

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”

Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

НАУМЧУК ОЛЕНА СЕРГІЇВНА

УДК: 620.92:697.1

ДИСЕРТАЦІЯ

**ОЦІНЮВАННЯ ВИМОГ ДО ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА
ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ЕФЕКТИВНОСТІ
СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ БУДІВЛЕЮ**

144 – Теплоенергетика

14 Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О. С. Наумчук

Науковий керівник: Дешко Валерій Іванович, д. т. н., професор

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Наумчук О. С. Оцінювання вимог до огорожувальних конструкцій та інженерних систем при визначенні ефективності споживання енергії будівлею. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 Теплоенергетика. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, м. Київ, 2026.

У вступі дисертаційної роботи висвітлено актуальність теми дослідження, описано зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Разом з тим, сформульовано мету дослідження та завдання для її досягнення, наукову новизну та практичну цінність результатів дослідження.

У першому розділі роботи проведено огляд європейських та українських нормативно – правових документів у питаннях оцінки енергоспоживання будівлями та окреслено відмінності у підходах до визначення рівня їх енергоефективності. Зокрема, описано практику масштабування та забезпечення будівель з майже нульовим споживанням енергії в Європі з приведенням вимог до теплової оболонки будівлі у країнах – членах Європейського Союзу, вимоги до джерел енергії, споживання первинної енергії та технічних систем. Вплив даних вимог на забезпечення низького споживання енергії представлено науковими працями, які описують практичний досвід слідування законодавчим актам окремих країн. Всі приведені вимоги порівнюються з аналогічними в Україні. Разом з тим, представлено досвід застосування програмних продуктів динамічного моделювання при проектуванні енергоспоживання будівлі.

Так, зазначено суттєвий прогрес у підвищенні енергоефективності будівель в Україні шляхом імплементації європейських норм та пошуків оптимальних рішень щодо забезпечення скорочення загального енергоспоживання будівлями. Цьогоріч

Уряд затвердив Національний план з енергетики та клімату до 2030 року а також визначили питання будівель з майже нульовим споживанням енергії, що означає посилення контролю щодо забезпечення енергоефективної теплової оболонки та інженерних систем. У першому розділі роботи зазначено зокрема питомий показник споживання первинної енергії в Україні, що є практично співставним з європейським рівнем.

У другому розділі дисертації наведені дані щодо об'єкту дослідження, який представлений як репрезентативна будівля – існуючий стан огорожувальних конструкцій, геометричних параметрів будівлі, джерел енергозабезпечення. На базі приведених даних створено модель будівлі у програмному середовищі динамічного моделювання Design Builder, створеного на базі Energy Plus, та визначено показник споживання енергії на опалення, вентиляцію та кондиціювання, проведено оцінку відповідності теплофізичних параметрів вимогам України. За результатами проведеного динамічного моделювання приведено рішення щодо оптимізації теплової оболонки будівлі до вимог України та вимог Швеції, як однієї з країн з найвищими показниками енергоефективності будівель у Європі, з наступним проведенням техніко – економічної оцінки описаних рішень.

Результатом виконаних досліджень у розділі 2 дисертаційної роботи є аналіз загального енергоспоживання будівлі при покращенні теплового захисту до вимог України [36, 37] та Швеції [76] – 219,624 МВт·год/рік, 221,33 МВт·год/рік та 211,72 МВт·год/рік енергії при здійсненні послідовного утеплення, порівняно з існуючим станом. Проведений аналіз дозволяє оцінити питомі показники енергоспоживання будівлі офісного призначення при здійсненні модернізації. Так, утеплення огорожувальних конструкцій будівлі до рівня вимог України [36, 37] та Швеції [76] зменшує питоме енергоспоживання на 64%, 63,8% та 65,4%, якщо порівнювати з існуючими характеристиками теплової оболонки. Економічна оцінка енергоефективності теплової оболонки, що враховує тарифні особливості України та Швеції, проведена з використанням методу інтегральних витрат для варіантів

відсутності зміни вартості енергоносії протягом розрахункового періоду, незначного їх збільшення (сценарій позитивних змін), зростання (існуючий сценарій) та суттєвого зростання (сценарій депресивних змін). За проведеною оцінкою, покращення теплового захисту будівлі є позитивним рішенням та забезпечує скорочення витрат на енергозабезпечення протягом її експлуатації. Зокрема, за умов настання сценарію позитивних змін (приріст цін на енергоносії – 2,5%, ставка дисконтування – 5%), окупність забезпечення енергоефективної (відповідно до вимог України) та високоенергоефективної теплової оболонки (згідно вимог Швеції) за середніх в Україні тарифів на енергоносії настає після 5, 7,8 та 8 років експлуатації будівлі відповідно, порівняно з існуючим рівнем теплового захисту. При зростанні вартості енергоносіїв та фіксації ставки дисконтування на рівні, вищому втричі порівняно з рівнем сценарію позитивних змін (приріст цін на енергоносії – 15,6%, ставка дисконтування – 15,8%), окупність реалізації підвищення енергоефективності будівлі до рівня вимог України та Швеції складає 4,7, 7,2 та 7,3 років відповідно. З урахуванням можливих суттєвих змін щодо тарифної політики (коефіцієнт приросту тарифів становить 0,4) та закріпленні ставки дисконтування на рівні 20,7%, економічна ефективність покращення теплового захисту будівлі зростає, терміни окупності реалізації енергоефективної та високоенергоефективної теплової оболонки становлять 3,2, 4,6 та 4,7 років відповідно.

Третій розділ роботи містить оцінку потенціалу відновлювальної енергетики для забезпечення енергоспоживання будівель. Так, проведено детальний аналіз доступної в Україні біомаси та здійснено оцінку щодо можливості її використання для офісної будівлі з приведенням енергетичних характеристик біомаси. Для кожного з рівнів утеплення офісної будівлі проведено оцінку заміщення природного газу пелетами, лушпиння соняшника, наведено варіанти використання твердопаливних котлів та здійснено техніко – економічну оцінку такого заміщення з урахуванням витрат на паливо, логістики та можливих змін вартості палива для теплозабезпечення. Разом з тим, проаналізовано можливість використання теплових насосів для

теплозабезпечення офісної будівлі з урахуванням факторів, що ускладнюють та/або полегшують використання кожного з видів теплового насоса на об'єкті. Мається на увазі, що використання водяного та геотермального насоса провокують зростання як інвестицій на початковому етапі впровадження проекту, так і зростання часу реалізації подібного забезпечення. На базі приведених даних обрано найбільш оптимальний варіант теплового насоса – типу «повітря – вода». Зокрема, для різних рівнів теплового захисту будівлі (відповідно до вимог України та Швеції) а також для варіанту неутепленої будівлі, проте за умов регулювання роботи системи опалення вентиляції та кондиціювання (ОВК), проведено оцінку можливостей використання теплового насоса у комбінації з котлом на біомасі та додатковим нагрівачем з використанням програмного середовища GeoTSOL. За результатами проведеного динамічного моделювання генерації теплової енергії тепловим насосом різних рівнів теплового захисту будівлі, представлено графіки залежності сезонної ефективності систем з тепловим насосом від температури зовнішнього повітря. Вплив зовнішнього повітря на коефіцієнт ефективності досліджено з використанням регресійного аналізу, де незалежна змінна – температура зовнішнього повітря. Генерація тепловим насосом теплової енергії забезпечує для неутепленої будівлі з переривчастим графіком роботи системи ОВК теплового захисту будівлі 69,7% необхідного теплоспоживання (решту необхідного тепла генерує котел на біомасі), утепленої до рівня вимог України [37] – 98,9%, утепленої до рівня вимог України [36] – 99%, утепленої до рівня вимог Швеції [76] – 99,4% (решта необхідної теплової енергії забезпечується додатковим нагрівачем). Отримані результати підтверджують технічну можливість забезпечення модернізації офісних будівель в Україні до рівня nZEB за умови створення енергоефективної та вискоенергоефективної теплової оболонки та використання наявних та доступних видів відновлювальних джерел енергії в Україні (показники питомого споживання енергії відповідають вимогам щодо забезпечення майже нульового споживання енергії). Зокрема, показник питомого енергоспоживання за використання біомаси для теплозабезпечення

енергоефективної (теплова оболонка будівлі відповідає вимогам України [36, 37]) та високоенергоефективної будівлі (теплова оболонка будівлі відповідає вимогам Швеції [76]) становить $27,11 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3 / \text{рік}$, $22,0 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3 / \text{рік}$ та $19,85 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3 / \text{рік}$ відповідно. За використання теплового насоса для теплозабезпечення, відповідні показники становлять $31,81 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3 / \text{рік}$, $26,22 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3 / \text{рік}$ та $24,07 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3 / \text{рік}$. Різниця питомих показників енергоспоживання полягає у кількості електричної енергії, необхідної для забезпечення роботи котла на біомасі та теплового насоса. Можливість модернізації існуючої будівлі до рівня nZEB підтверджується і здійсненою економічною оцінкою ефективності реалізації запропонованих у роботі заходів, проведеної з використання методу інтегральної вартості енергозабезпечення.

Розділ чотири даної роботи представлений оцінкою рівня скорочення викидів діоксиду вуглецю при підвищенні енергоефективності будівлі за запропонованих заходів у розділі два та три. Зокрема, проведено аналіз впливу споживання енергії будівельним сектором на глобальний рівень викидів протягом життєвого циклу. Виконано порівняння обсягу викидів діоксиду вуглецю при споживанні енергії різними рівнями теплового захисту будівлі, що використовує для теплозабезпечення різні види джерел енергії. Оцінка проведена з припущенням щодо оподаткування будь-якого обсягу викидів CO_2 при спалюванні палива стаціонарною установкою [137] та поширення європейської практики щодо оцінки та контролю обсягів непрямих викидів (Сфера 2) на будівлі (розрахунок згідно [139]).

З метою представлення можливостей забезпечення суттєвого скорочення енергоспоживання будівлі та викидів CO_2 , запропоновано використання механізму «активний споживач» для будівлі та виконано динамічне моделювання генерації електричної енергії фотоелектричними системами, розміщеними на будівлі, за умов орієнтації систем на південь та на захід і схід. Динамічне моделювання генерації електричної енергії, виконане для теплової оболонки будівлі, параметри якої відповідають вимогам [76] з використанням теплового насоса та додаткового

електронагрівача у програмному середовищі PV*SOL, показало що південний напрямок фотоелектричних панелей для електропостачання розглянутої будівлі дозволяє генерувати обсяг 62,42 МВт·год/рік. При обраному типі системи 26,02 МВт·год/рік (32,7%) електричної енергії надходить до будівлі від сонячної електростанції, а решта 53,4 МВт·год/рік надходять з електричної мережі (67,3%). Одночасна орієнтація сонячних панелей на схід та захід забезпечує більш ефективне виробництво електричної енергії. Зокрема, система генеруватиме близько 80,87 МВт·год/рік електроенергії. Частка енергії, споживаної будівлею з системи, становитиме 35,2%, решта 64,8% будуть повертатися в мережу за умов «активного споживача».

Ключові слова: енергоефективність, енергоспоживання, будівлі, теплова оболонка, охолодження, біомаса, підвищення енергоефективності, відновлювані джерела енергії, тепловий насос, енергомодельовання, EnergyPlus, енергозабезпечення, Design Builder.

ABSTRACT

Naumchuk O. S. Assessment of requirements for building envelopes and engineering systems when determining the efficiency of energy consumption of a building. – Manuscript.

The dissertation on completion of the Doctor of Philosophy degree on specialty 144 – Heat power engineering. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

The introduction to this dissertation reflects the relevance of the research topic and describes the connection between the work and existing research programs, plans, and topics. It also formulates the research objective and objectives, as well as the scientific novelty and practical value of the results.

The first section of the dissertation provides an overview of European and Ukrainian regulatory documents on assessing building energy consumption and identifies differences in approaches to determining their energy efficiency. Specifically, it describes the practice of scaling and achieving near-zero energy buildings in Europe, highlighting requirements for the building's thermal envelope in EU member states, as well as requirements for energy sources, primary energy consumption, and technical systems. The impact of these requirements on achieving low energy consumption is presented through scientific papers describing the practical experience of implementing legislative acts in individual countries. All of these requirements are compared with similar ones in Ukraine. Furthermore, experience with the use of dynamic modeling software in building energy design is presented.

Thus, significant progress has been noted in improving the energy efficiency of buildings in Ukraine through the implementation of European standards and the search for optimal solutions to reduce overall energy consumption in buildings. This year, the government approved the National Energy and Climate Plan until 2030 and also identified the need for near-zero-energy buildings, which means strengthening oversight of energy-

efficient thermal envelopes and engineering systems. The first section of the dissertation specifically identifies the specific primary energy consumption rate in Ukraine, which is practically comparable to European levels.

The second section of the dissertation presents data on the study object, presented as a representative building, including the existing state of the building envelope, geometric parameters, and energy sources. Using this data, a building model was created in the Design Builder dynamic modeling software environment, powered by Energy Plus, and the energy consumption for heating, ventilation, and air conditioning was determined, along with an assessment of the thermophysical parameters' compliance with Ukrainian requirements. Based on the results of the dynamic modeling, a solution was developed to optimize the building's thermal envelope in accordance with the requirements of Ukraine and the requirements of Sweden as one of the countries with high energy efficiency indicators for buildings in Europe, followed by a technical and economic assessment of the described solutions.

The result of the research carried out in Section 2 of the dissertation is the analysis of the total energy consumption of the building with the improvement of thermal protection to the requirements of Ukraine [36, 37] and Sweden [76] – 219.624 MW h/year, 221.33 MW h/year and 211.72 MW h/year. The conducted analysis allows us to estimate the specific energy consumption indicators of an office building during modernization. Thus, the insulation of the building envelope to the level of the requirements of Ukraine [36, 37] and Sweden [76] reduces the specific energy consumption by 64%, 63.8% and 65.4%, when compared with the existing characteristics of the thermal envelope. An economic assessment of the energy efficiency of a thermal envelope, taking into account the tariff characteristics of Ukraine and Sweden, was conducted using the integrated cost method for scenarios of no change in energy prices during the billing period, a slight increase (positive change scenario), an increase (current scenario), and a significant increase (depressive change scenario). According to the assessment, improving the building's thermal protection is a positive solution and ensures a reduction in energy costs over the course of its operation.

Specifically, assuming the positive change scenario (energy price increase of 2.5%, discount rate of 5%), the payback for installing an energy-efficient (in accordance with Ukrainian requirements) and highly energy-efficient thermal envelope (in accordance with Swedish requirements) at average energy tariffs in Ukraine occurs after thermal protection level 8.5. With rising energy costs and a discount rate fixed at a level three times higher than the positive change scenario (energy price increase of 15.6%, discount rate of 15.8%), the payback period for upgrading the building's energy efficiency to meet Ukrainian and Swedish requirements is 4.7, 3.7, and 5.7%. Taking into account possible significant changes in the tariff policy (the tariff growth coefficient is 0.4) and fixing the discount rate at 20.7%, the economic efficiency of improving the building's thermal protection increases, with the payback periods for implementing energy-efficient and highly energy-efficient thermal envelopes being 3.2, 4.6, and 4.7.

The third section of the paper assesses the potential of renewable energy for powering buildings. A detailed analysis of biomass available in Ukraine is presented, along with an assessment of its feasibility for an office building, including its energy characteristics. For each insulation level of the office building, an assessment is made of the substitution of natural gas with pellets and sunflower husks. Options for using solid fuel boilers are presented, and a technical and economic assessment is conducted, taking into account fuel costs, logistics, and potential changes in the cost of heating fuel. Additionally, the feasibility of using heat pumps for heating the office building is analyzed, considering the complicating and/or facilitating factors associated with each type of heat pump. It is assumed that the use of water and geothermal heat pumps increases both initial investment and the time required to implement such a solution. Based on the presented data, the most optimal heat pump option—the air-to-water type—was selected. Specifically, for different levels of building thermal protection (in accordance with Ukrainian and Swedish requirements), as well as for an uninsulated building with heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) system control, the potential for using a heat pump in combination with a biomass boiler and an additional heater was assessed using the GeoTSOL software environment. Based on the

results of dynamic modeling of heat pump heat generation at different levels of building thermal protection, graphs are presented showing the seasonal efficiency of heat pump systems as a function of outdoor air temperature. The impact of outdoor air on the efficiency coefficient was examined using regression analysis, where the independent variable is outdoor air temperature. Heat pump generation of thermal energy provides 69.7% of the required heat consumption for an uninsulated building with an intermittent operation schedule of the building's thermal protection system (the remaining required heat is generated by a biomass boiler), 98.9% for a building insulated to the level of Ukrainian requirements [37], and 99.4% for a building insulated to the level of Ukrainian requirements [36] (the remaining required heat is provided by an additional heater). The obtained results confirm the technical feasibility of modernizing office buildings in Ukraine to the nZEB level by creating an energy-efficient and highly energy-efficient thermal envelope and using existing and accessible types of renewable energy sources in Ukraine (the specific energy consumption indicators meet the requirements for ensuring near-zero energy consumption). In particular, the specific energy consumption indicator for using biomass for heat supply of an energy-efficient (thermal envelope of the building meets the requirements of Ukraine [36, 37]) and a highly energy-efficient building (thermal envelope of the building meets the requirements of Sweden [76]) is 27.11 kW h/m³/year, 22.9 kW h/m³/year, respectively. When using a heat pump for heat supply, the corresponding indicators are 31.81 kW h/m³/year, 26.22 kW h/m³/year and 24.07 kW h/m³/year. The difference in the specific energy consumption indicators consists in the amount of electrical energy required to operate the biomass boiler and the heat pump. The possibility of modernizing the existing building to the nZEB level is also confirmed by the economic assessment of the effectiveness of the implementation of the measures proposed in the work, carried out using the integral cost of energy supply method.

Section four of this paper presents an assessment of the carbon dioxide emission reduction potential resulting from improved building energy efficiency, using the measures proposed in Sections two and three. Specifically, an analysis is provided of the impact of

energy consumption in the building sector on global life-cycle emissions. A comparison is made of the carbon dioxide emissions generated by energy consumption at different levels of thermal insulation for buildings using different energy sources for heating. The assessment is conducted assuming taxation of any CO₂ emissions from fuel combustion by a stationary installation [137] and the widespread adoption of European practices for assessing and monitoring indirect emissions (Scope 2) for buildings (calculated according to [139]).

To provide opportunities for significant reductions in building energy consumption and CO₂ emissions, the use of an "active consumer" mechanism for the building is proposed, and dynamic modeling of electricity generation by photovoltaic systems placed on the building is performed, with the systems oriented to the south, west, and east. Dynamic modeling of electrical energy generation performed for a building thermal envelope with parameters meeting the requirements of [76] using a heat pump and an additional electric heater in the PV*SOL software environment showed that the south-facing photovoltaic panels for supplying electricity to the building under consideration allows for the generation of 62.4 MWh/year. With the selected system type, 26.02 MWh/year (32.7%) of electrical energy is supplied to the building from the solar power plant, and the remaining 53.4 MWh/year is supplied from the electrical grid (67.3%). The simultaneous orientation of solar panels to the east and sunset ensures more efficient electrical energy production. In particular, the system will generate approximately 80.87 MWh/year of electrical energy. The share of energy consumed by the building from the system will be 35.2%, the remaining 64.8% will be returned to the grid under active consumer conditions.

Keywords: energy efficiency, energy consumption, buildings, thermal envelope, cooling, biomass, energy efficiency improvement, renewable energy sources, heat pump, energy modeling, EnergyPlus, energy supply, Design Builder.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. N. Buyak, V. Deshko, A. Borodinecs, I. Bilous, O. Naumchuk та I. Sukhodub, “Assessment of strategies for low-carbon regeneration of buildings in Eastern Europe”, *Energy*, т. 325, с. 1–14, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136069>. (іноземне видання, включене до бази даних **Scopus**, кuartиль **Q1**).

Внесок авторів: Н. А. Буюк: відповідала за наукове керівництво при здійсненні економічної оцінки заходів підвищення енергоефективності та редагування рукопису; В. І. Дешко: відповідав за наукове керівництво та концепцію дослідження; А. Бородинець: відповідав за аналіз європейських підходів підвищення енергоефективності будівель; І. Ю. Білоус: відповідала за здійснення верифікації результатів моделювання енергоспоживання у програмному середовищі Design Builder; І. О. Суходуб: відповідала за методологію скорочення непрямих викидів будівлі та технічні підходи такого скорочення, моделювання генерації електричної енергії фотоелектричними панелями; О. С. Наумчук: відповідала за аналіз стану енергоефективності в Європі та в Україні, ідентифікацію викидів CO₂ при експлуатації будівлі та підходи до їх розрахунку, здійснення технічних, економічних та екологічних розрахунків, створення моделей різних варіантів утеплення будівлі у програмному середовищі Design Builder та здійснення симуляції енергоспоживання.

2. V. Deshko, I. Bilous, N. Buyak та O. Naumchuk, “Prospects for the Use of Renewable Energy Sources while Increasing the Energy Efficiency Level of Office Buildings to the Level of nZEB”, *Rocznik Ochrona Środowiska*, т. 25, с. 148–158, 2023. <https://doi.org/10.54740/ros.2023.015>. (іноземне видання, включене до бази даних **Scopus**, кuartиль **Q3**).

Внесок авторів: Н. А. Буюк: відповідала за наукове керівництво при здійсненні економічної оцінки заходів забезпечення nZEB та редагування рукопису; В. І. Дешко: відповідав за наукове керівництво та концепцію дослідження; І. Ю. Білоус: відповідала за наукове керівництво при здійсненні технічної оцінки використання

відновлювальних джерел енергії та альтернативних видів палива для теплозабезпечення; О. С. Наумчук: відповідала за огляд сучасних наукових праць та практичних можливостей щодо забезпечення nZEB, моделювання енергоспоживання будівлею при покращенні її теплової оболонки за використання різних джерел теплозабезпечення, проведення технічних, економічних та екологічних розрахунків.

3. В. І. Дешко та О. С. Наумчук, “Оцінка ефективності варіантів модернізації теплозабезпечення і теплового захисту офісної будівлі”, *Зб. наук. пр. укр. держ. ун-ту залізн. трансп.*, № 204, с. 12–26, 2023. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.204.2023.283743>. (фахове видання).

Внесок авторів: В. І. Дешко: відповідав за наукове керівництво та концепцію дослідження; О. С. Наумчук: відповідала за проведення техніко-економічних розрахунків, моделювання теплогенерації відновлювальними джерелами енергії що працюють у комплексі в програмному середовищі GeoTSOL та редагування рукопису.

4. В. І. Дешко, І. Ю. Білоус, Н. А. Буяк та О. С. Наумчук, “Аналіз напрямків підвищення енергоефективності офісних будівель в Україні до рівня nZEB”, *Енергетика і автоматика*, № 1 (2023), с. 150–164, 2023. [https://doi.org/10.31548/energiya1\(65\).2023.150](https://doi.org/10.31548/energiya1(65).2023.150). (фахове видання).

Внесок авторів: В. І. Дешко: відповідав за наукове керівництво та концепцію дослідження; І. Ю. Білоус: відповідала за наукове керівництво при здійсненні оцінки технічних підходів покращення теплового захисту будівлі та використання відновлювальних джерел енергії для її теплозабезпечення; Н. А. Буяк: відповідав за наукове керівництво при здійсненні економічної оцінки покращення теплової оболонки будівлі та використання біомаси; О. С. Наумчук: відповідала за огляд літератури, проведення техніко-економічних розрахунків та редагування рукопису.

5. В. І. Дешко та О. С. Наумчук, “Аспекти використання nZEB концепції для будівель у Центральній та Східній Європі”, *Технології та інжиніринг*, № 1 (12), с. 41–51, 2023. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.1.4>. (фахове видання).

Внесок авторів: В. І. Дешко: відповідав за наукове керівництво та концепцію дослідження; О. С. Наумчук: відповідала за огляд літератури, аналіз можливостей забезпечення масштабування nZEB концепції в Україні та редагування рукопису.

6. В. І. Дешко, Н. А. Буяк, І. Ю. Білоус та О. С. Наумчук, “Економічна оцінка підвищення теплового захисту громадських будівель до сучасних європейських вимог”, *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 2, с. 7–18, 2022. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2022.261277>. **(фахове видання).**

Внесок авторів: В. І. Дешко: відповідав за наукове керівництво та концепцію дослідження; І. Ю. Білоус: відповідала за наукове керівництво при здійсненні оцінки технічних підходів до утеплення будівлі та результатів динамічного моделювання енергоспоживання у програмному середовищі Design Builder; Н. А. Буяк: відповідала за методологію та наукове керівництво при здійсненні економічної оцінки утеплення будівлі; О. С. Наумчук: відповідала за огляд літератури, проведення техніко-економічних розрахунків при утепленні будівлі, збір вихідних даних для створення моделі будівлі у програмному середовищі Design Builder, здійснення симуляції енергоспоживання у програмному середовищі Design Builder та редагування рукопису.

7. Наумчук О., Яценко О., Дешко В. Особливості техніко-економічної оцінки споживання енергії будівлями. *Енергетика. Екологія. Людина: матеріали XII науково-технічної конференції Інституту енергозбереження та енергоменеджменту*, м. Київ, 7-8 травня 2020 р. – Київ: ІЕЕ, 2020. С. 269–272.

8. Наумчук О., Дешко В. Динаміка тарифів на енергетичні носії як ключовий фактор впливу на економічну оцінку енергетичних систем. *Аспірантські читання пам'яті професора Артура Праховника, присвячені 75-річчю ІЕЕ: матеріали читань (збірник наукових праць)*, м. Київ, 10-11 березня 2021 р. – Київ: ІЕЕ, 2021. С. 19–21.

9. Наумчук О. Будівлі, споживання енергії яких близьке до нуля, як метод усунення залежності від імпортованого викопного палива”. *Енергетика. Екологія.*

Людина: матеріали XIV науково-технічної конференції Інституту енергозбереження та енергоменеджменту, м. Київ, 2-3 червня 2022 р. – Київ: ІЕЕ, 2022. С. 75-80.

10. Наумчук О., Дешко В. Оцінювання модернізації офісних будівель у напрямку nZEB за різних економічних сценаріїв. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики*: матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених і студентів, м. Київ, 25 квіт. 2023 р. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, видавництво «Політехніка», С. 238-239.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	21
РОЗДІЛ 1. ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД	26
1.1 Стан енергоефективності будівель в Україні.....	26
1.2 Забезпечення розвитку будівель з майже нульовим споживанням енергії....	30
1.2.1 Вимоги до теплової оболонки будівлі.....	31
1.2.2 Вимоги до джерела енергії будівлі.....	36
1.2.3 Вимоги до рівня споживання первинної енергії	39
1.2.4 Вимоги до технічних систем будівлі.....	41
1.3 Комп'ютерне моделювання при здійсненні оцінки відповідності будівель рівню nZEB	43
Висновки до розділу 1	47
РОЗДІЛ 2 ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ БУДІВЛЕЮ ПРИ ПОКРАЩЕННІ ТЕПЛОВОЇ ОБОЛОНКИ БУДІВЛІ	51
2.1 Послідовність проведення оцінювання ефективності споживання енергії будівлею при покращенні теплової оболонки будівлі	51
2.2 Характеристики репрезентативної моделі	55
2.3 Оцінка енергоспоживання офісної будівлі	58
2.4 Технічна оцінка покращення теплової оболонки будівлі	66
2.5 Верифікація результатів енергетичного моделювання	75
2.6 Економічна оцінка покращення теплової оболонки будівлі.....	81
Висновки до розділу 2	99
РОЗДІЛ 3 ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ КОНЦЕПЦІЇ NZEB	103
3.1 Послідовність проведення оцінювання ефективності використання відновлювальних джерел при реалізації концепції nZEB.....	104
3.2 Огляд потенціалу відновлювальної енергетики в Україні	105

3.3 Технічна оцінка використання біомаси для теплозабезпечення репрезентативної будівлі	109
3.4 Технічна оцінка використання теплового насоса для теплозабезпечення будівлі різних рівнів теплового захисту будівлі	117
3.5 Економічна оцінка використання відновлювальних джерел для теплозабезпечення будівлі різних рівнів теплового захисту будівлі.....	134
Висновки до розділу 3	143
РОЗДІЛ 4 ОЦІНКА РІВНЯ СКОРОЧЕННЯ ВИКИДІВ ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ ПРИ ПІДВИЩЕННІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЛІ	146
4.1 Послідовність проведення оцінки рівня скорочення викидів діоксиду вуглецю при підвищенні енергоефективності будівлі.....	147
4.2 Вплив експлуатації будівель на екологію	148
4.3 Оцінка рівня скорочення прямих та непрямих викидів при реалізації заходів енергоефективності	150
4.4 Забезпечення скорочення непрямих викидів при експлуатації будівлі.....	161
Висновки до розділу 4	168
ВИСНОВКИ.....	171
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	176
ДОДАТОК.....	195

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ЄС	-	Європейський Союз
ОВК	-	опалення, вентиляція та кондиціювання
nZEB	-	near zero energy building
CO ₂	-	діоксид вуглецю
ГДОП	-	градусо – доби опалювального періоду
MEA	-	Міжнародне енергетичне агенство
ТН	-	тепловий насос
USAID	-	United States Agency for International Development
SAREP	-	The South Asia Regional Energy Partnership
BIM	-	Building Information Modeling
CAD	-	computer – aided design
COP	-	coefficient of performance
$R_{q \min}$	-	мінімально допустиме значення приведенного опору теплопередачі
λ	-	коефіцієнт теплопровідності
ρ	-	густина
B_t	-	інтегральна вартість заходів підвищення енергоефективності
$B_{\text{енерг}}$	-	річні затрати за спожиті енергоносії
$B_{\text{експл}}$	-	інші затрати
I_0	-	капітальні затрати на придбання та встановлення теплогенеруючого обладнання
$I_{\text{із}}$	-	витрати, спрямовані на покращення теплового захисту будівлі
I_{co}	-	витрати на придбання приладів опалення, покращення системи вентиляції
l	-	коефіцієнт, що враховує приріст цін на енергоносії

E	-	ставка дисконтування
E_{CO_2}	-	обсяг валових викидів діоксиду вуглецю
k_{CO_2}	-	показник емісії діоксиду вуглецю
Q_{H}^{p}	-	нижча робоча теплота згорання палива
B	-	витрата палива

ВСТУП

Актуальність теми. Ефективність використання енергії будівлями в Україні є надзвичайно низькою у контексті глобального розвитку. Враховуючи підхід масової забудови у часи існування Радянського Союзу та досить лояльні вимоги до огорожувальних конструкцій будівель щодо забезпечення надійного теплового захисту будівлі, більша частина будівель старої забудови представлена неенергоефективними адміністративними та житловими спорудами. Попри підтримку Уряду ідей реконструкцій та термосанації подібних будівель, темпи реалізації проектів з підвищення енергоефективності залишаються повільними. Така тенденція зберігається, в тому числі, і за рахунок відсутності достатньої проінформованості громадян щодо переваг енергоефективності, і за рахунок помірних тарифів на енергоносії, що не створюють підґрунтя для пошуку шляхів економії за рахунок впровадження заходів підвищення енергоефективності або енергозбереження.

Враховуючи взяті державою зобов'язання імплементації міжнародних норм в сфері енергоефективності зокрема, шляхом підписання Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони, забезпечення енергоефективності будівель є одним із завдань Стратегії енергетичної безпеки України та Енергетичної стратегії до 2050 року. Забезпечення необхідного (нормативного) рівня теплового захисту будівлі та збільшення частки генерації енергії з відновлюваних джерел, забезпечення необхідного для будівлі обсягу енергії з відновлюваних джерел, що працюють самостійно або комплексно є одним із шляхів підвищення енергоефективності будівель як у новому будівництві, так і в реконструкції будівель радянської забудови.

На сьогодні дослідження, пов'язані з комплексним підходом шляхів модернізації будівель старої забудови (від забезпечення теплового захисту будівлі до заміни

джерел енергії) та техніко – економічною оцінкою такою підходу потребують розвитку в Україні. Натомість, більша увага зосереджується на проведенні подібних досліджень для нових будівель. Питаннями, що пов’язані підвищенням енергоефективності будівельного сектору старої забудови за рахунок використання сучасних підходів займалися Дешко, Білоус, Буяк, Суходуб, Басок, Фіалко, Фаренюк, Tsikaloudaki та інші науковці. Таким чином, науковим завданням даної роботи є проведення техніко – економічної оцінки вимог до огорожувальних конструкцій будівель та її інженерних систем та представлення найбільш оптимального варіанту забезпечення ефективного споживання енергії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Проведені дослідження відповідають вимогам нормативно – правових актів у сфері енергоефективності, а саме: Законам України «Про енергетичну ефективність», «Про альтернативні джерела енергії», «Про енергетичну ефективність будівель», Розпорядженню КМУ «Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року», Наказу Міністерства розвитку громад та територій України «Деякі питання запровадження вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії», направленості тематики науково-дослідної роботи (НДР) кафедри теплотехніки та енергозбереження та кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського». Зокрема, матеріали наукової роботи рекомендовано до використання у навчальних дисциплінах «Основи інжинірингу життєвого циклу проектів з енергоефективності», «Методи аналізу енергоефективності будівель», «Прикладні задачі енергозбереження» за освітньо – професійною програмою «Енергетичний менеджмент та інжиніринг теплоенергетичних систем» спеціальності Теплоенергетика. Матеріали дисертаційної роботи використано під час виконання держбюджетної НДР “Інжинірингові аспекти функціонування системи енергоменеджменту об’єктів житлово – громадської сфери” (№ держреєстрації 0119U100670) та держбюджетної НДР “Розробка комплексу

рекомендацій з реновації історичних будівель для досягнення показників nZEB на основі енергетичного моделювання” (№ держреєстрації 0125U000579), а також в навчальному процесі.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є розробка та обґрунтування комплексу науково-практичних рішень з підвищення ефективності теплозабезпечення громадських об’єктів під час здійснення модернізації громадських об’єктів з урахуванням зниження негативного впливу на довкілля та досягнення показників nZEB. З метою досягнення поставленої мети, були виконані наступні завдання:

- аналіз стану енергоефективності ефективності енерговикористання громадськими об’єктами в Україні та Європі, а також сучасних підходів до забезпечення енергоефективності;
- оцінка рівня теплозабезпечення офісної будівлі та ефективності джерел теплопостачання з використанням програмних продуктів динамічного моделювання енергоспоживання будівлі за різних рівнів теплового захисту;
- проведення техніко – економічної оцінки диверсифікації джерел теплогенерації й комплексної термомодернізації будівлі з використанням методу інтегральних витрат;
- аналіз екологічних переваг оптимізації джерел теплозабезпечення й покращення теплової оболонки будівлі, в тому числі, за використання доступних механізмів підтримки споживачів.

Об’єкт дослідження – процеси евиробництва теплової енергії та формування режимів роботи джерел теплопостачання в системах забезпечення теплових навантажень будівлі.

Предмет дослідження – визначення показників енергоефективності та обсягів скорочення прямих та непрямих викидів при переоснащенні джерел теплопостачання будівлі на альтернативні види палива та при термомодернізації.

Наукова новизна полягає у:

- розробці комплексу моделей для визначення показників ефективності споживання енергії будівелею та джерел як енергетичної системи, що поєднує нестационарні 3D моделі енергетичного стану будівлі в комплексі з джерелами енергії, та техніко-економічні показники на основі зміни інтегральної вартості;

- обґрунтуванні досягнення показників забезпечення майже нульового споживання енергії офісними будівлями за диверсифікації джерел теплозабезпечення;

- проведенні оцінки рівня скорочення прямих та непрямих викидів діоксиду вуглецю при теплозабезпеченні відновлюваними джерелами для досягнення майже нульового споживання енергії;

- оцінюванні економічних переваг модернізації енергетичних установок будівлі та її енерговикористання в процесі досягнення майже нульового споживання.

Практична цінність результатів дослідження полягає у рекомендаціях щодо підвищення енергетичної ефективності теплозабезпечення офісних будівель (радянської забудови) на етапі здійснення модернізації при забезпеченні комфортних умов, а також у рекомендаціях щодо забезпечення декарбонізації будівель в Україні. Зокрема, результати дослідження можуть використовуватись органами місцевого самоврядування та освітньо-науковими закладами при здійсненні оцінки зниження питомих витрат енергії та викидів двоокису вуглецю за використання відновлюваних джерел та їх комбінації.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є завершеною науковою працею. Здобувачем особисто отримано всі результати, представлені у роботі.

Апробація результатів дисертації. Результати дослідження, представлені у дисертаційній роботі представлено на міжнародних науково – технічних та науково – практичних конференціях, зокрема: міжнародній науково-технічній конференції інституту енергозбереження та енергоменеджменту «Енергетика. Екологія. Людина» (Київ, 2020, 2022), міжнародній науково-практичній конференції «Енергоефективний університет» (Київ, 2022), Аспірантських читаннях пам'яті проф. Артура Праховника (Київ, 2021), міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених і

студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (Київ, 2023), а також висвітлено у начальному посібнику для студентів спеціальностей 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та 144 «Теплоенергетика».

Публікації. Матеріали досліджень, представлені у дисертаційній роботі, опубліковано в 11 наукових працях: 6 статей у наукових фахових виданнях, дві з яких – у виданні іноземної держави, що внесена до міжнародної бази Scopus), 4 тез з доповідей у збірниках матеріалів конференції.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, списку використаних джерел із 160 найменувань та 2 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 199 сторінок, 39 рисунків, 22 таблиць.

РОЗДІЛ 1. ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ БУДІВЕЛЯМИ ТА СПОРУДАМИ

1.1 Стан енергоефективності будівель в Україні

Енергоефективність є об'єднуючою ціллю Глобальних цілей сталого розвитку [1] та сприяє більш ефективному використанню ресурсів, зменшенню впливу на навколишнє середовище та забезпеченню стійкого розвитку. Зосередженням виконання зобов'язань щодо цілей 7 (доступна та чиста енергія), 12 (відповідальне споживання) та 13 (боротьба зі зміною клімату) [1] у Європейському Союзі є реалізація заходів, описаних у Директиві про енергетичну ефективність [2]. Варто зазначити, що вперше прийнята в 2012 році Директива [2] становила зобов'язання країн ЄС досягти скорочення загального споживання енергії на 20% до 2020 року. Разом з тим, в рамках впровадження енергоефективності у будівельний сектор, частка загального споживання енергії яким у країнах Європейського Союзу станом на 2021 рік становила майже 42% [3], Європейською Комісією ратифіковано Директиву про енергетичну ефективність будівель [4].

Україна взяла на себе зобов'язання у частині реалізації енергоефективних заходів з метою зменшення загального енергоспоживання секторами економіки та виконання умов [2] та [4] шляхом приєднання до Енергетичного Співтовариства [5] у 2011 році. Зокрема, у 2014 році набула чинності Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони [5], виконання умов якої, в тому числі, означало реформування, що зумовить зменшення енергоспоживання та скорочення вуглецевого сліду. З метою скорочення загального енергоспоживання без негативного впливу на умови комфортності перебування людей у будівлях, а також з метою реалізації ініціатив [3,4], 2017 року набув чинності ЗУ «Про енергетичну ефективність будівель» [6].

У 2018 році, в рамках пакету «Чиста енергія для європейців» [7], Європейська Комісія представила оновлену Директиву про енергоефективність [8], головним завданням якої є досягнення енергоефективності до 2030 року на рівні щонайменше 32,5%, порівняно з прогнозованим у 2007 році показником та оновлену Директиву про енергетичну ефективність будівель [9], з вищими амбіціями щодо енергоефективності громадських та житлових будівель. Зокрема, оновленою Директивою про енергетичну ефективність будівель, визначено [9], що всі будівлі, побудовані після 2021 року повинні бути такими, споживання енергії яких близьке до нуля (near zero energy building, nZEB). Директива [9] пояснює будівлю з майже нульовим споживанням енергії як таку, що має високу енергетичну ефективність, де майже вся необхідна енергія для опалення та інших потреб покривається за рахунок відновлювальних джерел. Разом з тим, кожна з країн – членів Європейського Союзу зобов'язана ратифікувати показники, що визначають таку будівлю, а саме: рівень теплового захисту будівлі, питомий показник використання первинної енергії (в кВт·год/м²·рік) та відсоток енергії у загальному енергоспоживанні, що забезпечується відновлювальними джерелами енергії.

У 2023 році Європейська Комісія переглянула зобов'язання, визначені Директивою [8] та оголосила про необхідність скорочення кінцевого енергоспоживання щонайменше на 37% з метою досягнення цілей декарбонізації (скорочення викидів парникових газів щонайменше на 55% до 2030 року порівняно з 1990 роком) в оновленій Директиві про енергоефективність [10]. Згідно повного огляду Національного застосування визначення nZEB [11], зобов'язання щодо визначення визначальних параметрів будівлі з майже нульовим споживанням енергії не виконано в повній мірі всіма країнами Європейського Союзу, проте 22 з них закріпили межі допустимого споживання первинної енергії, а шістнадцятьма визначено відсоток відновлювальної енергії, що забезпечить необхідну потребу в енергії. У доповнення до оновлених планів, визначених Директивою [10], Європейська Комісія також переглянула Директиву про енергетичну ефективність

будівель [12] з метою підвищення темпів покращення енергетичних характеристик існуючої будівлі, вимоги Директиви [12] повинні бути перенесені у національне законодавство до 29 травня 2026 року. Підвищення темпів покращення енергетичних характеристик будівель відбуватиметься згідно з пакетом підтримки впровадження Директиви про енергетичну ефективність будівель, що ухвалений 30 липня 2025 року та пропонує для країн-членів ЄС чіткі рекомендації щодо впровадження Директиви [12]:

- Делеговане регулювання про перегляд методологічної бази розрахунку оптимальних рівнів витрат [13], що оновлює методологічні рамки для розрахунку економічно оптимальних рівнів мінімальних вимог лр енергоефективності в нових та існуючих будівлях (щодо яких здійснюється капітальний ремонт) а також для їх будівельних елементів;

- Імплементативний регламент [14], який встановлює загальні шаблони для передачі інформації про енергетичну ефективність будівель до Обсерваторії будівельного фонду ЄС;

- Керівний документ з тринадцятьма додатками [15], що містить опис основних змін у енергоефективності будівель та практичні вказівки щодо вирішення потенційних та реальних питань.

Зважаючи на суттєві зміни у сфері енергоефективності та енергоефективності будівель зокрема, Міністерство розвитку громад та територій України розробило наказ «Деякі питання запровадження вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії» [16]. Разом з тим, Урядом схвалено Концепцію реалізації державної політики у сфері забезпечення енергетичної ефективності будівель у частині збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії [17] та затверджено Національний план збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії [18], перегляд якого було заплановано на четвертий квартал 2025 року.

Наказ Міністерства розвитку громад та територій України «Деякі питання запровадження вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії» [16] визначає перелік вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії. Такий перелік, згідно [16] стосується класу енергоефективності будівлі, показника споживання первинної енергії з невідновлювальних джерел, частки відновлювальних джерел енергії у енергобалансі будівлі, теплової оболонки будівлі, її повітропроникності та інженерних мереж. Зокрема, [16] прописує що клас енергоефективності повинен відповідати класу не нижче «А» для нового будівництва та не нижче «В» для будівель, у яких здійснюється реконструкція. У доповнення, частка енергії, яка споживається на потреби опалення та охолодження від відновлювальних джерел, повинна становити не менше 53% для першої та не менше 57% для другої температурної зони. Разом з тим, наказ [16] визначає максимальні значення показника споживання первинної енергії з невідновлювальних джерел для будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії у випадку нового будівництва та у випадках здійснення реконструкції існуючих будівель.

Важливість слідування рекомендаціям, викладеним у законодавчих актах щодо енергоефективності підтверджується позитивними зрушеннями у частині енергоспоживання. Так, згідно даних Євростату [19], станом на 2019 площа забудови нових громадських та житлових будівель становила майже 380 млн. м², що майже на 20 млн. м² менше, ніж у 2021 році та на 10 млн. м² менше, ніж у 2022. Загальна площа забудови житлових та нежитлових будівель в Україні у 2019 році склала 12,3 млн. м² (за даними [20]). Зокрема, величина споживання енергії будівельним сектором (від етапу проектування до власне експлуатації будівель) у Європі у 2019 році становила 4 381,6 ТВт·год енергії [21], що на 2% більше, порівняно з величиною споживання у 2020 році попри зниження динаміки будівництва. За оцінками Укрстату [22], кінцеве споживання енергії житловими та громадськими будівлями у 2019 становило 219,08 ТВт·год, що на 11% менше, порівняно з 2018 роком попри стрімке зростання нового будівництва протягом 2019 року (20 % відповідно до [23]).

З метою підтвердження планів України у забезпеченні підвищення енергоефективності, Урядом схвалено Національний план з енергетики та клімату на період до 2030 року [24], що визначає основні цілі та прописує конкретні плани з метою забезпечення сталого енергетичного розвитку та декарбонізації України.

Україна володіє високим потенціалом для покращення енергоефективності, проте зустрічається з викликами щодо зменшення споживання первинної енергії через застарілі технології та нестачу інвестицій у сферу енергоефективності.

1.2 Забезпечення розвитку будівель з майже нульовим споживанням енергії

За оцінками Київської школи економіки [25], станом на січень 2024 року в Україні знищено або пошкоджено понад 250 тис. житлових будівель, 580 адміністративних будівель та щонайменше 3,8 тис. та 1,8 тис. навчальних та культурних закладів відповідно. Для забезпечення відновлення зруйнованої інфраструктури та формування основних завдань щодо забезпечення розвитку економіки, постановою Кабінету Міністрів України «Про реалізацію експериментального проекту щодо відновлення населених пунктів, які постраждали внаслідок збройної агресії російської федерації» [26] визначено, що відновлення населених пунктів включає виготовлення проектної документації, нове будівництво, реконструкцію, реставрацію, капітальний та поточний ремонт а також придбання товарів. Зазначений перелік чітко регламентується законодавством, зокрема у частині енергоефективності. Для забезпечення необхідного рівня енергоефективності зруйнованих будівель, схвалено Положення про Національну раду з відновлення України від наслідків війни [27], головними завданнями якої є підтримка та забезпечення енергетичної та екологічної безпеки, забезпечення будівництва та відновлення згідно вимог чинного законодавства. З опублікованих Матеріалів робочої групи Національної ради з відновлення України від наслідків війни [27],

одним із завдань посиленої енергетичної безпеки є підвищення енергоефективності будівельного сектору на 35%. У відповідності до опублікованих проєктів Плану відновлення України [28] у контексті відновлення та модернізації житла й інфраструктури регіонів, заплановано будівництво будівель із близьким до нульового рівнем енергоспоживання (зокрема, пілотне будівництво будівель із близьким до нульового рівнем енергоспоживання, у тому числі шляхом відбудови зруйнованих будівель відповідно до вимог nZEB).

