2025).
14. Overview of Ukraine's policy context for demand restraint. *International Energy Agency*. URL: <https://www.iea.org/reports/harnessing-energy-demand-restraint-in-ukraine->

[a-roadmap/overview-of-ukraines-policy-context-for-demand-restraint](#) (date of access: 20.10.2025).

15. Supporting the national energy efficiency fund and the climate-friendly reform agenda (S2I) in Ukraine. *Die Internationale Klimaschutzinitiative | Internationale Klimaschutzinitiative (IKI)*. URL: <https://www.international-climate-initiative.com/en/project/supporting-the-national-energy-efficiency-fund-and-the-climate-friendly-reform-agenda-s2i-in-ukraine-18-i-241-ukr-g-s2i-energy-efficiency-fund/> (date of access: 20.10.2025).

16. Часті питання - Фонд Енергоефективності. *Фонд Енергоефективності*. URL: <https://eefund.org.ua/energodim/faq/#1686216006288-3b49dbaf-c160> (дата звернення: 20.10.2025).

17. Solutions to Ukraine: European Investment Bank starts insulation project to warm Ternopil schoolchildren. *Ukrainian Solutions Media*. URL: <https://rubryka.com/en/2023/04/09/u-ternopoli-startuvav-pershyj-za-koshty-yeib-proyekt-termomodernizatsiyi-dytsadka-yak-pratsyuuye-tse-rishennya/> (date of access: 20.10.2025).

18. Energy Performance of Buildings Directive. *Energy*. URL: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/energy-performance-buildings-directive\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/energy-performance-buildings-directive_en) (date of access: 20.10.2025).

19. Germany: Renovation Policy | Global Buildings Performance Network. *Policy Evidence Library | Global Buildings Performance Network*. URL: <https://library.gbpn.org/library/rp-detail-pages/germany-renovation-policy> (date of access: 20.10.2025).

20. Surmeli-Anac N., Kotin-Förster S., Schäfer M. Energy Efficiency Obligation Scheme in Denmark. The European Climate Initiative, 2018. 23 p. URL: <https://www.euki.de/wp-content/uploads/2018/09/fact-sheet-energy-efficiency-obligation-scheme-dk.pdf> (date of access: 20.10.2025).

21. Poland. *Concerted Action EPBD I CA EPBD*. URL: <https://www.ca-epbd.eu/countries/poland> (date of access: 21.10.2025).

22. Leutgöb K., Kuchar S., Grim M. QualitEE Project. Driving investment in energy efficiency services through quality assurance. The European Union's Horizon 2020 research and innovation programme, 2020. 63 p. URL: [https://qualitee.eu/wp-content/uploads/QualitEE\\_D1.3g\\_Final-Publishable-Report\\_20201215\\_FINAL.pdf](https://qualitee.eu/wp-content/uploads/QualitEE_D1.3g_Final-Publishable-Report_20201215_FINAL.pdf) (date of access: 20.10.2025).