1.2.1 Вимоги до теплової оболонки будівлі

За визначенням, приведеним у Директиві [4, 9], будівля з майже нульовим споживанням енергії означає висоенергоефективну будівлю, основна потреба в енергії якої забезпечується відновлювальними джерелами енергії. Високоенергоефективна будівля – це будівля, що створює комфортні умови мікроклімату за рахунок ефективного утеплення огорожувальних конструкцій будівлі та ефективного використання ресурсів [4, 9]. Зокрема, в рамках виконання завдань щодо декарбонізації будівельного сектору, утеплення огорожувальних конструкцій повинно забезпечуватись за рахунок використання екологічно безпечних для утеплення матеріалів. З метою виконання цілей Європейської зеленої угоди [29] щодо підвищення енергоефективності будівельного сектору, Європейською Комісією представлено стратегію «Хвиля оновлення для Європи – озеленення наших будівель, створення робочих місць, покращення життя» [30], що має на меті подвоєння щорічних темпів енергооновлення за рахунок реновації найгірших з точки зору енерговикористання будівель, реновації громадських будівель та закладів соціальної сфери а також декарбонізації систем опалення та охолодження. Шляхи досягнення мети для кожної країни ЄС повинні корелюватись з їх державною енергетичною стратегією. Як зазначалось раніше (див. п. 1.1), оновлена Директива [12] визначає більш амбітні цілі у підвищенні енергоефективності будівель. Так, згідно Директиви

[12], вимога ЄС щодо відповідності нового будівництва визначенню nZEB замінюється поняттям «будівель з нульовим рівнем викидів» починаючи з 2028 року (в т.ч., для будівель органів державної влади) та починаючи з 2030 – для всіх інших нових будівель. Така вимога наблизатиме ЄС до кліматичної нейтральності та представить результати принципу «енергоефективність понад усе». Враховуючи, що станом на 2024 рік розпочато перемовини між Україною та ЄС про вступ до Союзу [31], окремі цілі ЄС щодо енергоефективності й декарбонізації будівель та шляхи їх реалізації повинні розглядатися як потенційні стратегічні цілі й порядок дій і для України. Зважаючи на те, що оновлені Директиви [10, 12] будуть імплементовані лише після початку 2026 року, у подальшому розглядатимуться можливості України досягти цілей, зазначених у Директивах [8, 9].

Для забезпечення ефективної теплової оболонки будівлі на законодавчому рівні необхідно узгодити основні вимоги до огорожувальних конструкцій з урахуванням кліматичних особливостей регіону та цілей енергетичної стратегії. Враховуючи суттєві розбіжності щодо кліматичних зон країн Європейського Союзу, які у різній мірі варіюються від помірного до середземноморського, не існує єдиного підходу до теплофізичних параметрів огорожувальних конструкцій, здатних забезпечити необхідний мікроклімат у будівлях. Робота [32] являє собою, власне, підхід до оцінки енергопотреб для різних кліматичних зон Європи на основі аналізу граду – діб опалення та охолодження. Автори [32] наголошують на використанні такої моделі при проектуванні та експлуатації будівель та при узгодженні вимог до приведенного опору теплопередачі різних типів огорожувальних конструкцій будівлі.

З метою оцінки загального підходу до визначення ефективності теплової оболонки, розглянуто вимоги до огорожувальних конструкцій країн ЄС, що слідують політиці масштабування будівель з майже нульовим споживанням енергії, і середньозважені значення градусо – діб їх опалювального періоду [33] і проведено порівняння з відповідними параметрами в Україні. Вищевикладену інформацію приведемо у таблиці 1.2.1.1.

Таблиця 1.2.1.1. Градусо – доби опалювального періоду та вимоги до огорожувальних конструкцій будівлі у країнах Європейського Союзу та Україні

Країна ЄС	ГД ОП, К·діб	Значення R_{qmin} , м ² ·К/Вт				
		Зовнішні стінові огоджувальні конструкції	Зовнішні двері	Суміщення покриття, що межують з зовнішнім повітрям	Перекриття, що межують із зовнішнім повітрям, та над неопалювальними підвалами	Світлопрозорі огоджувальні конструкції
1	2	3	4	5	6	7
Австрія	3228,80	2,86	0,59	5,00	3,33	0,83
Бельгія	2377,05	4,17	0,50	4,17	3,33	0,50
Болгарія	2307,09	3,57	0,45	4,00	2,50	0,71/0,59
Хорватія	2114,78	3,3	0,5	4,00	2,50	0,91
Кіпр	695,96	2,56	0,71	1,72	0,50	0,26
Чехія	3083,31	5,00	0,83	4,35	2,22	0,63
Данія	3019,14	3,33	0,71	5,00	5,00	1,25
Естонія	4117,58	4,00	0,91	5	5	0,91
Фінляндія	5276,82	5,88	1,00	11,11	*	1,00
Франція	2035,58	2,22	0,56	4,00	2,13	0,53
Греція	1537,62	1,82	0,36	2,22	2,22	0,48
Іспанія	1478,27	2,04	0,18	2,50	1,43	0,91
Нідерланди	2395,80	4,55	0,61	4,00	3,57	0,61
Ірландія	2548,90	5,56	0,71	5,00	5,56	0,71
Литва	3773,19	6,06	0,49	6,67	5,56	1,00
Люксембург	2671,19	7,69	0,74	9,09	5,88	1,11
Латвія	4025,74	4,00	0,50	4,35	2,86	0,91
Мальта	543,62	0,64	0,25	2,50	0,64	0,25
Німеччина	2736,32	2,86	0,53	2,86	2,86	0,53
Польща	3200,38	6,25	0,71	8,04	5,63	0,71
Португалія	967,88	1,43	2,00	2,00	2,00	0,23
Румунія	2751,22	2,00	0,67	4,55	2,86	0,67

Продовження таблиці 1.2.1.1.

1	2	3	4	5	6	7
Словаччина	3042,68	6,67	1,67	10,00	6,67	1,67
Словенія	2643,91	5,00	1,00	5,56	1,00	1,00
Швеція	4919,42	5,84	0,83	9,50	6,67	0,83
Угорщина	2549,79	4,17	0,69	5,88	3,85	1,00
Італія	1734,63	3,57	0,56	1,25	3,13	0,56
Україна	3718,5	4,0	0,7	7,0	5,0	0,8

**підвищення енергоефективності, наскільки це можливо*

Проаналізувавши результати, приведені у таблиці 1.2.1.1, виділено 5 країн, мінімальні вимоги до огорожувальних конструкцій яких є найбільш жорсткими у Європейському Союзі: Словаччина, Люксембург, Фінляндія, Естонія та Швеція. Для якісної оцінки основних відмінностей щодо підходу забезпечення ефективної теплової оболонки у країнах Європейського Союзу та Україні, виділено Литву, Латвію, Естонію, Австрію, Польщу, Чехію та Словаччину як країни, кількість градусо – діб опалювального періоду яких максимально наближена до українських (відмінність середньозважених значень градусо – діб опалювального періоду становить відповідно 1,47%, 8,26%, 10,73%, 13,17%, 13,93%, 17,08% та 18,17%). Разом з тим, варто виділити, в тому числі, країни Європейського Союзу з найбільш холодним кліматом, як Фінляндія та Швеція, градусо – доби опалювального періоду яких є найбільшими.

Варто зазначити, що частина приведених у переліку країн встановлює, для прикладу, вимоги до вертикальних огорожувальних конструкцій, що межують з ґрунтом (Румунія, Болгарія, Хорватія, Греція та Іспанія). Окремі вимоги до стін, що примикають до непромерзаючої стіни приміщення на зразок гаража, встановлені у Польщі, Румунії, Німеччині, Австрії, Болгарії, Хорватії, Франції, Іспанії. Такі особливості свідчать про зосередження на огорожувальних конструкціях, тепловтрати крізь які визначені кількісно та є суттєвими у загальному балансі теплових страт через стіни.

Амбітні цілі, що були поставлені [8] та [9], зумовили пошуки рішень щодо будівництва максимально високого рівня теплового захисту будівлі. Авторами роботи [34], для прикладу, проведено аналіз використання енергії приватним будинком, значення термічних опорів огорожувальних конструкцій якого значно перевищували встановлені вимоги на законодавчому рівні. На етапі експлуатації такий підхід забезпечив високоенергоєфективну теплову оболонку за рахунок використання інноваційних енергоєфективних матеріалів (як, для прикладу, розумне скло) [34, 35].

Вимоги до параметрів огорожувальних конструкцій будівель для України також є оновленими та відповідають вимогам [36]. З 1 вересня 2022 року реконструкція, капітальний ремонт та нове будівництво споруд здійснюються згідно вимог [36], до цього часу вищенаведений перелік робіт здійснювався у відповідності до [37]. Порівняння значень приведенного опору теплопередачі для першої температурної зони згідно діючих та таких, що втратили чинність, будівельних норм, зведено у таблицю 1.2.1.2.

Таблиця 1.2.1.2. Порівняння вимог до огорожувальних конструкцій будівлі в Україні згідно [36] та [37] для першої температурної зони

Тип огорожувальної конструкції	Мінімально допустиме значення приведеного опору теплопередачі R_{qmin} огорожувальних конструкцій згідно вимог		Відсоток зростання R_{qmin} , %
	[37]	[36]	
Зовнішні стіни	3,3	4,0	21,2
Перекриття над проїздами та неопалювальними підвалами	3,75	5,0	33,3

Продовження таблиці 1.2.1.2

Світлопрозорі конструкції	0,75	0,9	20,0
Двері зовнішні	0,6	0,7	16,67
Суміщене перекриття	5,35	7,0	30,84

Проведений аналіз вимог до огорожувальних конструкцій в країнах ЄС та України дозволяє стверджувати про спільне акцентування на забезпеченні енергоефективних, екологічно – безпечних та стійких до кліматичних умов огорожувальних конструкцій. Зокрема, попри відмінності факторів впливу щодо вимог до теплової оболонки будівлі (регіональні відмінності, законодавчі акти та енергетичні стратегії) спостерігається спільна для всіх країн тенденція щодо підвищення енергоефективності та забезпечення комфорту перебування людей в приміщеннях.

Зважаючи на необхідність розвитку будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії у контексті забезпечення енергоефективності, наказом [16] встановлено вимоги до значень приведенного опору теплопередачі світлопрозорих огорожувальних конструкцій будівель. Зокрема, мінімальне значення приведенного опору теплопередачі для світлопрозорих огорожувальних конструкцій для першої температурної повинно становити $1,1 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$ (на 22,2% більше, аніж значення згідно вимог [36]), а для зовнішніх дверей – $0,8 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$ (на 14,3% більше відповідного значення згідно вимог [36]).

1.2.2 Вимоги до джерела енергії будівлі

На виконання вимог Директиви про енергоефективність [8] та Директиви про відновлювані джерела [38] щодо декарбонізації секторів економіки, Європейський Союз поставив ціль щодо використання частки відновлюваних джерел енергії у загальному кінцевому енергоспоживанні на рівні 32% до 2030, порівняно з

прогнозами базового сценарію 2020 року. У зв'язку з вторгненням росії на територію України, загальний показник скорочення енергоспоживання в Європі було переглянуто (з 32% до 45%), і в березні 2023 року зафіксовано на рівні 42,5% [39]. Такі зміни зумовлені як швидкою реакцією на міжнародні санкції у відношенні росії, яка була головним експортером природного газу до країн Європи, так і оцінкою можливостей заміщення природного газу відновлюваною енергією, темпи масштабування якої значно перевищили очікувані результати на кінець 2022 року. Згідно статті 10 Директиви про енергетичну ефективність будівель [9], при кожному збільшенні економії енергії на 1%, зниження імпорту природного газу становить 2,6%, що створює амбітні можливості для декарбонізації будівельного сектору та забезпечення енергонезалежності від імпортованих паливно – енергетичних ресурсів.

З метою забезпечення зазначеного показника скорочення загального енергоспоживання, пріоритетними завданнями країн Європейського Союзу є розвиток енергозбереження та відновлюваної енергетики. За даними Євростату [40], електроенергія та природний газ є найбільш поширеним енергоресурсом для забезпечення необхідних потреб промислового та житлового сектору. Попри швидкі темпи розвитку відновлюваної енергетики у країнах Євросоюзу, до 2022 року частка виробництва енергії з відновлюваних джерел не покривала в повній мірі необхідні потреби. Згідно звіту [41], у 2022 році енергія, отримана від відновлюваних джерел вперше перевищила обсяг енергії, отриманої шляхом спалювання природного газу, а у 2023 році відповідний показник був вищий на 1,4%. Зокрема, країнами з найбільшою часткою виробництва енергії шляхом використання відновлюваних джерел, є Німеччина, Швеція, Фінляндія та Данія.

Відповідно до Директиви про енергетичну ефективність будівель [9] та з метою реалізації цілей щодо масштабування та розвитку будівель з майже нульовим споживанням енергії, кожна з країн Європейського Союзу зобов'язана на законодавчому рівні затвердити частку забезпечення енергії з відновлювальних джерел. На сьогодні, лише в 16 країнах Союзу визначено прямі вимоги щодо

відновлюваної енергії [42]. Частина країн союзу (8 країн) визначає частку відновлюваної енергії для енергозабезпечення будівель шляхом варіювання значень від нуля до 50% або ж мінімальним рівнем відновлюваної енергії в кВт·год/м²/рік. Відповідно до статті 15 Закону України «Про енергетичну ефективність» [6], Національний план збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії [18] повинен містити, зокрема вимоги та заходи щодо збільшення використання енергії з відновлюваних джерел у нових будівлях та будівлях, які підлягають термомодернізації. Затверджений наказ [16] регламентує, що частка енергії, вироблена з відновлювальних джерел енергії у будівлях типу nZEB, що споживається на потреби опалення та охолодження, повинна становити не менше 53% для першої температурної зони та не менше 57% для другої.

Загальноприйняте визначення відновлювальних джерел енергії [43] поширюється на енергію, отриману від Сонця, вітру, землі, води (гідроенергія та енергія моря, океану) та біомаси. За оцінками МЕА [41], у 2021 році найбільша частка виробництва енергії з відновлюваних джерел у Європі належить вітровим електростанціям (35 ТВт або 52% від загального виробництва енергії відновлювальними джерелами), за тим – сонячним електростанціям (17 ТВт або 25%), після – виробництво енергії шляхом спалювання біомаси (8 ТВт або 12%), і наостанок – гідроенергетика (7 ТВт або 11%). Подібний розподіл щодо виробництва енергії відновлювальними джерелами в Україні має наступний вигляд [44]: генерація енергії сонячними електростанціями склала у 2021 році 7,6 ГВт або 79% загальної генерації енергії відновлювальними джерелами, вітровими електростанціями – 1,7 ГВт або 17%, за рахунок спалювання біомаси/біогазу – 0,28 ГВт або 3% та за рахунок гідроенергетики – 0,12 ГВт або 1%. Разом з тим, за оцінками Біоенергетичної асоціації, розвиток біомаси для забезпечення енергії є достатньо високим. Так, згідно даних [45], використання біомаси для отримання теплової енергії у 2020 році становить лише 5% у загальному розподілі, у Швеції, Австрії, Фінляндії та Латвії ці показники становили відповідно 60%, 31%, 27% та 15% [46].

Не зважаючи на не зовсім чітке визначення частки покриття необхідної енергії за рахунок відновлювальних джерел, орієнтація на курс, що просувається Директивою про енергоефективність [8], Директивою про енергетичну ефективність будівель [9] та Директивою про відновлювальні джерела енергії [39], забезпечує розвиток використання чистої енергії самостійно чи у комбінації з іншими технологіями. Проведена оцінка підходу до використання nZEB концепції для будівель у Центральній та Східній Європі [35] демонструє використання оптимізованих моделей управління системами опалення, вентиляції та кондиціонування за різних кліматичних умов та поведінкових особливостей людей, що перебувають у будівлі шляхом використання комбінованих відновлювальних джерел енергії. Авторами [47] представлено модель забезпечення енергоспоживання будівель у Австрії з використанням теплового насоса та фотоелектричних сонячних установок замість поширених газових систем опалення. Зокрема, проведено техніко – економічну оцінку такої заміни з урахуванням існуючих стимулюючих програм субсидіювання та приросту тарифів на енергоносії, та проаналізовано рівень скорочення викидів діоксиду вуглецю.

1.2.3 Вимоги до рівня споживання первинної енергії

«Первинна енергія» означає енергію з відновлюваних і невідновлюваних джерел, яка не зазнала жодного процесу перетворення чи трансформації [9]. Враховуючи велику розбіжність щодо кліматичних особливостей країн – членів Європейського Союзу, сталого підходу щодо забезпечення будівель з майже нульовим споживанням енергії, спільного для всіх країн, нема. У відповідності до Директиви про енергетичну ефективність будівлі [9] та враховуючи амбітні цілі щодо скорочення споживання енергії будівельним сектором, Європейська Комісія розробила Рекомендації [48] у розрізі кліматичних регіонів Європи та зафіксувала контрольні показники щодо споживання первинної енергії для будівель різного призначення. Контрольні

показники щодо рівня первинної енергії, згідно [48] приведені для чотирьох кліматичних зон: середземноморський, океанічний, континентальний та скандинавський клімат. Так, для офісних будівель для різних кліматичних зон первинна енергія повинна знаходитись в межах:

- 1) середземноморський клімат – $80 - 90 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2 \cdot \text{рік}$;
- 2) океанічний клімат – $85 - 10 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2 \cdot \text{рік}$;
- 3) континентальний клімат – $85 - 100 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2 \cdot \text{рік}$;
- 4) скандинавський клімат – $85 - 100 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2 \cdot \text{рік}$.

Клімат України є помірно – континентальним на практично всій території України. Згідно [36], виділяють II температурні зони, де I температурна зона включає практично всі області України, II ж – південь України (Запорізька, Миколаївська, Херсонська, Одеська області, АР Крим) та Чернівецьку область. Це означає, що загальний підхід до визначення використаної первинної енергії може здійснюватись відповідно до [48] в залежності від типу клімату.

Контрольний показник споживання первинної енергії в Україні встановлений Концепцією [17] та не повинен перевищувати зазначений у концепції показник. Так, згідно наведеного у [17] додатку, для будівель різного призначення та різного конструктиву (поверховість) для першої та другої температурних зон максимальний питомий показник споживання енергії для нових будівель варіюється від $26 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$ (нові громадські будівлі висотою 10 – 24 поверхи) до $92 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$ (1 – 3 поверхові житлові будівлі) для першої температурної зони та від $21 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$ до $88 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$ для другої температурної зони відповідно. У разі реконструкції або здійсненні капітального ремонту будівель, значення питомого споживання енергії для громадської будівлі висотою 10 – 24 поверхи, згідно [17], не повинно перевищувати $31,2 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$ для першої температурної зони та $25,2 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$ для другої температурної зони. Разом з тим, згідно [16], максимальне значення показника споживання первинної енергії з невідновлювальних джерел енергії для будівель з близьким до нуля рівнем споживання енергії (громадська будівлі 4-9 поверхів) не

повинен перевищувати 29 кВт·год/м³ для першої температурної зони та 22 кВт·год/м³ – для другої у випадку реконструкції.

Підсумовуючи вищевикладене, можна зосередити свою увагу на відмінності у визначенні первинної енергії у Європейському Союзі та в Україні з точки зору визначення показника первинної енергії для громадських будівель: за Директивою [9], визначається на м² площі, згідно Концепції [17] та наказу [16] – на м³ об'єму. Хоча, доцільно також зазначити що Директива [9] не визначає єдино правильним підходом до визначення показника споживання енергії на м² площі для громадських будівель та наголошує на тому, що кожна з держав – членів ЄС має право щодо визначення споживання первинної згідно діючих у державі законопроектів. Разом з тим, аналізуючи власне показники, визначені згідно алгоритму Рекомендацій [48], можна стверджувати про досить амбітні визначення рівня первинного споживання енергії громадськими будівлями в Україні.

1.2.4 Вимоги до технічних систем будівлі

«Технічна система будівлі» має на увазі технічне обладнання для обігріву приміщень, охолодження приміщень, вентиляції, гарячої води для побутових потреб, вбудованого освітлення, автоматизації та управління будівлею, виробництва електроенергії на місці або їх поєднання, включаючи системи, що використовують енергію з відновлюваних джерел, будівлі або будівельного блоку [9]. Разом з тим, Директива [9] наголошує на високій ефективності обладнання та систем, які використовуються для виробництва, розподілу та транспортування енергії. Попри обов'язкове підключення відновлюваних джерел до загальної схеми енерговикористання, необхідний постійний контроль щодо оптимізації споживання енергії, що здійснюється автоматично або вручну. Концепція [17], в свою чергу, встановлює вимоги щодо використання інтелектуальних систем обліку та автоматизації інженерних систем будівлі в Україні. Контроль за дотриманням

необхідної температури та вологості в приміщенні і достатнього рівня повітрообміну здійснюється відповідно до вимог законодавчих актів кожної країни для забезпечення необхідного мікроклімату в приміщенні. Поєднання температури, відносної вологості та швидкості руху повітря, за нормами [49] визначають мікроклімат в межах огорожувальних конструкцій. Умови мікроклімату житлових та громадських будівель в Україні відповідають параметрам, приведеним у [49] та [50] (таблиця 1.2.4.1).

Таблиця 1.2.4.1. Нормативні параметри мікроклімату приміщень в Україні

Призначення будівлі	Температура внутрішнього повітря, °C	Відносна вологість внутрішнього повітря, %	Повітряний потік на особу, л/с/особу
Житлова будівля	20	55	7
Громадська будівля		50	

Управління комфортом та енергією використовує ідею систем управління енергоспоживанням будівлі [51] (Building Energy Management Systems, BEMS). Такі системи характеризуються комбінацією підходів, що забезпечують ефективність використання енергії. Для прикладу, керування попитом на енергію у громадських та житлових будівлях здійснюється реагуванням на тривалість перебування людей у приміщеннях, за результатами подібного реагування здійснюється регулювання системи охолодження та опалення для окремих приміщень та будівлі в цілому. Авторами [51] проведено оцінку різних підходів управління BEMS на зразок моделі прогнозованого споживання, управління попитом та виявлення й діагностики несправностей щодо житлових і нежитлових будівель.

1.3 Комп'ютерне моделювання при здійсненні оцінки відповідності будівель рівню nZEB

Масштабування будівель з майже нульовим споживанням енергії зумовлює розвиток моделей та підходів, що дозволяють візуалізувати дизайн будівлі та її систем, потоки теплих та холодних повітряних мас а також навантаження на технічні системи у конкретний момент часу. Програмні продукти, здатні забезпечити подібну візуалізацію, містять вбудовані бази даних щодо кліматичних особливостей регіонів, енергетичного обладнання та огорожувальних конструкцій. Подібні програмні продукти є гнучкими у використанні та дозволяють оцінити необхідні для проектувальників параметри при зміні вихідних даних у короткий час.

З метою оцінки впливу теплофізичних, кліматичних, конструктивних параметрів на енергоспоживання та умови комфорту, представлена велика кількість програмних продуктів, які різняться підходами до визначень необхідних показників та кінцевою метою моделювання. Як було описано вище, будівлі з майже нульовим споживанням енергії означають будівлю з високоенергоєфективною тепловою оболонкою та системами, більшу частину енергопотреби якої забезпечують відновлювані джерела енергії (вітрові електроустановки, сонячні електростанції, установки, що працюють на біомасі та теплові насоси різних типів). Портал знань nZEB [52], створений в рамках Програми інтеграції ринку та трансформації енергоєфективності USAID у 2017 – 2022 роках (на даний час підтримується в рамках Регіонального енергетичного партнерства Південної Азії (SAREP) Агенства США з міжнародного розвитку), пропонує використовувати для оцінки відповідності будівлі рівню nZEB програмні ресурси EnergyPlus, DesignBuilder, eQuest [52]. Вищеописані програмні продукти використовуються для моделювання енергоспоживання будівлею, оцінки умов комфортності та гнучкого реагування на рівень енергоспоживання при зміні початкових факторів.

EnergyPlus є інструментом моделювання будівель для щогодинного аналізу симуляції та забезпечує можливість аналізу ефективності системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря [52]. Програмний продукт є безкоштовним та часто слугує базою для оцінки енергоспоживання будівлі у інших програмних ресурсах. Для прикладу, у роботі [53] для цифрового моделювання будівлі автори використали програму Grasshopper (плагін для Rhino), що використовує механізм EnergyPlus для визначення виробленої енергії інтегрованою фотоелектричною системою.

DesignBuilder, створений на базі EnergyPlus програмний продукт, дозволяє оцінити величину енергоспоживання, рівень викидів за існуючої теплової оболонки та інженерних систем, освітлення, умов комфортності та фінансових вкладень при будівництві та модернізації будівлі [54]. Можливість імпортування проектних даних BIM і CAD у DesignBuilder дає змогу візуалізувати дизайн будівлі на зображенні або короткому відео. Дані щодо первинного споживання енергії, теплофізичних параметрів огорожувальних конструкцій, оцінка теплового комфорту та потужність систем опалення, вентиляції та кондиціонування подаються у формі звіту, що значно полегшує навігацію потрібних показників. Робота [55] є оцінкою впливу параметрів огорожувальних конструкцій на загальне енергоспоживання громадської будівлі. Авторами здійснено аналіз зміни теплоспоживання громадської будівлі у програмному середовищі DesignBuilder за існуючого рівня теплового захисту будівлі (неутеплена будівля), при покращенні теплової оболонки будівлі до національних вимог та при здійсненні термомодернізації будівлі до рівня високоенергоефективної будівлі. Подібний аналіз проведено і автором [56], проте цьому дослідженні проводиться оцінка енерговикористання як на потреби опалення, так і на потреби охолодження. Зокрема, автором [56] проведено аналіз наукових праць щодо динаміки загального споживання енергії, визначеного з використанням динамічного моделювання у програмі Energy Plus. Так, висновками [56] є акцентування на зростанні потреби на охолодженні громадської будівлі при покращенні її теплової

оболонки у той час, коли показник потреби на опалення будівлі значно знижується кількісно. Подібне зростання потреби на охолодження при здійсненні моделювання утеплення огорожувальних конструкцій будівлі у Energy Plus не є новим. Так, автором [56] відзначено, що авторами посібника [57], використовуючи аналогічний підхід при підвищенні енергоефективності будівлі шляхом додавання утеплювача товщиною 0, 25, 50 та 100 мм, демонструється зростання охолодження на 27%, 37% та 45% відповідно, проте такий ефект явно не демонструється, а приведені результати оцінюються як очікувані.

Перевагами подібних програмних продуктів є універсальність їх застосування для будь – якого типу будівлі та призначення. Так, задаючи необхідні параметри щодо внутрішньої температури, потужності технічних систем, рівня освітленості та повітрообміну, симулювання моделі здійснюватиметься для досягнення представлених вимог.

EQuest, що є програмним продуктом Міністерства енергетики США, це швидкий інструмент енергетичної симуляції громадських місць у будівлі [58]. У цьому програмному середовищі можна створювати будівлю, визначити її енергоефективність та графічно візуалізувати технічні системи, обрані для її енергозабезпечення. Моделювання лабораторії з бетонними стінами та листовим оцинкованим покриттям авторами [59] у програмному середовищі eQuest проведено для чотирьох різних варіантів з метою визначення найбільш оптимального рівня покращення теплового захисту будівлі для забезпечення комфортних умов. Результати дослідження заходів енергетичної модернізації готелю, приведені у [60] з використанням eQuest демонструють залежність прогнозного енергоспоживання готелю від графіків внутрішніх навантажень, заповненості та ефективності холодильних установок. Виходячи з такої залежності, авторами представлено схему модернізації та проведено оцінку потенціалу енергозбереження.

Для оцінки можливостей відстеження генерації енергії відновлюваними джерелами для енергозабезпечення будівлі використовують програмні середовища

компанії Valentin Software [61]. Для проектування та оптимізації фотоелектричних та сонячних теплових систем використовують програми PVSOL та TSOL, динамічне моделювання систем теплових насосів здійснюється в GeoTSOL [61]. База даних енергетичних продуктів та автоматичне відстеження помилки при внесенні вихідних даних створюють доступні умови для використання програми за різного рівня досвіду проектувальника.

Так, дослідження у роботі [62] зосереджено на проведенні оцінки роботи трьох фотоелектричних систем (полікристалічної, монокристалічної та тонкоплівкової фотоелектросистеми на основі телуриду кадмію), що протягом тривалого часу працюють на відкритому повітрі, встановлені на даху. у Єгипті (м. Каїр) та підключених до мережі. З метою проведення такої оцінки, авторами [62] проведено моделювання у програмних ресурсах PVSyst [63], PVSOL та SMA Sunny Design Web [64] для порівняння точності представлення результатів фактичної сонячної генерації зі змодельованим показником генерації електроенергії від Сонця. Результати демонструють високу точність оцінки продуктивності фотоелектричної моделі у програмному середовищі PVSOL (діапазон відхилення фактичних даних від змодельованих – 2 – 5 %). Перевагою PVSOL серед інших програмних продуктів модулювання фотоелектричних систем є можливість проведення оцінки викидів діоксиду вуглецю при використанні системи. Авторами [62] проведено порівняння запропонованих на ринку програм чисельного моделювання фотоелектричних систем. Із оглянутих у [62] ресурсів лише ресурс PVSOL та RETscreen дозволяє оцінити рівень викидів шкідливих речовин в атмосферу (викиди CO₂ та парникових газів відповідно).

Прикладом використання програми TSOL є запропонована авторами [65] модель реалізації стратегії використання сонячної енергії в медичній мережі Аргентини (10 лікарняних корпусів). У роботі [65] проведено аналіз забезпечення гарячого водопостачання від сонячних теплових станцій та оцінку економії палива (природний газ) для забезпечення гарячої води при використанні сонячних теплових систем.

Основні характеристики та переваги програмного продукту GeoTSOL представлені у роботі [66]. Авторами [66] проаналізовано можливості використання різних режимів роботи теплового насоса для теплозабезпечення громадської будівлі різного рівня теплового захисту: неутеплена будівля, утеплена до вимог регіону, що розглядається (Україна) та утеплена згідно вимог країни Європейського Союзу з більш холодним кліматом (Швеція). Приведені результати динамічного моделювання генерації теплової енергії тепловим насосом свідчать про можливість використання GeoTSOL для оцінки рівня генерації теплової енергії, рівня енергоспоживання тепловим насосом для власне генерації та показника сезонної продуктивності системи з тепловим насосом, що працює як в комбінації з котлом, так і самостійно.

Висновки до розділу 1

Огляд наукових праць, міжнародного та українського законодавства у розрізі даного дослідження дозволяє зробити наступні висновки.

Суттєве споживання енергії будівельним сектором та значний вплив енергоспоживання на клімат зумовили перегляд цілей щодо енергоефективності у Європейському Союзі та Україні зокрема. З метою забезпечення скорочення глобального енергоспоживання вирішуються питання щодо використання інноваційних підходів при будівництві та експлуатації будівель для приведення будівель до рівня nZEB за рахунок утеплення огорожувальних конструкцій, використання ефективних систем енергозабезпечення та заміщення традиційних джерел енергії, що використовують викопне паливо, відновлювальними.

Огорожувальні конструкції є одними з ключових елементів при підвищенні енергоефективності будівель в умовах виконання цілей сталого глобального розвитку та забезпечення енергонезалежності. Аналіз вимог до огорожувальних конструкцій у різних країнах Європейського Союзу та України підтверджує важливість їхньої ролі у забезпеченні теплового комфорту та енергоефективності будівель. Огорожувальні

конструкції визначають рівень теплового захисту будівлі, її стійкість до зовнішніх кліматичних умов, а також її енергоефективність. Ряд країн Європейського Союзу встановлює жорсткі вимоги до теплової оболонки та інших параметрів огорожувальних конструкцій, що допомагає зменшити тепловтрати (Словаччина, Люксембург, Фінляндія, Естонія, Швеція). Рівень вимог до огорожувальних конструкцій в Україні є доволі високим, якщо проводити порівняння з іншими країнами Європейського Союзу, зокрема при аналізуванні градусо – днів опалювального періоду та середнього мінімально допустимого значення приведенного опору теплопередачі (рисунок 1.1).

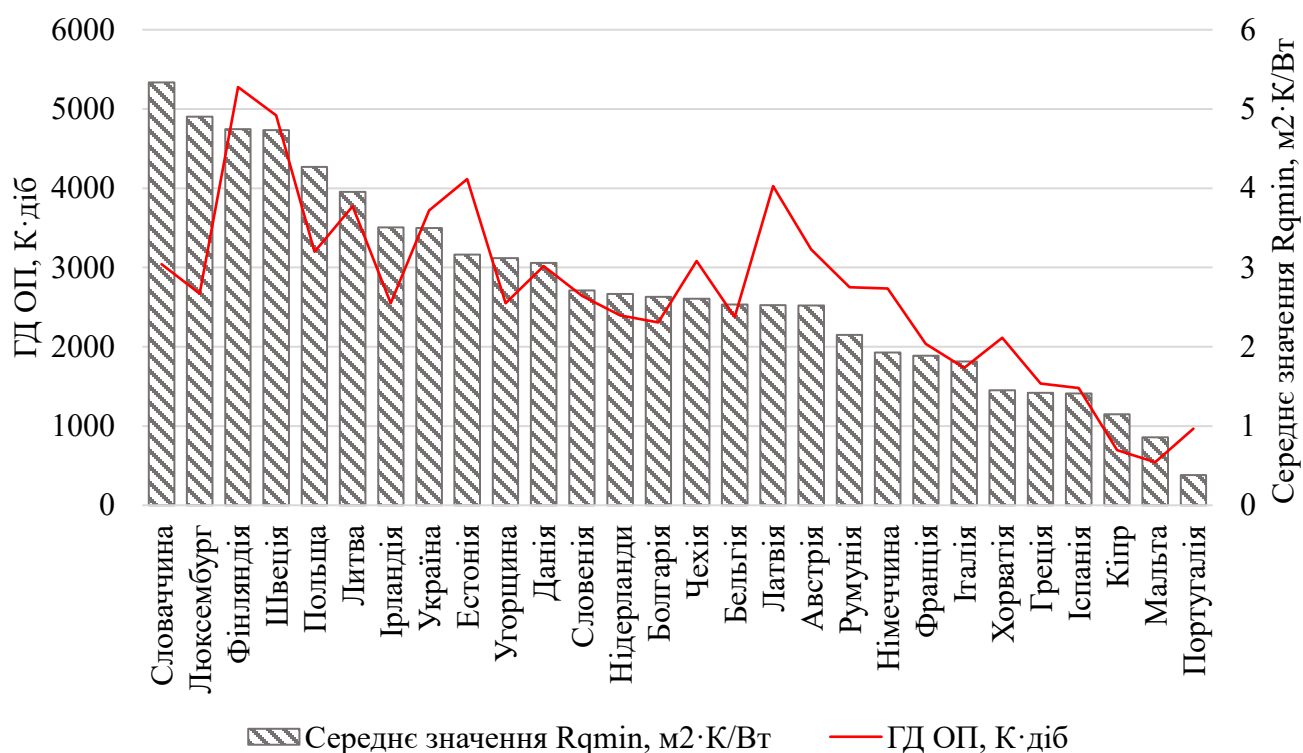


Рисунок 1.1. Залежність середнього мінімально допустимого значення приведенного опору теплопередачі від кількості градусо – днів опалювального періоду у країнах ЄС та Україні

Так, порівнюючи вимоги України та Естонії до теплової оболонки будівлі свідчать про жорсткіші вимоги до огорожувальних конструкцій в Україні попри

менше значення градусо – діб опалювального періоду. Разом з тим, вимоги України є дуже близькими до вимог Ірландії, незважаючи на суттєву відмінність граду – діб опалювального періоду (30,5%). Вищенаведене свідчить про вагомі кроки України до підвищення енергоефективності будівель, що у майбутньому дозволить забезпечити значне скорочення енергоспоживання будівельним сектором. Вибір огорожувальних конструкцій будівлі в Європі та в Україні в тому числі здійснюється, зокрема, з огляду на екологічність, що важливо в контексті збереження природних ресурсів та зменшення викидів CO₂.

Враховуючи необхідність використання відновлюваних джерел енергії для енергозабезпечення будівлі відповідно до Директиви про енергоефективність та Директиви про енергетичну ефективність будівлі, а також для забезпечення розвитку будівництва з використанням концепції nZEB, кожна країна на законодавчому рівні зобов'язана зафіксувати частку покриття енергопотреби відновлювальними джерелами. На сьогодні, в 16 країнах Європейського Союзу така частка визначена кількісно, у 8 країнах – у діапазоні від 50%. Україна, зокрема, визначає частку відновлювальних джерел енергії для енергозабезпечення будівлі у межах більше 50%, акцентуючи на будівлях рівня nZEB. Розвиток будівництва будівель з майже нульовим споживанням енергії зумовлює пошук шляхів та інноваційних підходів для енергозабезпечення як, наприклад, комбіноване виробництво енергії тепловим насосом та фотоелектричними або сонячними тепловими станціями.

Питання енергетичної ефективності та споживання первинної енергії є стратегічно важливими для забезпечення сталого розвитку та мінімізації впливу на довкілля. Політика Європейського Союзу демонструє увагу до зменшення первинного споживання енергії та зменшення викидів парникових газів, встановлюючи жорсткі стандарти та обмеження. Так, кожна з країн – членів ЄС зобов'язана зафіксувати контрольні показники щодо споживання первинної енергії та частки використання енергії з відновлювальних джерел для енергозабезпечення на законодавчому рівні для оцінки відповідності будівлі різного типу/призначення

nZEB. Україна, в свою чергу, розділяє позицію Європейської Комісії та фіксує питомі показники споживання первинної енергії на рівні, співставному з європейським для умов клімату, притаманних на її території та частку відновлювальних джерел у енергобалансі будівлі на досить високому рівні.

Технічні системи будівлі повинні забезпечувати необхідний рівень теплового комфорту, мати високий рівень енергоефективності та високу екологічність (з метою просування декарбонізації будівельного сектору). Разом з тим, контрольоване споживання енергії та управління енергією в залежності від попиту, режиму роботи та відповідного технічного обслуговування створюють передумови для ефективного енергоспоживання. Інтеграція відновлювальних джерел енергії у загальну систему енергозабезпечення будівлі є обов'язковою, незважаючи на місце виробництва «чистої» енергії (безпосередньо на місці використання чи поблизу).

Оцінка відповідності будівлі рівню nZEB здійснюється відповідно до методик та рекомендацій, розроблених експертами у сфері енергоефективності відповідно до норм чинного державного законодавства, а також, за рахунок використання програмних продуктів, що дозволяють оцінити енергоспоживання, умови мікроклімату, ефективність технічних систем будівлі, величину викидів та фінансові витрати на реалізацію модернізації будівлі. Енергетичне моделювання дає змогу здійснювати гнучке управління енергоспоживанням за рахунок внесення змін щодо графіку роботи енергетичних систем, рівня заповненості приміщення та зміни джерела енергії. Разом з тим, низка програмних продуктів дозволяє провести оцінку генерації енергії відновлювальними джерелами з представленням ефективності їх роботи для енергозабезпечення.

РОЗДІЛ 2 ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ БУДІВЛЕЮ ПРИ ПОКРАЩЕННІ ТЕПЛОВОЇ ОБОЛОНКИ

2.1 Послідовність проведення оцінювання ефективності споживання енергії будівлею при покращенні теплової оболонки

За даними Укрстату [67], громадські будівлі у 2020 році споживали близько 10% енергії у загальному енергобалансі України. Для забезпечення бюджетних будівель, що входять в вищевказані 10% енергією, витрачається близько 17% загального бюджету громади [68]. Разом з тим, близько 80% існуючих наразі будівель в Україні збудовані за часів Радянського Союзу [69], що характеризується масовою забудовою однакових за конструктивом будівель без належної теплоізоляції. З метою скорочення загального енергоспоживання громадськими будівлями, необхідне впровадження енергоефективних заходів, що включає в себе термомодернізацію оболонки будівлі, перегляд джерел теплозабезпечення та заміну інженерних систем. У науковій роботі проведено оцінку енергоспоживання громадської будівлі за різних рівнів її теплового захисту з використанням динамічного моделювання. Репрезентативною моделлю для дослідження обрано офісну будівлю в м. Київ.

Для визначення енергетичних показників будівлі було обрано програмне середовище Design Builder [70], що створене на базі програми Energy Plus [71]. Перевагою Design Builder над іншими програмними продуктами, описаними у розділі 1 даної роботи, є можливість відтворення геометрії будівлі у 3D вигляді, гнучке управління енергоспоживання шляхом внесення необхідних змін, представлення схеми системи енергозабезпечення та приведення результатів у формі звіту, що значно спрощує відслідковування коректності результатів та/або пошуку помилки. Разом з тим, представлення даних у програмному ресурсі можливе для різних часових проміжків – аналіз необхідних даних проводиться погодинно, у розрізі доби, у розрізі тижня, місяця та року. Зокрема, згідно матеріалів, приведених у [71, 160], теплове

навантаження будівлі оцінюється на основі теплового балансу зонального повітря (формула 2.1).

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surface}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys}, \quad (2.1)$$

де $C_z \frac{dT_z}{dt}$ – енергія, що зберігається в зональному повітрі, Вт;

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ – сума конвективних внутрішніх навантажень, Вт;

$\sum_{i=1}^{N_{surface}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ – конвективна теплопередача від поверхонь зони, Вт;

$\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$ – теплопередача завдяки міжзонному перемішуванню повітря, Вт;

$\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$ – теплопередача внаслідок інфільтрації зовнішнього повітря, Вт;

$\dot{Q}_{sys}$ – вихідна потужність повітряних систем, Вт.

Конвективна теплопередача від поверхонь до зони визначається на основі врахування розрахунку радіаційного та конвективного ефектів на внутрішній та зовнішній поверхні протягом кожного часового проміжку одночасно.

Внутрішній тепловий баланс моделюється з урахуванням чотирьох взаємопов'язаних компонентів теплопередачі: теплопровідність через огорожувальні конструкції, конвективний повітряний теплообмін всередині будівлі, поглинання та відбиття короткохвильового випромінювання та довгохвильове випромінювання всередині будівлі. Короткохвильове випромінювання означає сонячну радіацію, яка потрапляє до будівлі крізь світлопрозорі огорожувальні конструкції й випромінювання від внутрішніх джерел освітлення. Довгохвильовий променевий обмін трактується як поглинання й випромінювання від поверхонь будівлі, обладнання та людей. Вищеописане можна узагальнити формулою (2.2):

$$q''_{LW\ X} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0, \quad (2.2)$$

де $q''_{LW\ X}$ - довгохвильове випромінювання між поверхнями будівлі (внутрішні огороження), Вт/м²;

q''_{SW} - короткохвильове випромінювання від джерел освітлення на поверхні, Вт/м²;

q''_{LWS} - довгохвильове випромінювання від обладнання та присутніх у будівлі, Вт/м²;

q''_{ki} - теплопровідність через огорожувальні конструкції, Вт/м²;

q''_{sol} - сонячне випромінювання, що пройшло через світлопрозорі конструкції, Вт/м²;

q''_{conv} - конвективний внутрішній теплообмін, Вт/м².

Зовнішній тепловий баланс враховує величину поглинутої сонячної радіації огорожувальними конструкціями, довгохвильове випромінювання від навколишнього середовища, конвективний теплообмін із зовнішнім повітрям а також тепловідність всередині огорожувальної конструкції. Узагальнено цей баланс має наступний вигляд (формула 2.3):

$$q''_{asol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0, \quad (2.3)$$

де q''_{asol} - поглинута огорожувальними конструкціями сонячна радіація, Вт/м²;

q''_{LWR} - довгохвильове випромінювання від навколишнього середовища, Вт/м²;

q''_{conv} - конвективний теплообмін із зовнішнім повітрям, Вт/м²;

q''_{ko} - тепловідність всередині огорожувальної конструкції, Вт/м².

Послідовність проведення дослідження наступна:

1) створення плану репрезентативної будівлі в середовищі AutoCAD з попереднім обстеженням будівлі;

2) проведення енергетичного обстеження будівлі та збір необхідних вихідних даних (об'ємно-планувальні рішення будівлі, склад та стан огорожувальних

конструкцій, режими експлуатації будівлі, джерело енергозабезпечення, технічний стан інженерних систем);

3) створення моделі будівлі в середовищі Design Builder;

4) коригування існуючого графіку роботи системи опалення, вентиляції та кондиціювання будівлі у відповідності до її режиму експлуатації;

5) послідовне підвищення енергоефективності будівлі шляхом теплоізоляції існуючих огорожувальних конструкцій до вимог України та Швеції;

6) динамічна симуляція енергозабезпечення будівлі з відслідковуванням динаміки енергоспоживання за різних рівнів теплового захисту будівлі;

7) економічний аналіз покращення теплової оболонки будівлі з використанням підходу оцінювання інтегральних витрат на енергозабезпечення.

Узагальнено, вищеописана послідовність виглядатиме наступним чином (рисунок 2.1.1).

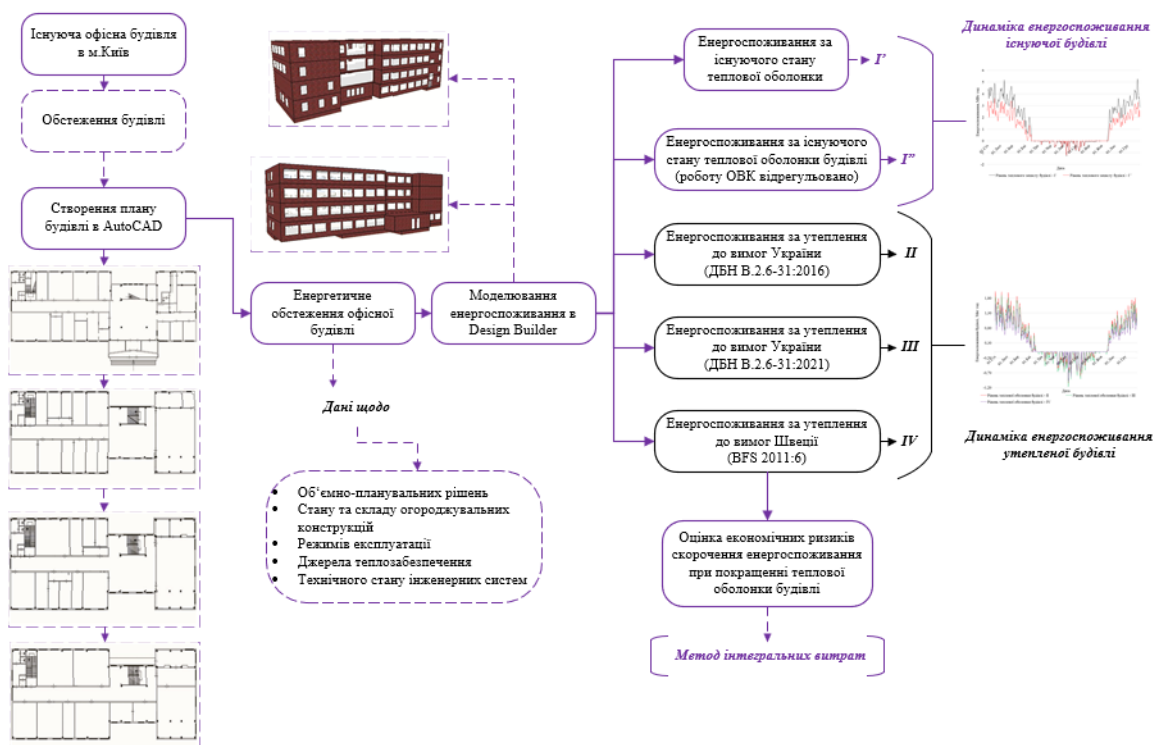


Рисунок 2.1.1. Послідовність здійснення оцінювання ефективності споживання енергії будівлею при покращенні теплової оболонки будівлі

2.2 Характеристики репрезентативної моделі

Репрезентативною моделлю дослідження є офісна будівля у м. Київ. Будівля є чотирьох поверховою не виробничою цивільною спорудою для адміністративних потреб. Загальна площа будівлі становить 2 707,24 м² (кондиціонована площа – 2274,44 м²). Вертикальні огорожувальні конструкції представлені керамзитобетонними плитами, світлопрозорі конструкції – металопластиковими двокамерними склопакетами та склоблоками, розміщеними на стіні, орієнтованій на схід. Суміщене перекриття – залізобетонне перекриття з шаром руберойду, стан перекриття – в незадовільному стані (дах будівлі вимагає укріплення). Перекриття над неопалювальним підвалом представлено залізобетонним перекриттям [55]. Джерело енергозабезпечення – котельня, що працює на природному газі. Котел, що забезпечує теплопостачання, переобладнаний з парового у водогрійний. Загалом, теплопостачання будівлі забезпечується двома котлами типу Е 1,0/0,9, коефіцієнт корисної дії якого (згідно технічного паспорту) становить 90,5%. Система опалення не збалансована, мають місце перетопи та недотопи в окремих приміщеннях, у зв'язку з чим активно використовуються кондиціонери для підтримки оптимальних умов мікроклімату. Система теплопостачання двотрубна, з можливістю ручного регулювання подачі теплоносія.

У будівлі, що розглядається, виконано капітальний ремонт з переплануванням у з метою розширення корисної площі та створення нових робочих місць. Змін зазнали, зокрема, вертикальні огорожувальні конструкції, орієнтовані на:

- схід – заміна склоблоків за двокамерні металопластикові вікна на 3 та 4 поверхах;
- північ – зменшення площі світлопрозорих конструкцій;
- південь – зменшення площі світлопрозорих конструкцій;
- захід – монтажем світлопрозорих конструкцій на 2, 3 та 4 поверхах.

Оскільки зовнішня оболонка будівлі відрізняється для різних поверхів, план будівлі доцільно представити для кожного поверху (рисунок 2.2.1 – 2.2.4).



Рисунок 2.2.1. План першого поверху
офісної будівлі

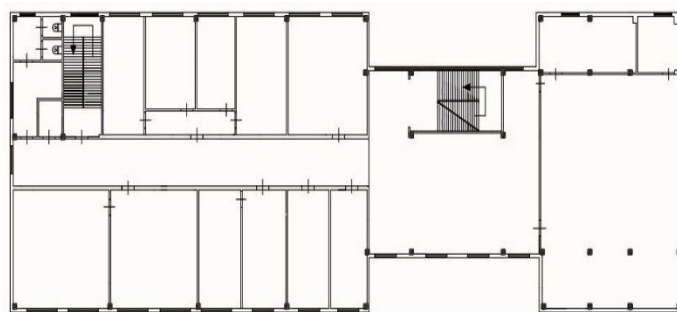


Рисунок 2.2.2. План другого поверху
офісної будівлі

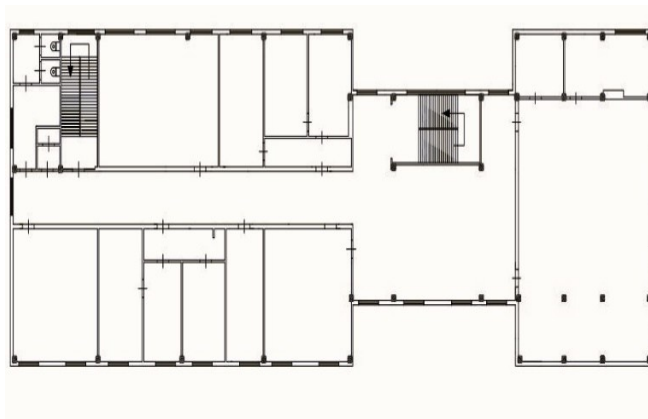


Рисунок 2.2.3. План третього поверху
офісної будівлі

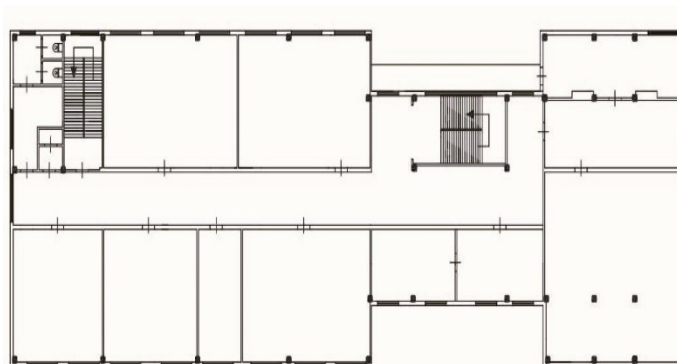


Рисунок 2.2.4. План четвертого поверху
офісної будівлі

Для оцінки можливостей покращення теплової оболонки будівлі з наступною економічною оцінкою проведеного утеплення, у таблиці 2.2.1 приведено площі та опір теплопередачі огорожувальних конструкцій, що обмежують будівлю.

Таблиця 2.2.1. Площа та опір теплопередачі огорожувальних конструкцій репрезентативної будівлі

Тип огорожувальної конструкції		Площа, м ²	Термічний опір огорожувальної конструкції R, м ² ·°C/Вт
1		2	3
Зовнішні стіни		923,214	1,36
Перекриття над проїздами та неопалювальними підвалами		645,8	0,37
Світлопрозорі конструкції	металопластикові	393,96	0,6
	склоблоки	30,63	0,4
Двері зовнішні	металопластикові	9,528	0,6
	металеві	3,368	0,3
Суміщене покриття		645,8	0,4

Аналізуючи вищепредставлені дані, можна зробити висновок про невідповідність теплофізичних параметрів огорожувальних конструкцій вимогам [36] та [37]. Зокрема, під час енергетичного обстеження будівлі було встановлено, що одним з найбільших джерел втрат теплоти через огорожувальні конструкції будівлі є склоблоки, загальна площа яких становить 30,63 м² або 2,05% загальної площі огорожувальних конструкцій будівлі. Конструкція склоблоків з часом отримала механічні пошкодження, що не були усунені, тому наступна модернізація повинна здійснюватись з їх демонтажем та встановленням на місці склоблоків висоенергоєфективних світлопрозорих конструкцій згідно вимог [36]. Разом з тим, велика частка теплоти втрачається через суміщене перекриття (дах) у зв'язку з неякісною конструкцією, що зумовлює часті «затоплення» верхніх поверхів протягом перехідного та опалювального періоду, та власне відсутністю теплової ізоляції.

2.3 Оцінка енергоспоживання офісної будівлі

Оцінка енергоспоживання будівлі виконується з використанням динамічного моделювання в середовищі Design Builder. Створений в AutoCAD поверховий план офісної будівлі (рисунок 2.2.1 – 2.2.4) включно з планом підвального приміщення імпортовано в Design Builder для відтворення загального вигляду будівлі, параметри та тип огорожувальних конструкцій задано у відповідності до технічного паспорту будівлі. Внесення даних для створення моделі (після створення оболонки згідно поверхового плану) є покроковим, та включає:

- дані щодо інженерних систем будівлі (блок HVAC), зокрема палива, коефіцієнтів ефективності систем/джерел та графіків їх роботи;
- дані щодо додаткових джерел теплоти (блок Activity), зокрема щодо кількості присутніх у будівлі, кількості обладнання та відповідних режимів роботи;
- дані щодо непрозорих огорожувальних конструкцій (блок Construction) з виокремленням окремих непрозорих огорожувальних конструкцій та вимогою щодо внесення деталізованого складу відповідного огороження (вносяться дані по огорожувальних конструкціях окремих стін/зон);
- дані щодо світлопрозорих огорожувальних конструкцій та дверей (блок Openings) з аналогічним виокремленням детального опису таких конструкцій (окремі характеристики для окремих дверей, вікон);
- дані щодо системи освітлення (блок Lighting) з вимогою щодо зазначення джерел освітлення приміщень/будівлі (додатково можна зазначити особливості регулювання системи освітлення, якщо така наявна).

Початковим етапом створення моделі є вибір географічного регіону, в якому розташована будівля, для синхронізації кліматичних даних. Потім, налаштовано орієнтування будівлі по сторонах світу (пн, пд, зх, сх). Загальний вигляд будівлі (пд – сх та пн – зх сторони), створений у програмі Design Builder приведено на рисунках 2.3.1, 2.3.2 відповідно.

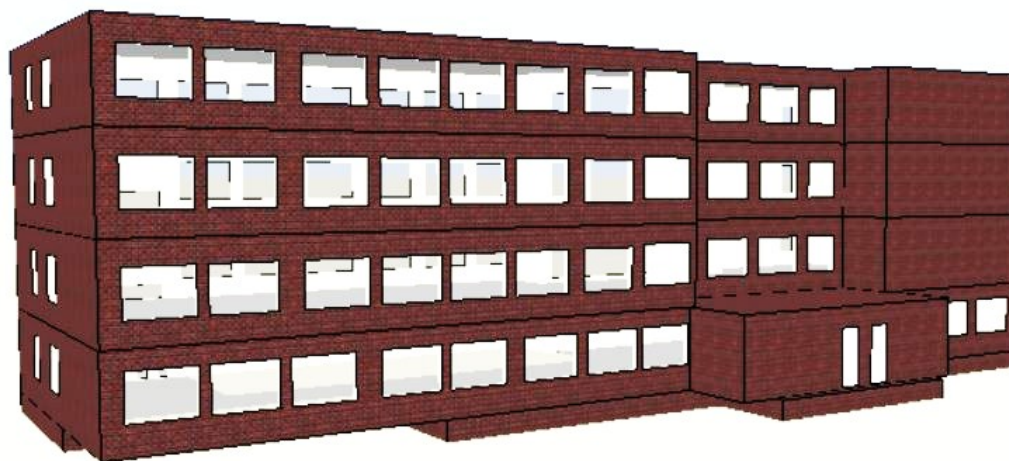


Рисунок 2.3.1. Модель репрезентативної будівлі (південна та східна сторони будівлі)

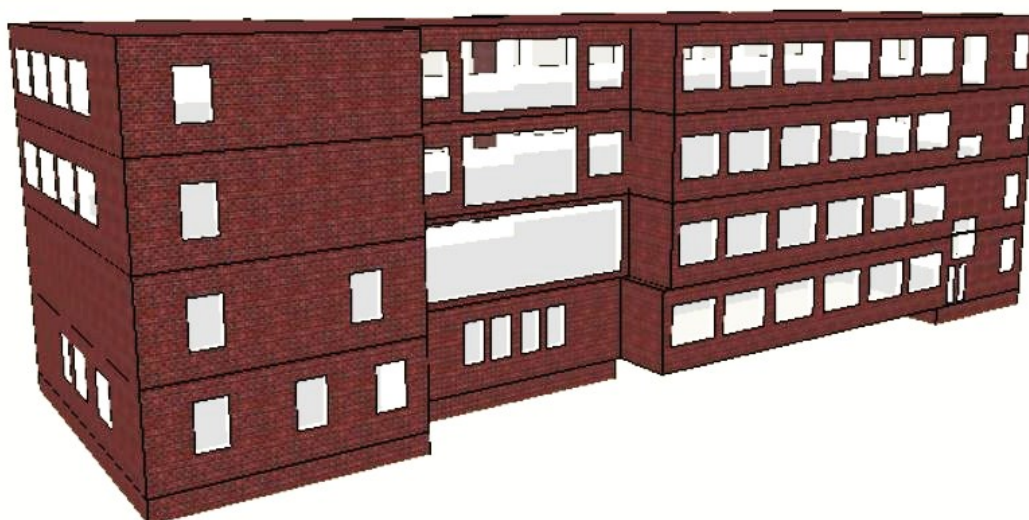


Рисунок 2.3.2. Модель репрезентативної будівлі (північна та західна сторони будівлі)

Теплозабезпечення будівлі здійснюється за постійним графіком, незалежно від тривалості робочого дня та присутності людей у офісі, регулювання системи опалення, вентиляції та кондиціювання відсутнє. Відповідну особливість роботи інженерних систем враховано при створенні базової моделі, тобто базова модель загалом визначена:

- фактичними характеристиками огорожувальних конструкцій будівлі, що досліджується (існуючої будівлі), та приведені у таблиці 2.2.1;
- внутрішньою температурою на рівні 20°C;
- даними щодо системи вентиляції (механічна припливно-витяжна вентиляція) з залежністю подачі припливного повітря від кількості людей та від площі) з існуючим графіком роботи системи вентиляції (працює цілодобово протягом року);
- даними щодо системи опалення з зазначенням джерела теплоти (котельня на природному газі з ККД газового котла на рівні 90,5%) з існуючим графіком системи опалення на момент обстеження (опалювальний період визначений наказом Київської міської державної адміністрації, система працює постійно протягом опалювального періоду);
- даними щодо системи охолодження з зазначенням, що система працює за рахунок електроенергії від мережі, та існуючим коефіцієнтом ефективності системи охолодження (згідно отриманої інформації, середній коефіцієнт ефективності визначений на рівні 2,8) та постійним графіком роботи системи у міжопалювальний період;
- даними щодо кількості працюючих у офісі та кількості офісного обладнання та джерел освітлення.

Враховуючи вищезазначені особливості, в подальшому в роботі існуюча теплова оболонка будівлі (без утеплення) з постійним режимом роботи систем опалення, вентиляції та кондиціювання відповідатиме позначенню I' (далі також – рівень теплового захисту I').

З метою оцінки впливу здійснення контролю за системою опалення, вентиляції та кондиціювання в неробочі години, внесено зміни до графіка роботи таких систем будівлі у частині зменшення навантаження на роботу системи у вихідні та святкові дні, неробочі години (далі також – рівень теплового захисту I''). Зокрема, аналіз впливу контролю за енергоспоживанням розглядається як такий, де джерело енергії є існуючим.

Приведені результати споживання енергії на теплозабезпечення та охолодження будівлі рівнів І' та І'' представлено на рисунку 2.3.3.

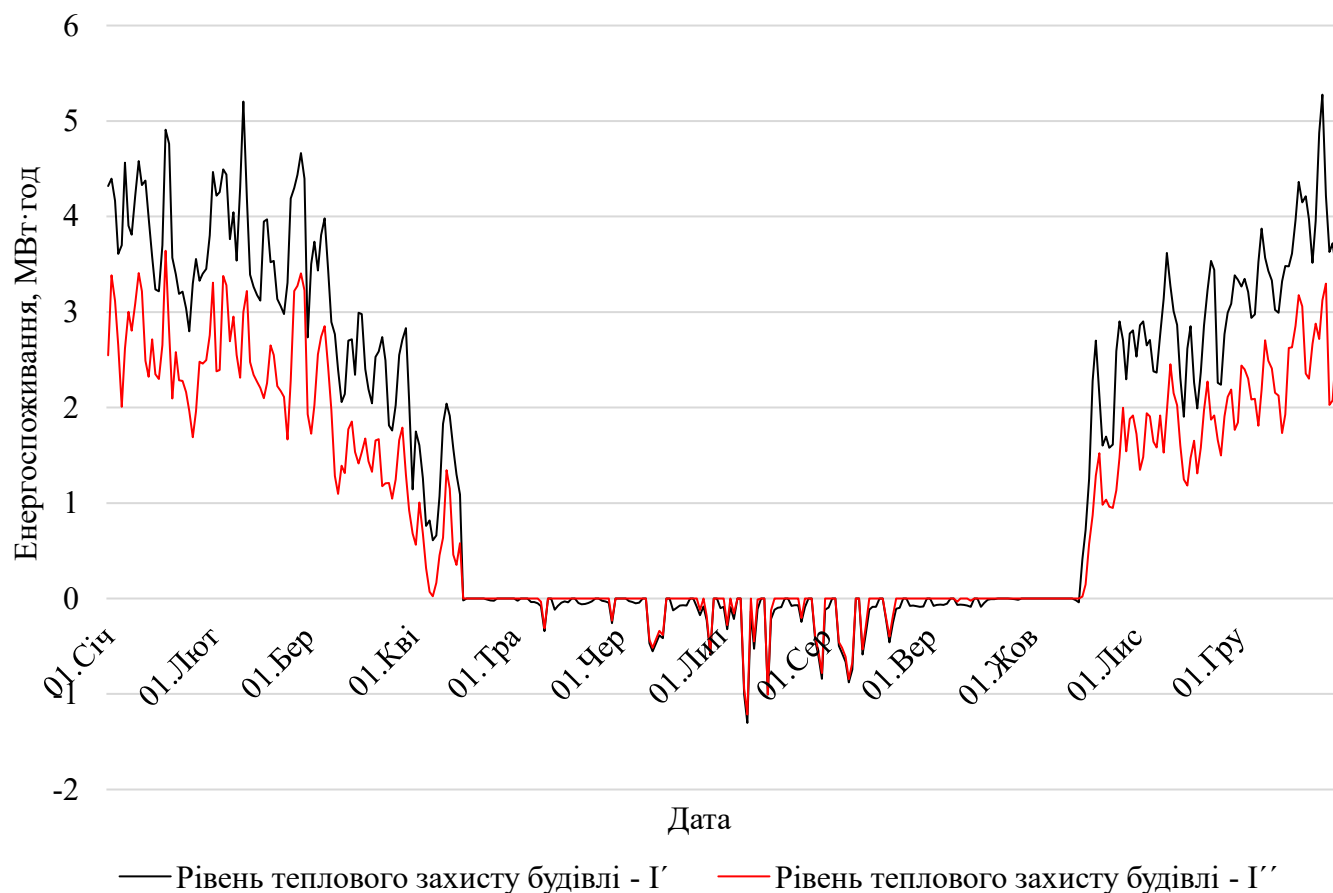


Рисунок 2.3.3. Енергоспоживання офісною будівлею за постійного та регульованого графіків системи опалення, вентиляції та кондиціонування

Приведені результати свідчать про суттєве скорочення загального енергоспоживання (33,5%) за умови управління та здійснення контролю за енергоспоживанням. Проте, приведені на рисунку результати динамічного моделювання будівлі, теплова оболонка якої відповідає рівню І' та І'', є наслідком здійсненого контролю за електроспоживанням на освітлення та роботу офісного обладнання. За використання запропонованого програмним середовищем графіку роботи системи освітлення та обладнання (включаючи комп'ютерне обладнання, що

використовується на робочих місцях), потреба на опалення будівлі та охолодження має дещо інший показник.

Здійснення контролю за графіком роботи системи опалення, вентиляції, кондиціонування, системи освітлення та робочого (офісного) обладнання відбувається у відповідності до законодавчих актів щодо забезпечення умов мікроклімату та робочого графіку офісної будівлі. Для прикладу, контроль за роботою системи освітлення та робочого обладнання здійснювався у програмі динамічного моделювання позонно (окремо для 1 – 4 поверхів будівлі та підвалу), виходячи з тривалості світлового дня при регулюванні роботи освітлення та можливості переведення робочого обладнання в режим очікування – при регулюванні роботи офісного обладнання. Важливим також є момент забезпечення освітлення у підвальному приміщенні, де проходять основні інженерні комунікаційні вузли, а також вузли обліку споживання холодної води. Графік роботи системи освітлення, згідно якого здійснюється динамічне моделювання загального енергоспоживання, має 4 ключові точки відліку – 21 березня (перехід на літній час), 21 вересня (дата зменшення тривалості світлового дня), 21 грудня (перехід на зимовий час) та 31 січня (завершення року). Навантаження на роботу джерел освітлення у діапазоні кожної з точок приведено у таблиці 2.3.1.

Таблиця 2.3.1. Графік роботи системи освітлення офісної будівлі у залежності від тривалості світлового дня протягом року

З 1 січня до 21 березня	З 22 березня до 21 вересня	З 22 вересня до 21 грудня	З 22 грудня до 31 грудня
До: 7:00, 0	До: 7:00, 0	До: 7:00, 0	До: 7:00, 0
До: 08:00, 1	До: 08:00, 0,2	До: 08:00, 0,5	До: 08:00, 1
До: 12:00, 0,5	До: 10:00, 0,5	До: 12:00, 1	До: 12:00, 1

Продовження таблиці 2.3.1

З 1 січня до 21 березня	З 22 березня до 21 вересня	З 22 вересня до 21 грудня	З 22 грудня до 31 грудня
До: 13:00, 0		До: 13:00, 0.2	До: 13:00, 0.2
До: 15:00, 0.5	До: 24:00, 0	До: 17:00, 1	До: 17:00, 1
До: 17:00, 1		До: 24:00, 0	До: 24:00, 0
До: 24:00, 0			

З метою необхідності здійснення обліку споживання холодної води (вузол обліку знаходиться у підвалі), а також з урахуванням щорічних ремонтних робіт та/або перевірки життєздатності інженерних систем будівлі (зазвичай виконується протягом 1,5 місяців – з 15 липня по 1 вересня), внесено зміни щодо роботи системи освітлення підвальних приміщень з урахуванням потреби на освітлення. Графік роботи системи освітлення для зони підвалу приведено у таблиці 2.3.2.

Таблиця 2.3.2. Графік роботи системи освітлення зони підвалу будівлі

З 1 січня до 15 липня	З 16 липня до 1 вересня	З 2 вересня до 31 грудня
До: 12:00, 0	До: 09:00, 0	До: 12:00, 0
До: 13:00, 0,5	До: 17:00, 1	До: 13:00, 0,5
До: 24:00, 0	До: 24:00, 0	До: 24:00, 0

Варто зазначити, що використання приведених у таблиці 2.3.1 та 2.3.2 графіків роботи системи освітлення є демонстративними та можуть використовуватись для будівель, робочий графік яких – з 8 до 16:30, з урахуванням можливості перебування людей на робочих місцях з 7 до 8 години ранку та в період з 16:30 до 17:00. Такий підхід (мається на увазі забезпечення повного контролю за роботою системи освітлення та офісного обладнання) в загальному призводить до зростання

теплоспоживання та зменшення енергоспоживання системою охолодження. Для оцінки власне впливу потужності роботи системи освітлення та офісного обладнання на потреби опалення та охолодження, здійснено динамічне моделювання енергоспоживання будівлі рівня теплового захисту I' та I'' за відсутності регулювання роботи системи освітлення (з 9:00 до 18:00 використання потужності освітлення становить 1, тобто максимальне) та офісного обладнання (без розгляду переходу обладнання у режим очікування).

Так, за відсутності регулювання графіку роботи системи освітлення та обладнання, теплоспоживання будівлі рівня I' є меншим на 3%, енергоспоживання на охолодження – більшим на 1%. За таких же умов, для будівлі рівня I'' теплового захисту, енергоспоживання на опалення є меншим на 5%, на охолодження – більшим на 29,4%. Динаміка зміни енергоспоживання при регулюванні графіку роботи систем опалення, вентиляції та кондиціонування, освітлення та офісного обладнання загалом є закономірною – при експлуатації джерел освітлення та електрообладнання виділяється додаткова теплота. Так, при здійсненні контролю за роботою системи освітлення та офісного обладнання теплонадходження від роботи освітлення та обладнання знижуються на 5%.

Такий підхід не потребує жодних грошових вкладень, але дозволяє зекономити кошти на енергозабезпечення на більше ніж третину протягом опалювального періоду. Це показовий приклад збереження енергії, особливо актуальний в умовах тимчасової зайнятості працівників в офісі. Контроль за споживанням енергії, загалом є золотим правилом здійснення енергетичного менеджменту та забезпечення енергозбереження. В умовах пройденої пандемії та неможливості перебування в офісі у зв'язку з військовими діями, регулювання системи опалення, вентиляції та контроль за системою кондиціонування забезпечить власникам економію коштів, які можна використати, в тому числі, на модернізацію будівлі та покращення комфорту перебування працівників на робочих місцях. Змінний режим роботи системи опалення та охолодження вимагає коригування температури чергового режиму опалення та,

відповідно, охолодження. Відповідне коригування здійснено у відповідності до діючого законодавства України [72] та становить:

- для режиму охолодження 27 °С;
- для режиму опалення 17 °С .

Найпростішу оцінку економії коштів від контролю за споживанням енергії представимо у таблиці 2.3.3 для трьох останніх років (2020 – 2022 рік) з урахуванням вартості природного газу та електричної енергії для юридичних осіб у м. Київ протягом років, що розглядаються [73, 74].

Таблиця 2.3.3. Середня вартість природного газу для юридичних осіб та величина економії коштів при регулюванні графіку роботи системи опалення, вентиляції та кондиціонування

Рік	Середня вартість (без ПДВ)		Економія		
	природного газу, грн/куб. м	електричної енергії, грн/ кВт·год	природного газу, куб. м	електричної енергії, кВт·год	коштів протягом опалювального періоду, грн
2020	6,90	1,75			153 481
2021	19,45	2,58	21 171,66	4 226, 86	422 694
2022	43,75	3,65			941 688

Більш детальну техніко – економічну оцінку контролю за споживанням енергії буде розглянуто пізніше. Зокрема, не варто відкидати також факт значного зменшення викидів CO₂ в результаті реалізації регулювання роботи вищезгаданих інженерних систем. З використанням міжнародного калькулятора «вуглецевого сліду» [75] виявлено, що за рахунок економії енергії викиди діоксиду вуглецю в атмосферу зменшаться на 36,2 т. Детальнішу оцінку скорочень викидів CO₂ в

атмосферу за рахунок покращення теплового захисту будівлі буде розглянуто у розділі 4 даної роботи.

2.4 Технічна оцінка покращення теплової оболонки будівлі

З моменту введення будівлі в експлуатацію (60-і роки) теплофізичні характеристики будівлі не змінювались жодного разу. Окрім проведеного перепланування та зміни площі огорожувальних конструкцій, втручань в конструктив будівлі не відбувалось. Власне, приведені у таблиці 2.2.1 значення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій є актуальними на період 2020 року. Для оцінки енергоспоживання будівлі при покроковому покращенні теплової оболонки з існуючого до рівня високоенергоефективної, виконано динамічне моделювання енергоспоживання будівлі до вимог [36, 37, 76] (далі – рівень II теплового захисту будівлі, рівень III теплового захисту будівлі та рівень IV теплового захисту будівлі відповідно).

Варто зазначити, що приведення рівня теплозахисту теплової оболонки будівлі до вимог Швеції [76] та її порівняння з вимогами України [36, 37] не є випадковим. Вимоги до огорожувальних конструкцій у Швеції є одними з найжорсткіших у Європейському Союзі. Разом з тим, Швеція є однією з країн, що практично на 100% забезпечена енергією з низьковуглецевих джерел [77] (40% – атомна енергетика, 40% – гідроенергетика, 10% – альтернативні джерела енергії, 10% – тепла енергія, отримана шляхом спалювання природного газу). Зі слів Пер-Еріка Нільсена, управляючого директора енергоконсалтингової компанії Швеції, 20 – 25% нових будівель в Швеції є такими, які потребують дуже мало енергії для енергозабезпечення [78]. Разом з тим, Швеція допомагає Україні у підвищенні енергоефективності будівель, представляючи досвід своєї країни та набуті досягнення. Так, Швеція підтримувала Україну у шляху впровадження енергосервісу, яким успішно користуються шведи з 2007 року [78]. У контексті розвитку енергоефективності

будівлі, Пер-Ерік Нільсен рекомендує варіант реалізації загальної концепції (total concept method), що широко використовується при покращенні енергоефективності нежитлових будівель в Норвегії, Фінляндії, Естонії, Данії та Швеції зокрема [78]. Згаданий метод полягає у системному підході до всього проекту покращення енергоефективності та спрямований на досягненні максимальної економії енергії. Приведення огорожувальних конструкцій репрезентативної будівлі до рівня вимог Швеції [76] дозволить створити високоенергоефективну оболонку будівлі та дасть можливість зрозуміти межі опору теплопередачі огорожувальних конструкцій при модернізації громадської будівлі до рівня майже нульового споживання енергії, що особливо актуально для майбутнього відновлення сектору будівель в Україні.

Як описано у розділі 1 даної роботи, до 1 вересня 2022 року опір теплопередачі огорожувальних конструкцій будівлі в Україні повинен відповідати вимогам [37]. Оновлені норми встановлюють значення опору мінімальних вимог до енергоефективності на рівні, визначеному [36]. Моделювання енергоспоживання будівлі здійснювалось з урахуванням дійсних на 2021 рік вимог в Україні [37], оновлених українських [36] та шведських [76] вимог до огорожувальних конструкцій для проведення оцінки щодо доцільності покращення теплової оболонки будівлі до вимог країн Європейського Союзу, а також з метою аналізу зміни енергоспоживання при здійсненні термомодернізації. Мінімальні значення опорів огорожувальних конструкцій у відповідності до [36, 37, 76] для оцінки різниці вимог та загального підходу щодо енергетичної ефективності теплової оболонки будівлі, приведено у таблиці 2.4.1.

Таблиця 2.4.1. Мінімальні опори теплопередачі огорожувальної конструкції будівлі в Україні та Швеції

Вид огорожувальної конструкції	Мінімально допустиме значення приведенного опору теплопередачі, R_{qmin} , $m^2 \cdot ^\circ C / W$ згідно вимог		
	[37]	[36]	[76]
Зовнішні стінові конструкції	3,3	4,0	5,56
Суміщені покриття, що межують з зовнішнім повітрям	5,35	7,0	7,69
Перекриття, що межують із зовнішнім повітрям та над неопалювальним підвалом	3,75	5,0	6,67
Світлопрозорі огорожувальні конструкції	0,75	0,9	0,83
Зовнішні двері	0,6	0,7	0,83

Аналізуючи дані таблиці 2.4.1 можна зробити висновок, що діючі вимоги в Україні щодо огорожувальних конструкцій будівлі в середньому встановлюють жорсткіші вимоги, порівняно з попередніми, на 28%, проте є більш «м'якими», порівняно з вимогами Швеції приблизно на 18,5%.

Для відповідності огорожувальних конструкцій будівлі рівням вимог [36, 37, 76], виконано утеплення зовнішніх стін, перекриття над неопалювальним підвалом та суміщеного покриття, а також здійснено заміну вікон та дверей на енергоефективні. Покращення теплової оболонки будівлі здійснюється з використанням наступних матеріалів [55]:

- вертикальні огорожувальні конструкції – екструдований пінополістерол ($\lambda = 0,029 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{С}$, $\rho = 35 \text{ кг/м}^3$);
- перекриття над неопалювальним підвалом – мінеральна вата ($\lambda = 0,15 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{С}$, $\rho = 14 \text{ кг/м}^3$);
- суміщене покриття – пінополістерол ($\lambda = 0,022 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{С}$, $\rho = 30 \text{ кг/м}^3$).

Вибір товщини ізоляції для кожного з представлених матеріалів для забезпечення необхідного рівня теплового захисту здійснено у відповідності до вимог [36, 37, 76]. Зокрема, при виборі утеплювача особлива увага приділялась вимогам щодо пожежної безпеки та екологічності матеріалів. Екологічність матеріалів є однією з основних вимог Державних будівельних норм [79], що визначають зобов'язання застосовувати будівельні конструкції, які мінімізують вплив на людину та довкілля протягом усього життєвого циклу. У контексті згаданого ДБН [79] будівельні конструкції розглядаються як будівельні матеріали, що власне охоплюють матеріали теплоізоляції будівлі. Заміна світлопрозорих конструкцій будівлі та дверей (металопластикові та метали) здійснюється згідно вимог [36, 37, 76] за різних етапів покращення теплової оболонки будівлі.

Варто зазначити, що при моделюванні утепленої згідно вимог [36, 37, 76] будівлі, відсутність регулювання системи опалення та вентиляції не враховувалась. Це означає, що динамічне моделювання модернізованої будівлі виконується з урахуванням контролю за енергоспоживанням у відповідності до робочого графіку працівників, вихідних та святкових днів. Зокрема, для забезпечення адаптації працівників будівлі до умов перебування в будівлі, при внесенні вихідних даних для моделювання параметри температурного діапазону для опалення та охолодження, величина повітряного потоку на особу, загальна робоча площа ($\text{м}^2/\text{особу}$) а також норма вентиляції (л/с , м^2) та норма освітлення витримані рекомендації [50].

Динаміка енергоспоживання досліджуваної будівлі, тепловий захист якої покращено згідно вимог, приведено на рисунку 2.4.1.

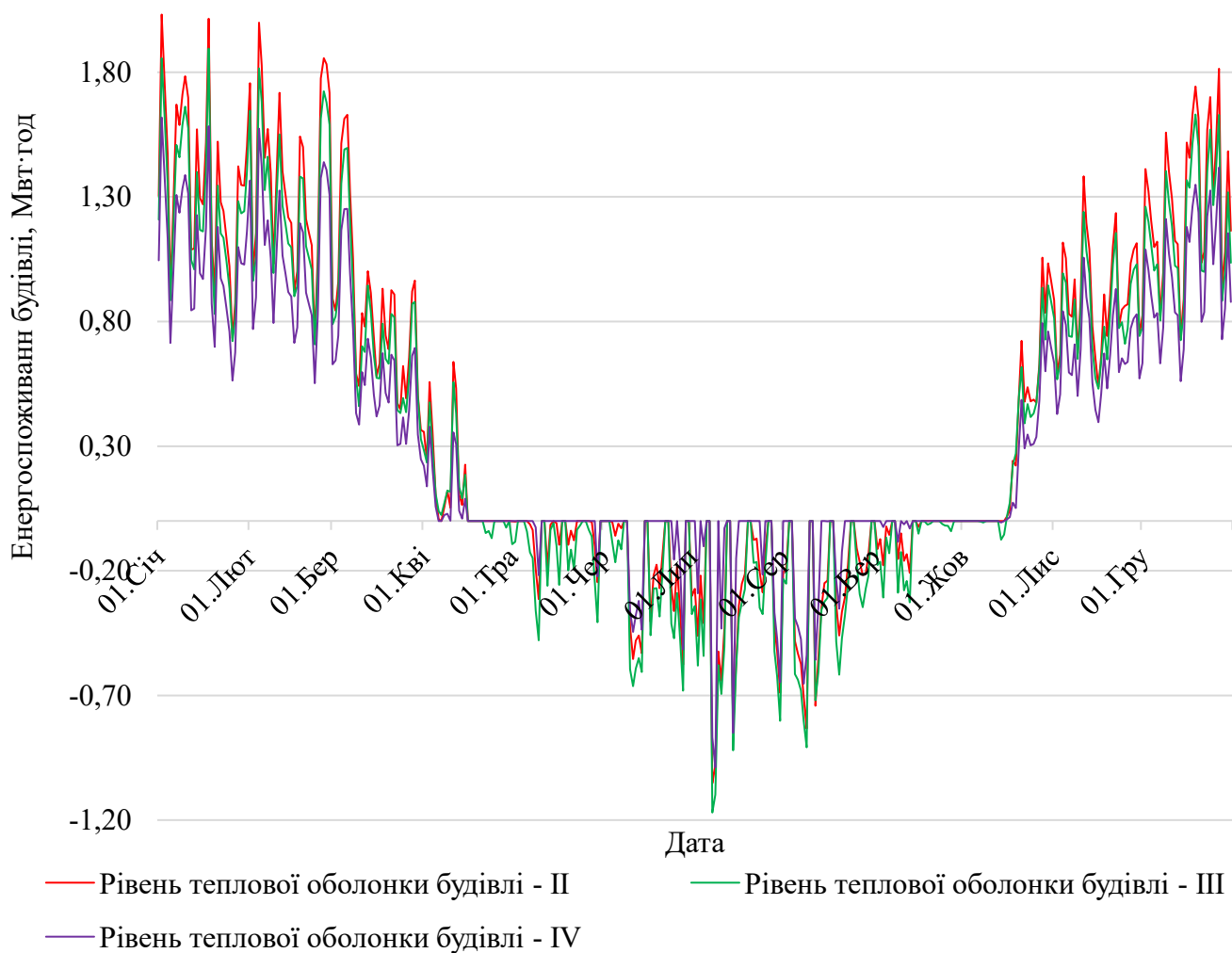


Рисунок 2.4.1. Динаміка енергоспоживання будівлі при покращенні її теплового захисту до рівня II, III та IV

Результати динамічного моделювання будівлі, приведені на рисунку 2.4.1 свідчать про позитивну динаміку щодо зменшення загального енергоспоживання будівлі. Так, при здійсненні заходів покращення теплової оболонки будівлі до рівня II, III, IV, економія теплової енергії становить близько 48%, 52% та 61% відповідно, порівняно з рівнем теплового захисту будівлі I''. Разом з тим, енергетична потреба будівлі на охолодження при забезпеченні теплового захисту огорожувальних конструкцій до рівня III зростає на 34%, порівняно з рівнем II, та зменшується на 63%

при забезпеченні рівня IV теплового захисту будівлі, порівняно з рівнем III. Загалом, такі показники можуть свідчити про недостатню теплоізоляцію будівлі, адже гіпотеза щодо скорочення енергоспоживання будівлі при покращенні теплової ізоляції будівлі не виконується. Автор [56] називає такий ефект переходом будівлі з проізоляційної у антиізоляційну та зосереджує свою увагу на тому, що подібна поведінка є можливою. Зокрема, увага у дослідженні [56] зосереджена на постійному зниженні енергії на опалення при забезпеченні кращої теплової ізоляції будівлі і одночасному зростанні енергії на охолодження будівлі (в тому числі, за рахунок зростання частки тепловиділення при експлуатації системи освітлення та офісного обладнання). Робота авторів [80], для прикладу, приводить дані проведеного динамічного моделювання будівлі при поетапному утепленні її огорожувальних конструкцій до рівня національних вимог. Результати такого моделювання свідчать про скорочення споживання енергії для теплозабезпечення та охолодження будівлі на 22%, проте збільшення годин роботи вентиляції на 20% протягом року.

Враховуючи досвід науковців у проведенні оцінки енергоспоживання будівлі за покращення її теплової оболонки, а також висновки щодо впливу товщини утеплення на зростання потреби на охолодження будівлі, проведено оцінку впливу обладнання офісу. Оскільки тепловий ефект від використання системи освітлення та офісного обладнання є впливовим, аналіз зміни тепловиділень від обладнання та джерел штучного світла проведено згідно графіку теплових надходжень від освітлення та офісних приладів для рівних рівнів теплового захисту будівлі (рисунок 2.4.2).

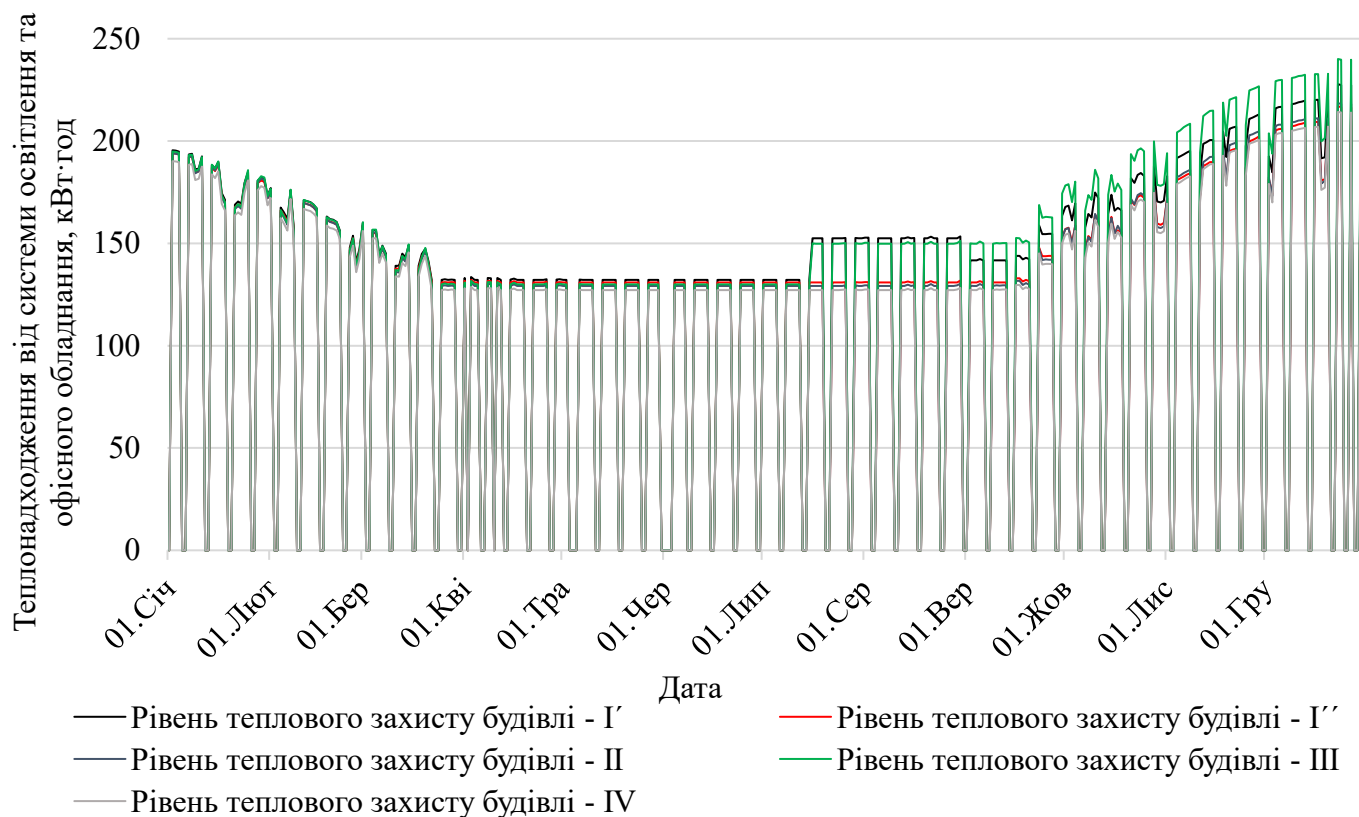


Рисунок 2.4.2. Теплонадходження від системи освітлення та офісного обладнання за різних рівнів теплового захисту будівлі

При здійсненні динамічного моделювання, у відповідності до вимог [50], проведено оцінку загального споживання електричної енергії. Динаміка споживання електричної енергії будівлею різного рівня теплового захисту з забезпеченням ефективного використання джерел освітлення та офісного обладнання (для існуючого рівня – оцінка за постійної роботи системи опалення, вентиляції та охолодження, та за регулювання роботи систем у відповідності до графіку роботи) приведена на рисунку 2.4.3.

Відповідно до рисунку 2.4.3, можна зробити висновок щодо закономірності зміни електроспоживання при здійсненні контролю за енергоспоживанням (при регулюванні системи охолодження знижується споживання електричної енергії системою охолодження) та здійсненні заходів щодо покращення теплової оболонки

будівлі (при здійсненні утеплення потреба у охолодженні зростає, порівняно з початковим та/або існуючим станом теплової оболонки, проте зменшується при подальшому утепленні). Загалом, аномальних відхилень щодо динаміки електроспоживання, порівняно з енергоспоживанням для потреб опалення, вентиляції та кондиціювання (рисунок 2.4.1, 2.4.2) не спостерігається.

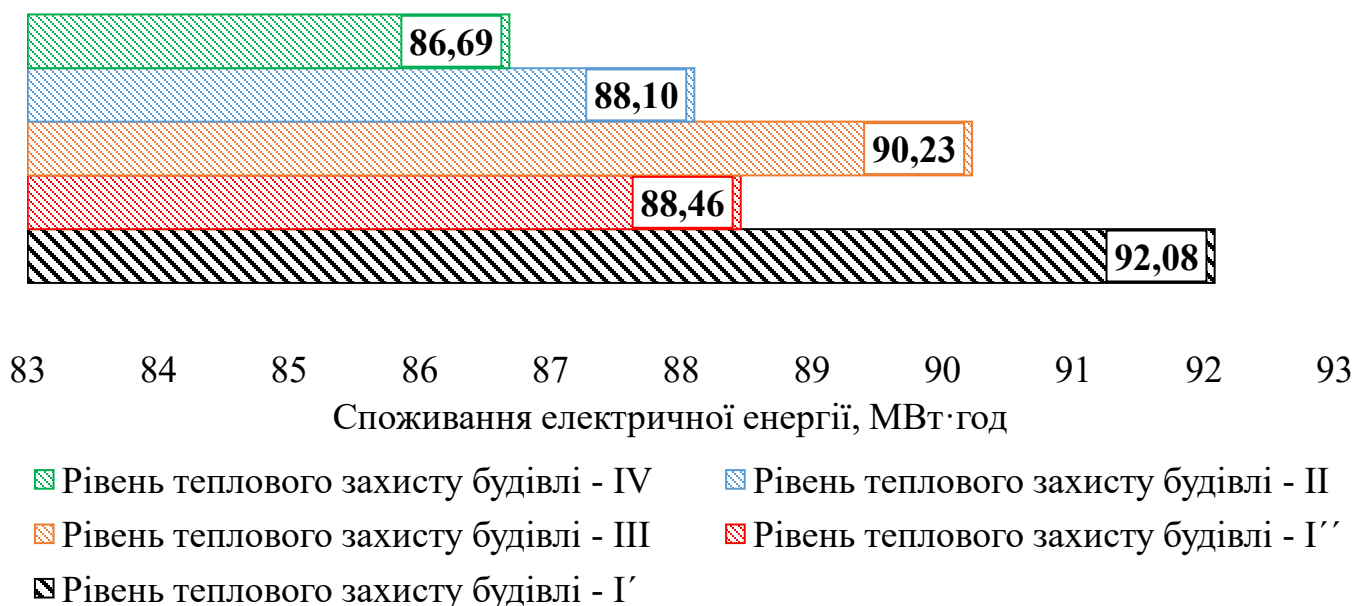


Рисунок 2.4.3. Споживання електричної енергії будівлею при регулюванні роботи системи опалення, вентиляції та кондиціювання а також при покращенні теплової оболонки будівлі

Реалізація заходів, що сприяють покращенню теплової оболонки будівлі та раціональному енергоспоживанню, сприяють економії паливно – енергетичних ресурсів, що забезпечують необхідний рівень енергії. Для прикладу, при кожному з етапів термоізоляції будівлі та власне регулювання роботи системи опалення, вентиляції та кондиціювання, проведено оцінку економії природного газу, виходячи з даних технічного паспорту котла, що використовується для теплозабезпечення та фізичних параметрів природного газу. Результати проведеної оцінки наступні:

- з рівня теплового захисту будівлі I' до рівня I'' – 22,99 тис. м³;
- з рівня I'' до рівня II – 20,08 тис. м³;
- з рівня II до рівня III – 1,91 тис. м³;
- з рівня III до рівня IV – 1,11 тис. м³.

Питомий показник споживання енергії будівлею визначено з урахуванням потреби на теплозабезпечення, вентиляцію, кондиціонування та електрозабезпечення. Тобто, для кожного рівня теплового захисту будівлі (I' – IV) розраховано загальне енергоспоживання:

- I' – 610,98 МВт·год;
- I'' – 410,54 МВт·год;
- II – 219,624 МВт·год;
- III – 221,33 МВт·год;
- IV – 211,72 МВт·год.

З метою оцінки проведених заходів з покращення теплового захисту будівлі та з урахуванням необхідності визначення питомого показника споживання енергії (згідно [17]), проведено оцінку енергоспоживання на кубічний метр кондиціонованого об'єму досліджуваного офісу (6 237 м³). Показники питомого енергоспоживання будівлі різного рівня теплового захисту представлено у таблиці 2.4.2.

Таблиця 2.4.2. Питомі показники енергоспоживання енергії будівлі за різних рівнів теплового захисту

Рівень теплового захисту будівлі	Питомий показник енергоспоживання
	будівлі, кВт·год/м ³
I'	97,9
I''	65,8
II	35,2

Продовження таблиці 2.4.2

Рівень теплового захисту будівлі	Питомий показник енергоспоживання будівлі, кВт·год/м³
III	35,4
IV	33,9

Результати проведених розрахунків загалом свідчать про невиконання вимог щодо показника питомого енергоспоживання для рівнів теплового захисту будівлі згідно. Це свідчить, зокрема і про неможливість забезпечення будівлі рівню nZEB [16] без використання відновлюваних джерел енергії, або принаймні з забезпеченням більш енергоефективних джерел енергії. Разом з тим, динаміка енергоспоживання при утепленні також акцентує увагу на додатковому навантаженні на систему вентиляції та кондиціонування для забезпечення необхідного повітрообміну згідно національних вимог. Тобто, при покращенні теплової оболонки будівлі з існуючого стану до вимог України та Швеції зокрема, виникає потреба у додатковій енергії для збереження оптимальних умов мікроклімату.

2.5 Верифікація результатів енергетичного моделювання

Для валідації моделі громадської будівлі, створеної в Design Builder, було використано модель 5-R-1-C [81], яка є основою ISO 52016-1:2017 [82]. Зазначена модель являє собою динамічний метод розрахунку енергії для опалення, вентиляції та охолодження. Зазначений метод є прийнятним у країнах Східної Європи та включений до національних алгоритмів, які використовуються для енергетичної сертифікації будівель (Хорватія), оскільки дозволяє визначати погодинну енергопотребу на опалення, вентиляцію та кондиціонування з урахуванням усіх потоків енергії.

Згідно з моделлю 5R1C (динамічна сіткова модель приміщення, п'ять опорів, одна продуктивність), потреба в енергії для опалення Φ_{HC} розраховується як значення потужності опалення за кожну годину, що подається до вузла температури повітря в приміщенні (θ_{air}) для підтримки заданого значення температури [83]. Внутрішні теплонадходження (Φ_{int}) та теплонадходження від сонця (Φ_{sol}) поділяються на три частини: Φ_{m} , Φ_{st} , Φ_{ia} , що пов'язані з вузлами зовнішньої температури (θ_{m}), температури внутрішніх поверхонь (θ_{s}) та внутрішньої температури повітря (θ_{air}). Значення $H_{\text{tr.w}}$, $H_{\text{tr.em}}$, $H_{\text{tr.ms}}$, $H_{\text{tr.is}}$, H_{ve} характеризують зв'язану провідність між температурними вузлами, що характеризує втрати на передачу через огорожувальні конструкції будівлі та вентиляцію та з'єднанні з внутрішньою теплоємністю непрозорих огорожувальних конструкцій C_{m} , що являє собою теплову масу будівлі. Зокрема, коефіцієнт теплопередачі вентиляції (H_{ve}) пов'язаний з температурою припливного повітря θ_{sup} , коефіцієнт теплопередачі світлопрозорих ($H_{\text{tr.w}}$) та непрозорих огорожувальних конструкцій ($H_{\text{tr.em}}$) – із зовнішньою температурою (θ_{e}).

Схема динамічного методу реалізована на основі EN ISO 13790, EN ISO 13786 та ISO 52016-1:2017, як показано на рисунку 2.5.1 [84].

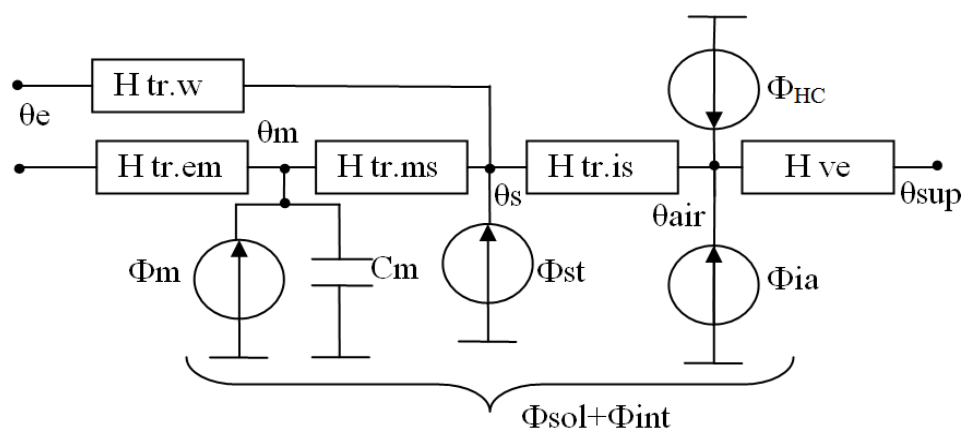


Рисунок 2.5.1. Динамічна сітчаста модель кімнати, п'ять опорів, одна ємність (5R1C)

Потреба в енергії для опалення базується на розрахунку рівня нагріву, $\Phi_{\text{HC.nd}}$, який має бути поданий щогодини до вузла внутрішньої температури повітря (θ_{air}), для

підтримки певної заданої температури. Задана температура є середньозваженим значенням внутрішньої температури повітря та температури випромінювання. Теплопередача вентиляцією (H_{ve}) безпосередньо пов'язана з вузлом внутрішньої температури повітря θ_{air} та вузлом, що відповідає температурі припливного повітря θ_{sup} . Теплопередача шляхом передачі поділяється на дві частини: перша – через світлопрозорі огороження, такі як вікна та двері ($H_{tr.w}$) які не мають теплової маси, друга – через непрозорі огорожувальні конструкції ($H_{tr.em}$), які мають теплову масу, і, у свою чергу, поділяється на дві частини: сонячні (Φ_{sol}) та внутрішні теплонадходження (Φ_{int}) розподіляються між вузлом внутрішньої температури повітря θ_{air} , температурою внутрішніх поверхонь θ_s , та вузлом зовнішньої температури θ_m , що представляє масу будівлі. Теплова маса відображається питомою теплоємністю C_m , розташованою між $H_{tr.em}$ та $H_{tr.ms}$. Зв'язок темплотепередачі внутрішньої та зовнішньої частини непрозорих огорожувальних конструкцій визначається між внутрішньою температурою повітря та центральним вузлом. Значення теплового потоку від внутрішніх джерел (Φ_{int}) та значення теплонадходжень від сонця (Φ_{sol}), поділяються між трьома вузлами: температура внутрішнього повітря (θ_{air}) та внутрішніх вузлів (θ_s , θ_m) [53]. Розрахунки приведених вище коефіцієнтів здійснюються за формулами 2.4-2.15.

$$H_{tr.is} = h_{is}A_{tot} \quad (2.4)$$

$$H_{tr.ms} = h_{ms}A_m \quad (2.5)$$

$$H_{tr.em} = \frac{1}{\frac{1}{H_{op}} - \frac{1}{H_{tr.ms}}} \quad (2.6)$$

$$H_{tr.1} = \frac{1}{\frac{1}{H_{ve}} + \frac{1}{H_{tr.is}}} \quad (2.7)$$

$$H_{tr.2} = H_{tr.1} + H_{tr.w} \quad (2.8)$$

$$H_{tr.3} = \frac{1}{\frac{1}{H_{tr.2}} + \frac{1}{H_{tr.ms}}} \quad (2.9)$$

$$C_m = \sum k_j A_j \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{m.tot} &= \Phi_m + H_{tr.em} \theta_e \\ &+ \frac{H_{tr.3}(\Phi_{st} + H_{tr.w} \theta_e + H_{tr.1}(\frac{\Phi_{ia} + \Phi_{HC.nd}}{H_{ve}} + \theta_{sup}))}{H_{tr.2}} \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\theta_m = \frac{\theta_{m,t} + \theta_{m,t-1}}{2} \quad (2.12)$$

$$\theta_{m,t} = \frac{\theta_{m,t-1}(\frac{C_m}{3600} - 0,5(H_{tr.3} + H_{tr.em}) + \Phi_{m.tot})}{\frac{C_m}{3600} + 0,5(H_{tr.3} + H_{tr.em})} \quad (2.13)$$

$$\theta_s = \frac{H_{tr.ms} \theta_m + \Phi_{st} + H_{tr.w} \theta_e + H_{tr.1}(\frac{\Phi_{ia} + \Phi_{HC.nd}}{H_{ve}} + \theta_{sup})}{H_{tr.ms} + H_{tr.w} + H_{tr.1}} \quad (2.14)$$

$$\theta_{air} = \frac{H_{tr.is} \theta_s + H_{ve} \theta_{sup} + \Phi_{ia} + \Phi_{HC.nd}}{H_{tr.is} + H_{ve}} \quad (2.15)$$

де $\Phi_{ia}, \Phi_m, \Phi_{st}$ – внутрішні та сонячні теплонадходження, що розподіляються між трьома вузлами $\theta_{air}, \theta_s, \theta_m$, Вт;

$\Phi_{m.tot}$ – загальний тепловий потік, Вт;

h_{is} – коефіцієнт теплопередачі між вузлом внутрішньої температури θ_{air} та центрального вузла θ_s , має фіксоване значення $h_{is} = 3,45 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$;

h_{ms} – коефіцієнт теплопередачі між вузлами m and s , має фіксоване значення

$$h_{ms} = 9,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}};$$

A_m – ефективна площа, м^2 ;

A_j – площа j -елементу, м^2 ;

A_{tot} – площа всіх огорожувальних конструкцій будівлі, м^2 ;

C_m – внутрішня теплоємність, Дж/К;

k_j – внутрішня теплоємність на одиницю площі j -елемента будівлі, Дж/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$);

$H_{tr.is}$ – зв'язок через провідність між вузлами s та температурою повітря всередині Вт/К;

$H_{tr.1}, H_{tr.2}, H_{tr.3}$ – теплопровідність умовних вузлів 1, 2, 3, Вт/К.

На рисунку 2.5.2 представлено погодинні значення енергопотреб на опалення для базової досліджуваної моделі, отримані на основі розрахунків за допомогою моделі 5R1C та на основі моделі, розробленої в Design Builder. Результати порівняння моделей наведено в таблиці 2.5.1 та на рисунку 2.5.2.

Таблиця 2.5.1. Порівняння моделей розрахунку енергопотреб на опалення у програмному середовищі Design Builder та 5R1C

Параметр	5R1C	Design Builder
Середнє значення, кВт·год	117412,4	126952,7527
Медіана	121074,6	132325
Максимум	194775,3	236900
Загальне	5.16E+08	557576490
Коефіцієнт детермінації		0.94
Скоригований коефіцієнт детермінації		0.94

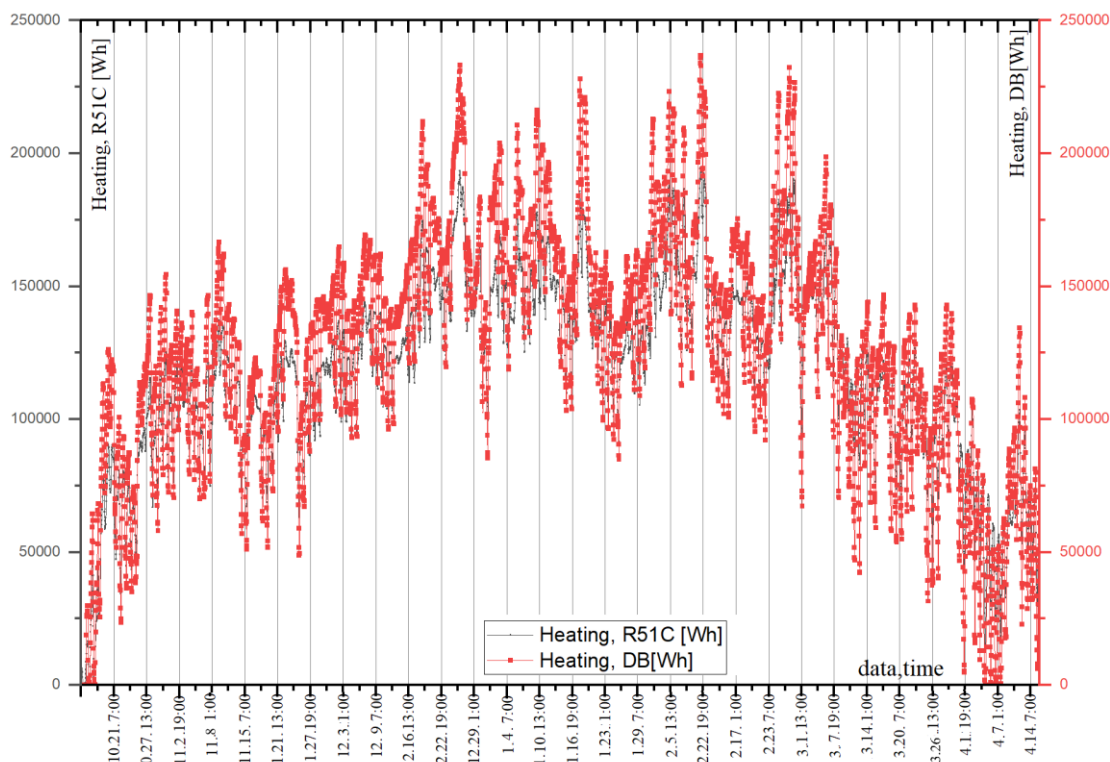


Рисунок 2.5.2. Енергопотреба на опалення для базового варіанту моделі дослідження

Результати проведених розрахунків та моделювання були проаналізовані за допомогою Origin (рисунок 2.5.3).

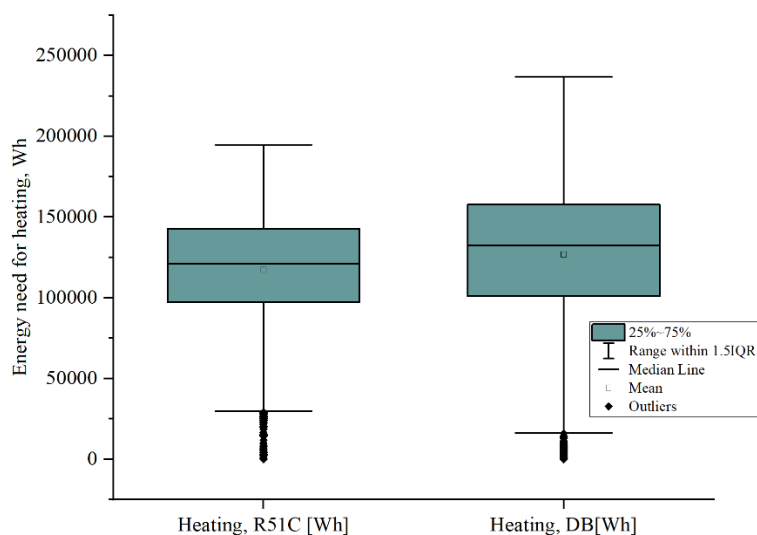


Рисунок 2.5.3. Погодинний розподіл енергопотреби на опалення для моделей 5R1C та Design Builder

Різниця між результатами загальної енергопотреби на опалення становить близько 8%, вищі значення характерні для моделі Design Builder та пояснюється тим, що модель 5R1C розглядає середню температуру випромінювання та температуру повітря як один вузол відповідно, тоді як у Design Builder середня температура випромінювання розраховується для кожної оболонки окремо, а температура повітря розраховується для кожної зони. Розбіжність між результатами двох моделей була оцінена на основі скоригованого коефіцієнта детермінації $R^2 = 0,94$.

2.6 Економічна оцінка покращення теплової оболонки будівлі

Ринок енергетики є дуже вразливим до економічних та політичних змін. Серед взаємозалежних факторів тарифів за послуги енергопостачання, зокрема можна виділити наявність доступних джерел енергії, динаміку зміни клімату та технічне забезпечення. Так, для прикладу, вартість енергоносіїв залежить від того, чи володіє окрема країна достатньою кількістю запасів ресурсів для покриття необхідного енергоспоживання, чи змушена імпортувати ці ресурси з інших країн світу. Зміна клімату зумовлює пошуки альтернативних джерел енергії для забезпечення «чистої енергетики» та сприяє відходу від традиційних, невідновлювальних джерел енергії. Так, існують політики щодо призупинення або зменшення (з огляду на соціальне забезпечення населення) державного субсидіювання для споживачів природного газу (Литва, [85]) та навпаки, забезпеченні фінансової підтримки споживачів, що використовують альтернативні джерела для енергозабезпечення житлових та громадських будівель. Більше того, політика Європейського Союзу направлена на представлення результатів реалізації проєктів «чистого будівництва». Зокрема, згідно Директиви про енергетичну ефективність будівель [9], країни ЄС повинні зобов'язати на законодавчому рівні виконання будівництва за концепцією nZEB споруд державного значення, що підкреслює необхідність забезпечення енергією таких будівель з відновлювальних джерел. Вплив технічного забезпечення на динаміку

тарифів на енергоносії полягає у вразливості енергосистеми до технічних збоїв та кібератак, відновлення після яких вимагає перегляду тарифної політики. МЕА відзначає залежність тарифів на електроенергію від динаміки цін на природний газ у контексті виробництва електричної енергії на станціях, що працюють на природному газі. Так, згідно [86], оптові ціни на електроенергію у Європі значно зросли починаючи з серпня 2021 року власне через здорожчання природного газу. Разом з тим, виконання ініціатив щодо скорочення глобального енергоспоживання відбувається з урахуванням соціальних показників. Так, поширеною практикою є збільшення тарифів на електричну та теплову енергію, природний газ для підприємств та/або юридичних осіб в той час, коли зростання тарифів для населення не спостерігається.

Вартість одиниці енергії є вагомим фактором при здійсненні оцінки заходів з енергозбереження та підвищення енергоефективності. Автором роботи [87] підкреслено необхідність врахування зміни тарифів на енергетичні ресурси при техніко – економічному обґрунтуванні можливих шляхів модернізації будівлі. Тобто, при здійсненні попереднього аналізу доцільності реалізації будь – яких заходів підвищення енергетичної ефективності, врахування зміни вартості одиниці енергії, а також реакція економіки на певні можливі глобальні чи регіональні виклики, повинна бути врахована. З метою якісної оцінки запропонованих заходів покращення теплової ізоляції будівлі, у процесі виконання роботи проведено аналіз динаміки цін на природний газ та електроенергію для непобутових споживачів в Україні [73, 74] та Швеції [88, 89] в розрізі восьми років (2015 – 2022). Результати проведеного аналізу представлено на рисунку 2.6.1.



Рисунок 2.6.1. Динаміка тарифів на природний газ та електроенергію в Україні та Швеції

Згідно з рисунком 2.6.1, загальний характер зміни тарифів на електричну енергію та природний газ в Україні та Швеції не відрізняється – зростання ціни на природний газ та електричну енергію в Україні в певному році спостерігається і для Швеції, і навпаки. Проте, існує велике різниця у кількісному співвідношенні тарифів, де середній тариф протягом років, що розглядаються, для України менший на 65,6% (природний газ) та 28,9% (електрична енергія), порівняно зі Швецією.

Представлена у роботі [87] оцінка енергоефективності будівлі використовує підхід щодо визначення інтегральної вартості запропонованих заходів. Такий підхід, зокрема, дозволяє провести аналіз основних характеристик, що враховані при визначенні життєвого циклу будівлі (термін збереження теплофізичних параметрів

матеріалів та/або обладнання, зміну вартості коштів у часі). Функція інтегральної вартості [87] вищезазначених заходів з покращення теплової оболонки будівлі враховує зміну оплати за енергетичні ресурси при їх зменшенні за реалізації заходів, вартість обладнання та матеріалів, що використані для теплоізоляції, а також економічних параметрів, представлених зміною вартості коштів у часі та динамікою тарифів за паливно – енергетичні ресурси. Загальний вигляд функції інтегральної вартості заходів підвищення енергоефективності представлено формулою (2.16):

$$B_t = \sum_t^n \frac{B_{\text{експл}}}{(1+E)^n} + \sum_{t=0}^n B_{\text{енерг}} \cdot \frac{(1+l \cdot t)}{(1+E)^n} + I_0 + I_{\text{із}} + I_{\text{со}}, \quad (2.16)$$

де B_t – інтегральна вартість заходів підвищення енергоефективності, грн;

$B_{\text{енерг}}$ – річні затрати за спожиті енергоносії, грн;

$B_{\text{експл}}$ – інші затрати, грн;

I_0 – капітальні затрати на придбання та встановлення теплогенеруючого обладнання, грн;

$I_{\text{із}}$ – витрати, спрямовані на покращення теплового захисту будівлі, грн;

$I_{\text{со}}$ – витрати на придбання приладів опалення, покращення системи вентиляції, грн;

l – коефіцієнт, що враховує приріст цін на енергоносії;

n – час, для якого визначаються інтегральні дисконтовані витрати, роки;

E – ставка дисконтування.

Варто зазначити, що ставка дисконтування є, фактично, числом що допомагає оцінити вартість проекту у майбутньому з урахуванням можливої зміни поточної суми протягом певного прогнозованого періоду. Загалом, цей показник є різним для кожної країни та залежить від економічних факторів. Початкова оцінка інтегральних витрат покращення теплової оболонки будівлі оцінена без урахування приросту цін на енергоносії та ставки дисконтування з урахуванням середнього тарифу на

електроенергію та природний газ протягом восьми останніх років в Україні та Швеції у розрізі 25 років. Варто зазначити, що згідно [90], термін служби теплоізоляційних матеріалів оцінюється терміном служби будівлі загалом, проте відповідно з [37], ефективна експлуатація теплоізолюючих матеріалів становить 25 років. Графік зміни інтегральної вартості покращення теплової оболонки будівлі за середнього протягом восьми років тарифу на електричну енергію та природний газ в Україні (рисунок 2.6.1) приведено на рисунку 2.6.2.

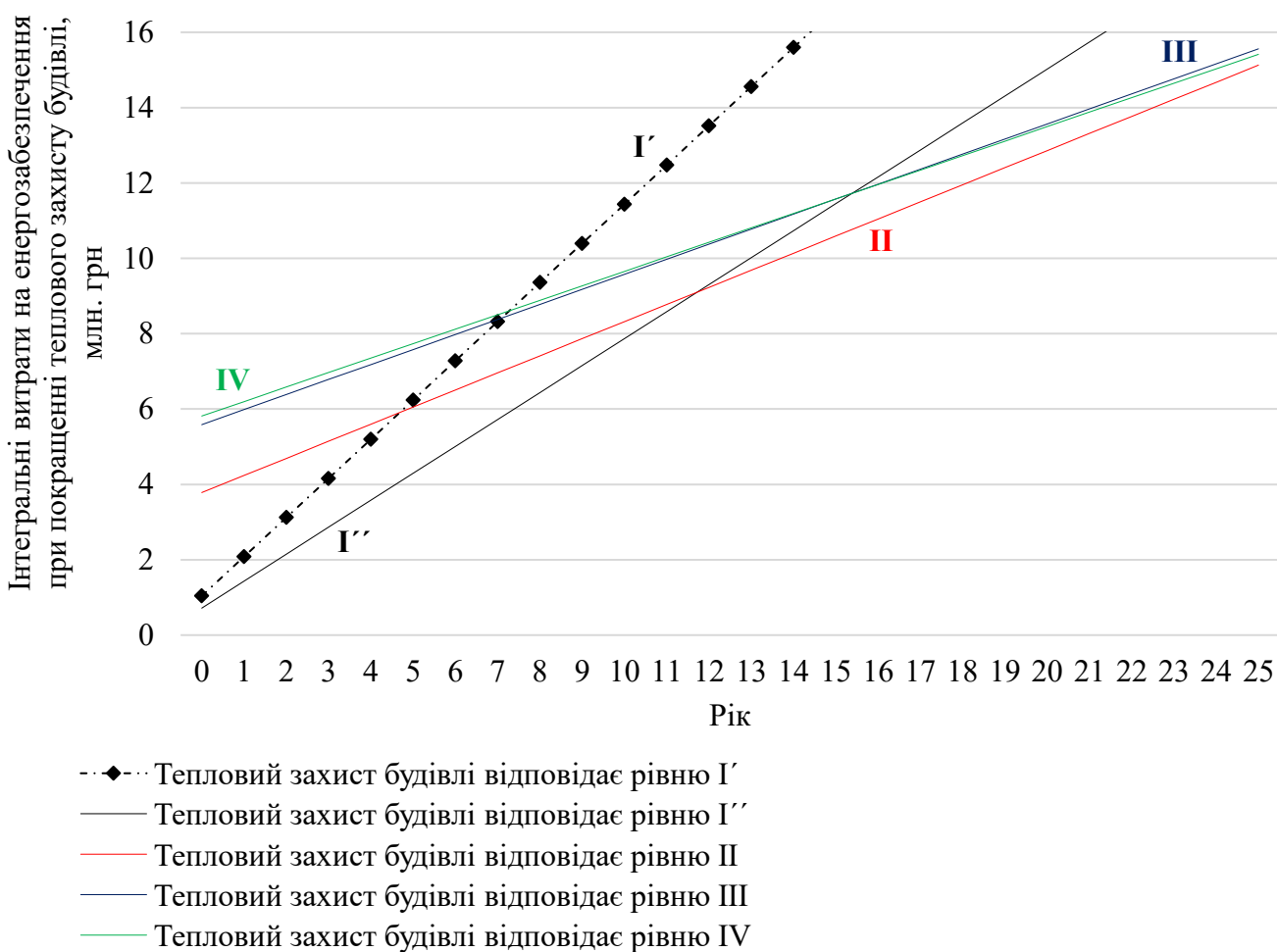


Рисунок 2.6.2. Інтегральні витрати при покращенні теплової оболонки будівлі за умов незмінних тарифів та ставки дисконтування протягом розрахункових років з урахуванням середніх протягом 2015 – 2022 років тарифів на ПЕР в Україні

Динаміка інтегральних витрат на енергозабезпечення, представлена на рисунку 2.6.2 свідчить, в першу чергу, про суттєві експлуатаційні витрати за умови підтримки будівлі на рівні I' - графік інтегральних витрат є найбільш крутим у представленому порівнянні. Як було прописано вище, рівень I' - це неутеплена існуюча будівля з постійним графіком роботи системи опалення, вентиляції та кондиціонування. При регулюванні роботи зазначених інженерних систем будівлі за існуючої теплової оболонки (неутеплена будівля), лінія інтегральних витрат є більш пологою, експлуатація такої будівлі є значно дешевшою (для прикладу, на п'ятому році експлуатації будівлі, витрати на енергозабезпечення будівлі рівня I'' будуть на 45% меншими за експлуатацію будівлі за рівня теплового захисту I'). З метою охоплення абсолютної більшості економічних переваг покращення теплової оболонки будівлі, у подальшому оцінка інтегральних витрат на енергозабезпечення покращених теплових оболонок будівлі (рівні II, III та IV теплового захисту) проводитиметься порівнянням як з рівнем I', так і з рівнем I''.

Так, аналізуючи ефект від покращення теплової оболонки будівлі до рівня вимог України [37] (рівень II), що були діючими до вересня 2022 року, можна зробити висновок про ефективність утеплення огорожувальних конструкцій та регулювання роботи системи опалення, вентиляції та кондиціонування, після близько 4,7 років експлуатації будівлі, у порівнянні з рівнем I' будівлі. Порівнюючи таку ж модернізацію з рівнем I'' (тобто порівнюючи власне ефект лише від утеплення, оскільки і за рівня I'', і за рівня II, графік роботи системи опалення, вентиляції та кондиціонування є переривчастим), окупність заходу стає менш економічно привабливою та досягає рівня беззбитковості після 11,7 років.

Вищі початкові затрати на утеплення будівлі до рівня III теплового захисту (вимоги України [36]) зумовлені, як зазначено вище, більш жорсткими вимогами до теплофізичних параметрів огорожувальних будівель порівняно з попередніми вимогами України [37]. З урахуванням зазначеного, економічна перевага покращення теплової оболонки будівлі до рівня III фіксуватиметься уже після 7 років експлуатації

будівлі, якщо порівнювати з рівнем I' теплового захисту будівлі, та після близько 15,4 років експлуатації – при порівнянні з рівнем I'' теплового захисту будівлі. Подібна ж перевага модернізації будівлі до рівня III теплового захисту у порівнянні з рівнем II теплового захисту будівлі спостерігатиметься після більше 25 років експлуатації будівлі, що ані з економічної точки зору не є цікавою перспективою, ані з технічної точки зору, оскільки за цей період ефективність теплоізоляційних матеріалів знизиться. Проведена оцінка переваг між рівнем III та рівнем II теплового захисту будівлі все ж має сенс з точки зору представлення впливу забезпечення більш енергоефективної оболонки будівлі на експлуатаційні витрати протягом тривалого терміну експлуатації, зважаючи на те, що рівень II теплового захисту будівлі більше не є прийнятним у контексті модернізації у відповідності до законодавчих національних вимог.

Якщо ж проводити оцінку модернізації будівлі від рівня I' до рівня IV теплової оболонки будівлі, то в першу чергу є помітною різниця у нахилі лінії інтегральних витрат на енергозабезпечення будівлі. Скорочення витрат на енергоносії при поступовій теплоізоляції зумовлюють нахил ліній інтегральних витрат на покращення теплового захисту, що дозволяє використовувати графік інтегральних витрат з точки зору оцінки ефективності впровадження заходів підвищення енергоефективності будівлі з визначенням їх терміну окупності. Як було зазначено раніше, терміном окупності є точка перетину ліній інтегральних витрат на енергозабезпечення будівлі при покращенні її теплового захисту до рівня вимог України (II та III) та Швеції (IV) з лінією, що характеризує існуючу будівлю при відсутності контролю роботи систем опалення, вентиляції та кондиціонування (I').

За рівня I' лінія більш крута (витрати значно вищі), за рівня IV витрати більш сталі, протягом 25 років експлуатації будівлі спостерігається незначне підвищення, порівняно з роком реалізації заходу. Так, економічна перевага утеплення будівлі до рівня IV теплового захисту спостерігається після 7,2 років експлуатації будівлі. Точка беззбитковості модернізації теплової оболонки будівлі до рівня IV, порівняно з рівнем

I'' теплового захисту будівлі становить 15,4 років, тобто знаходиться на тому ж рівні, що точка беззбитковості утеплення будівлі до рівня III за такого ж порівняння. Це свідчить про те, що за ефективність реалізації заходу з забезпечення високоенергоєфективної теплової оболонки будівлі (рівень IV) є вищою, аніж забезпечення енергоєфективної теплової оболонки будівлі (рівень III) з урахуванням того, що після перетину ліній I'', III та IV інтегральних витрат на енергозабезпечення будівлі лінія IV є найбільш пологою, тобто витрати є найнижчими. Разом з тим, ефективність забезпечення теплової оболонки рівня IV є вищою, порівняно з рівнем III теплового захисту, після 14 років експлуатації будівлі.

Виходячи з вищеприведеного, можна зробити висновок про залежність економічної ефективності покращення теплової оболонки будівлі від тарифної політики, вартості матеріалів, а також рівня скорочення енергоспоживання. З метою оцінки доцільності реалізації представлених варіантів покращення теплової оболонки будівлі при можливих тарифних змінах у сторону їх зростання, проведено розрахунок інтегральних витрат на енергозабезпечення репрезентативної будівлі за тарифної політики Швеції (рисунк 2.6.3). Підхід аналогічний попередньому – розрахунок проведено без урахування приросту цін на енергоносії та ставки дисконтування ($i = 0$, $E = 0$) за середніх протягом восьми останніх років тарифів на природний газ та електроенергію у Швеції. Такий варіант дозволить проаналізувати вплив цін на енергоносії на загальний характер графіку зміни інтегральних витрат на енергозабезпечення будівлі та економічну ефективність за різних рівнів теплової оболонки будівлі. Зміну інтегральних витрат, пов'язаних з енергоспоживанням офісної будівлі за середнього тарифу (протягом 2015 – 2022 років) на ПЕР у Швеції представлено на рисунку 2.6.3.

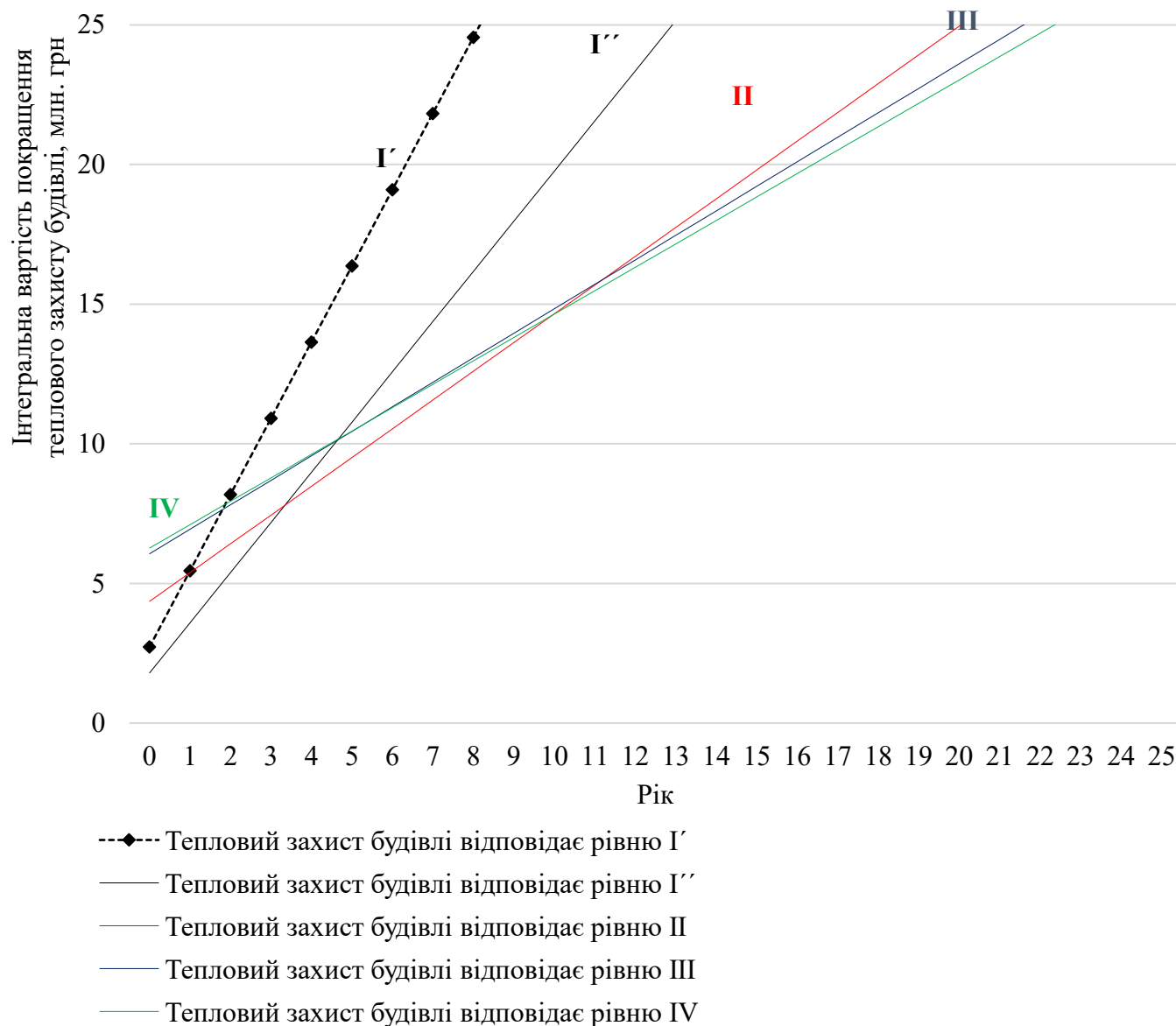


Рисунок 2.6.3. Інтегральні витрати при покращенні теплової оболонки будівлі за умов незмінних тарифів та ставки дисконтування протягом розрахункових років з урахуванням середніх протягом 2015 – 2022 років тарифів на ПЕР в Швеції

Оцінюючи динаміку інтегральних витрат на енергозабезпечення будівлі за різних рівнів її теплового захисту, представлену на рисунку 2.6.3, помітним є зростання економічної привабливості утеплення за умов підвищення тарифів на

природний газ та на електроенергію. Так, аналізуючи зміни інтегральних витрат за умов утеплення будівлі до вимог України [37] (рівень II) та витрат на енергозабезпечення існуючої будівлі (рівень I' будівлі – неутеплена будівля з постійним графіком роботи систем опалення, вентиляції та кондиціонування), фіксується суттєво нижчий термін окупності заходу з утеплення (рівень II), аніж за умов, що використані для представлення ліній інтегральних витрат на рисунку 2.6.2. Так, термін окупності модернізації теплової оболонки будівлі до рівня II за умов підвищення тарифів на енергоносії до рівня Швеції, становить приблизно 1 рік. Якщо ж оцінювати власне ефективність утеплення, тобто порівняти витрати за рівня II теплового захисту будівлі та рівня I'' теплового захисту), то окупність такої термосанації становитиме приблизно 3 роки та 3 місяці за умов європейських тарифних рівнів.

Ефективність покращення теплової оболонки будівлі за умов вищих тарифів на енергоносії до рівня III спостерігатиметься після 1 року 9 місяців експлуатації будівлі при порівнянні з рівнем I' теплового захисту будівлі, та після 4 років та 7 місяців експлуатації за порівняння з рівнем I'' теплової оболонки будівлі. Оцінка точки беззбитковості модернізації будівлі до рівня III теплового захисту при порівнянні з рівнем II теплового захисту будівлі спостерігатиметься після 11 років та близько 2 місяців експлуатації будівлі. За умови значно нижчих тарифів на енергоносії (тарифи України), що відображає динаміка інтегральних витрат на енергозабезпечення на рисунку 2.6.2, економічні переваги у реалізації більш жорстких вимог до огорожувальних конструкцій спостерігались після більш ніж 25 років експлуатації.

Точка беззбитковості модернізації будівлі від рівня I' до рівня IV теплового захисту знаходиться на рівні 1 року та 10 місяців, від рівня I'' - 4 роки та сім місяців, що відповідає точці беззбитковості рівня III при її порівнянні з I''. Скорочення енергоспоживання при утепленні будівлі до рівня IV, порівнюючи з рівнем II теплового захисту будівлі, є вищою аніж при утепленні до рівня III за подібного порівняння, оскільки точка беззбитковості модернізації теплової оболонки до рівня IV становить

менше 10 років (9 років та 10 місяців). Загалом, знову ж таки, ефективність реалізації заходу з забезпечення високоенергоєфективної теплової оболонки будівлі (рівень IV) є вищою, аніж забезпечення енергоєфективної теплової оболонки будівлі (рівень III) з урахуванням того, що після перетину ліній I', III та IV інтегральних витрат на енергозабезпечення будівлі лінія IV є найбільш пологою, тобто витрати є найнижчими.

Вищеприведений аналіз є свідченням того, що для оцінки доцільності реалізації проектів підвищення енергоєфективності врахування факторів зміни початкових параметрів на зразок тарифів на ПЕР, що забезпечують енергією будівлю, є необхідною. Такий фактор, власне і характеризує показник приросту цін на енергоносії l (формула 2.13). Показником, що враховує, в тому числі, можливу зміну вартості матеріалів є ставка дисконтування E . Власне, l та E регулює можливі сценарії здорожчання та/або здешевшання проекту у довгостроковому розгляді. З огляду на це, у роботі проведено аналіз економічної доцільності реалізації покращення теплового захисту будівлі за трьох можливих сценаріїв зміни тарифів на енергію та ставки дисконтування:

- 1) сценарій позитивних змін – характеризується незначним зростанням тарифів ($l = 0,025$ або 2,5%), та ставкою дисконтування $E = 5\%$;
- 2) існуючий сценарій – $l = 0,156$ або 15,6%, $E = 15,8\%$;
- 3) сценарій депресивних змін – приріст цін на енергоносії l становить 0,4 або 40%, ставка дисконтування E – в межах 20,7%.

Період 2021 – 2022 є аномальним з точки зору аналізування тарифів на енергетичні ресурси. Так, пандемія зумовила необхідність перегляду існуючих тарифів, що пов'язано з пошуком можливих варіантів регулювання існуючих цін на природний газ та електричну енергію. Відповідно до рисунку 2.6.1, до 2021 року глобальних стрибків у тарифній політиці як України, так і Швеції, не спостерігалось. Зокрема, визначено, що середній рівень зростання цін на енергоносії до 2021 року становив 2,5% ($l = 0,025$). Враховуючи більш сталу економічну ситуацію до 2021 року

та збереження єдиного підходу до визначення вартості паливно – енергетичних ресурсів для енергозабезпечення громадських та житлових будівель, сценарій позитивних змін характеризується середніми значеннями приросту енергоносіїв в Україні та Швеції протягом 2015 – 2020 років. Ставку дисконтування для оцінки дисконтованих інтегральних витрат на опалення обрано на рівні ставки дисконту, що використовується державами ЄС у розрахунках оптимальності витрат моделювання енергетичної системи – 5% [91].

Існуючий сценарій демонструє приріст загального рівня цін на споживчі товари, в тому числі, на енергоносії, протягом 2016-2017 років в Україні та середню ставку дисконтування за відповідний період в Україні. Зокрема, за даними Нацбанку України, середня ставка дисконтування у розрізі зазначеного періоду становила 15,8%, індекс споживчих цін становив 15,6%. Варто зазначити, що політика тарифоутворення в Україні досить складна і у конкретному припущенні здійснювати прогнозування на рівні історичних цін за одиницю енергії не було б правильно з декількох причин. Зокрема, тариф на електричну енергію та природний газ для непобутових споживачів має досить велике розгалудження та залежить від обраного постачальника з розвитком ринків електричної енергії та природного газу. Кожен із тарифів (загальний розмір тарифу) формується з урахуванням втрат в мережах розподілу та транспортування. Для кожного з операторів розподілу такий тариф відрізняється, як і власне комерційні пропозиції на постачання послуг. Для розуміння, є можливість провести загальний огляд динаміки тарифів на «електричну енергію» для постачальника універсальної послуги та тарифів на природний газ для «постачальника останньої надії», проте зміна таких тарифів точно не відображатиме реальний стан справ. З іншого боку, при визначенні приросту на основі історичних даних, фіксується пряма залежність розміру тарифів від глобальної економічно-політичної ситуації: енергетичні кризи, зумовлені пандемією та повномасштабним вторгненням на територію України, зумовили стрімке зростання вартості енергоносіїв у світі. Існуючий сценарій розглядає можливості поступових змін та очікуваних

прогнозів на рівні періоду до пандемії, тому за такого сценарію у роботі розглянути приріст цін на енергоносії на рівні $I=15,6\%$, $E=15,8\%$.

Сценарій депресивних змін розглядає варіант порівняно стрімкого зростання вартості енергоносії, як це було у 2022 порівняно з 2021 роком в Україні. Зростання тарифу на природний газ у 2022 році, порівняно з 2021, відбулось на 55% в Україні та на 39% в Швеції, приріст вартості електроенергії в Україні та Швеції становив 29% та 36% відповідно. Середній відсоток зростання тарифів на енергоносії, що забезпечують енергією досліджувану будівлю, складає 40% ($I = 4,0$). В якості ставки дисконтування обрано середню ставку дисконтування в Україні протягом 2022 року, що становить 20,7%. В умовах настання блек – аутів та масованих обстрілів об'єктів енергетики, як це було протягом опалювального періоду 2022 – 2023 років, можливим варіантом енергозабезпечення необхідного попиту може бути імпорт енергоносії в країн Європи. За таких умов збереження сталого тарифу, встановленого з огляду на можливості покриття потужностей власними енергоресурсами, може виявитись абсолютно недоцільним з економічної точки зору. Зростання тарифу на природний газ та електроенергії на 40% є, на жаль, є не найгіршим варіантом, який необхідно розглядати.

Зміна інтегральних витрат на енергозабезпечення при покращенні теплової оболонки будівлі з рівня I' до рівнів I'' , II, III та IV за середніх тарифів на природний газ та електроенергію протягом 2015 – 2022 років в Україні та Швеції для кожного з вищеописаних сценаріїв дозволяє оцінити точку беззбитковості (термін окупності) кожного з варіантів модернізації теплової оболонки. Точка беззбитковості утеплення будівлі для кожного з приведених варіантів за сценарію позитивних змін з урахуванням середніх тарифів на енергоносії в Україні та Швеції приведена у таблиці 2.6.1.

Таблиця 2.6.1. Точка беззбитковості реалізації покращення теплової оболонки будівлі до вимог при врахуванні середніх тарифів на енергоносії в Україні та Швеції за сценарію позитивних змін

Рівні теплової оболонки будівлі, що порівнюються	Точка беззбитковості покращення теплової оболонки будівлі (років) за сценарію позитивних змін (E=5%, I=2,5%) з урахуванням середніх протягом 2015 – 2022 тарифів на енергоносії в	
	Україні	Швеції
I' – I''	-	-
I' – II	5,0	1,0
I' – III	7,8	1,9
I' – IV	8,0	2,0
I'' – II	14,0	3,5
I'' – III	19,8	5,0
I'' – IV	19,8	5,0
II – III	-	13,2
II – IV	-	11,5
III – IV	18,8	5,7

Аналізуючи приведені у таблиці 2.6.1 дані, можна зробити висновок про зростання доцільності покращення теплової оболонки будівлі при можливому зростанню тарифів на енергоносії. Так, порівнюючи витрати на енергію будівлі за середнього тарифу на природний газ та електричну енергію в Україні та Швеції, можна помітити зміщення точки беззбитковості кожного з етапів утеплення в сторону зменшення при більшій вартості за енергоресурси та сталих показників приросту такої вартості та ставки дисконтування.

Враховуючи відмінність середніх тарифів у Швеції та Україні приблизно на 47%, скорочення точки беззбитковості кожного із рівнів, що розглядаються, на 75% при

врахуванні можливого зростання тарифів на природний газ та електричну енергію на 2,5% та ставку дисконтування в 5%, є досить логічним. Зокрема варто відзначити, що при тарифній динаміці України та не нульових значеннях I та E реалізація покращення теплової оболонки з рівня II до рівнів III та IV є абсолютно не ефективною та не матиме економічного ефекту протягом навіть п'ятдесяти років. Така аналітика є дуже цінною з точки зору попередньої оцінки реалізації заходів підвищення енергоефективності за можливого зростання вартості енергоносіїв за різних економічних впливів. Зокрема, це доводить також момент зростання мотивації щодо впровадження енергозберігаючих та/або енергоефективних заходів на рівні побутового або не побутового споживача у країнах Європейського Союзу, де вартість енергоносіїв є набагато вищою, ніж в Україні та у країнах пострадянського простору. Так, за європейської тарифної ставки та того ж рівня ставки дисконтування і приросту цін на енергоносії, реалізація утеплення будівлі є більш економічно привабливою – точка беззбитковості помітно скорочується.

Для підтвердження залежності тарифної політики на економічну доцільність реалізації заходів покращення енергоефективності (в даному розгляді – теплової оболонки будівлі), розглянуто варіант можливого зростання тарифів на природний газ та електричну енергію на 15,6% ($I = 0,156$) та зростанні ставки дисконтування у більш ніж 3 рази, порівняно з попереднім варіантом ($E = 15,8\%$). Точку беззбитковості кожного з розглянутих варіантів модернізації теплової оболонки будівлі за умов існуючого сценарію приведено у таблиці 2.6.2.

Таблиця 2.6.2. Точка безбитковості реалізації покращення теплової оболонки будівлі до вимог при врахуванні середніх тарифів на енергоносії в Україні та Швеції за існуючого сценарію

Рівні теплової оболонки будівлі, що порівнюються	Точка безбитковості покращення теплової оболонки будівлі (років) за існуючого сценарію ($E=15,8\%$, $l=15,6\%$) з урахуванням середніх протягом 2015 – 2022 тарифів на енергоносії в	
	Україні	Швеції
I' – I''	-	-
I' – II	4,7	1,0
I' – III	7,2	1,75
I' – IV	7,3	1,8
I'' – II	11,9	3,3
I'' – III	15,6	4,6
I'' – IV	15,6	4,6
II – III	-	11,3
II – IV	-	10,0
III – IV	15,0	5,0

Попри зростання початкових витрат на енергозабезпечення, порівняно з початковими даними ($E=5\%$, $l=2,5\%$), жоден з запропонованих варіантів покращення теплової оболонки будівлі за припущень, використаних для існуючого сценарію не призводить до зростання термінів окупності модернізації огорожувальних конструкцій. Зокрема, відповідно до даних, приведених у таблиці 2.6.2, зростання тарифів на природний газ та електричну енергію, а також встановлення вищої ставки дисконтування, зумовлює більш швидке повернення коштів при модернізації будівлі рівня I (I' та I'') до рівнів II, III та IV. Так, прослідковується закономірність щодо власне забезпечення окупності після 10 років експлуатації будівлі рівня IV та 11,3

років до рівня III, порівняно з рівнем II, що не створювало економічної доцільності такого покращення за сценарію позитивних змін. Разом з тим, проведений аналіз змін інтегральних витрат на енергозабезпечення за таких умов показує значне скорочення терміну окупності (точка беззбитковості менша) за реалізації заходів з покращення теплового захисту будівлі від існуючого рівня I' до рівнів II, III та IV (1 рік, 1,75 років та 1,8 років відповідно).

Результати проведеної оцінки зміни інтегральних витрат на енергозабезпечення будівлі при покращенні теплового захисту будівлі за сценарію депресивних змін при врахуванні середніх протягом восьми років (2015 – 2022) тарифів на енергоносії в Україні та Швеції, синтезовано у таблиці 2.6.3.

Таблиця 2.6.3. Точка беззбитковості реалізації покращення теплової оболонки будівлі до вимог при врахуванні середніх тарифів на енергоносії в Україні та Швеції за сценарію депресивних змін

Рівні теплової оболонки будівлі, що порівнюються	Точка беззбитковості покращення теплової оболонки будівлі за сценарію депресивних змін (E=20,7%, I=40%) з урахуванням середніх протягом 2015 – 2022 тарифів на енергоносії в	
	Україні	Швеції
I' – I''	-	-
I' – II	3,2	0,8
I' – III	4,6	1,4
I' – IV	4,7	1,5
I'' – II	6,4	2,5
I'' – III	7,7	3,3
I'' – IV	7,7	3,3
II – III	11,5	6,2

Продовження таблиці 2.6.3

Рівні теплової оболонки будівлі, що порівнюються	Точка беззбитковості покращення теплової оболонки будівлі за сценарію депресивних змін ($E=20,7\%$, $I=40\%$) з урахуванням середніх протягом 2015 – 2022 тарифів на енергоносії в	
	Україні	Швеції
II – IV	10,9	5,8
III – IV	7,0	3,4

Оцінка результатів, приведених у таблиці 2.6.3 свідчить про суттєве зростання економічної ефективності реалізації запропонованих варіантів покращення теплової оболонки будівлі. Загалом, можна стверджувати про вагоме зростання щорічних витрат на енергозабезпечення, проте ці витрати пов'язані власне зі зростанням ставки дисконтування та тарифів на енергоносії. Разом з тим, за подібного сценарію змін і ставки дисконтування, і тарифів, точка беззбитковості кожного з рівнів теплової оболонки будівлі (II, III, IV) свідчить про високу привабливість реалізації високого рівня теплового захисту будівлі. Приведені варіанти покращення теплової оболонки будівлі за умов сценарію депресивних змін є швидкоокупними та доцільними для реалізації. В умовах економічної нестабільності та кризових явищ, проведена оцінка показує, що здійснене до вимог України та Швеції утеплення огорожувальних конструкцій є економічно обгрунтованим рішенням. Загалом, ефект від реалізації заходів покращення теплового захисту будівель у Україні від найгірших теплофізичних параметрів огорожувальних будівель до найкращих (у контексті даної роботи – теплофізичні параметри, що відповідають вимогам Швеції) відчутний уже після 1 року та 6 місяців.

Висновки до розділу 2

Об'єктом дослідження обрано невиробничу будівлю для адміністративних потреб радянської забудови. Теплофізичні характеристики огорожувальних конструкцій будівлі не відповідають вимогам енергоефективності, що діють в Україні, технічний стан частини світлопрозорих конструкцій та перекриття, що межує з зовнішнім повітрям вимагає заміни. Енергоспоживання будівлі існуючого стану розраховано з використанням програмного середовища динамічного моделювання Design Builder з урахуванням існуючого конструктиву будівлі та існуючого стану огорожувальних конструкцій та становить 610,98 МВт·год/рік. З метою покращення теплового захисту будівлі, розглянуто можливості теплової ізоляції її оболонки до вимог України (зокрема, діючих станом до 01.09.2022 року та актуальних станом на 2025 рік) та Швеції з використанням пінополістеролу та мінеральної вати різної товщини, а також заміни дверей та світлопрозорих конструкцій рівня енергоефективності, визначеного вимогам. Разом з тим, здійснено оцінку впливу експлуатаційних факторів на енергоспоживання будівлі офісного призначення у програмному середовищі Design Builder за відсутності контролю за роботою енергетичних систем (рівень I') та при забезпеченні такого контролю (рівень I'') в залежності від робочого графіку. Регулювання роботи системи опалення, вентиляції та кондиціонування дає змогу зекономити 21,1 тис. куб м природного газу протягом опалювального періоду та 4,2 МВт·год електричної енергії на охолодження та скоротити викиди діоксиду вуглецю в атмосферу на 36,2 т.

З метою перевірки адекватності моделі використано динамічний метод розрахунку енергії для опалення, вентиляції та охолодження 5-R-1-C, що включений до національних алгоритмів окремих країн Східної Європи, які використовуються для енергетичної сертифікації будівель. У якості порівняння використано результати моделювання існуючого стану будівлю (неутеплена будівля без регулювання роботи системи опалення, вентиляції та кондиціонування) у Design Builder та здійснено оцінку

енергопотреби на опалення з використанням моделі 5-R-1-C. Різниця між результатами загальної енергопотреби на опалення становить близько 8%, вищі значення характерні для моделі Design Builder та пояснюється тим, що модель 5R1C розглядає середню температуру випромінювання та температуру повітря як один вузол відповідно, тоді як у Design Builder середня температура випромінювання розраховується для кожної оболонки окремо, а температура повітря розраховується для кожної зони. Це означає, що модель Design Builder більш деталізованою та враховує фактори зонально, формуючи результати з урахуванням конкретних параметрів. Підхід же 5-R-1-C дещо «розмиває» відповідні фактори, усереднюючи їх по одному вузлу. Розбіжність між результатами двох моделей була оцінена на основі скоригованого коефіцієнта детермінації $R^2 = 0,94$.

Проведений аналіз енергоспоживання будівлі при покращенні теплового захисту до вимог України (рівень II та III) та Швеції (рівень IV) показує динаміку зменшення споживання теплової енергії при утепленні (зменшення на 48%, 52% та 61% при утепленні від рівня I'' до рівня II, III та IV відповідно) та дещо аномальне зростання енергоспоживання на охолодження при забезпеченні теплового захисту будівлі рівню III. Так, утеплення будівлі до рівня III провокує зростання споживання енергії на охолодження на 34% порівняно з рівнем II, але є меншим на 63%, порівняно з рівнем IV. Подібне спостереження не є новим, оскільки наукові роботи, пов'язані з оцінкою енергоспоживання будівлі за використання програмних продуктів динамічного моделювання при покращенні теплового захисту, показують аналогічну динаміку.

Здійснення утеплення від рівня I'' до рівнів II, III та IV забезпечують зменшення загального енергоспоживання будівлі на 190,9 МВт·год/рік, 189,2 МВт·год/рік та 198,8 МВт·год/рік та зменшення показника питомого енергоспоживання будівлі на 46,5%, 46,2% та 48,5% відповідно. Кількісна зміна показника питомого споживання енергії для різних рівнів теплового захисту представлена на рисунку 2.6.4.

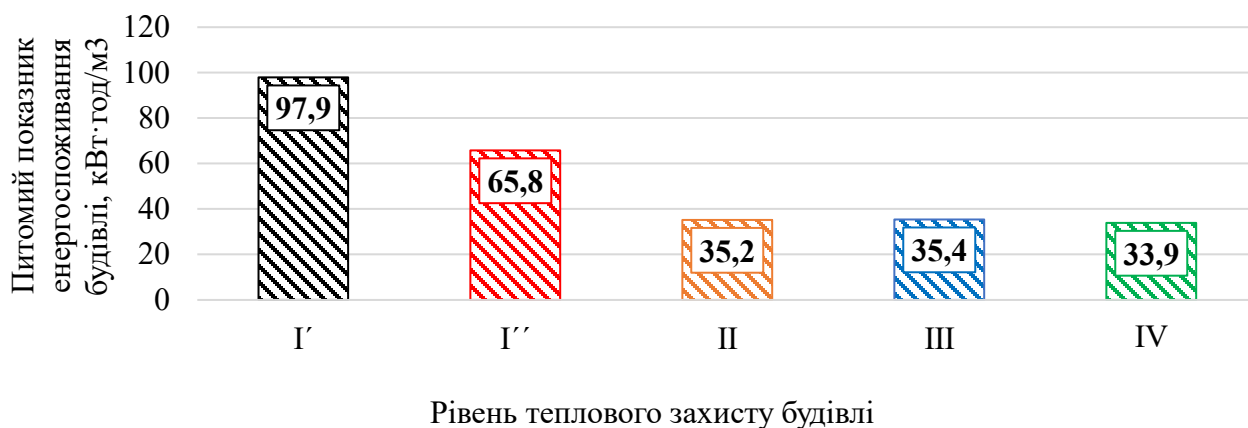


Рисунок 2.6.4. Зміна показника питомого споживання енергії для різних рівнів теплового захисту будівлі

Оцінка ефективності покращення теплового захисту будівлі проведена з використанням методу інтегральних витрат на енергію з урахуванням динаміки вартості природного газу та електричної енергії в Україні та в Швеції. Доцільність реалізації утеплення огорожувальних конструкцій будівлі з існуючого стану до рівня вимог країни Європи без урахування зміни вартості енергоносіїв протягом часу та з нульовою ставкою дисконтування є привабливішою за умов зростання тарифів. Зокрема, при врахуванні можливих змін щодо тарифів на енергію, така гіпотеза в загальному є справедливою, проте економічна ефективність реалізації покращення енергоефективності за менших початкових цін на природний газ та електроенергію є вищою, порівняно з початковою оцінкою (приростом цін та ставкою дисконтування нехтуємо).

Фактор можливої зміни вартості цін на енергоносії носії розглянуто за трьох сценаріїв, що відрізняються рівнем зростання тарифів та ставкою дисконтування. Так, сценарій позитивних змін характеризується незначним зростанням вартості одиниці енергії (2,5%) та ставкою дисконтування на рівні 5%. Існуючий сценарій означає зростання вартості одиниці енергії на 15,6% та фіксації ставки дисконтування на рівні 15,8%. Сценарій депресивних змін характеризується суттєвим зростанням вартості енергоносії (40%) та ставкою дисконтування, що становить 20,7%. Результати такого

впливу на тарифну політику підвищують економічну ефективність покращення теплового захисту будівлі та забезпечують швидку окупність підвищення енергоефективності теплової оболонки будівлі. Такий ефект власне вкотре фіксує увагу на недостатньо швидких темпах реалізації заходів підвищення енергоефективності в Україні – за рахунок низьких тарифів на енергоносії проекти модернізації будівель зокрема не зустрічають необхідної підтримки у інвесторів. Зокрема, за умов настання сценарію позитивних змін, окупність забезпечення енергоефективної (відповідно до вимог [36, 37]) та високоенергоефективної теплової оболонки (згідно вимог [76]) за середніх в Україні тарифів на енергоносії настає після 5, 7,8 років та 8 років експлуатації будівлі відповідно, порівняно з існуючим рівнем теплового захисту (I'). При зростанні вартості енергоносіїв та фіксації ставки дисконтування на рівні, вищому у три рази порівняно з рівнем сценарію позитивних змін, окупність реалізації підвищення енергоефективності будівлі до рівня вимог України та Швеції складає 4,7 років, 7,2 та 7,3 років відповідно. З урахуванням можливих суттєвих змін щодо тарифної політики (коефіцієнт приросту цін становить 0,4) та закріпленні ставки дисконтування на рівні 20,7%, економічна ефективність покращення теплового захисту будівлі зростає, терміни окупності реалізації енергоефективної та високоенергоефективної теплової оболонки становлять 3,2, 4,6 та 4,7 років відповідно. Вищі тарифи на електроенергію (приблизно на 40%) та природний газ (вищі практично втричі), порівняно з тарифами в Україні, дозволяють скоротити терміни окупності кожного із розглянутих варіантів покращення теплової оболонки будівлі за кожного із розглянутих сценаріїв всередньому втричі. Таке спостереження вкотре доводить необхідність перегляду підходів до тарифоутворення з метою забезпечення більш швидких темпів розвитку енергоефективності.

РОЗДІЛ 3 ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ КОНЦЕПЦІЇ NZEB

На фоні енергетичної кризи, що виникла сьогодні в Україні, а також з метою забезпечення виконання вимог Європейського Союзу щодо декарбонізації та енергоефективності [8, 9], все більша увага зосереджується на збільшенні частки генерації енергії з відновлювальних джерел. Досвід країн Європи свідчить про суттєве скорочення викидів парникових газів за стійкого курсу розвитку відновлювальної енергетики. Так, після ратифікації Директиви про відновлювальні джерела [39] та Директиви про енергоефективність [8], Європейська Комісія засвідчила про перевиконання плану щодо скорочення рівня викидів. Найбільш показовим є приклад Німеччини та Швеції, частка генерації енергії відновлювальними джерелами яких перевищила частку генерації «традиційними» (у даному контексті – ті, що працюють на природному газі та вугіллі).

Після затвердження Національного плану з енергетики та клімату [24] питання забезпечення підвищення енергоефективності сектору будівель стала не просто більш гострою, а й визначила один зі стратегічних напрямків України на шляху до євроінтеграції. Так, з метою забезпечення сталого енергетичного розвитку України затверджено Державну цільову економічну програму підтримки термомодернізації будівель до 2030 року [92] та прийнято наказ «Деякі питання запровадження вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії» [16], згідно з яким частка енергії, вироблена з відновлювальних джерел в будівлях з близьким до нульового рівнем споживання енергії, та яка споживається на потреби опалення й охолодження будівлі, повинна становити не менше 53% для I температурної зони та 57% - для II. Окреслення та затвердження на державному рівні зазначених складових є вагомим кроком у розвитку енергоефективного будівництва та спрямовує власників будівель різного призначення до скорочення загального енергоспоживання,

скорочення споживання викопних невідновлювальних видів енергоресурсів та, відповідно, скорочення вуглецевого сліду сектором будівель.

Затвердження НПЕК [24] є підтримкою цілей сталого енергетичного розвитку та забезпечення розвитку чистої енергії та підкреслює прагнення трансформації існуючої в Україні енергетичної системи до забезпечення декарбонізації різних сфер економіки в державі.

3.1 Послідовність проведення оцінювання ефективності використання відновлюваних джерел при реалізації концепції nZEB

З метою оцінки наявних національних та світових можливостей у забезпеченні високої частки використання відновлювальних джерел у загальному енергобалансі будівлі у даному розділі виконано дослідження за наступною послідовністю:

1) згідно отриманих результатів динамічного моделювання у програмному середовищі Design Builder енергоспоживання будівлі кожного з розглянутих рівнів теплового захисту у розділі 2 даної роботи оцінено потенціал заміни джерела енергії – з котла на природному газі на пелетний котел;

2) для кожного рівня теплового захисту будівлі здійснено оцінку доцільності використання теплового насоса типу «повітря-вода»;

3) для кожного із запропонованих варіантів модернізації будівлі (комплекс «теплова оболонка та джерело теплозабезпечення») здійснено економічну оцінку з використанням підходу інтегральних витрат, що враховує змінні економічні показники.

Загалом, вищезазначена послідовність у загальному відслідковується на схемі, представлений на рисунку 3.1.1.

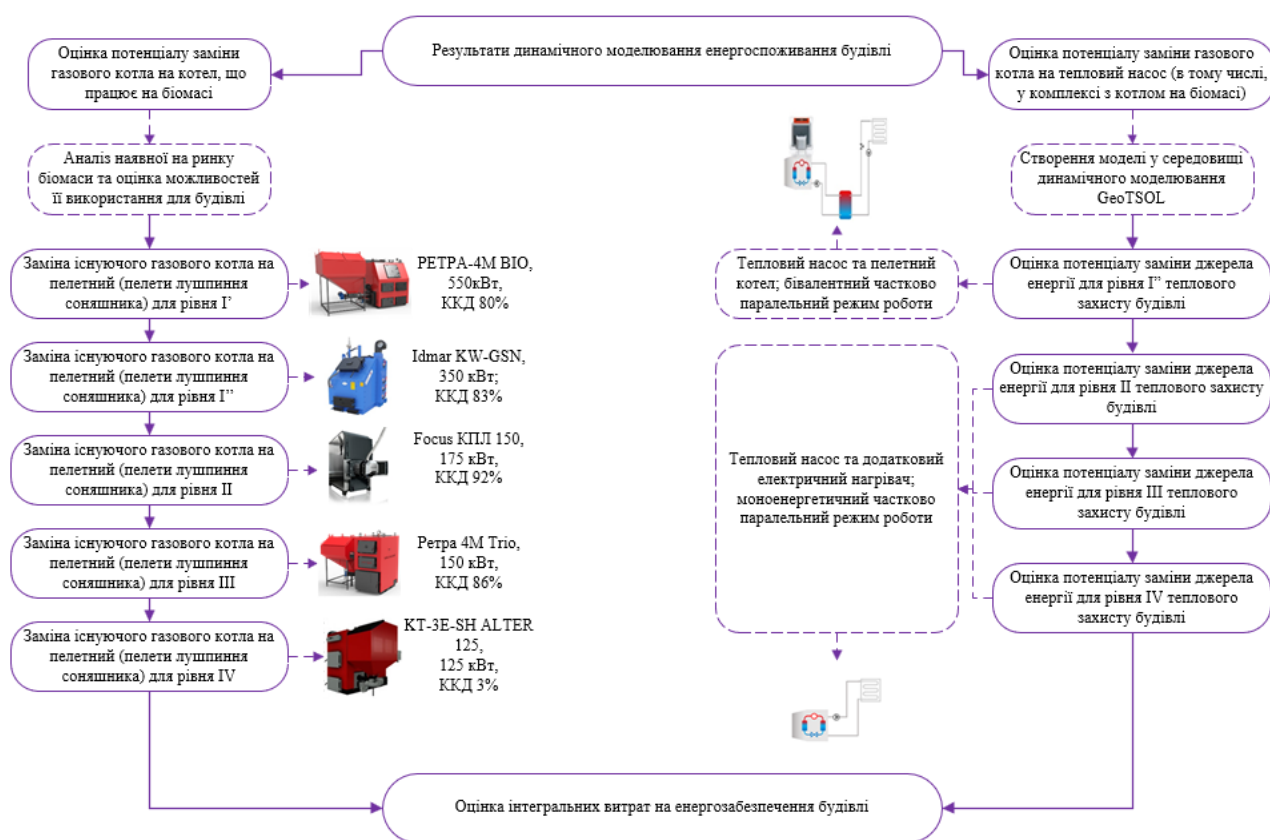


Рисунок 3.1.1. Послідовність проведення оцінювання ефективності використання відновлюваних джерел при реалізації концепції nZEB

3.2 Огляд потенціалу відновлювальної енергетики в Україні

Однією з основних проблем сьогодення є обмеження запасів та доступу до викопного палива а також вплив подібних ресурсів на загальний кліматичний стан. Загальносвітовий підхід щодо скорочення частки викопних джерел енергії у загальному енергетичному балансі підтримується Україною з часів підписання Кіотського протоколу [93]. Викиди, спричинені спалюванням невідновних викопних ресурсів та власне шкода для навколишнього середовища від видобування подібних ресурсів зумовлюють пошук рішень щодо заміщення подібних джерел енергії у кожному напрямі економіки. За даними Укрстату [94], загальна частка викопних

невідновних джерел енергії у енергетичному балансі постачання первинної енергії України 2020 року становила 70%. Зокрема, по розподілу ресурсів:

- вугілля та торф – 26% (на 2% менше, ніж у 2019);
- нафта сира та нафтопродукти – 16% (на 1% більше, ніж у 2019 році);
- газ природний – 28 % (на 2% більше, ніж у 2019).

Разом з тим, аналіз використання джерел енергозабезпечення 2020 року свідчить про зростання частки відновлювальної енергетики на 2% [94] (загальна частка у 2020 році – 7%), та зменшення використання атомної енергії на 2% порівняно з 2019 роком (загальна частка у енергобалансі 2020 року – 23%).

У структурі ж кінцевого споживання енергії відбулась загалом негативна динаміка викидів, спричинених використанням викопних енергетичних ресурсів. Так, згідно [94], найбільшу частку в енергобалансі у 2020 році складає природний газ (28%), за тим – нафта сира та нафтопродукти й електроенергія (по 20%), теплова енергія (15%), вугілля та торф (12%) і відновлювальна енергія (5%). Попри високе заохочення до використання відновлювальних джерел, енергозабезпечення чистими видами ресурсів лишається на найнижчому рівні у порівнянні з іншими видами енергії. Для забезпечення розвитку відновлювальної енергетики та, відповідно, зменшення негативного впливу на навколишнє середовище, в Україні на сьогодні впроваджено стимулюючі тарифи для виробництва енергії з відновлювальних джерел, реалізовано програми підтримки уряду для малих проектів відновлювальної енергетики, а також промислових підприємств та житлового фонду. Зокрема, зростання частки відновлювальної енергії у загальному енергетичному балансі України є однією зі стратегічних цілей Енергетичної стратегії України [95] та Стратегії енергетичної безпеки [96].

Оцінка кожного з можливих варіантів використання ВДЕ проводиться, в тому числі, з можливими ризиками. Так, сприятливий для генерації сонячної енергії південний та південно – західний регіон України на сьогодні перебуває під постійними обстрілами. Подібний ризик існує і для вітрогенеруючих установок,

ефективність яких значно вища на північному узбережжі Чорного та Азовського морів та у деяких районах центральних та західних регіонів. Разом з тим, реалізація проектів із використанням великих фотоелектричних та вітрогенеруючих систем є достатньо вартісною, а тому потребує ретельних розрахунків та залучення інвесторів. Так, навіть у розгляді окремого домогосподарства, термін окупності вітрових електричних установок складає, в середньому, десять років, сонячних фотоелектричних станцій – близько п'яти. Окремим напрямом декарбонізації енергетики, який дасть змогу забезпечити чистою енергією українців, є гідроенергетика. За оцінками експерта [97, 98], лише в Карпатському регіоні можна побудувати більше ста малих гідроелектростанцій, загальна потужність яких становитиме 400 МВт. Окрему увагу у забезпеченні чистої енергії приділяють тепловим насосам, активну увагу до яких в Україні привернув досвід європейських країн. Варто зазначити, що зі зростанням тарифів на енергетичні ресурси, пошук дешевшого, але не менш ефективного за традиційні котли на природному газі, обладнання, є досить актуальним. Так, одним із заходів підвищення енергетичної ефективності промислових підприємств та власне скорочення викидів шкідливих речовин у атмосферу, є використання теплового насоса, що генерує теплоту вихідних газів у корисну теплоту, яка може використовуватись на обігрів приміщень або на нагрівання гарячої води. У розгляді домогосподарства чи невеликої будівлі на зразок дитячого садочку, теплові насоси служать джерелом теплоти для «теплої підлоги» або «теплої стіни». Центральне опалення Данії, для прикладу, використовує для теплозабезпечення міст 120 теплових насосів, 66 з яких використовують тепло повітря [99]. Загалом, використання теплових насосів у системі теплопостачання Данії забезпечує генерацію енергії на рівні майже 400 МВт, що розподіляються по типу використаної енергії наступним чином:

- питна вода та підземні води – 5 ТН, що генерують 7МВт теплової енергії;
- морська вода – 3ТН, 9 МВт теплової енергії;
- централізоване охолодження – 2 ТН, 10 МВт згенерованого тепла;

- сонячне (теплове охолодження) – 6ТН, що генерують 9 МВт теплової енергії;
- димові гази – 15 ТН, 24 МВт теплової енергії;
- стічні води – 4 ТН, 32 МВт енергії;
- відпрацьоване тепло – 18 ТН, 104 МВт згенерованого тепла;
- повітря – 66 ТН, 204 МВт теплової енергії.

Біоенергетична Асоціація [100], в свою чергу, акцентує на декарбонізації секторів економіки за рахунок використання біомаси як одного з досить перспективних напрямків.

Україна в загальному розгляді є країною із сприятливим для ведення господарства кліматом. За даними [101], 68% загальної площі України займають сільськогосподарські угіддя. За даними Міністерства аграрної політики та продовольства України [102], прогнозована площа посіву зернових та технічних культур у 2023 році становить 19,3 млн га, з яких на вирощування кукурудзи планувалось відвести 3,6 млн га, соняшнику – 5,6 млн га, ріпаку – 1,4 млн га. Потенціал використання біомаси оцінюється в 20,95 млн т.н.е. [103]. Розподіл потенціалу за видами біомаси приведено на рисунку 3.2.1.

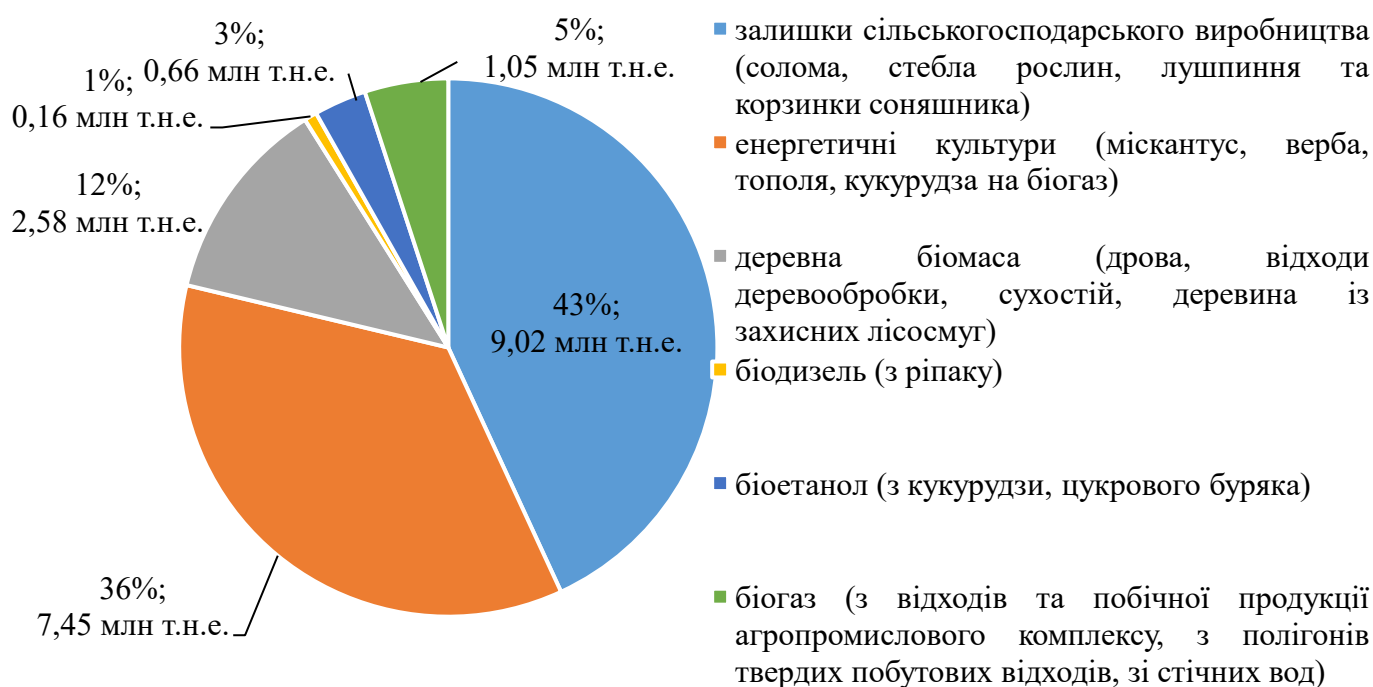


Рисунок 3.2.1. Розподіл потенціалу біомаси за видами

Раціональне використання біомаси для забезпечення енергії вимагає узгодження логістичних шляхів та взаємодії основних джерел забезпечення біомаси з центрами переробки та її складування. Успішний досвід заміщення природного газу біомасою демонструється владою міста Житомир. Так, станом на літо 2023 року Житомир зумів замінити 50% природного газу, необхідного для енергозабезпечення міста [104]. Натомість, владою міста визначено стратегію по використанню біомаси для досягнення до 2030 року скорочення використання природного газу на 90%, а до 2050 року повністю покривати необхідну потребу в енергії тільки за рахунок біомаси.

3.3 Технічна оцінка використання біомаси для теплозабезпечення репрезентативної будівлі

Враховуючи регіональне розташування будівлі, що розглядається (м. Київ), оцінка її теплозабезпечення за рахунок вирощання біомаси проводилась з аналізуванням можливості ефективного забезпечення необхідного обсягу палива та його транспортування на об'єкт. Так, було проведено огляд доступних видів палива (за видом біомаси), області найбільшої врожайності кожного з розглянутих типів, центри виробничих потужностей паливних пелет. Одним із визначальних факторів на прийняття рішення щодо обрання того чи іншого типу біомаси є теплота згорання та середня вартість одиниці палива [103], що дозволяє оцінити витрату палива для теплозабезпечення будівлі протягом опалювального періоду та економічну ефективність використання біомаси, порівняно з природним газом. Результати вищеприписаного огляду представлені у таблиці 3.3.1.

Таблиця 3.3.1. Оцінка доступності різних видів біомаси для теплозабезпечення офісної будівлі

Вид палива	Області найбільшої врожайності (дані 2019 року)	Вартість одиниці палива*, грн/кг, [грн/м3]	Теплота згорання палива, МДж/кг, [МДж/м3]	Обласні центри виробничих потужностей паливних пелет/ джерело даних
Природний газ	-	[43,22]	[34,528]	-
Солома зернових культур	Вінницька, Полтавська, Черкаська, Харківська	10,2	15	Житомир, Дніпро, Чернівці, Вінниця
Лушпиння соняшника	Рівненська, Черкаська,	4,8	19,2	Дніпро, Київ,
Стебла рослин (соняшник)	Вінницька, Київська, Сумська	7,5	16	Вінниця, Черкаси
Стебла рослин (кукурудза)	Полтавській, Черкаська, Кіровоградська	5,4	16,7	Дніпро, Вінниця
Солома ріпаку	Одеська, Миколаївська, Дніпропетровська, Херсонська, Житомирська	5,6	16	Житомир

* Вартість палива вказана на січень 2023 року

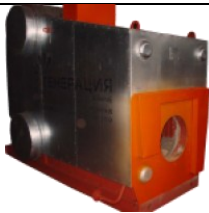
Згідно результатів, приведених у таблиці 3.3.1, найбільш доцільним видом біомаси для заміщення природного газу є лушпиння соняшника у зв'язку з високою теплотою згорання вказаного палива, можливістю його оперативної доставки до об'єкту та меншою, у даному розгляді, вартістю одиниці палива. Варто зазначити, що центр виробничих потужностей з переробки лушпиння соняшника у брикети, знаходить у безпосередній близькості до офісної будівлі, що значно скорочує

майбутні логістичні витрати на доставку та дозволяє, у разі необхідності, оперативно коригувати необхідні обсяги поставки.

З технічної точки зору, використання біомаси для теплозабезпечення будівлі є одним із найкращих технічних рішень, адже загалом не вимагає будь – якого втручання у систему опалення. Сам підхід щодо заміщення природного газу біомасою (лушпиння соняшника) базується на порівнянні витрат природного газу та пелет лушпиння соняшника для теплозабезпечення будівлі з огляду на теплоту згорання палива та ефективності котла (існуючий на природному газі та новий, підібраний з огляду на теплову потребу, твердопаливний на пелетах лушпиння соняшника). Разом з тим, варто відзначити, що таке порівняння проводиться для різних рівнів теплового захисту будівлі (I', I'', II, III та IV), особливості яких детально описано у розділі 2 даної роботи.

Так, для кожного рівня теплового захисту будівлі першочергово визначено необхідну для опалення кількість теплової енергії у програмному середовищі Design Builder. Відповідно до необхідного обсягу теплової енергії, обрано твердопаливний котел, що працює на пелетах лушпиння соняшника. Використовуючи дані, представлені у таблиці 2.5.1, а також отримані значення необхідної для опалення енергії, визначено витрату біомаси протягом години та опалювального періоду та здійснено порівняння отриманих даних з відповідними параметрами існуючого котла, що працює на природному газі. Технічні характеристики котла, а також витрати палива за кожного з описаних раніше рівнів теплового захисту приведені у таблиці 3.3.2.

Таблиця 3.3.2. Технічні характеристики твердопаливних котлів та витрата пелет лушпиння соняшника для різних рівнів теплового захисту будівлі

Рівень теплового захисту будівлі	Марка котла	Загальний вигляд котла	Потужність		Витрата палива	
			котла (паспортні дані виробника), кВт	ККД, %	т/год, [тис. куб м/год]	за опал. період, т, [тис. куб м]
I'	E-1-0,9		627	90,5	[0,072]	[336,9]
I'	РЕТРА- 4М ВІО		550	80	0,129	603,7
I''	Idmar KW-GSN		350	83	0,079	369,7
II	Focus КПЛ 150		175	92	0,036	168,5

Продовження таблиці 3.3.2

Рівень теплого захисту будівлі	Марка котла	Загальний вигляд котла	Потужність котла (паспортні дані виробника), кВт		Витрата палива	
			ККД, %	т/год, [тис. куб м/год]	т/год, [тис. куб м/год]	
III	Ретра 4М Trio		150	86	0,033	154,4
IV	КТ-3Е- SH ALTER 125		125	83	0,028	131,04

Порівнюючи приведені у таблиці 3.3.2 дані щодо ККД обраних котлів, а також виходячи з того, що ККД існуючого газового котла прийнято на рівні 90,5 %, виникає питання щодо власне доцільності проведення подібної заміни і загалом проведення порівняння. Отож, для пояснення подібної ситуації, варто зазначити, що реалізація використання джерела енергії, що працює на біомасі, виконується для досягнення цілей по скороченню викидів CO₂, забезпечення підвищення загальної ефективності системи опалення будівлі, а також зниження собівартості енергії для теплозабезпечення будівлі. При здійсненні подібного переходу джерел енергії важливо враховувати можливу зміну коефіцієнту ефективності роботи котлового агрегату при будь – якому втручанні. Так, згідно з формулою балансу котлового агрегату, можна виконати попередню оцінку зміни ефективності роботи котла при

його експлуатації. Загалом, формула теплового балансу котлового агрегату має наступний вигляд:

$$Q_p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (3.1)$$

де Q_p – тепло, що підводиться до котла, кВт;

Q_1 – корисно використане в котловому агрегаті тепло для отримання гарячої води, кВт;

Q_2 – втрати теплоти з димовими газами, кВт;

Q_3 – втрати теплоти від хімічної неповноти згорання палива, кВт;

Q_4 – втрати теплоти від механічної неповноти згорання палива, кВт;

Q_5 – втрати теплоти в навколишнє середовище, кВт;

Q_6 – втрати фізичної теплоти шлаків, кВт .

Зокрема, аналізуючи формулу (3.1), можна зосередитись на наступному взаємовпливі параметрів котлового агрегату:

- збільшення показника втрат теплоти від хімічної та механічної неповноти згорання при збільшенні навантаження, що призводить до зменшення ККД котлового агрегату;

- зменшення втрат теплоти в навколишнє середовище при мінімальному навантаженні котла зумовить зростання інших видів втрат, проте забезпечить зростання ККД котлового агрегату;

- збільшення коефіцієнту надлишку повітря може створювати зони із нестачею кисню, що зумовлює, у майбутньому, утворення сажі та зниження загальної ефективності роботи котла;

- збільшення температури вихідних газів призводить до зношення елементів котла та димососа.

Цей перелік, насправді не є вичерпним але подібні заходи є загальноприйнятими з точки зору впливу на ефективність роботи котла та, відповідно, теплозабезпечення будівлі. Основний акцент при здійсненні технічної оцінки щодо використання джерела енергозабезпечення, що працює на біомасі, базується зокрема на забезпеченні надійного теплопостачання, порівняно з існуючим.

З метою представлення високої ефективності роботи обраних твердопаливних (пелетних котлів), розглянуто представлені виробниками переваги котлів. Отож, як описано вище, для кожного рівня теплового захисту будівлі обрано твердопаливний котел з урахуванням необхідної теплової енергії для забезпечення якісного опалення (розділ 2). Для забезпечення необхідної кількості тепла будівлі рівня I' теплового захисту обрано пелетний котел марки РЕТРА-4М ВІО, перевагою якого є автоматична подача палива з бункера, що входить до складу котлового агрегату [120]. Загалом, дана модель дозволяє працювати у двох режимах роботи – ручному та автоматичному, для чого внесено певні конструктивні зміни. Виробники даного котла створили 2 камери топки – верхню та нижню, причому верхня призначена для ручної подачі палива, а нижня – для автоматичної.

Для забезпечення опалення будівлі рівня I'' теплового захисту, обрано котел меншої потужності марки IDMAR KW-GSN. Цей котловий агрегат вимагає ручної подачі палива, проте спалювання палива у топці відбувається пошарово, що забезпечує доволі ефективний процес спалювання [121]. Разом з тим, котел автоматично подає повітря в топку з допомогою нагнітаючого вентилятора та автоматичного регулювання.

Для II рівня теплового захисту будівлі обрано котел Focus КПЛ 150. Котел поєднує у собі переваги двох попередніх котлів: може працювати у ручному та автоматичному режимі, подача повітря здійснюється вентилятором, що керується контролером, який підтримує задану температуру котла [122]. Виробник Focus додатково пропонує використання пелетного пальника, що є автоматизованим та

здатен передавати інформацію щодо аварій, а також реагувати на зміни температури зовнішнього повітря та наявність палива.

Рівень III теплового захисту будівлі забезпечує твердопаливний котел Ретра 4М Trio, що має дві камери згорання. Для забезпечення згорання пелет виробниками запропоновано використання реторного пальника, що встановлюється на місці бокового люка котла [123]. Згорання палива відбувається у нижній камері котла, а його подача здійснюється за допомогою шнеку пальника з бункера. Недоліком є ручне видалення золи.

Забезпечення теплом будівлі рівня IV теплового захисту здійснюється котлом марки КТ-3Е-SH ALTER 125. Подача палива у топку здійснюється вручну, процес згорання – автоматично [124]. Тобто, контролер реагує на кліматичні зміни та регулює роботу котла, а за можливої відсутності електроенергії аварійний термостат забезпечить безпеку роботи котла, загасивши вогонь.

З метою забезпечення деталізованої оцінки запропонованих у таблиці 3.3.2 котлів для теплозабезпечення будівлі, представлено більш детальні характеристики кожного котлового агрегату для різних типів теплового захисту будівлі у таблиці 3.3.3.

Таблиця 3.3.3. Характеристики котлових агрегатів

Характеристики котла	Е-1-0,9	РЕТРА-4М BIO	Idmar KW-GSN	Focus КПЛ 150	Ретра 4М Trio	КТ-3Е-SH ALTER 125
Номінальна потужність, кВт	627	550	350	175	150	125
Температура води на виході з котла, °C	170	95	90	90	95	
Споживана потужність котла, Вт/год	-	465	270	100	405	100

Продовження таблиці 3.3.3

Характеристики котла	E-1-0,9	PETPA-4M BIO	Idmar KW-GSN	Focus КПЛ 150	Петра 4M Trio	KT-3E-SH ALTEP 125
Об'єм бункера, куб. м	-	3	1,4	0,6	1,5	0,62
Габаритні розміри котла, (Д/Ш/В), мм	4300/ 2350/ 2900	2950/ 4110/ 2370	2000/ 1700/ 1750	2500/ 1400/ 1700	890/ 800/ 640	2050/ 1820/ 1570

Дані, представлені в таблиці 3.3.3 свідчать про необхідність передбачення системи очистки димових газів та складу для зберігання пелет лушпиння соняшника, аби оптимізувати роботу персоналу щодо подачі палива протягом доби. Зокрема, важливим моментом у розгляді енергозбереження є забезпечення можливостей утилізації теплоти вихідних газів, які у даній роботі не розглядаються. Враховуючи необхідність переходу до чистого виробництва енергії та слідуючи принципам екологічного виробництва, система очистки димових газів дозволить забезпечити скорочення викидів шкідливих речовин в атмосферу як за рахунок забезпечення кращого теплового захисту будівлі (за рахунок скорочення енергоспоживання), так і за рахунок використання біомаси (пелет лушпиння соняшника), що буде розглянуто більш детально у наступному розділі роботи.

3.4 Технічна оцінка використання теплового насоса для теплозабезпечення будівлі різних рівнів теплового захисту будівлі

В умовах заселеного району міста використання відновлюваних джерел енергії є дещо обмеженим через розміщення, можливий шум, спричинений роботою установки або її окремими елементами та обмеженою площею, яку можна використати для власне розташування установки. Теплові насоси за своїм

конструктивом та можливістю генерації енергії є найбільш оптимальними джерелами для енергозабезпечення, якщо враховувати вищеописані обмеження. Зокрема, теплові насоси є одними з найбільш поширених джерел енергії в Європі за рахунок широких можливостей щодо використання енергії. Так, загалом виділяють три основних типи теплових насосів: повітряний, водяний та геотермальний тепловий насос. Всі представлені типи відрізняються джерелом, що служить для генерації енергії. Так, повітряний тепловий насос використовує енергію зовнішнього повітря для генерації тепла, водяний – енергію води з глибокої водойми або підземних вод, геотермальний – енергію з глибинних шарів ґрунту [125].

Кожен із представлених типів має свої особливості, які необхідно враховувати при проектуванні систем теплозабезпечення або охолодження. Зокрема, тип джерела енергії, що генерує тепло, визначає загальну ефективність насоса: за оцінками експертів, теплові насоси, що використовують підземні джерела (водяні та геотермальні) є більш ефективними при роботі через сталу температуру ґрунту або води (коефіцієнт ефективності COP в середньому варіюється від 3,5 до 4,5) порівняно з повітряними насосами (коефіцієнт ефективності COP в середньому варіюється від 2,5 до 3,5). Разом з тим, повітряний тепловий насос має ряд переваг перед іншими типами теплових насосів. Зокрема, використання повітряного теплового насоса не вимагає втручання у навколишній ландшафт та не передбачає проведення додаткових проектно – вишукувальних робіт, які необхідні за встановлення ґрунтового чи водяного теплового насоса. Оскільки об'єкт дослідження знаходиться в Києві та розташований у районі житлових забудов, встановлення повітряного теплового насоса дозволить уникнути додаткових витрат та отримання дозволів на буріння свердловин (необхідність при використанні водяного теплового насоса) та розкопування ґрунту (при використанні ґрунтового теплового насоса).

Враховуючи вищевикладене, найбільш оптимальним рішенням теплозабезпечення будівлі є повітряний тепловий насос, зокрема насос типу «повітря – вода» для можливості використання існуючої системи опалення для

теплозабезпечення. Проведені дослідження дещо суперечать подібному підходу, акцентуючи увагу на неможливості використання лише теплового насоса за існуючих зовнішніх температур повітря. Так, температурний графік роботи теплових мереж у м. Київ – $95/70^{\circ}\text{C}$. Разом з тим, реальна температура теплоносія у подавальному трубопроводі не перевищує значення в 70°C , зворотному – 60°C . Сучасні теплові насоси здатні працювати за графіком $45/35^{\circ}\text{C}$ та створюють низькотемпературну систему опалення.

За розрахунками [126], при коригуванні графіка системи опалення з температури $70/60^{\circ}\text{C}$ до $45/35^{\circ}\text{C}$, необхідно передбачити можливості для розширення площі радіаторів системи опалення приблизно на 40%, проте при забезпеченні необхідного теплового захисту таких кроків можна уникнути. Зокрема, результати досліджень, приведені у розділі 1 даної роботи свідчать про скорочення енергоспоживання будівлею на 73,4% при забезпеченні високоенергоефективної теплової оболонки (рівень IV), порівняно з базовим варіантом (рівень I'). Такий показник дозволяє зробити припущення щодо можливості використання теплового насоса для теплозабезпечення, що працюватиме протягом опалювального сезону та повністю забезпечуватиме необхідний рівень теплової енергії без використання додаткового джерела енергії. Для теплового захисту будівлі рівня I'' у роботі розглянуто можливість використання теплового насоса типу «повітря – вода» в комплексі з іншим видом низьковуглецевого джерела енергії (котел, що працює на пелетах лущиння соняшника). Моделювання теплозабезпечення за вищеописаних припущень проводиться з використанням програмного продукту GeoTSOL [61].

Програма динамічного моделювання GeoTSOL [61] дозволяє провести оцінку генерації теплової енергії різними типами теплового насоса та за різних режимів роботи: моновалентного, моноенергетичного та бівалентного. Програма створена з урахуванням підходів міжнародних стандартів у сфері відновлювальної енергетики, зокрема стандарту VDI 4650 [127], зміни до якого відображені у різних версіях програмного забезпечення, та EN 14511 [128], що встановлює умови відповідності

технічних характеристик одно- та двоканальних установок. Режими використання теплового насоса визначають можливість його використання у комплексі з іншими видами джерел енергії та різних температур зовнішнього повітря.

Зокрема, моновалентний режим роботи теплового насоса у програмному середовищі GeoTSOL [61] характеризується роботою лише теплового насоса, без використання додаткових нагрівачів та джерел енергії [126]. Моноенергетичний та бівалентний режим роботи, представлений у програмі, дозволяє моделювати генерацію теплової енергії за паралельної, альтернативної та частково паралельної роботи теплового насоса та додаткового нагрівача і котла відповідно. Кожен з режимів роботи (паралельний, альтернативний, частково паралельний) залежить від температури зовнішнього повітря, що визначає тривалість роботи додаткового нагрівача, теплового насоса та котла. Так, паралельна робота теплового насоса та додаткового нагрівача або котла означає забезпечення паралельної роботи обох джерел при зниженні внесеного значення зовнішньої температури. Альтернативний режим роботи означає, що при зниженні вказаної температури тепловий насос вимикається, а основна генерація теплоти забезпечується лише додатковим нагрівачем за моноенергетичного режиму роботи або котлом – за бівалентного. Частково паралельна робота означає одночасну роботу додаткового нагрівача чи котла та теплового насоса, при цьому необхідно вказати значення температури, за якої вимикається котел і генерація забезпечується лише тепловим насосом, та температуру зовнішнього повітря, нижче якої тепловий насос вимикається, а котел або додатковий нагрівач забезпечує необхідну генерацію.

Вихідними умовами для моделювання генерації теплової енергії у середовищі GeoTSOL [61] є:

- місцезонаштування об'єкту моделювання для завантаження необхідних кліматичних даних з бази даних програми;
- температура високотемпературного та низькотемпературного нагрівального контуру (70/60°C та 40/37°C відповідно);

- теплове навантаження системи опалення, теплова потужність протягом року або помісячно (результати динамічного моделювання рівнів теплового захисту, отримані у Design Builder);

- опалювальна площа будівлі (2 274 кв. м);

- внутрішня температура у приміщеннях (20°C згідно);

- верхньої межі зовнішньої температури, при якій працюватиме система опалення (8°C);

- зовнішня температура повітря (-19,9°C, через неможливість внесення нормативної для м. Київ температури у зв'язку з обмеженнями, встановленими програмою).

Загальний вигляд вікна для внесення вихідних даних у програмному середовищі GeoTSOL представлено на рисунку 3.4.1.

Space Heating

Space heating loop

Low temp. (LT) heating loop proportion: %

Low temperature heating loop		High temperature heating loop	
Supply temperature:	35,0 °C	Supply temperature:	50,0 °C
Return temperature:	28,0 °C	Return temperature:	35,0 °C

Requirements

☒ Heating load: kW

☐ Heating output (yearly total): kWh

☐ Heating output (monthly):

Heated useable area:	130 m ²	Specific heating load:	38 W/m ²
Indoor temperature:	21,0 °C	Spec. annual heat requirement	48 000 Wh/m ²
Heating limit temperature:	12 °C		
Standard outdoor temperature:	-14,0 °C		

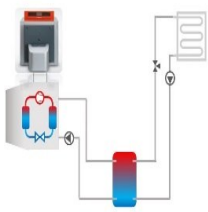
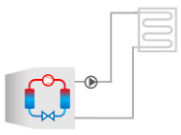
Рисунок 3.4.1. Загальний вигляд вікна для внесення необхідних початкових даних при здійсненні динамічного моделювання генерації теплоти тепловим насосом у програмному середовищі GeoTSOL

Проектним рішенням у даній роботі рівень теплового захисту I' не розглядається, враховуючи необхідність забезпечення великої теплової потужності для умов такого теплового захисту будівлі. Подальша оцінка генерації розглядається для рівнів I'', II, III та IV. Причому, враховуючи відповідність таких рівнів вимогам України та Швеції

до огорожувальних конструкцій, для теплового захисту I'' можливість теплозабезпечення будівлі розглянуто за бівалентного частково паралельного режиму роботи теплового насоса та котла, що працює на біомасі (пелети), теплових рівнів II, III та IV – за моноенергетичного частково паралельного режиму роботи теплового насоса та додаткового нагрівача обраної потужності.

Враховуючи початкові дані теплоспоживання будівлі, обрано тепловий насос з представленого у програмі каталогу, котел на біомасі (для рівня теплового захисту I'') та буферну ємність для забезпечення мінімального запасу теплової енергії у разі виробництва надлишкової генерації теплової енергії. Технічні характеристики та схему підключення обраного обладнання представлено у таблиці 3.4.1.

Таблиця 3.4.1. Схема підключення та технічні характеристики обладнання системи з тепловим насосом за різних режимів роботи

Режим роботи	Схема підключення системи	Тип обладнання	Компанія – виробник/ модель	Технічні характеристики обладнання			
				Рном., кВт	ККД котла, %	COP теплового насоса	Об'єм бака – накопичувача, л
бівалентний частково – паралельний		Котел, що працює на пелетах	Vaillant Deutschland GmbH Co.KG/RenerVIT VKP 602/2	60,1	95	-	-
		Бак – накопичувач (буферна ємність)	Viessmann Werke GmbH & Co KG/ Vitocell 100 – W	-	-	-	120
		Тепловий насос типу «повітря – вода»	Waterkotte GmbH/ EcoTouch Air Kaskade 5120.5	107,2	-	5,0	-
моноенергетичний частково – паралельний		Нагрівальний елемент	Drazice/ tpk 210-12	6,6	-	-	-

З метою забезпечення максимально ефективної роботи теплового насоса та забезпечення найбільшої генерації, було визначено точки перемикання систем теплового насоса та котла для бівалентного режиму роботи (рівень I' теплового захисту будівлі) та теплового насоса і нагрівального елемента для моноенергетичного режиму роботи (для рівнів II, III та IV теплового захисту будівлі). Так, бівалентний частково паралельний режим роботи задано наступними параметрами зовнішнього повітря:

- котел вимикається, коли температура повітря зовні вище 2°C і генерація теплоти створюється лише за рахунок теплового насоса;
- тепловий насос вимикається, коли температура повітря зовні опускається нижче -20°C і необхідний обсяг теплової енергії забезпечується лише за рахунок котла обраної потужності;
- у діапазоні від -20°C до 2°C тепловий насос та котел працюють паралельно, де недостатню кількість згенерованої тепловим насосом теплоти забезпечує котел.

Моноенергетичний частково паралельний режим роботи задано параметрами:

- нагрівальний елемент вимикається, коли температура повітря зовні вище -10°C і генерація теплоти створюється лише за рахунок теплового насоса;
- тепловий насос вимикається, коли температура повітря зовні опускається нижче -20°C і необхідний обсяг теплової енергії забезпечується лише за рахунок нагрівального елемента (12, 10 та 6 кВт для рівнів II, III та IV теплового захисту будівлі відповідно);
- у діапазоні від -20°C до -10°C тепловий насос та котел працюють паралельно, де недостатню кількість згенерованої тепловим насосом теплоти покриває нагрівальний елемент.

Варто також зазначити, що протягом останніх 5 років температура повітря взимку не опускалась нижче -20°C. Більше того, наразі спостерігається значне збільшення температури зовнішнього повітря протягом року.

З метою забезпечення якісної оцінки можливості генерації теплоти зовнішнього повітря для теплозабезпечення будівлі протягом опалювального періоду, дані щодо енергоспоживання (вихідні дані, необхідні для моделювання) відповідають результатам динамічного моделювання енергоспоживання будівлі, виконані у Design Builder [70].

Результати динамічного моделювання генерації теплової енергії тепловим насосом для теплового захисту будівлі рівнів I'', II, III та IV тепловим насосом (з використанням GeoTSOL) протягом опалювального періоду та загальне енергоспоживання неутепленої будівлі представлено на рисунку 3.4.2.

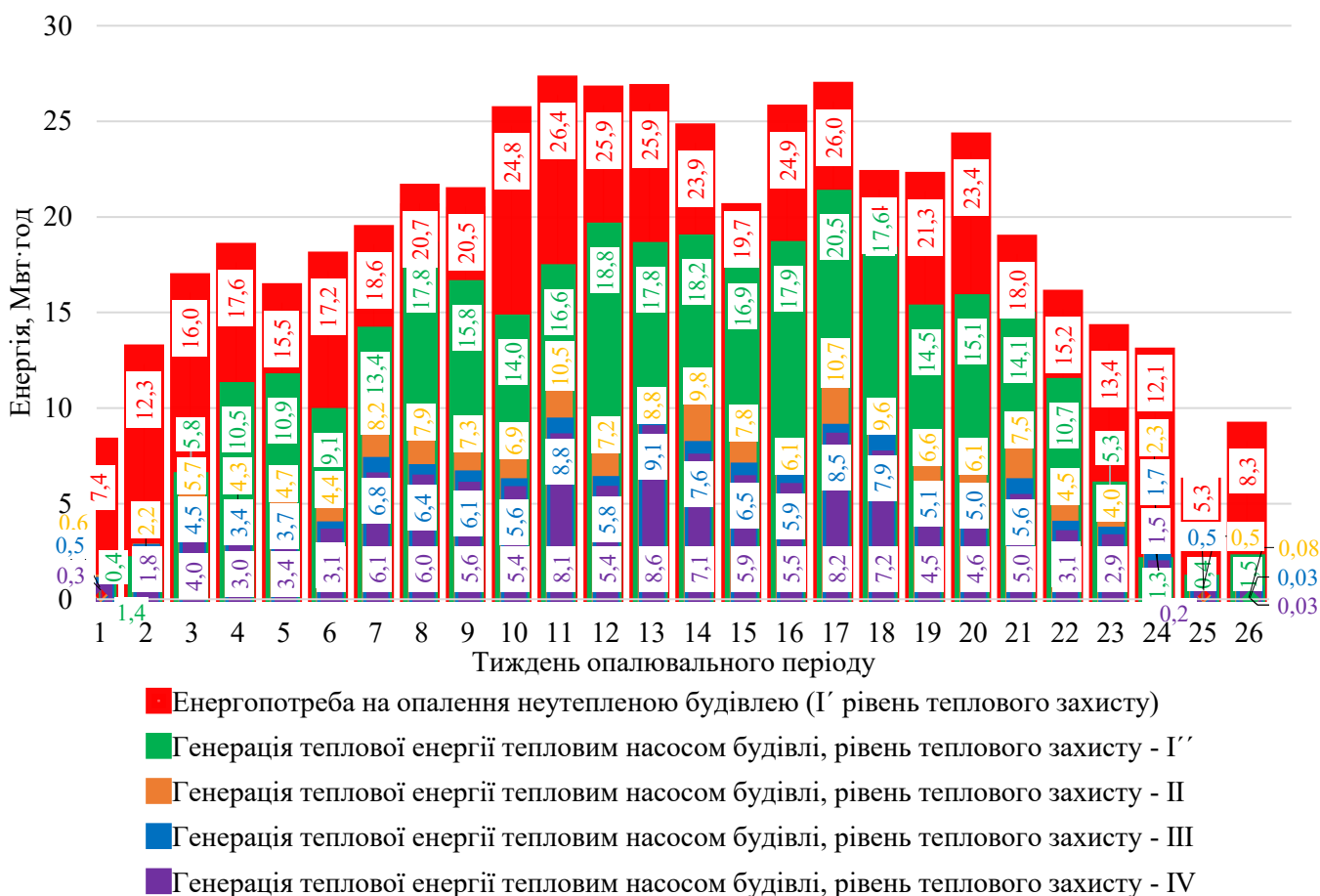


Рисунок 3.4.2. Енергопотреба будівлі на опалення та генерація теплової енергії тепловим насосом для теплового захисту будівлі рівнів I, II та III тепловим насосом протягом опалювального періоду

Результати динамічного моделювання генерації теплової енергії тепловим насосом типу «повітря – вода» для рівнів I'', II, III та IV теплового захисту будівлі у GeoTSOL та величина енергоспоживання, отримана як результат моделювання у Design Builder (рисунок 2.3.3) свідчать про наступне: за регулювання роботи системи опалення та використання комбінації відновлювальних джерел енергії, можна забезпечити необхідну потребу на опалення будівлі. Зокрема, при здійсненні термоізоляції огорожувальних конструкцій до вимог України [36, 37] (енергоефективна оболонка будівлі) та Швеції [76] (високоенергоефективна оболонка), тепловий насос здатен забезпечити необхідний рівень теплової енергії без використання котла. Проте, не варто виключати необхідність у електричній енергії для забезпечення власне роботи теплового насоса. Програмне середовище GeoTSOL [61] дає змогу оцінити обсяг необхідної для роботи теплового насоса електричної енергії, що при розрахунках інтегральних витрат на опалення будівлі є одним із ключових факторів.

Зокрема, енергоспоживання системи з тепловим насосом при рівні теплового захисту будівлі, що відповідає вимогам України [36, 37] та вимогам Швеції [76] становить 44,1 МВт·год, 36,5 МВт·год та 33,6 МВт·год протягом опалювального періоду відповідно. При цьому, генерація тепловим насосом теплової енергії забезпечує для рівня I'' теплового захисту будівлі 69,7% необхідного теплоспоживання, рівня II – 98,9%, III – 99%, IV – 99,4%. Тобто, 92,9 МВт·год теплової енергії забезпечується котлом на біомасі при здійсненні контролю енергоспоживання неутепленої будівлі (рівень I'' теплового захисту), 1,6 МВт·год – додатковим нагрівачем при забезпеченні рівні II теплового захисту будівлі, 1,22 МВт·год теплової енергії – при забезпеченні рівня III та 0,72 МВт·год – при забезпеченні рівня IV теплового захисту будівлі. Причому, паралельна робота теплового насоса та додаткового нагрівача для рівнів II – IV теплового захисту будівлі представлена саме з 13 по 18 тижні опалювального періоду (8.01 – 18.02), коли

зовнішня температура повітря (за даними GeoTSOL) варіюється з -10°C до -1°C , що відповідає заданим параметрам для моноенергетичного режиму. Для візуального відстеження можливості забезпечення необхідної для рівнів теплової енергії I', II, III та IV теплового захисту будівлі тепловим насосом у комбінації з котлом та додатковим електричним нагрівачем, представлено порівняння теплоспоживання будівлі за відповідних рівнів теплового захисту та результати динамічного моделювання генерації теплової енергії у програмному середовищі GeoTSOL (рисунок 3.4.3).

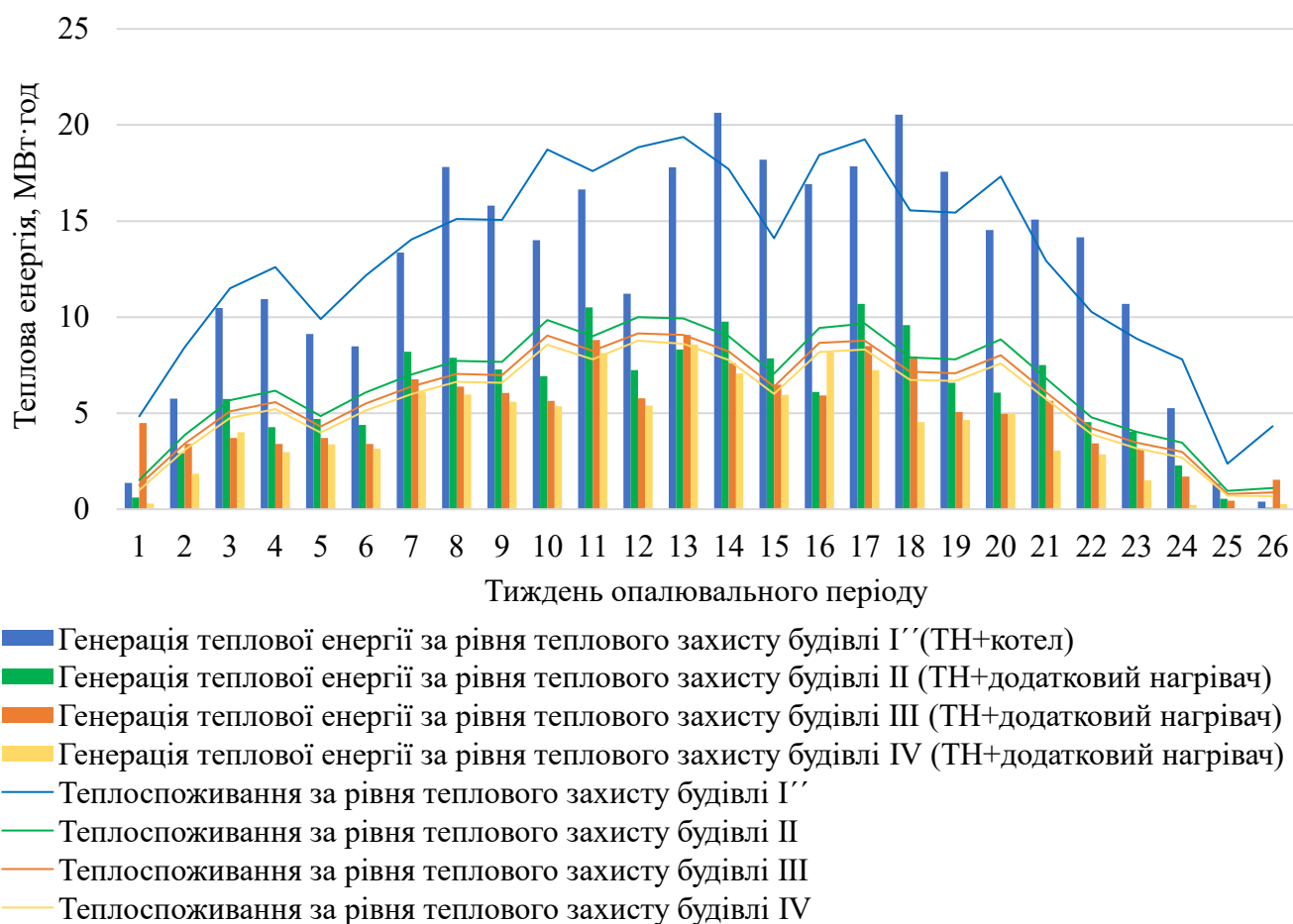


Рисунок 3.4.3. Теплоспоживання та генерація теплової енергії тепловим насосом у комбінації з котлом на біомасі та додатковим нагрівачем за різних рівнів теплового захисту будівлі

Аналізуючи дані рисунку 3.3.3, можна зробити висновок про як недостатню генерацію теплової енергії системи з тепловим насосом у певні тижні опалювального періоду за різних рівнів теплового захисту будівлі, так і надлишкову генерацію. Сумарна ж генерація теплової енергії протягом року за різних рівнів теплового захисту будівлі свідчить про невелике відхилення значень, отриманих у результаті моделювання у GeoTSOL від необхідного теплоспоживання, значення якого отримано у результаті проведеного динамічного моделювання енергоспоживання будівлі у Design Builder (кількісні значення приведено вище). Виходячи з того, що приведені на рисунку 3.4.3 дані є результатом проведеного динамічного моделювання у програмних середовищах різного напрямлення, різниця значень теплоспоживання будівлі за певного рівня теплового захисту будівель та кількості теплової енергії, згенерованої системою з тепловим насосом, може бути пов'язана з різницею кліматичних даних у базі програм. Разом з тим, приведені на рисунку 3.4.3 результати дозволяють зробити висновок про можливість використання системи теплозабезпечення з тепловим насосом та котлом на біомасі за різних рівнів теплового захисту будівлі. Така комбінація відновлювальних джерел теплової енергії забезпечить необхідну потребу у опаленні будівлі II, III та IV рівня теплового захисту. Варто підкреслити також позитивний ефект використання систем з тепловим насосом у найбільш холодні місяці опалювального сезону, що припадають зазвичай на лютий (16 – 19 тижні опалювального періоду). Враховуючи те, що попередньо було обрано буферну ємність для забезпечення якісної роботи системи з тепловим насосом для теплозабезпечення, якісний контроль за генерацією дозволить розділити надлишково згенеровану теплоту тепловим насосом на періоди недостатньої генерації.

Тобто, приведені на рисунку 3.4.2 дані свідчать про можливість використання комбінованої системи з котла, що працює на біомасі, та теплового насоса для забезпечення необхідного рівня теплоспоживання будівлі. Керуючись вимогами [9, 16, 17], можна говорити про можливість практично повного забезпечення необхідної для будівлі теплової енергії за рахунок відновлювальних джерел, що

представлені в даній роботі комбінованою системою з тепловим насосом типу «повітря – вода» та котлом, що працює на пелетах лушпиння соняшника та тепловим насосом і додатковим нагрівачем. Складова невідновлювальних джерел енергії для теплозабезпечення рівня теплового захисту будівлі I'' при використанні теплового насоса та котла на біомасі представлена величиною електричної енергії, необхідною для забезпечення роботи системи. Те ж саме стосується і використання теплового насоса для рівнів теплового захисту будівлі II, III та IV з різницею у використанні електроенергії в тому числі і для забезпечення генерації теплоти додатковим електричним нагрівачем.

Враховуючи параметри, наведені вище, одним із основних факторів, що впливають на ефективність роботи систем з тепловим насосом, є зовнішня температура. Ефективність роботи системи з тепловим насосом для різних рівнів теплового захисту за різних температур зовнішнього повітря представлено на рисунку 3.4.4.

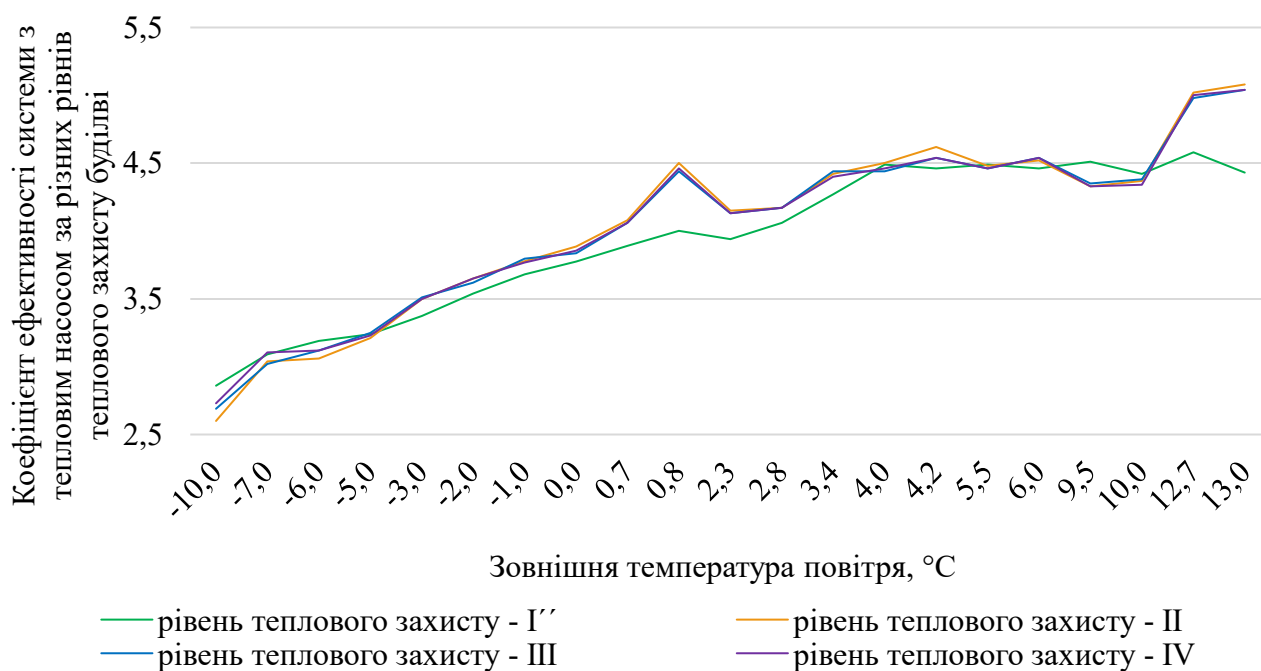


Рисунок 3.4.4. Сезонна ефективність системи теплозабезпечення з тепловим насосом за різних рівнів теплового захисту будівлі

Результати, приведені на рисунку 3.4.4 свідчать про зменшення ефективності роботи системи при зниженні температури зовнішнього повітря, що загалом є відомим фактом. Разом з тим, помітна схожість у динаміці коефіцієнтів ефективності утепленої будівлі та деяку відмінність між ефективністю роботи теплового насоса у бівалентному режимі та моноенергетичному. Зокрема, чітко відображено зниження загальної ефективності системи тепловий насос – котел на біомасі при зростанні температури повітря з 2°C , де котел вимикається і тепловий насос переходить у, моновалентний режим роботи. Загалом, ефективність роботи уже тільки теплового насоса за рівня теплового захисту I'' помітно зменшується при досягненні температури вище 13°C (останній тиждень опалювального періоду), коли загалом теплозабезпечення будівлі уже не потребується. З метою оцінки динаміки ефективності роботи теплового насоса за різних температур і за різного рівня теплового захисту, проведено порівняння температур зовнішнього повітря протягом опалювального періоду у середовищі GEOTSol (база даних програми) та фактичної температури за відповідний період протягом 2021 року. Результати порівняння наведені на рисунку 3.4.5.



Рисунок 3.4.5. Динаміка температури зовнішнього повітря протягом опалювального сезону бази даних GEOTSol та фактичної температури

Попри помітні зміни середніх протягом тижня температур зовнішнього повітря, середня температура згідно бази даних програми та відповідно до даних МЕТЕО є однаковою та дорівнює 1°C . Проте, для можливості оцінки ефективності представлених для рівнів I'', II, III та IV систем з тепловим насосом, визначено рівняння кривих, зображених на рисунку 3.4.4 та розраховано ефективність системи з тепловим насосом за бівалентного та моноенергетичного режиму роботи при помітних відхиленнях щодо зовнішніх температур, що порівнюються – протягом $7, 10, 14$ та 18°C тижнів опалювального періоду. Так, для кожної кривої, представленої на рисунку 3.4.5, проведено регресійний аналіз залежності коефіцієнта ефективності системи з тепловим насосом від зовнішньої температури повітря з визначенням коефіцієнту апроксимації:

- ефективність системи з тепловим насосом за рівня I'' теплового захисту будівлі визначається за рівнянням $y=0,08447 \cdot t_{\text{зв}}+3,0093$. Коефіцієнт апроксимації $R=0,920$;

- ефективність системи з тепловим насосом за рівня II теплового захисту будівлі визначається за рівнянням $y=0,0997 \cdot t_{\text{зв}}+2,949$. Коефіцієнт апроксимації $R=0,865$;

- ефективність системи з тепловим насосом за рівня III теплового захисту будівлі визначається за рівнянням $y=0,0969 \cdot t_{\text{зв}}+2,9732$. Коефіцієнт апроксимації $R=0,878$;

- ефективність системи з тепловим насосом за рівня IV теплового захисту будівлі визначається за рівнянням $y=0,0951 \cdot t_{\text{зв}}+2,9732$. Коефіцієнт апроксимації $R=0,884$.

Результати регресійного аналізу дозволяють визначити найбільш прийнятну для подальшої оцінки лінійну залежність коефіцієнту ефективності системи з тепловим насосом за коефіцієнтом апроксимації. Так, рівняння залежності ефективності системи є найбільш точним для I'' рівня теплового захисту будівлі, тому подальше порівняння зміни коефіцієнту ефективності системи за температур зовнішнього повітря згідно бази даних GEOTSol та фактичної температури протягом 2021

проведено саме з використанням рівняння $y=0,08447 \cdot t_{zv}+3,0093$. Результати проведених розрахунків представлено у таблиці 3.4.4.

Таблиця 3.4.4. Коефіцієнт ефективності системи з тепловим насосом протягом 7, 10, 14 та 18 тижнів опалювального періоду

Тиждень опалювального періоду	Зовнішня температура повітря, °C		Коефіцієнт ефективності системи з тепловим насосом	
	база даних GEOTSol	фактична протягом 2021 року	За температури зовнішнього повітря бази даних GEOTSol	За протягом 2021 року температури зовнішнього повітря
7	-2	3,0	2,8	3,3
10	0,7	-5,3	3,1	2,6
14	-5	-13,0	2,6	1,9
18	-6	-10,0	2,5	2,2

Результати, приведені у таблиці 3.4.4 підтверджують зростання коефіцієнту ефективності системи з використанням теплового насоса при зростанні температури зовнішнього повітря і навпаки.

Здійснюючи оцінку використання відновлювальних джерел енергії при реалізації концепції nZEB, приведено значення питомих витрат енергії за різних рівнів теплового захисту будівлі та з використанням різних джерел теплозабезпечення. Зокрема, проведено аналіз використання електричної енергії для забезпечення роботи котла на біомасі (пелети лушпиння соняшника) та використання теплового насоса у комбінації з котлом на біомасі та додатковим нагрівачем. В таблиці 3.4.5 наведено порівняння показників питомого енергоспоживання з використанням двох концепцій реновації: різні варіанти теплозахисту будівлі та стандарт рівня nZEB.

Таблиця 3.4.5. Показники питомого споживання енергії за реалізації концепції nZEB

Рівень теплового захисту будівлі	Питомий показник енергоспоживання будівлі, кВт·год/м ³ при використанні в якості джерела теплозабезпечення		
	газового котла	котла на біомасі	теплового насоса у комбінації з котлом на біомасі або додаткового нагрівача
I'	97,19	86,91	
I''	57,83	55,12	59,53
II	35,80	27,11	31,81
III	35,48	22,0	26,22
IV	33,95	19,85	24,07

Варто зазначити, що величина використання електричної енергії для забезпечення роботи пелетних котлів розрахована згідно паспортної споживаної потужності, а це означає, що розраховане споживання електричної енергії може відрізнятись як у більшу (при «запуску» котла), так і в меншу сторону (при виході на режим). Разом з тим, варто підкреслити значне споживання електричної енергії, необхідної для генерації теплової енергії системами з тепловим насосом. Електроспоживання системи з тепловим насосом для кожного з рівнів теплового захисту будівлі, наведено на рисунку 3.4.6.

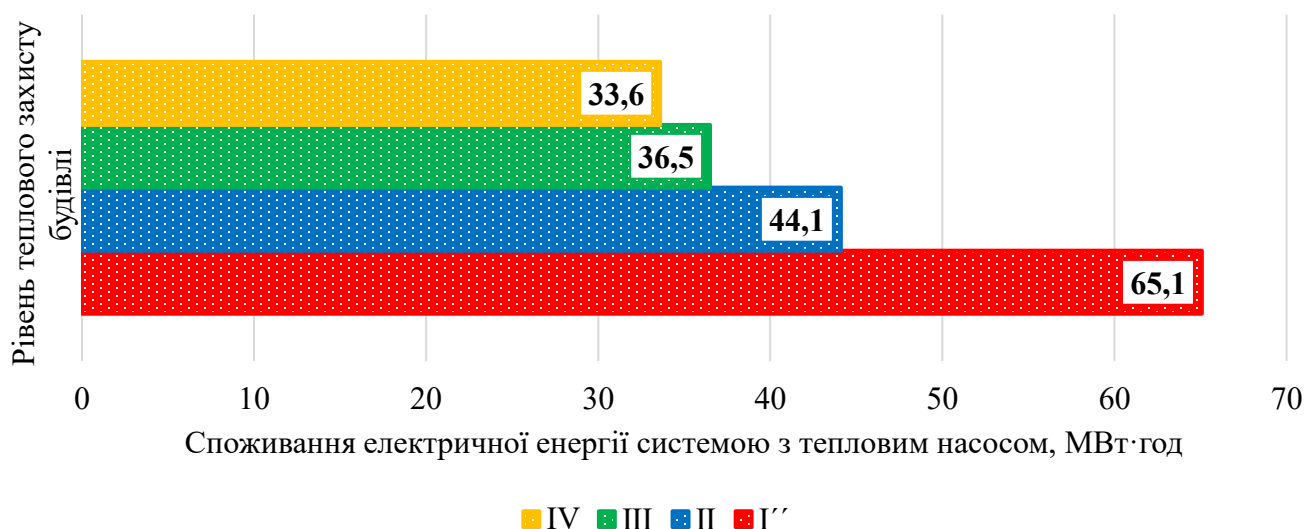


Рисунок 3.4.6. Споживання електричної енергії системою з тепловим насосом для різних рівнів теплового захисту будівлі

Згідно [17], максимальні показники питомого енергоспоживання первинної енергії енергонезалежної громадської будівлі висотою від 4 до 9 поверхів для першої температурної зони не повинно перевищувати $33,6 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3 / \text{рік}$ у випадку здійснення реконструкції. Разом з тим, за діючим Наказом [16], показник споживання первинної енергії з невідновлюваних джерел енергії для I температурної зони України при реконструкції будівлі зазначеної поверховості не повинен перевищувати $29 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3 / \text{рік}$, що означає, що переглянуті вимоги є більш жорсткими. Враховуючи дані, приведені у таблиці 3.3.5 та вимоги [16, 17], забезпечення теплового захисту будівель до діючих вимог України [36] та вимог Швеції [76] при зміні лише джерела теплозабезпечення на таке, що є відновлювальним, дозволяє реалізувати реконструкцію існуючої офісної будівлі до рівня nZEB. Отримані результати, зокрема, дозволяють зробити висновок щодо високого потенціалу забезпечення будівництва та/або реконструкції громадських будівель рівня nZEB в Україні.

При реалізації підходів щодо комплексного використання відновлювальних систем, які б генерували електричну енергію для забезпечення роботи котла на біомасі та теплового насоса, та/або забезпечення охолодження будівлі відновлювальними джерелами, існує потенціал реалізації активних будинків.

3.5 Економічна оцінка використання відновлювальних джерел для теплозабезпечення за різного теплового захисту об'єкту

Враховуючи сталу залежність доцільності покращення енергоефективності будівель від рівня інвестиційних витрат, необхідних для реалізації енергоефективності, проведення економічної оцінки будь – яких заходів повинно бути враховано при попередньому плануванні. Зокрема, методика оцінки інтегральних витрат на теплозабезпечення за реалізації заходів енергоефективності, в тому числі перехід від традиційних джерел енергії до відновлювальних, дозволяє проаналізувати ефективність здійснення такої заміни. Виходячи з необхідності визначення найбільш привабливого варіанту теплозабезпечення будівлі, проведено оцінку інтегральної вартості заміни котла з такого, що працює на природному газі до такого, що працює на біомасі (пелети лушпиння соняшника) та переходу від котла на природному газі до комплексного використання різних відновлювальних джерел енергії (характеризується використанням котла на біомасі та теплового насоса і теплового насоса і нагрівального елемента, що працюють частково паралельно). Зокрема, враховано величину витрат за спожиті енергоносії (природний газ, пелети лушпиння соняшника, електроенергія), витрат на експлуатацію систем теплозабезпечення, що розглядаються, величину інвестицій на придбання обладнання, утеплення огорожувальних конструкцій (формула 2.13). Експлуатація запропонованих систем включає в себе вартість обслуговування таких систем та вартість доставки енергоресурсів (біомаса) до місця використання.

Дані щодо витрат для кожного з запропонованих варіантів, розглянутих у розділі 2, наведено у таблиці 3.5.1.

Таблиця 3.5.1. Витрати на підвищення енергоефективності будівлі

Тепловий захист будівлі/енергоносій	Річні витрати, млн. грн			
	за спожиту енергію, Вен	на покращення теплового захисту будівлі Ііз	за придбане теплогенеруюче обладнання, Іо*	на інші затрати, В експл**
І'/ природний газ	1,04	-	-	0,04
І'/ пелети				
лушпиння	0,805	-	0,84	0,06
соняшника				
І''/пелети				
лушпиння	0,561	-	0,55	0,04
соняшника				
ІІ/пелети				
лушпиння	0,359	3,33	0,37	0,018
соняшника				
ІІІ/ пелети				
лушпиння	0,33	5,19	0,29	0,015
соняшника				
ІV/ пелети				
лушпиння	0,32	5,43	0,14	0,012
соняшника				

Продовження таблиці 3.5.1

Тепловий захист будівлі/ енергоносій	Річні витрати, млн. грн			
	за спожиту енергію, Вен	на покращення теплого захисту будівлі Ііз	за придбане теплогенеруюче обладнання, Іо*	на інші затрати, В експл**
I''/тепловий насос та котел на біомасі	0,26	-	1,04	0,03
II/тепловий насос та додатковий нагрівач	0,09	3,33	0,87	0,018
III/ тепловий насос та додатковий нагрівач	0,08	5,19	0,87	0,018
IV/ тепловий насос та додатковий нагрівач	0,07	5,43	0,86	0,017

**З урахуванням витрат на обслуговування системи (згідно [90] обрано на рівні 2% від початкових вкладень) та доставку пелет*

Початкова оцінка інтегральних витрат покращення теплової оболонки будівлі та використання систем теплозабезпечення з відновлювальними джерела оцінена без урахування приросту цін на енергоносії та ставки дисконтування з урахуванням

середнього тарифу на електроенергію та природний газ протягом восьми останніх років в Україні у розрізі 20 років. Варто зазначити, що згідно [90], термін служби теплового насоса становить 15 – 20 років. Графік зміни інтегральної витрати на теплозабезпечення будівлі за різних рівнів теплового захисту та з використанням різних видів джерел енергії за середнього протягом восьми років тарифу на електричну енергію та природний газ в Україні (рисунок 2.6.1) приведено на рисунку 3.5.1.

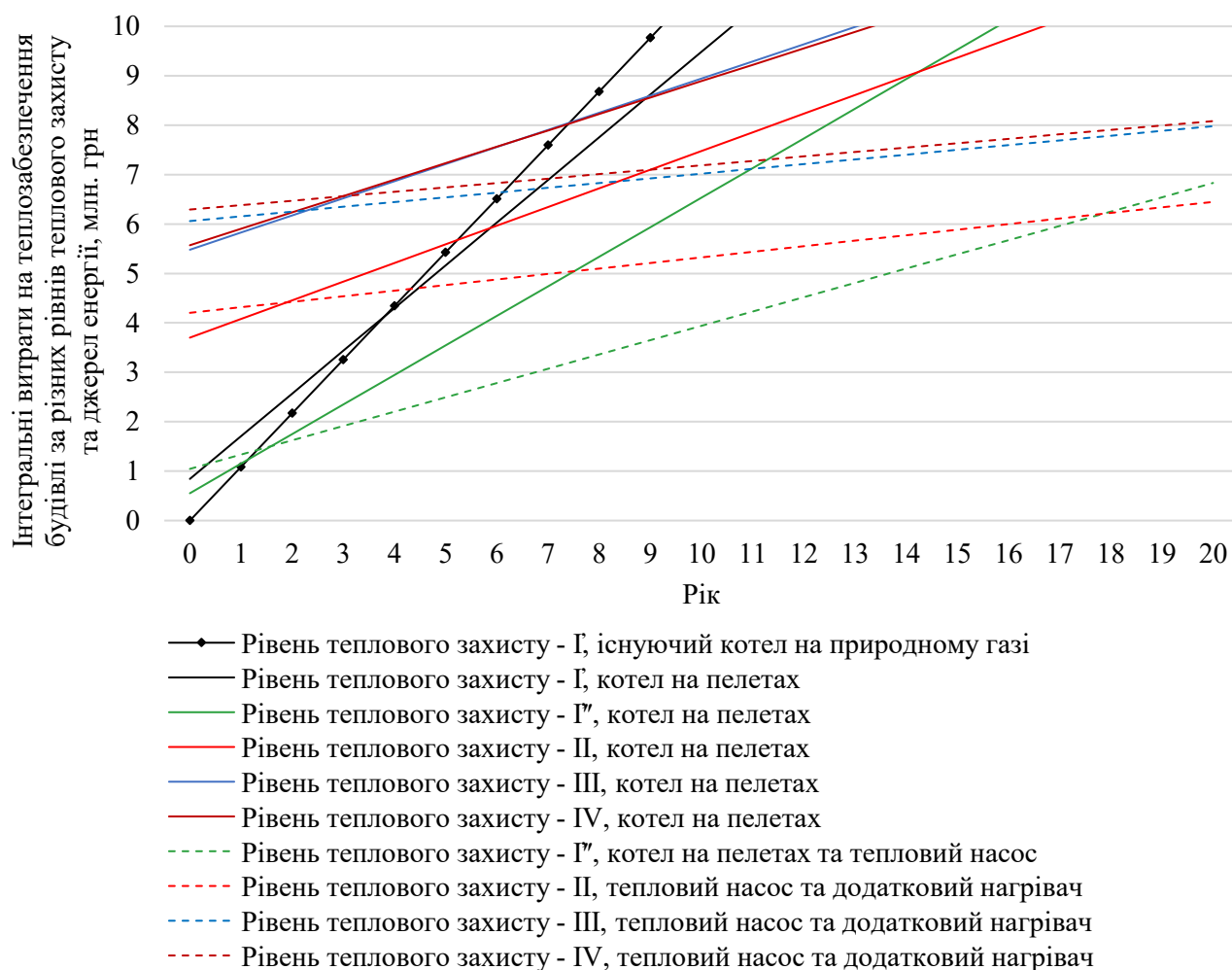


Рисунок 3.5.1. Зміна інтегральних витрат на теплозабезпечення будівлі за різних рівнів теплового захисту та з використанням різних видів джерел енергії за середнього протягом восьми років тарифу на електричну енергію та природний газ в Україні

Аналіз рисунку дозволяє зробити висновок про ефективність використання теплового насоса та котла на біомасі для теплозабезпечення будівлі та теплового насоса, що працює за моноенергетичного частково – паралельного режиму роботи з додатковим нагрівачем протягом 20 років. Так, важливим фактором при здійсненні аналізу інтегральних витрат на теплозабезпечення є значно менший рівень інвестицій у початковому (нульовому) році, пов'язаний з тим, що будівля не утеплена та витрат на забезпечення теплового захисту оболонки не передбачається. Використання котла, що працює на біомасі є дорожчим у початковому році, проте після приблизно 3,8 років експлуатації є більш економічно привабливим, порівняно з газовим котлом, при здійсненні порівняння ліній інтегральних витрат на теплозабезпечення будівлі рівня I' у зв'язку з використанням більш дешевого палива. Варто зазначити, що попри суттєву різницю у витраті палива (витрата пелет на опалювальний сезон вища за очікувану витрату природного газу приблизно вдвічі), ключову роль у витратах на енергоносії відіграє значення тарифу, пелети залишаються дешевшими за природний газ майже втричі. Використання ж теплового насоса є найдешевшим у загальному розгляді, що пов'язано з високим значенням коефіцієнту ефективності обраного теплового насоса та невисокими тарифами на електричну енергію, необхідну для забезпечення роботи теплового насоса. Так, порівнюючи ефективність використання для теплозабезпечення теплового насоса та котла на пелетах, можна зробити висновок про доволі швидко окупність системи з тепловим насосом та додатковим нагрівачем (близько двох років) при рівні теплового захисту II при нехтуванні можливим зростанням тарифів на енергоносії. Дещо більша окупність теплового насоса для рівнів теплового захисту III та IV, порівняно з котлом на пелетах, проте беззбитковим використання теплового насоса та додаткового нагрівача для теплозабезпечення офісної будівлі буде протягом близько двох та трьох років відповідно.

Оцінка інтегральних витрат на теплозабезпечення у довгостроковому розгляді без урахування можливих змін тарифів на енергоносії та ставки дисконтування не є якісною, тому доцільність реалізації проектів підвищення енергоефективності

розглянуто і з урахуванням зміни таких параметрів за трьох можливих сценаріїв зміни тарифів на енергію та ставки дисконтування:

- 1) сценарій позитивних змін – характеризується незначним зростанням тарифів ($l = 0,025$ або 2,5%), та ставкою дисконтування $E = 5\%$;
- 2) існуючий сценарій – $l = 0,156$ або 40%, $E = 15,8\%$;
- 3) сценарій депресивних змін – приріст цін на енергоносії l становить 0,4 або 40%, ставка дисконтування E – в межах 20,7%.

Зміну інтегральних витрат на теплозабезпечення будівлі при підвищенні її енергоефективності за сценарію позитивних змін оцінимо за рисунком 3.5.2.

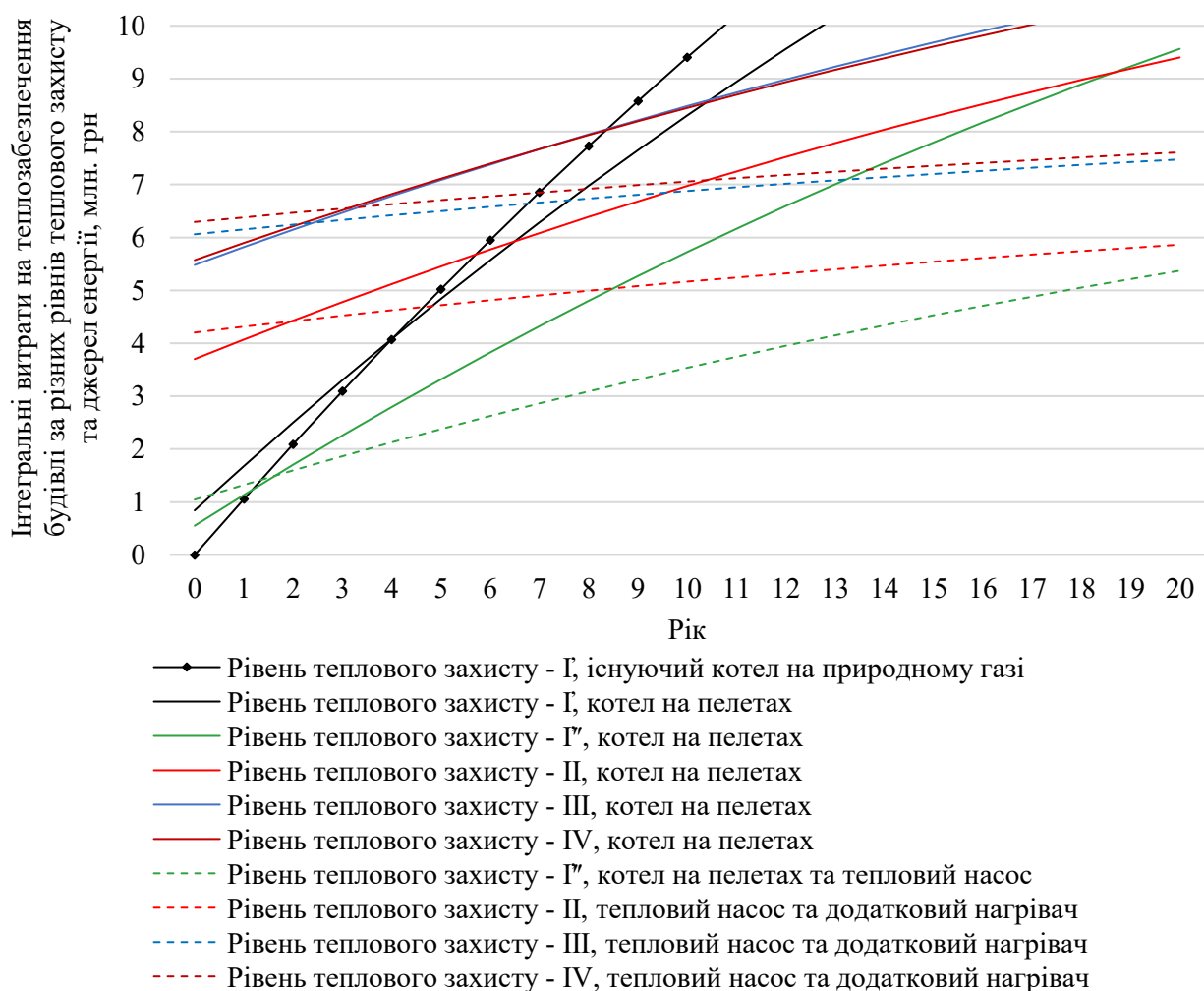


Рисунок 3.5.2. Зміна інтегральних витрат на теплозабезпечення будівлі при підвищенні її енергоефективності за сценарію позитивних змін

Якщо порівнювати значення точки безбитковості заходів підвищення енергоефективності, приведені на рисунку 3.5.1 та 3.5.2, легко помітити зростання термінів окупності для кожної з систем при врахуванні незначного приросту тарифів на енергоносії та ставки дисконтування. Тенденція привабливої перспективи використання комбінованих відновлювальних джерел енергії (котел на біомасі та тепловий насос) зберігається за сценарію позитивних змін, доцільність покращення теплової оболонки будівлі до рівня II спостерігається більше ніж після 20 років експлуатації будівлі (точка перетину ліній інтегральних витрат на теплозабезпечення будівлі рівня I'' теплового захисту з тепловим насосом та пелетним котлом та рівня II теплового захисту будівлі з тепловим насосом). Динаміку зміни ефективності експлуатації різних джерел енергії для різних рівнів теплового захисту будівлі за існуючого сценарію представлено на рисунку 3.5.3.

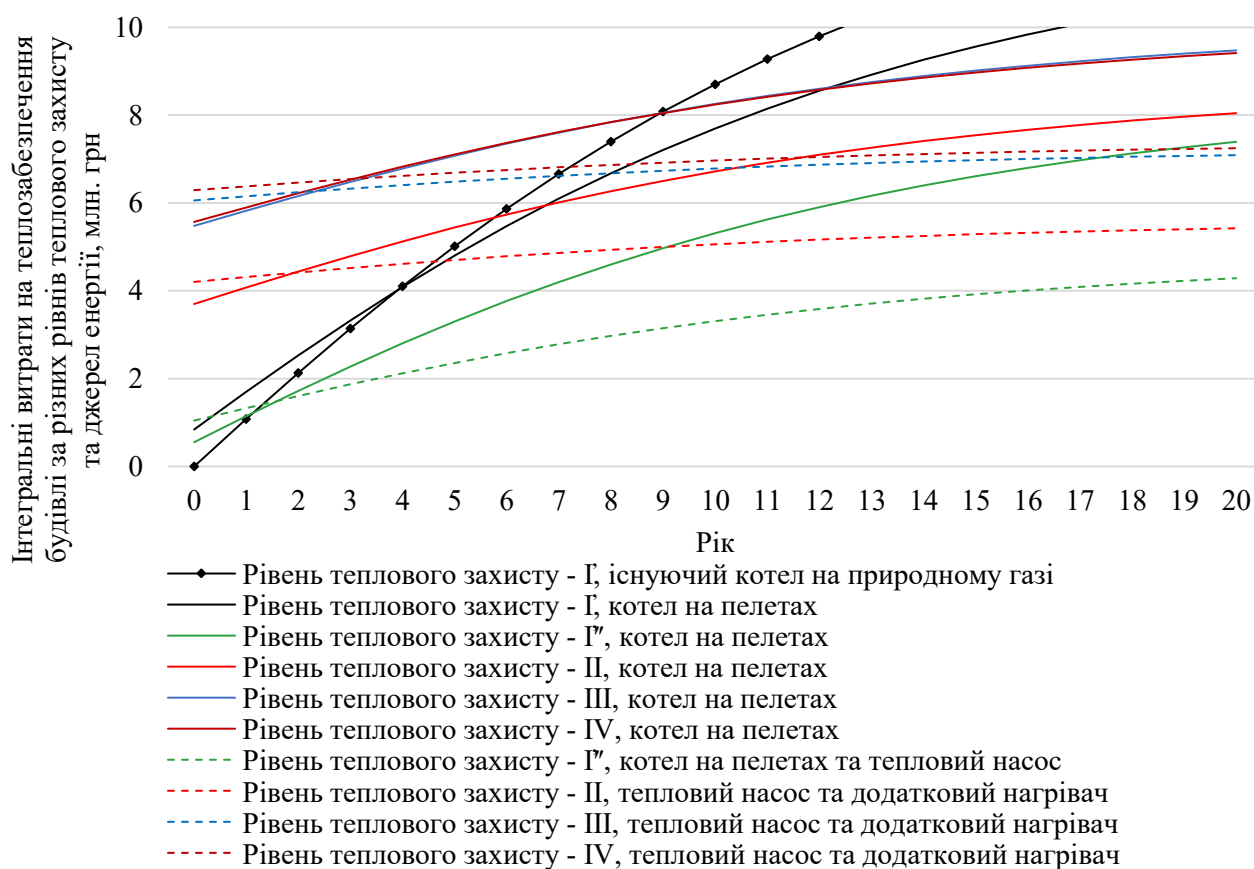


Рисунок 3.5.3. Зміна інтегральних витрат на теплозабезпечення будівлі при підвищенні її енергоефективності за існуючого сценарію

Аналізуючи результати розрахунку, представлені на рисунку, можна зробити висновок про суттєвий вплив можливого приросту вартості енергоресурсів на 15,6% на загальну ефективність представлених заходів підвищення енергоефективності офісної будівлі. Так, ефективність використання системи теплозабезпечення, представленої тепловим насосом та котлом на біомасі, які працюють за частково – паралельного режиму роботи неутепленої будівлі підтверджується протягом 1 року та 3 місяців експлуатації, якщо порівняти з існуючою ситуацією (з рівнем теплового захисту I' та використанням котла на природному газі). Рівень же витрат протягом всього терміну служби теплового насоса порівняно не змінюється (згідно рисунку 3.5.3, кут нахилу ліній інтегральних витрат при використанні теплового насоса фактично не змінюється) хоча використання запропонованого теплового насоса (система тепловий насос з додатковим нагрівачем) вимагає найбільших інвестицій на початку. Варто зазначити, зокрема, що представлені на рисунку графіки зміни інтегральних витрат загалом підтверджують високу ефективність використання відновлювальних джерел у комплексі (система теплозабезпечення з тепловим насосом та котлом на біомасі, що працюють у бівалентному частково – паралельному режимі роботи). Вплив можливого більш значного приросту тарифів на енергоносії та фіксацію ставки дисконтування на рівні 20,7% (сценарій депресивних змін) досліджено за рисунком 3.5.4.

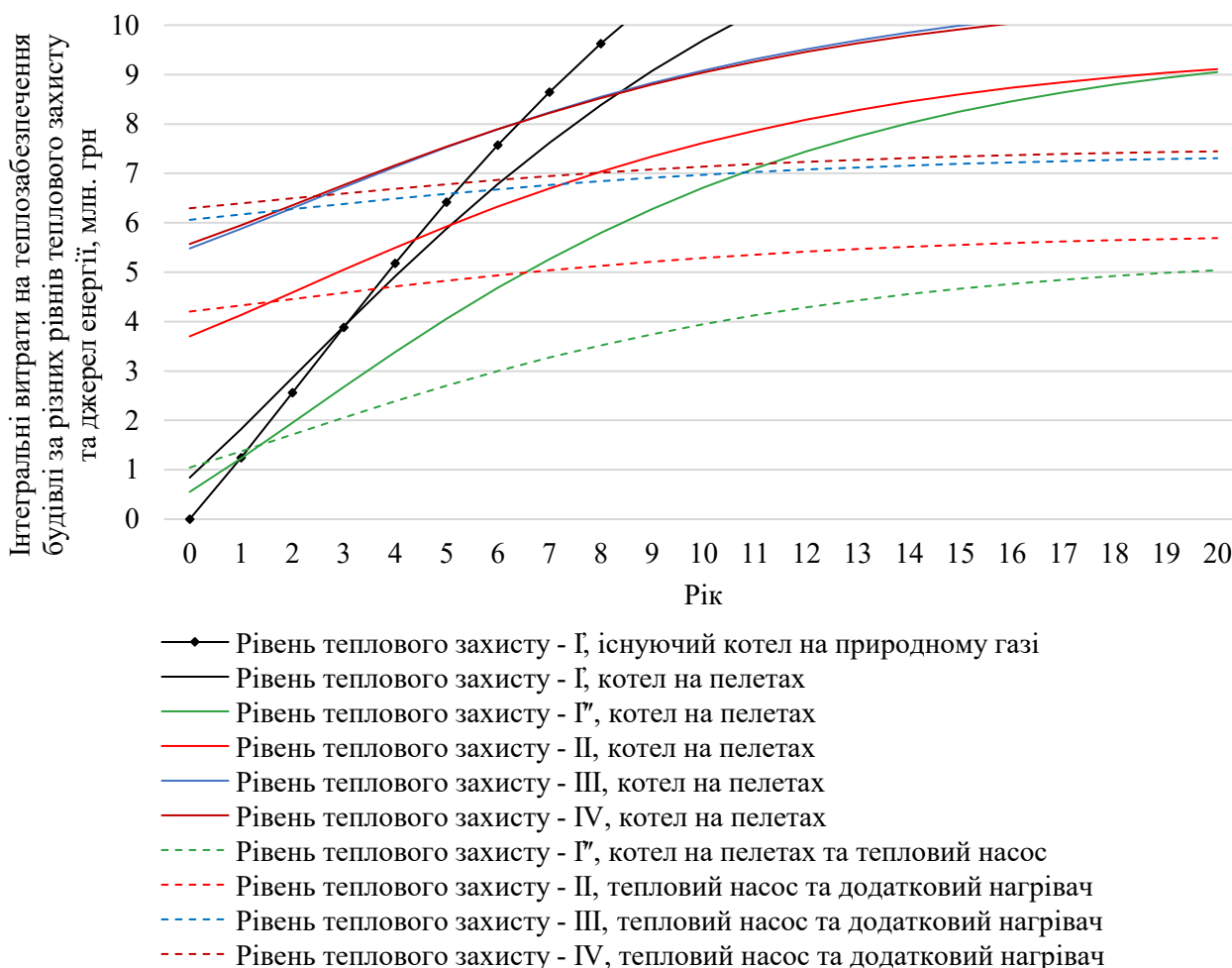


Рисунок 3.5.4. Зміна інтегральних витрат на теплозабезпечення будівлі при підвищенні її енергоефективності за сценарію депресивних змін

Графіки, приведені на рисунку, підтверджують попередньо наведені в роботі припущення щодо зростання ефективності використання відновлювальних джерел енергії для теплозабезпечення будівлі при зростанні тарифів на природний газ – точки беззбитковості відновлювальних джерел енергії зменшуються. Такий аналіз особливо актуальний сьогодні, коли економіка та ринок енергії знаходиться у скрутному становищі, що зумовили воєнні дії на території країни. Попри збереження сталого тарифу на природний газ та електричну енергію, та і загалом інші види енергоносіїв, вартість яких взаємозалежна від вартості «традиційного» для України природного газу, тарифна політика може бути переглянута.

Висновки до розділу 3

Потенціал України у сфері відновлювальної енергетики є надзвичайно високим, проте недостатньо використаним у сфері енергоефективності. Досвід країн Європи у темпах та підходах щодо забезпечення виробництва «чистої» енергії є надзвичайно привабливим як з технічної, так і з економічної точки зору. Попри порівняно невисокі темпи нарощування виробництва енергії з відновлювальних джерел в Україні, такий досвід демонструє ефективність реалізації подібних проектів. У даному розділі, для підтвердження високої ефективності використання відновлювальних джерел енергії, розглянуто можливості заміщення природного газу для теплозабезпечення офісної будівлі в місті Київ відновлювальними джерелами енергії. Зокрема, представлено техніко – економічну оцінку використання котла, що працює на пелетах лушпиння соняшника та теплового насоса, здатного генерувати необхідну для будівлі кількість теплової енергії у комплексі з додатковим електричним нагрівачем та котлом на біомасі за різних рівнів теплового захисту.

Покращення теплової оболонки будівлі дозволяє забезпечити значне зниження потреби на теплову енергію протягом опалювального періоду. Для кожного з рівнів теплового захисту будівлі проведено оцінку заміщення котла, що працює на природному газі, на котел на біомасі. Зокрема, проведено розрахунки необхідної для теплозабезпечення рівнів теплової оболонки будівлі витрати палива. Попри менше значення коефіцієнту корисної дії запропонованих котлів, що працюють на біомасі, температура вихідних газів є значно нижчою, порівняно з газовим котлом, що дозволяє зробити висновок про зменшення негативного впливу на атмосферу. Ефективність використання біомаси підтверджується і суттєво нижчими витратами на забезпечення теплопостачання будівлі, порівняно з використанням природного газу як основного ресурсу для виробництва енергії.

Використання теплових насосів для теплозабезпечення будівлі є чудовою альтернативою традиційним джерелам енергії, особливо у розгляді його

комплексного використання з котлом, що працює на біомасі. Проведена у програмному середовищі GeoTSOL оцінка генерації теплової енергії тепловим насосом типу «повітря – вода» для різних рівнів теплового захисту будівлі підтверджує можливості покриття необхідної для будівлі у осінньо – зимовий період теплової енергії за частково – паралельного режиму роботи обраного теплового насоса та котла на біомасі чи додаткового нагрівача. Так, сезонна ефективність комбінованої системи «тепловий насос – котел на біомасі» та «тепловий насос – додатковий нагрівач» протягом року – більше 3. Відзначено, що при здійсненні заходів забезпечення високої ефективності теплової оболонки будівлі, тепловий насос здатен покрити необхідну потребу у тепловій енергії у комплексі з котлом на біомасі. Зокрема, генерація тепловим насосом теплової енергії забезпечує для рівня I'' теплового захисту будівлі 69,7% необхідного теплоспоживання, рівня II – 98,9%, III – 99%, IV – 99,4%.

Здійснюючи оцінку використання відновлювальних джерел енергії при реалізації концепції nZEB, приведено значення питомих витрат енергії офісної будівлі за різних рівнів теплового захисту будівлі та з використанням різних джерел теплозабезпечення з метою порівняння отриманих даних з вимогами у сфері забезпечення енергетичної ефективності будівель у частині збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії. Так, згідно вимог [16], значення питомого показника енергоспоживання будівлі, тепловий захист якої відповідає вимогам України та Швеції, а основним джерелом теплозабезпечення є відновлювальні джерела, відповідає рівню будівлі з близьким до нульового рівнем споживання енергії. Представлені у роботі варіанти реалізації концепції nZEB свідчать про наявний високий потенціал забезпечення будівництва та/або реконструкції громадських будівель рівня nZEB в Україні.

За результатами проведеного динамічного моделювання генерації теплової енергії тепловим насосом різних рівнів теплового захисту будівлі, представлено графіки залежності сезонної ефективності систем з тепловим насосом від

температури зовнішнього повітря. Вплив зовнішнього повітря на коефіцієнт ефективності досліджено з використанням регресійного аналізу, де незалежна змінна – температура зовнішнього повітря. Оцінка ефективності запропонованих заходів підвищення енергоефективності будівлі оцінена зокрема і з використанням методів інтегральних витрат, що дозволяє зробити висновок про використання комбінованої системи «тепловий насос – котел на біомасі» як найбільш ефективної для теплозабезпечення системи.

Вищезгадану перевагу використання відновлювальних джерел для теплозабезпечення будівлі додатково підтверджено також при здійсненні оцінки інтегральних витрат на теплозабезпечення будівлі. Так, кут нахилу ліній інтегральних витрат систем, що використовують тепловий насос (у комплексі пелетним котлом або додатковим нагрівачем) є найменшим, якщо порівнювати з пелетним котлом та, тим більше, газовим котлом. Менший кут нахилу свідчить про несуттєві зміни витрат протягом періоду експлуатації будівлі попри значно суттєвіші початкові вкладенні. Відповідні витрати на експлуатацію будівлі лишаються найбільш привабливими з економічної точки зору в тому числі за різних варіантів економічних змін, що впливають на тарифоутворення та облікову ставку.

Можливий приріст тарифів на енергоресурси за різних варіантів економічного розвитку (сценарій позитивних змін, існуючий сценарій та сценарій депресивних змін) має вплив на загальну ефективність представлених заходів підвищення енергоефективності офісної будівлі. Зокрема, зростання тарифів на енергоносії підвищує загальну економічну привабливість кожного з варіантів модернізації будівлі, що представлені у роботі. Такий вплив ще раз показує актуальність перегляду тарифної політики на розвиток енергоефективності будівель.

РОЗДІЛ 4 ОЦІНКА РІВНЯ СКОРОЧЕННЯ ВИКИДІВ ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ ПРИ ВИКОРИСТАННІ РІЗНИХ ВАРІАНТІВ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Однією з найбільш актуальних проблем сьогодення є зміна клімату. Боротьба зі зміною клімату є однією з Глобальних цілей сталого розвитку та означає прийняття заходів щодо зменшення впливу діяльності кожного на навколишнє середовище. За даними Міжнародної групи експертів зі зміни клімату [129], протягом останніх п'ятнадцяти років сумарна температура повітря та поверхні моря зросла на 1°C. Експерти оцінюють потепління приблизно на 0,2°C протягом наступних десяти років у глобальному розгляді, акцентуючи увагу на тому, що в деяких регіонах світу потепління відбувається значно швидше. Діяльність людини на навколишнє середовище оцінюється значним зниженням біорізноманіття та незначними темпами скорочення рівня викидів. Зокрема, згідно представленого експертами звіту, для забезпечення зниження інтенсивності потепління, частка відновлювальних джерел енергії у виробництві повинна становити від 52% до 67% до 2050 року. Національний план з енергетики та клімату до 2030 року [24] прописує зобов'язання щодо частки ВДЕ у валовому кінцевому споживанні енергії, що розподіляться наступним чином:

- опалення та охолодження – 35%;
- електроенергія – 25,4%;
- транспорт – 14%.

У 2019 році лідери Європейського Союзу підтримали ціль стати кліматично нейтральними до 2050 року [130] за результатами підписаної Паризької угоди у 2015 році [131]. Кліматична нейтральність означає максимальне скорочення викидів парникових газів та компенсацію залишкових викидів, інтеграція зелених технологій у всі сектори економіки та забезпечення переваг у інвестуванні в чисту енергетику. Наслідуючи принципи Європейського Союзу, Україна проголосила про намір досягнення кліматичної нейтральності енергосектору до 2050 року [24], а у 2024 році

схваленим НПЕК визначено скорочення викидів на 65% порівняно з рівнем 1990 роком як одну із цілей для досягнення до 2030 року.

4.1 Послідовність проведення оцінки рівня скорочення викидів діоксиду вуглецю

Оцінка рівня скорочення викидів діоксиду вуглецю відбувається за наступною послідовністю:

- 1) оцінка рівня викидів будівлею за різних рівнів теплового захисту (I', III, IV) за використання різних джерел теплозабезпечення (котел на природному газі, пелетний котел та тепловий насос з додатковим нагрівачем відповідно) за різних підходів;
- 2) економічний аналіз підходів щодо забезпечення скорочення викидів CO₂ під час експлуатації будівлі з урахуванням діючих тарифних ставок в Україні та у світі;
- 3) оцінка скорочення рівня непрямих викидів (Сфера 2) з використанням існуючих законодавчих підходів та динамічного моделювання у програмному середовищі PV*SOL.

Приведена вище послідовність включає кроки, представлені на рисунку 4.1.1.

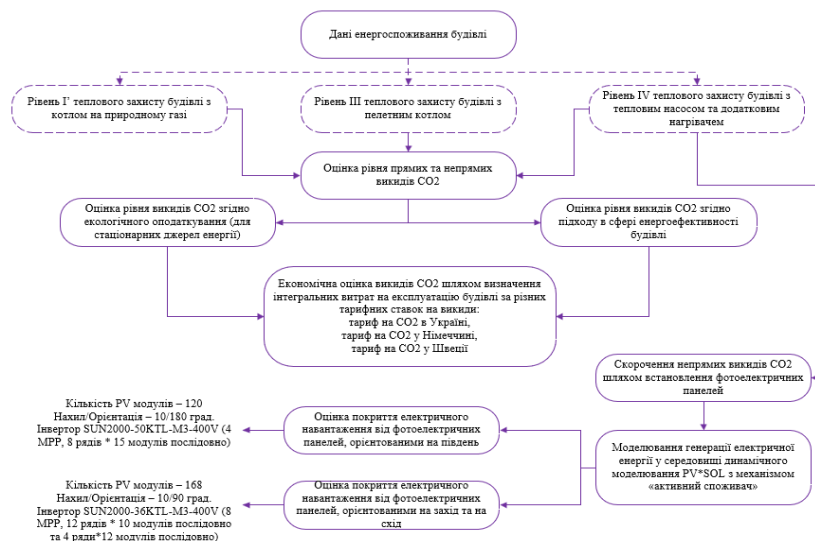


Рисунок 4.1.1. Послідовність проведення оцінки рівня скорочення викидів діоксиду вуглецю при підвищенні енергоефективності будівлі

4.2 Вплив джерел теплозабезпечення об'єкту на екологію

За даними Міжнародного енергетичного агентства, будівництво відповідає за 26,9% викидів парникових газів у світі, з яких 13% відбуваються під час будівництва [132]. В цілому, будівельна галузь становила 39,9% світових викидів у 2021 році. Разом з тим, приведена оцінка некомерційної організації Architecture 2030 [133] загального річного рівня глобальних викидів приводить наступні значення викидів діоксиду вуглецю у сфері будівництва:

- прямі викиди, пов'язані з експлуатацією житлових будівель – 5,8% від глобального рівня викидів у сфері будівництва;
- непрямі викиди, пов'язані з експлуатацією житлових будівель – 1,1%;
- прямі викиди, пов'язані з експлуатацією нежитлових будівель – 2,8%;
- непрямі викиди, пов'язані з експлуатацією нежитлових будівель – 7,7%;
- прямі та непрямі викиди, пов'язані з виробництвом цементу – 4,1%;
- прямі та непрямі викиди, пов'язані з виробництвом заліза, сталі та алюмінію – 3,6%.

Варто зазначити, що поняття прямих та непрямих викидів тісно пов'язано з Протоколом про парникові гази [134]. Даний протокол враховує всі сфери дії викидів – від 1 до 3. Зокрема, сфера 1 охоплює прямі викиди парникових газів, що контролюються організацією як, для прикладу, викиди від спалювання палива у котлах. Викиди сфери 2 характеризуються непрямими викидами парникових газів, що є наслідком використання закупленої від підприємств енергії. Викиди сфер 1 та 2 контролюються організацією та можуть бути зменшені за рахунок економії енергії чи впровадження заходів підвищення енергоефективності. Сфера 3 викидів парникових газів не контролюється та характеризується непрямими викидами, що не увійшли у сфери 1 та 2. Тобто, з метою забезпечення позитивного впливу на навколишнє середовище, достатньо забезпечити зменшення енергоспоживання та використання інноваційних технологій для виробництва енергії, серед яких власне є

приведення енергоефективності будівлі до рівня такої, споживання енергії якою є близьким до нуля.

Технології «нульового енергоспоживання» є необхідною складовою для досягнення кліматично нейтрального будівництва, і розширення використання будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії сприяє розвитку низьковуглецевого будівельного сектору на глобальному рівні.

Відновлення будівельної галузі в Україні є ключовим завданням для економічного розвитку і поліпшення життя громадян. В останні роки після складних економічних і соціальних змін у країні, цей сектор отримав підтримку та стимули для розвитку і модернізації. Уряд України активно підтримує заходи щодо підвищення енергоефективності в будівництві, включаючи заохочення використання енергоефективних матеріалів і технологій, інтеграцію відновлювальних джерел енергії та впровадження енергоефективних стандартів у будівельних кодексах, включаючи використання європейських норм. Згідно останніх вимог стосовно енергоефективності будівель, уряд вирішив сприяти розвитку технологій «нульового енергоспоживання».

Заохочення використання технологій «нульового енергоспоживання» має кілька цілей, спрямованих на підвищення енергоефективності, збереження навколишнього середовища, зменшення витрат та покращення якості життя. Використання цих технологій значно знижує енергоспоживання в будівлях, що дозволяє зменшити енергетичну залежність країни, редукувати витрати на опалення, охолодження та загальний обслуговування будівель. Крім того, такі технології сприяють зменшенню викидів парникових газів та інших шкідливих речовин у навколишнє середовище, що сприяє збереженню природних ресурсів і зменшенню негативного впливу будівництва на клімат та навколишнє середовище. Нові технології також поліпшують умови життя, забезпечуючи стабільну температуру, зменшення шуму та покращення якості повітря в приміщеннях. Впровадження таких технологій спонукає до інновацій

в будівельній галузі, включаючи використання відновлювальних джерел енергії, сучасних систем управління енергією та автоматизації будівельних процесів.

Поруч з технологіями «нульового енергоспоживання» широкого поширення набуває поняття «нульових викидів», оскільки еквівалент діоксиду вуглецю від використання відновлювальних джерел енергії для теплозабезпечення або охолодження будівлі залишається на нульовому рівні.

4.3 Оцінка рівня скорочення прямих та непрямих викидів при реалізації заходів енергоефективності

Забезпечення скорочення вуглецевого сліду є однією з цілей Енергетичної стратегії України до 2050 року [135]. Така ціль повинна забезпечуватись впровадженням енергоефективних заходів у виробництві та побуті, що дозволить скоротити загальне енергоспоживання, та використанні відновлювальних джерел енергії. Попри порівняно не швидкі темпи впровадження проектів відновлювальної енергетики, все більше уваги приділяється можливостям забезпечення сталого розвитку енергетики у всіх сферах економіки. На сьогодні, враховуючи складну ситуацію з енергетикою та економікою, велика кількість міжнародних організацій надає можливості та підтримку українським бюджетним та приватним закладам у реалізації проектів «зеленої» енергетики. Для прикладу, за підтримки Урядів Німеччини та Швейцарії, в Україні розпочато реалізацію проекту «Енергія сонця для діточок» [136], що передбачає використання геліосистем у дошкільних закладах освіти для забезпечення гарячої води. Разом з тим, зміни на шляху до декарбонізації стосуються і централізованого теплопостачання. За даними Держенергоефективності України, протягом 2022 року реалізовано більше 330 проектів з виробництва теплової енергії з альтернативних видів палива [136]. Подібні шляхи розвитку чистого виробництва енергії розглядатимуться Фондом декарбонізації, створеним в Україні у 2023 році, робота якого розпочалась у 2024 році.

Оцінку впливу розглянутих у даній роботі заходів енергоефективності на навколишнє середовище проведено з використанням різних підходів. Для оцінки перспективи скорочення викидів для кожного з представлених у роботі рівнів теплового захисту будівлі та використанні різних джерел енергії для теплозабезпечення, проведено розрахунок викидів CO₂ кожного з розглянутих у роботі шляхів модернізації будівлі (об'єкту дослідження). Зокрема, викиди діоксиду вуглецю при спалюванні природного газу та пелет лушпиння соняшника оцінено за методикою, описаною у [137]. Методика [137] базується на застосуванні показників емісії забруднюючих речовин палива, що використовується для теплозабезпечення та побудована за [139]. Згідно [138], визначення викидів забруднюючих речовин в атмосферу може здійснюватись розрахунковим методом, що характеризується використанням показника емісії. Зокрема, за даними [139], показник емісії діоксиду вуглецю (k_{co_2}) при спалюванні природного газу становить 58 748,13 г/ГДж, пелет лушпиння соняшника (згідно [149]) – 22 220 г/ГДж. Формула розрахунку валового викиду діоксиду азоту [150] має вигляд:

$$E_{co_2} = 10^{-6} \cdot k_{co_2} \cdot Q_H^p \cdot B, \quad (4.1)$$

де E_{co_2} – обсяг валових викидів діоксиду вуглецю, т

k_{co_2} – показник емісії діоксиду вуглецю, г/ГДж;

Q_H^p – нижча робоча теплота згорання палива, МДж/кг;

B – витрата палива, кг.

Приведена формула може використовуватись для будь – якого типу палива. Коли йдеться про модернізацію або реконструкцію існуючої будівлі, слід звернути увагу на підходи, що використовуються фахівцями в галузі енергоефективності будівель. Зокрема, критично важливо оцінити питомі викиди вуглекислого газу під час приведення будівлі до стану, що відповідає нормативним вимогам у будівельній

галузі, шляхом реконструкції та/або модернізації. Обсяг викидів, спричинених експлуатацією будівлі, є частиною звітної інформації будівлі, відповідно до якої можна відслідкувати динаміку впливу впровадження проектів підвищення енергоефективності будівлі та рівня досягнення цілої декарбонізації. Обсяг викидів, розрахований за таким підходом, не оподатковується відповідно до законодавства України. Згідно з вимогами законодавства України у сфері енергоефективності будівель, маса викидів парникових газів – це різниця між сумою добутків відпущеної енергії енергоносія та відповідного коефіцієнта викидів для зазначеного енергоносія та сумою добутків експортованої енергії для конкретного енергоносія та коефіцієнта викидів для експортованого енергоносія [139]. Формула (4.2) є узагальненням вищезазначеного:

$$m_{\text{CO}_2} = \sum(E_{\text{del},i} \cdot K_{\text{del},i})/1000 - \sum(E_{\text{exp},i} \cdot K_{\text{exp},i})/1000, \quad (4.2)$$

де m_{CO_2} – маса викидів парникових газів, кг;

$E_{\text{del},i}$ – поставлена енергія енергоносія, кВт;

$K_{\text{del},i}$ – коефіцієнт викидів парникових газів для поставленого енергоносія CO₂, г/кВт·год;

$E_{\text{exp},i}$ – експортована енергія енергоносія, кВт;

$K_{\text{exp},i}$ – коефіцієнт викидів парникових газів для експортованого енергоносія CO₂, г/кВт·год.

Варто зазначити, що обсяг викидів для рівнів утеплення будівлі з використанням теплового насоса (рівні I'', II, III та IV) враховують викиди від спалювання бурого вугілля для виробництва електроенергії на ТЕС у Києві, необхідної для роботи теплового насоса. У свою чергу, викиди вуглекислого газу для різних рівнів теплової оболонки будівлі що використовують для теплозабезпечення природний газ та пелети лушпиння соняшника, оцінюються з урахуванням спалювання відповідних видів палива (викиди від процесу виробництва теплової енергії поблизу/на місці) та

кількості бурого вугілля, необхідної для виробництва електроенергії, необхідної для роботи котлів (викиди від процесу виробництва електричної енергії поза місцем розташування об'єкта дослідження). З метою представлення можливостей скорочення викидів двоокису вуглецю у подальшому розглядатимуться наступні рівні теплового захисту будівлі з використанням наступних джерел енергії:

- рівень I теплового захисту будівлі (неутеплена існуюча будівля з постійною роботою систем опалення, вентиляції та кондиціонування) з котлом, що працює на природному газі;

- рівень II теплового захисту будівлі (утеплена згідно діючих вимог України будівля) з використанням пелетного котла, що працює на пелетах лушпиння соняшника;

- рівень III теплового захисту будівлі (утеплена згідно вимог Швеції будівля) з використанням теплового насоса типу «повітря-вода» та додаткового електричного нагрівача.

Незважаючи на обрані для оцінки підходи модернізації будівлі з використанням альтернативного виду палива (пелети з лушпиння соняшнику) та джерела відновлюваної енергії (тепловий насос типу «повітря-вода»), можливість продажу енергії енергосистемі за «зеленим тарифом» не розглядається. Тобто, згідно з наведеними підходами до оцінки викидів двоокису вуглецю, маса викидів CO₂ прямо пропорційна сумі добутків поставленої енергії кожного виду та коефіцієнта викидів парникових газів відповідного виду енергоносія. Представлення результатів для зазначених вище рівнів та джерел теплозабезпечення будівлі дозволить виконати попередню оцінку можливостей моделювання та практичної реконструкції будівлі до рівня такої, що споживає енергію на рівні, близькому до нуля. Дані, необхідні для розрахунку маси викидів CO₂ у відповідності до формули (4.2), приведені у таблиці 4.3.1.

Таблиця 4.3.1. Обсяг, тип енергоносія та коефіцієнти викидів парникових газів для розглянутих варіантів

Рівень теплового захисту будівлі та джерело теплозабезпечення	Тип енергоносія, що постачається	Споживання енергії, кВт	Коефіцієнт викидів CO ₂ г/кВт·год
Рівень I' теплового захисту, котел на природному газі	Природний газ	539 858	220
	Електроенергія	2 534	420
Рівень III теплового захисту, пелетний котел	Тверде біопаливо (пелети лушпиння соняшника)	135 300	40
	Електроенергія	1 942	420
Рівень IV теплового захисту, тепловий насос та додатковий нагрівач	Аеротермальна енергія, вироблена на місці	123 351	0
	Електроенергія	33 621	420

Варто зазначити ключовий аспект наведеного аналізу викидів CO₂ – відповідна оцінка викидів представлена для ланцюга: «виробництво необхідної кількості поставленої електроенергії для запуску стаціонарного джерела – виробництво теплової енергії стаціонарним джерелом». Тому вкрай важливо розглядати використання відновлюваних джерел енергії ширше як засіб заохочення користувачів до споживання електроенергії, виробленої відновлювальними джерелами поблизу. Облік викидів вуглекислого газу в навколишнє середовище від централізованих джерел опалення/електропостачання є важливим з точки зору оцінки як прямих, так і непрямих викидів відповідно до Протоколу про парникові гази [134]. На сьогодні зобов'язання України щодо звітності про викиди за Протоколом про парникові гази визначені лише в частині існуючих меморандумів великих компаній з Європейським Співтовариством і не визначені на національному рівні. Таким чином, звітність про обсяги прямих та непрямих викидів існує лише для підприємств відповідних

параметрів (наприклад, виробники електроенергії та нафтогазовий сектор), при цьому вкрай важливо оцінювати викиди за Сферою 1 та Сферою 2 від експлуатації будівлі при розгляді шляхів декарбонізації будівельного сектору України.

Наприклад, адміністративні будівлі в Європі повинні звітувати про викиди парникових газів, головним чином, якщо такі будівлі належать великим компаніям і є великими споживачами енергії. Відповідна звітність (включаючи звітність про прямі та непрямі викиди) базується на Директиві про енергоефективність та Регламенті про сталу звітність.

Згідно з чинним українським та європейським законодавством, тепловий насос не належить до стаціонарних джерел, тому викиди CO₂ не враховуються при розрахунках у відповідності до Методики [137]. Однак важливо зазначити, що споживана електрична енергія тепловим насосом та котельними установками, зокрема для варіантів модернізації, запропонованих у таблиці 4.2, має значний вплив на шлях національної декарбонізації. З урахуванням вищезазначеного, пропонується розглянути аналіз оцінки викидів CO₂ за підходом податкового законодавства не лише в контексті оцінки категорії Score 1 (прямі викиди), але й категорії Score 2 (непрямі викиди). Це означає, що подальше представлення результатів обсягу викидів CO₂ для порівняння двох вище представлених підходів включає:

- за Методикою [137] або згідно екологічного оподаткування: сумарний обсяг викидів від спалювання палива у стаціонарній установці (I – котла на природному газі, II – котла на пелетах лущиння соняшника), що є викидами Сфери 1, та обсяг викидів CO₂, що утворюється при спалюванні палива для виробництва електричної енергії на ТЕЦ м. Києва (для всіх видів установок теплозабезпечення, що розглядаються у роботі), що є викидами Сфери 2;

- за підходу у сфері енергоефективності будівель: обсяг викидів Сфери 2, оскільки всі види енергоносіїв розглядаються як «поставлені» до об'єкту.

Відповідна оцінка викидів категорії Сфери 2 представлена з урахуванням первинної енергії для виробництва електричної енергії, необхідної для роботи котла

на природному газі (рівень I' теплового захисту), на пелетах з лушпиння соняшнику (рівень III теплового захисту) та теплового насоса (рівень IV теплового захисту). Рівні скорочення викидів двоокису вуглецю для різних рівнів теплового захисту та джерел теплозабезпечення за різних методик здійснення оцінки зображені на рисунку 4.3.2.

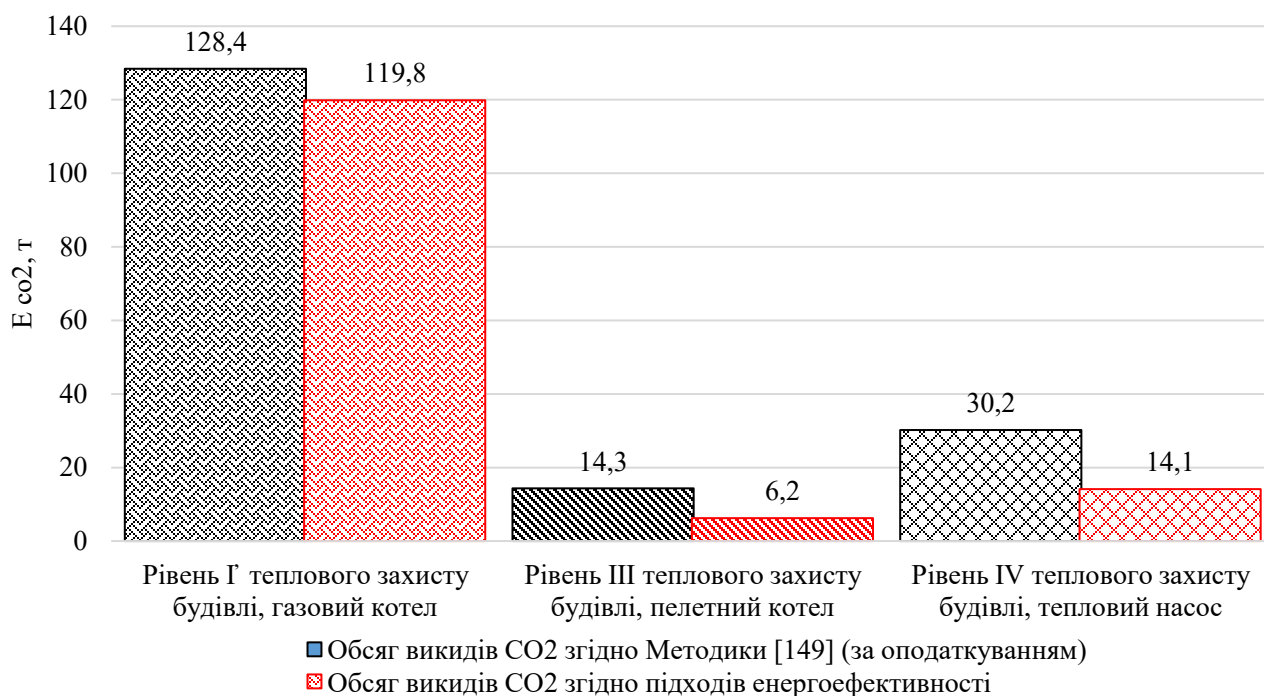


Рисунок 4.3.2. Викиди CO₂ для різних рівнів теплового захисту будівлі та різних джерел теплозабезпечення

Дані, представлені на рисунку 4.3.2 вказують на суттєві відмінності між двома розглянутими варіантами оцінки викидів CO₂ під час експлуатації будівлі для модернізації будівлі від рівня I' теплового захисту з використанням котла на природному газі до рівнів III теплового захисту з пелетним котлом IV з тепловим насосом. Зокрема, суттєве відхилення у викидах CO₂ (56,5%) варіанту модернізації до рівня III теплового захисту з використанням пелетного котла для теплозабезпечення є наслідком застосування різних коефіцієнтів викидів. Таким чином, коефіцієнт викидів CO₂ при оцінці згідно з податковим законодавством становить 22 220 г/ГДж (80 г/кВт·год) у той час, коли, згідно з [139], для будь-якого

твердого біопалива (зокрема, пелет з лушпиння соняшнику) відповідний коефіцієнт становить 40 г/кВт·год. Значна різниця у викидах CO₂ для варіанту модернізації будівлі до рівня IV з використанням теплового насоса (53,2%) фактично призводить до більш поглибленого аналізу.

Під час оцінки кількості викидів двоокису вуглецю з метою подальшого оподаткування електрична енергія, необхідна для роботи теплового насоса, розглядається як експортована електроенергія з вугільної теплоелектростанції, тобто викиди CO₂ оцінюються з урахуванням викидів під час спалювання бурого вугілля (у роботі втрати під час розподілу та передачі електричної енергії не враховуються). Згідно з підходом, що використовується при оцінці енергоефективності будівель, коефіцієнт викидів не має характеристик розподілу за видом палива, що використовується для виробництва електричної енергії для споживача. Тобто відповідний коефіцієнт є радше усередненим значенням викидів при виробництві електроенергії різними генеруючими потужностями.

Зокрема, згідно з даними [140], станом на квітень 2023 року частка виробництва електроенергії атомними електростанціями становила 53,4%, тепловими електростанціями – 20,8%, тепловими електростанціями – 7,8%, гідро- та гідроакумуючими електростанціями – 12,3%. Частка виробництва електроенергії відновлюваними джерелами станом на квітень 2023 року становила 5,7% від загальної структури виробництва. Незважаючи на дещо суперечливе ставлення до ядерної енергетики у зв'язку з катастрофічними наслідками Чорнобиля та Фукусіми, автор статті [141] та експерт Міжнародного агентства з атомної енергії [142] наводять аргументи на користь «чистого» виробництва електричної енергії на атомних електростанціях з мінімальним вуглецевим слідом. Українське ядерне товариство зазначає [143], що, враховуючи продовження роботи десяти енергоблоків АЕС протягом усього періоду використання ядерної енергії в Україні для виробництва електроенергії, вдалося уникнути понад 2,7 мільярда тонн викидів CO₂ у навколишнє середовище. Наведені вище висновки та частка виробництва електроенергії атомними

електростанціями в Україні дозволяють припустити, що коефіцієнт викидів CO₂ від електричної енергії, що постачається на об'єкт (згідно з підходом, що використовується при оцінці енергоефективності будівлі), все ж таки є усередненим. Водночас наведено відповідну оцінку викидів згідно з податковим законодавством, враховуючи фізичні величини, що характеризують певний вид палива (нижча теплотворна здатність Q), та, при конкретному розгляді, використання лігніту (бурого вугілля) на теплових електростанціях України є суттєвим показником впливу. Підхід до звітності за категоріями Сфери 1 та Сфери 2 має загалом створювати сприятливі умови для розвитку відновлюваних джерел енергії як у національному енергетичному балансі, так і для окремих категорій споживачів. Водночас доцільним є перегляд тарифної політики щодо викидів парникових газів в атмосферу.

Політика ЄС щодо сприяння чистішому довкіллю базується на принципі «забруднювач платить», і в цьому випадку будь-яке перевищення узгоджених попередніх лімітів, чи то з точки зору споживання енергії (використання викопного палива), чи викидів, відображається у витратах для споживача та забруднювача відповідно. Фактично, якщо розглядати Швецію з точки зору країни, яка входить до трійки «найзеленіших» у ЄС, можна припустити, що тарифи є одним із мотивуючих факторів для зменшення частки викопних джерел енергії в загальному енергетичному балансі країни (станом на 2022 рік [144] частка ВДЕ в енергетичному балансі становила 69,4% в опаленні та охолодженні, 83,3% в електроенергії). Зокрема, Швеція була однією з перших країн ЄС, яка запровадила податок на викиди CO₂ у 1991 році [145], станом на сьогодні [146] відповідний показник є одним із найвищих у Європейському Союзі (рисунок 4.3.3). Високий податок на викиди CO₂ у Швеції призвів до розвитку використання біомаси та електроенергії в секторі опалення та охолодження [147].

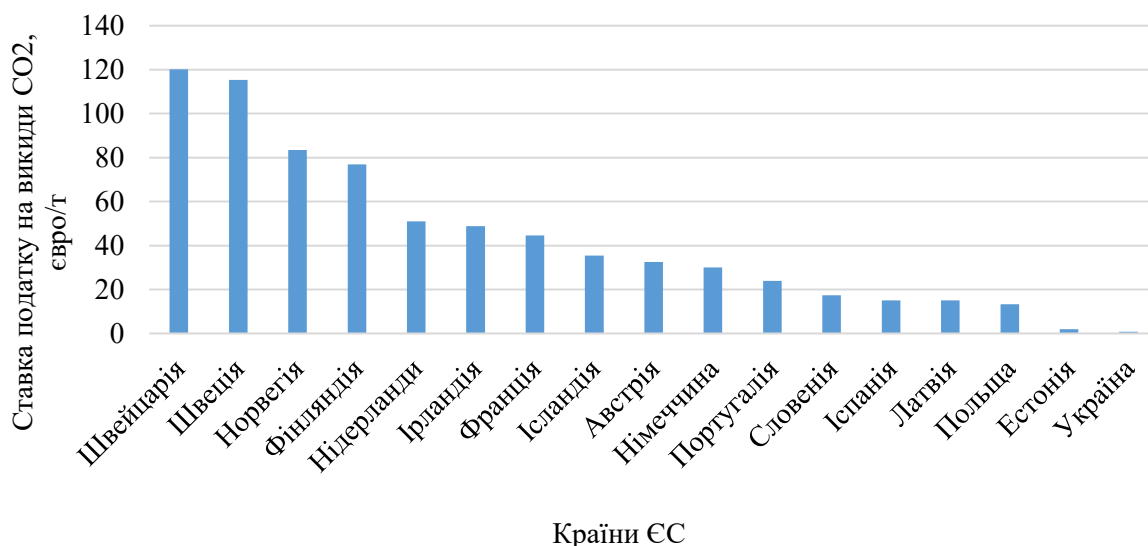
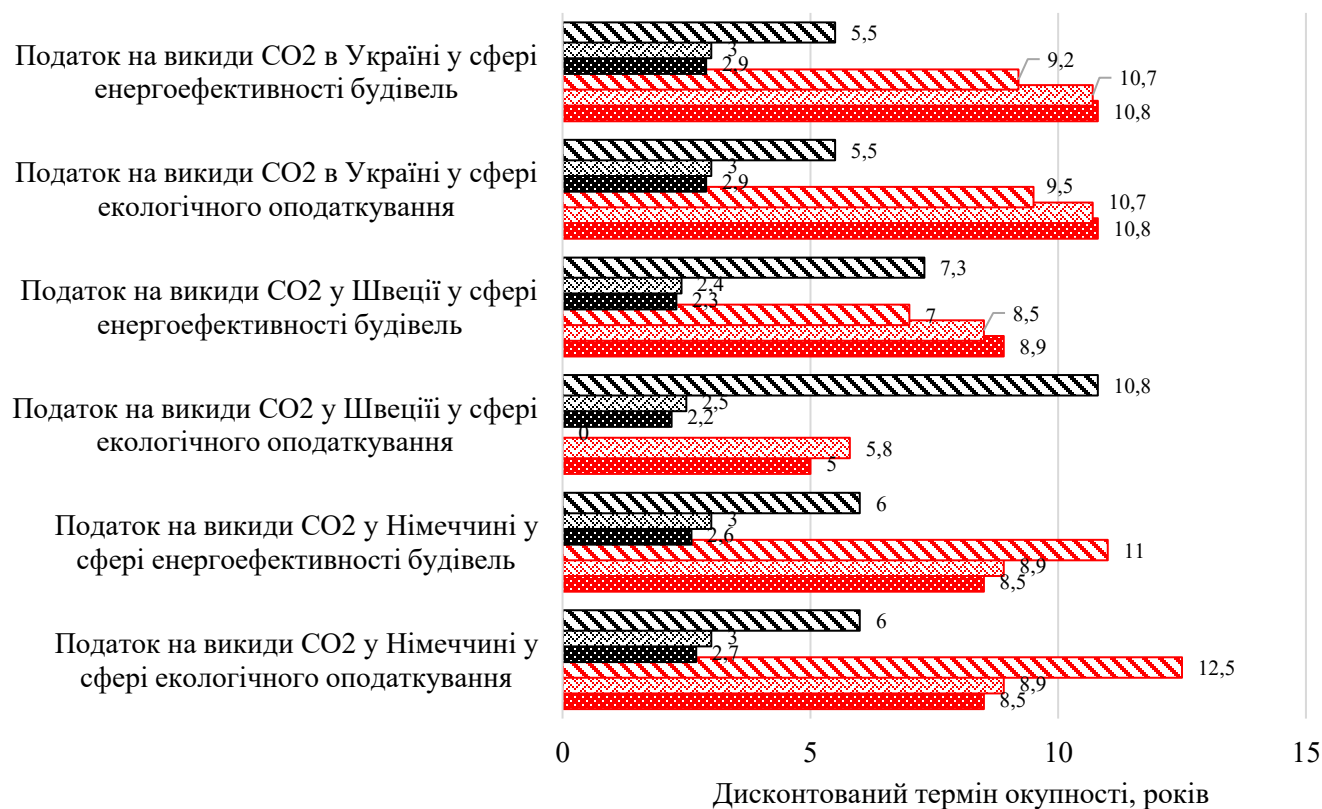


Рисунок 4.3.3. Ставка податку на викиди двоокису вуглецю у Європейському Союзі

Ранжування даних на рисунку 4.3.3 можна розглядати з точки зору уваги до скорочення викидів. Наприклад, податок на викиди CO₂ в Україні становить менше 1 євро за тонну, що є найнижчим податком на викиди в Європі. У зв'язку з введенням воєнного стану в Україні, починаючи з 24 лютого 2022 року, тарифи на електроенергію, тепло та природний газ для побутових споживачів повинні залишатися незмінними протягом періоду воєнного стану, тоді як тарифи для промислових підприємств можуть змінюватися залежно від певних факторів, зокрема загальної енергетичної ситуації в країні. В умовах ракетних та безпілотних атак на енергетичні об'єкти та будівлі в Україні питання просування зеленої енергетики та зеленого будівництва стає актуальнішим, ніж будь-коли.

Підхід до звітності за категоріями Сфери 1 та Сфери 2 має загалом створювати сприятливі умови для розвитку відновлюваних джерел енергії як у національному енергетичному балансі, так і для окремих категорій споживачів. Водночас доцільним є перегляд тарифної політики щодо викидів парникових газів в атмосферу. Відповідні варіанти приведення тарифів на викиди CO₂ в Україні до рівня європейських країн та їх вплив на економічну оцінку варіантів декарбонізації, що розглядаються у даному розділі роботи, були розглянуті з використанням методу інтегральних витрат,

відповідні терміни окупності модернізації будівлі до рівня III теплового захисту будівлі з використанням пелетного котла для теплозабезпечення та рівня IV теплового захисту будівлі з тепловим насосом показано на рисунку 4.3.4, де I' - існуюча (неутеплена) теплова оболонка будівлі.



- Точка беззбитковості модернізації будівлі до рівня IV з використанням теплового насоса порівняно з рівнем III та пелетним котлом з урахуванням тарифів на енергію у Швеції
- Точка беззбитковості модернізації будівлі до рівня IV з використанням теплового насоса порівняно з рівнем I' та газовим котлом з урахуванням тарифів на енергію у Швеції
- Точка беззбитковості модернізації будівлі до рівня III з використанням пелетного котла порівняно з рівнем I' та газовим котлом з урахуванням тарифів на енергію у Швеції
- Точка беззбитковості модернізації будівлі до рівня IV з використанням теплового насоса порівняно з рівнем III та пелетним котлом з урахуванням тарифів на енергію в Україні
- Точка беззбитковості модернізації будівлі до рівня IV з використанням теплового насоса порівняно з рівнем I' та газовим котлом з урахуванням тарифів на енергію в Україні
- Точка беззбитковості модернізації будівлі до рівня III з використанням пелетного котла порівняно з рівнем I' та газовим котлом з урахуванням тарифів на енергію в Україні

Рисунок 4.3.4. Дисконтований термін окупності модернізації будівлі за різних рівнів податку на викиди CO2 та різних тарифів на енергію

Аналізуючи рисунок 4.3.4 та результати розрахунку інтегральних витрат на теплозабезпечення будівлі при модернізації її теплової оболонки та заміні джерела енергії, отримані у розділі 2 та 3 даної роботи, можна зробити висновок, що тарифна політика та можливе збільшення оподаткування викидів CO₂ суттєво впливають на загальну економічну привабливість заходів щодо підвищення енергоефективності громадських будівель. Водночас, порівняння термінів окупності варіантів модернізації дозволяє зробити висновок, що тариф на енергію залишається одним з найважливіших факторів, що впливають на величину окупності. З урахуванням суттєвого дефіциту в енергосистемі України, а також виходячи з необхідності забезпечити пошук рішень для скорочення викидів Сфери 2 та скорочення витрат на енергозабезпечення при використанні теплового насоса, було би корисно уточнити про можливості, наявні в Україні, для підтримки споживачів енергії (в тому числі, електричної).

4.4 Забезпечення скорочення непрямих викидів при споживанні енергії будівлею

З метою представлення можливості забезпечення декарбонізації у сфері будівель, здійснено детальний огляд національних законодавчих актів та практичних ініціатив, які можна масштабувати з метою досягнення стратегічних планів держави згідно [24]. В Україні питання функціонування балансуєного ринку електричної енергії врегульовано статтею 68 Закону України «Про ринок електричної енергії» [148]. Згідно з [148], учасником ринку може бути будь-яка фізична або юридична особа, яка виробляє або постачає електричну енергію, оператор системи передачі та розподілу електричної енергії, трейдер, оператор ринку або оператор накопичувача енергії. Згідно з [148], організованим сегментом ринку електричної енергії є ринок на добу наперед, внутрішньодобовий ринок та балансуєний ринок. Особливості продажу електричної енергії у вищезазначених сегментах визначаються

законодавчими актами, затвердженими Національною комісією, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП). Зокрема, в рамках ринку «на добу наперед» купівля-продаж електричної енергії відбувається на наступний день після дня проведення аукціону. Ринок на добу наперед є оптовим ринком.

Купівля та продаж електроенергії на внутрішньоденному ринку відбуваються безперервно після завершення аукціону на добу наперед та протягом 24 годин фізичного споживання електроенергії, що дозволяє учасникам ринку коригувати власні пропозиції.

З метою запобігання зловживанням на оптових ринках енергії, Верховна Рада України у 2023 році прийняла Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо запобігання зловживанням на оптових ринках енергії» [149], який імплементує Регламент ЄС № 1227/2011 про доброчесність та прозорість на оптовому ринку енергії (REMIT) [150] у національне законодавство. Відповідний закон можна вважати повноцінною інтеграцією енергетичного ринку України з європейським.

Враховуючи вищезазначене, важливо зазначити, що в цій роботі не розглядається можливість регулювання цін на балансуєчому ринку, а тарифи на електроенергію представлені середньорічними роздрібними цінами для юридичної особи, де вже враховано особливості торгів учасників ринку електроенергії. Варто також уточнити, що впроваджено механізми забезпечення енергетичної автономії споживача та значної економії коштів на розвиток відновлюваних джерел енергії в Україні. Згідно із Законом [148], споживач, який використовує, виробляє та зберігає електричну енергію та продає її надлишки до загальної мережі, є «активним споживачем» (або механізмом Net Billing). Тобто, побутовий та/або непобутовий споживач може покривати своє споживання електроенергії та забезпечувати накопичення коштів на своєму рахунку завдяки продажу надлишків до мережі. Результати дослідження, проведеного авторами статті [151], показують за допомогою моделювання, що Net Billing легко впровадити в реальних умовах. Актуальність

запропонованого методу оцінки підтверджується багатьма науковими роботами щодо застосування механізмів на ринку електроенергії, зокрема статтями [152] та [153].

Це означає, що обсяги викидів CO₂ категорії Сфери 2 від експлуатації будівлі можуть бути суттєво зменшені за рахунок поєднання фотоелектричних сонячних панелей і теплового насоса «повітря-вода» для енергозабезпечення будівлі, модернізованої до рівня IV теплового захисту з використанням теплового насоса, в міжопалювальний та опалювальний періоди. Питання заміни викопного палива відновлювальними джерелами для забезпечення скорочення CO₂ та досягнення сталого розвитку є надзвичайно актуальним, про що наголошують автори в статті [154]. Для оцінки ефективності вищезазначеного методу було проведено моделювання в програмному середовищі PV*SOL [155] для варіантів спрямування фотоелектричних модулів на південь та одночасно на схід і захід, враховуючи кількість електричної енергії, необхідної для обраної будівлі протягом року.

Орієнтація панелей на південь вважається золотим стандартом розміщення сонячних панелей у Північній півкулі. Таке рішення пов'язано з тим, що сонце більшу частину дня перебуває у зеніті та, відповідно, інсоляція сонячного випромінювання є найвищою протягом дня [156]. Більшість фотоелектричних систем в Україні використовують варіант південної орієнтації при реалізації проектів для «зеленого тарифу». Проте, враховуючи особливості графіку роботи офісної будівлі, розташування панелей на захід-схід є одним із рішень для забезпечення ефективної генерації електричної енергії, зокрема при використанні механізму «активний споживач». Експерти компанії «Avenston» підкреслюють, що при споживанні електричної енергії у другій половині дня, найбільш оптимальним є розміщення фотоелектричних панелей на захід, коли у той же час генерація електроенергії панелями, орієнтованими на південь, практично не відбуватиметься [157]. Експерти [157] зазначають, що в умовах, коли електрична енергія потрібна протягом усього дня (зранку і до вечора), комбінація панелей, орієнтованих на схід та захід, буде найбільш ефективною. При розміщенні ж панелей на південь, максимальна генерація

електричної енергії спостерігатиметься близько 12 години. З урахуванням вищезазначеного, а також виходячи з розташування будівлі, у подальшому буде розглянуто два варіанти розміщення фотоелектричних панелей – на південь, та комбінація панелей, орієнтованих одночасно та схід та на захід. Додатково варто зазначити, що реалізація фотоелектричних панелей для будівлі розглядається у контексті скорочення непрямих викидів CO₂, спричинених необхідністю використання електричної енергії для роботи теплового насоса, розрахунок заміни даху та навантаження на нього опри монтажі фотоелектричних систем не розглядається.

Додатковим важливим для врахування фактором є спосіб підключення фотоелектричних панелей. Загальновідомо, що розділяють три способи підключення:

- послідовне з'єднання;
- паралельне з'єднання;
- послідовно-паралельне з'єднання.

Зазначені способи підключення мають свої особливості, вибір підключення залежить від необхідної потреби «на виході» із системи. Так, при послідовному підключенні напруга всієї системи є сумою напруг кожної панелі, загальна потужність є сумою потужностей кожної окремої фотоелектричної панелі, струм же залишається сталим [158]. Паралельне ж підключення означає, що загальна потужність та струм є сумою потужностей кожної панелі та струму відповідно при незмінній напрузі. Послідовно-паралельне з'єднання дозволяє забезпечити найбільш оптимальне співвідношення струму та напруги [158]. З урахуванням зазначених особливостей, подальше моделювання здійснюватиметься за умов послідовно-паралельного з'єднання фотоелектричних панелей.

Дані, необхідні для моделювання генерації електричної енергії сонячними панелями для «активного споживача», наведено в таблиці 4.4.1.

Таблиця 4.4.1. Параметри моделювання фотоелектричної електростанції в програмному середовищі PV*SOL

Опис/Орієнтація	Південь	Схід-захід
Тип системи	Підключена до мережі фотоелектрична система з електроприладами	
Виробник фотоелектричних модулів	JA Solar Holdings Co.	
PV модуль	JAM66S30-500/MR	
Кількість PV модулів	120	168
Нахил/Орієнтація, °	10/180	10/90
Виробник інверторів	Huawei Technologies	
Інвертор	SUN2000-50KTL-M3-400V (4 MPP, 8 рядів * 15 модулів послідовно)	SUN2000-36KTL-M3-400V (8 MPP, 12 рядів * 10 послідовних модулів та 4 ряди * 12 послідовних модулів)

Для вищезазначених параметрів було оцінено потік енергії для «активного споживача», коли фотоелектричні модулі були спрямовані на південь (рисунки 4.4.1.а та 4.4.1.б відповідно) та коли вони були одночасно спрямовані на схід та захід (рисунки 4.4.2.а та 4.4.2.б).

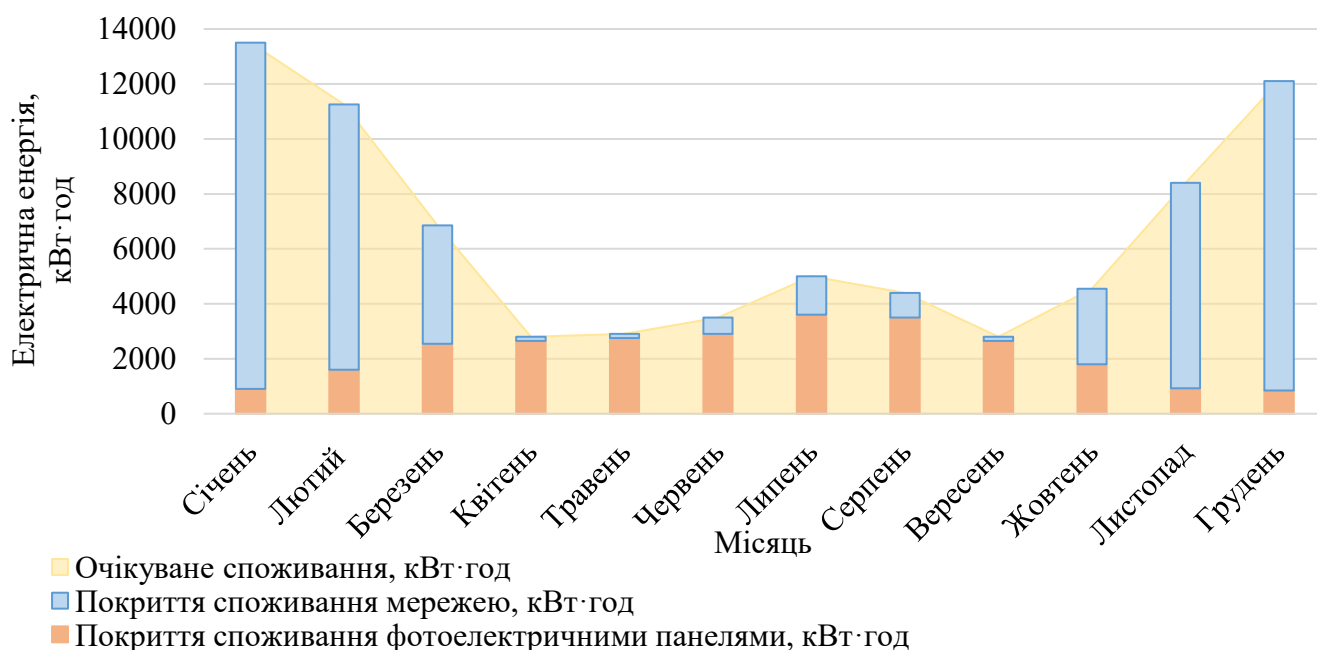


Рисунок 4.4.1.а. Покриття споживання електричної енергії фотоелектричними панелями, орієнтованими на південь

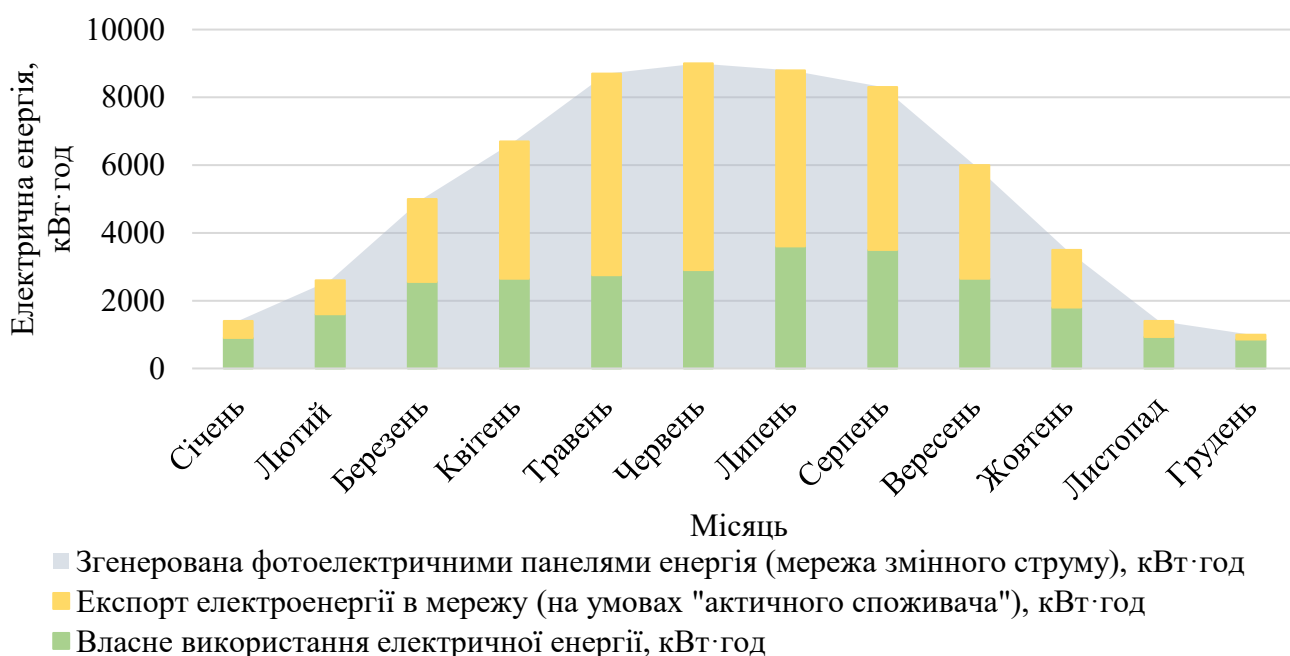


Рисунок 4.4.1.б. Використання електричної енергії, згенерованої фотоелектричними панелями, для власних потреб та для «активного споживача» (за орієнтації панелей на південь)

Аналізуючи результати моделювання, представлені на рисунках 4.4.1.а та 4.4.1.б, можна зробити висновок що для орієнтації панелей на південь з мережі споживається 53,436 МВт·год енергії, експортується 36,395 МВт·год, а в червні виробляється приблизно 9 МВт·год.

Відповідні результати моделювання для орієнтації фотоелектричних панелей приведені на рисунках 4.4.2.а та 4.4.2.б.

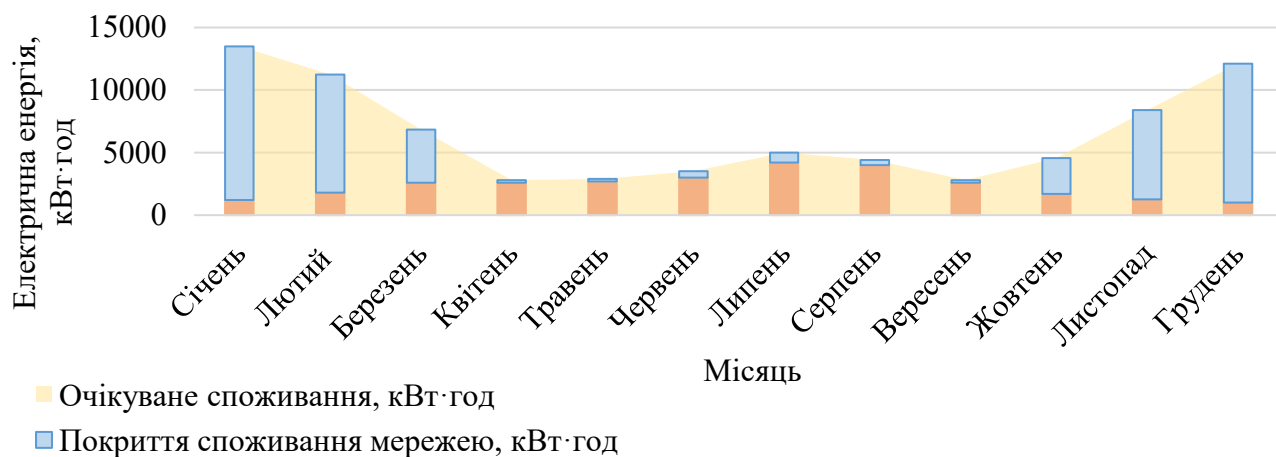


Рисунок 4.4.2.а. Покрытие потребления электрической энергии фотоэлектрическими панелями, ориентированными на восток и запад

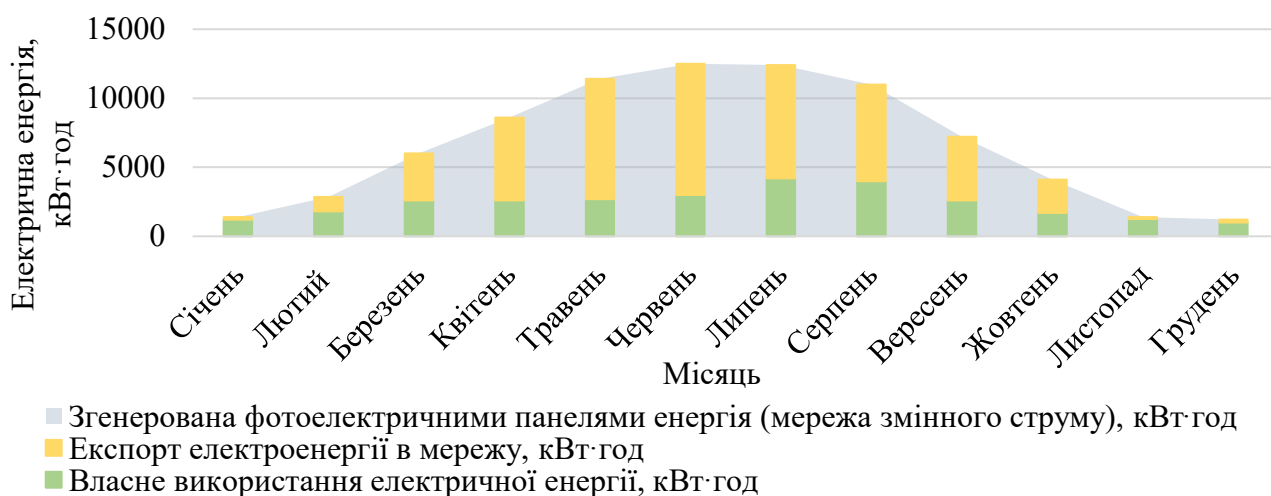


Рисунок 4.4.2.б. Использование электрической энергии, генерированной фотоэлектрическими панелями, для собственных нужд и для «активного потребителя» (за ориентации панелей на восток и запад)

За орієнтації панелей одночасно на схід та на захід з мережі споживається 51,302 МВт·год енергії (що на 4% менше порівняно з південною орієнтацією панелей), а експортується 52,44 МВт·год (що на 44% більше порівняно з південною орієнтацією панелей), у червні генерується близько 12 МВт·год, 75% з яких надходить у мережу.

Таким чином, південний напрямок фотоелектричних панелей для електропостачання розглянутої будівлі дозволяє генерувати обсяг 62,42 МВт·год/рік. При обраному типі системи 26,02 МВт·год/рік (32,7%) електричної енергії надходить до будівлі від сонячної електростанції, а решта 53,4 МВт·год/рік надходять з електричної мережі (67,3%). Одночасна орієнтація сонячних панелей на північ та захід забезпечує більш ефективне виробництво електричної енергії. Зокрема, запропонована система генеруватиме близько 80,87 МВт·год/рік електроенергії. Частка енергії, споживаної будівлею з системи, становитиме 35,2%, решта 64,8% будуть повертатися в мережу за умов «активного споживача». Результати, представлені на рисунках 4.4.1 та 4.4.2, свідчать про значне зменшення частки викидів Сфери 2 при модернізації будівлі до рівня теплової оболонки будівлі, що відповідає вимогам Швеції з використанням теплового насоса та додаткового нагрівача, оскільки кількість електроенергії, що виробляється фотоелектричними системами, забезпечує зменшення споживання електроенергії протягом року з мережі.

Висновки до розділу 4

Будівельний сектор (від проектування будівлі до експлуатації) відповідає за майже половину глобальних викидів шкідливих речовин в атмосферу, враховуючи прямі та непрямі викиди. Одним із шляхів забезпечення меншого впливу будівель на навколишнє середовище є використання інноваційних технологій та підвищення

енергоефективності. Забезпечення та масштабування технологій «нульового енергоспоживання» будівель є поєднанням інновацій та високого рівня енергоефективності.

У даному розділі здійснено оцінку прямих та непрямих викидів діоксиду вуглецю при забезпеченні високої енергоефективності теплової оболонки та використання відновлювальних джерел енергії на прикладі біомаси та повітряного теплового насоса. Викиди діоксиду вуглецю при спалюванні природного газу та пелет лушпиння соняшника розраховано за Методикою визначення викидів забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок використовуючи підхід щодо оцінки викидів стаціонарного джерела енергії. Разом з тим, здійснено також оцінку обсягів викидів CO₂ згідно Методики визначення енергетичної ефективності будівель для всіх розглянутих у розділі рівнів теплової оболонки будівлі та джерел теплозабезпечення. Різниця розглянутих підходів полягає у тому, що Методика визначення енергетичної ефективності будівлі враховує непрямі викиди від спожитої придбаної енергії та стимулює споживачів до щонайменш раціонального енергоспоживання. Методика визначення викидів забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок позбавляє можливості відстеження динаміки скорочення викидів CO₂ та загалом економії енергоресурсів. Результати використання двох зазначених Методик суттєво відрізняються при здійсненні оцінки викидів діоксиду вуглецю для пелетного котла та теплового насоса. Так, обсяг викидів CO₂ згідно Методики визначення енергетичної ефективності будівлі у більш ніж вдвічі нижчий обсягу, визначеного згідно Методики визначення викидів забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок у зв'язку з суттєвими відмінностями у показниках коефіцієнту викидів CO₂. Аналогічна різниця у обсягах викидів, розрахованих для рівня IV теплового захисту будівлі з тепловим насосом пов'язана з оцінкою викидів від виробництва електроенергії, необхідної для роботи теплового насоса та паливом, що спалюється на місцевих ТЕЦ.

Оцінка інтегральних витрат на енергозабезпечення за припущення щодо можливого оподаткування обсягів викидів CO₂ будівлі (без обмежень щодо такого обсягу) загалом підтверджує попередні висновки про зростання ефективності модернізації будівель за умов вищих тарифів, в тому числі і на т викидів CO₂.

З метою представлення можливостей реконструкції будівлі до рівня майже нульового споживання енергії, а отже і майже нульових викидів будівлі, здійснено оцінку компенсації викидів Сфери 2 будівлі за використання механізму «активний споживач» та результатів проведеного динамічного моделювання обсягів згенерованої електроенергії фотоелектричними системами, орієнтованими на південь та на схід і захід одночасно за умов послідовно-паралельного з'єднання з метою отримання найбільш оптимального співвідношення струму та напруги. Південний напрямок фотоелектричних панелей для електропостачання розглянутої будівлі дозволяє генерувати 62,42 МВт·год/рік. При обраному типі системи, 26,02 МВт·год/рік (32,7%) електричної енергії надходить до будівлі від сонячної електростанції, а решта 53,4 МВт·год/рік надходять з електричної мережі (67,3%).

Одночасна орієнтація сонячних панелей на схід та захід забезпечує більш ефективне виробництво електричної енергії в тому числі, за рахунок використання більшої кількості панелей при такому розташуванні. Зокрема, запропонована система генеруватиме близько 80,87 МВт·год/рік електроенергії. Частка енергії, споживаної будівлею з системи, становитиме 35,2%, решта 64,8% будуть повертатися в мережу за умов «активного споживача».

Здійснена оцінка є комплексом підходів, що зрештою дозволяють прийти до висновку про наявні можливості для стимулювання та масштабування будівель з майже нульовим споживанням енергії та декарбонізації будівельної сфери за умов перегляду тарифів на енергію, тарифів на викиди діоксиду вуглецю та перегляду сфер, щодо яких здійснюється моніторинг та контроль обліку прямих та непрямих викидів.

ВИСНОВКИ

Представлені у дисертаційній роботі результати є новими, науково обґрунтованими та можуть бути використанні для подальших досліджень щодо підвищення енергоефективності офісних будівель та оцінки викидів шкідливих у атмосферу сполук іншими видами джерел енергії. У процесі виконання роботи отримано наступні науково – практичні результати:

1. Використання програмного забезпечення при здійсненні оцінки енергоспоживання будівлею дозволяє враховувати змінні протягом часу процеси та забезпечує результати такої зміни при розрахунках. Це дозволяє здійснювати планування енергоспоживання будівлі протягом часу та оперативно реагувати на регулювання роботи енергетичних систем за будь – яких обставин.

2. Покращення теплового захисту будівлі забезпечує скорочення споживання енергії та зниження навантаження на систему опалення. У роботі представлено оцінку зниження енергоспоживання будівлі при реалізації утеплення будівлі від існуючого рівня огорожувальних конструкцій за постійної (I') та переривчастої (I'') роботи системи опалення, вентиляції та кондиціювання до вимог України (II – згідно [37] та III – згідно [36]) та Швеції (IV, згідно [76]). З метою покращення теплового захисту будівлі, розглянуто можливості теплової ізоляції її оболонки до вимог України та Швеції з використанням пінополістеролу та мінеральної вати різної товщини, а також заміни дверей та світлопрозорих конструкцій рівня енергоефективності, визначеного вимогами. Запропоновані шляхи покращення теплової оболонки будівлі та їх вплив на енергоспоживання оцінено у програмному забезпеченні Design Builder. Зокрема встановлено, що при здійсненні покращення теплового захисту будівлі від рівня I', до рівнів II, III та IV забезпечується зменшення загального енергоспоживання будівлі на 391,4 МВт·год/рік, 389,6 МВт·год/рік та 399,3 МВт·год/рік та зменшення показника питомого енергоспоживання будівлі на 64%, 63,8% та 65,4% відповідно. Для оцінки адекватності створеної моделі у Design Builder використано динамічний метод

розрахунку енергії для опалення, вентиляції та охолодження 5-R-1-C. Різниця між результатами загальної енергопотреби на опалення становить близько 8%, вищі значення характерні для моделі 5R1C та пояснюється тим, що модель 5R1C розглядає середню температуру випромінювання та температуру повітря як один вузол відповідно, тоді як у Design Builder середня температура випромінювання розраховується для кожної оболонки окремо, а температура повітря розраховується для кожної зони. Розбіжність між результатами двох моделей була оцінена на основі скоригованого коефіцієнта детермінації $R^2 = 0,94$.

Оцінка економічної ефективності покращення теплового захисту будівлі проведена з використанням методу інтегральних витрат на енергію з урахуванням динаміки вартості природного газу та електричної енергії в Україні та Швеції. Вплив можливих змін у вартості енергоносіїв розглянуто на основі трьох різних сценаріїв, які відрізняються рівнем зростання тарифів і ставкою дисконтування. Сценарій позитивних змін характеризується невеликим підвищенням вартості одиниці енергії (2,5%) і ставкою дисконтування на рівні 5%. Існуючий сценарій передбачає збільшення вартості одиниці енергії на 15,6% та ставку дисконтування на рівні 15,8%. Сценарій депресивних змін означає суттєве підвищення вартості енергоносіїв (40%) та ставку дисконтування на рівні 20,7%. Так, за умов настання сценарію позитивних змін, окупність забезпечення енергоефективної (відповідно до вимог [36, 37]) та високоенергоефективної теплової оболонки (згідно вимог [76]) за середніх в Україні тарифів на енергоносії настає після 5, 7,8 та 8 років експлуатації будівлі відповідно, порівняно з існуючим рівнем теплового захисту. При зростанні вартості енергоносіїв та фіксації ставки дисконтування на рівні, вищому майже втричі порівняно з рівнем сценарію позитивних змін, окупність реалізації підвищення енергоефективності будівлі до рівня вимог України та Швеції складає 4,7, 7,2 та 7,3 років відповідно. З урахуванням можливих суттєвих змін щодо тарифної політики (коефіцієнт приросту цін становить 0,4) та закріпленні ставки дисконтування на рівні 20,7%, економічна ефективність покращення теплового захисту будівлі зростає, терміни окупності

реалізації енергоефективної та високоенергоефективної теплової оболонки становлять 3,2, 4,6 та 4,7 років відповідно. Отримані результати загалом свідчать про зростання ефективності реалізації заходів щодо покращення теплового захисту будівлі за умов перегляду тарифної політики на енергоносії.

3. У розділі 3 дослідження розглянуто можливості заміни природного газу в системі опалення офісної будівлі в місті Київ відновлювальними джерелами енергії, доступними у регіоні на прикладі котла, що працює на біомасі та теплового насоса. Так, аналізуючи потенціал біомаси в Україні, визначено найбільш привабливий вид біомаси для об'єкту дослідження, виходячи з енергетичних характеристик палива та доступності центрів виробництва до власне будівлі. Разом з тим, проведено техніко – економічну оцінку системи теплового насоса типу «повітря – вода» в поєднанні з електричним нагрівачем та котлом на біомасі при різних рівнях теплового захисту будівлі.

Використання котла, що працює на пелетах лушпиння соняшника забезпечує зменшення негативного впливу на навколишнє середовище та зниження витрат на теплопостачання будівлі у порівнянні з використанням природного газу. Результати динамічного моделювання у програмному середовищі GeoTSOL показали, що теплові насоси здатні забезпечити необхідну теплову енергію для будівлі при різних рівнях теплового захисту, в тому числі за умов невтручання до теплової оболонки. Так, генерація тепловим насосом теплової енергії забезпечує для рівня I'' теплового захисту будівлі (неутеплена існуюча будівля з переривчастим графіком роботи системи опалення, вентиляції та кондиціювання) 69,7% необхідного теплоспоживання, рівня II – 98,9%, III – 99%, IV – 99,4%.

Керуючись вимогами України та Європи щодо забезпечення високоенергоефективного будівництва, визначено, що представлені у роботі шляхи модернізації офісу забезпечують відповідність будівлі концепції «майже нульового споживання енергії» (nZEB). Зокрема, згідно [16, 17], максимальні показники питомого енергоспоживання первинної енергії енергонезалежної громадської будівлі

висотою від 4 до 9 поверхів для першої температурної зони не повинно перевищувати $29 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3 / \text{рік}$ та $33,6 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3 / \text{рік}$ (здійснюється реконструкція) відповідно. Результати проведеного дослідження підтверджують можливість забезпечення існуючої офісної будівлі рівню nZEB при покращенні теплової оболонки до рівня вимог України та Швеції та використанні відновлювальних джерел енергії. Зокрема, показник питомого енергоспоживання за використання біомаси для теплозабезпечення енергоефективної (теплова оболонка будівлі відповідає вимогам України [36, 37]) та високоенергоефективної будівлі (теплова оболонка будівлі відповідає вимогам Швеції [76]) становить $27,11 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3 / \text{рік}$, $22,0 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3 / \text{рік}$ та $19,85 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3 / \text{рік}$ відповідно. За використання теплового насоса для теплозабезпечення, відповідні показники становлять $31,81 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3 / \text{рік}$, $26,22 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3 / \text{рік}$ та $24,07 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3 / \text{рік}$.

Тому, приведені у роботі варіанти модернізації офісної будівлі при здійсненні оцінки забезпечення будівництва та/або реконструкції громадських будівель рівню nZEB в Україні свідчать про наявний високий потенціал масштабування такого будівництва.

4. У розділі 4 дисертації проведено оцінку прямих та непрямих викидів діоксиду вуглецю при досягненні високого рівня енергоефективності теплової ізоляції та використанні відновлювальних джерел енергії, таких як біомаса та повітряний тепловий насос. Відповідна оцінка проведена з припущенням щодо оподаткування будь-якого обсягу викидів CO_2 при спалюванні палива стаціонарною установкою [137] та поширення європейської практики щодо оцінки та контролю обсягів непрямих викидів (Сфера 2) на будівлі (розрахунок згідно [139]). Порівняння двох вищезазначених методів оцінки дозволили виявити суттєві зміни значень коефіцієнтів викидів CO_2 за використання Методики [137] та [139] для пелет лушпиння соняшника – за використання підходу [137] коефіцієнт викидів CO_2 вдвічі вищий. Більш аніж вдвічі вищі обсяги викидів CO_2 за Методики [137] у зв'язку з використанням підходу Методики у визначенні обсягів викидів при виробництві

електроенергії на ТЕЦ, необхідної для забезпечення роботи теплового насоса будівлі рівня IV теплового захисту.

З метою представлення можливостей забезпечення суттєвого скорочення енергоспоживання будівлі та викидів CO₂, запропоновано використання механізму «активний споживач» для будівлі та виконано динамічне моделювання генерації електричної енергії фотоелектричними системами, розміщеними на будівлі, за умов орієнтації систем на південь та на захід і схід. Динамічне моделювання, виконане для рівня IV теплового захисту будівлі з використанням теплового насоса та додаткового електронагрівача у програмному середовищі PV*SOL, показало що південний напрямок фотоелектричних панелей для електропостачання розглянутої будівлі дозволяє генерувати обсяг 62,42 МВт·год/рік. При обраному типі системи 26,02 МВт·год/рік (32,7%) електричної енергії надходить до будівлі від сонячної електростанції, а решта 53,4 МВт·год/рік надходять з електричної мережі (67,3%). Одночасна орієнтація сонячних панелей на схід та захід забезпечує більш ефективне виробництво електричної енергії. Зокрема, система генеруватиме близько 80,87 МВт·год/рік електроенергії. Частка енергії, споживаної будівлею з системи, становитиме 35,2%, решта 64,8% будуть повертатися в мережу за умов «активного споживача».

Представлені результати дисертаційної роботи використовуються ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» та у навчальному процесі кафедри теплової та альтернативної енергетики КПІ ім. Ігоря Сікорського для спеціальності G4.02 «Теплоенергетика» освітньої програми «Управління енергоефективністю та інжиніринг теплоенергетичних систем». Відповідні акти впровадження є частиною даного рукопису (додаток 1). Додатково, приведені у роботі результати дослідження опубліковано в іноземних та вітчизняних виданнях, перелік яких представлено у додатку 2.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Цілі сталого розвитку | United Nations Development Programme. *UNDP*. URL: <https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku>.
2. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC Text with EEA relevance : Directive of the European Parliament and of the Council of 25.10.2012 no. 2012/27/EU. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1399375464230&uri=CELEX:32012L0027>.
3. Energy statistics - an overview - Statistics Explained. *European Commission*. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview#Final_energy_consumption.
4. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings : Directive of the European Parliament and of the Council of 19.05.2010 no. 2010/31/EU. URL: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:en:PDF>.
5. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським Співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони : Угода про асоц. від 21.03.2014 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text.
6. Про енергетичну ефективність : Закон України від 21.10.2021 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text>.
7. Clean energy for all Europeans package. *Energy*. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package_en.
8. Directive (EU) 2018/2002 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 amending Directive 2012/27/EU on energy efficiency : Directive of the

European Parliament and of the Council of 11.12.2018 no. 2018/2002. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.01.0210.01.ENG.

9. Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency : Directive of the European Parliament and of the Council of 30.05.2018. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1529483556082&uri=CELEX:32018L0844>.

10. Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955 (recast) (Text with EEA relevance) : Directive (EU) of 13.09.2023 no. 2023/1791. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj/eng>.

11. Erhorn-Kluttig H., Erhorn H. National applications of the NZEB definition – The complete overview. Germany, 2018. 4 p. URL: https://epbd-ca.eu/wp-content/uploads/2019/06/CT1-Factsheet-National_applications_of_NZEB_definition.pdf.

12. Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast) (Text with EEA relevance) : Directive (EU) of 24.04.2024 no. 2024/1275. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj/eng>.

13. Commission Delegated Regulation (EU) 2025/2273 of 30 June 2025 supplementing Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council as regards the establishment of a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and building elements : Commission Delegated Regulation (EU) of 30.07.2025 no. 2025/2273. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2025/2273/oj.

14. Commission Implementing Regulation (EU) 2025/1328 of 30 June 2025 implementing Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council by establishing common templates for the transfer of information from national energy performance of buildings databases to the EU Building Stock Observatory : Commission

Implementing Regulation (EU) of 30.07.2025 no. 2025/1328. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32025R1328&qid=1756461897921>.

15. Communication approving the content of the Notice providing guidance on the recast EPBD (C/2025/4132)/ Guidance on the recast EPBD. *The European Commission*. URL: https://energy.ec.europa.eu/publications/communication-approving-content-notice-providing-guidance-recast-epbd-c20254132-guidance-recast-epbd_en.

16. Деякі питання запровадження вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії : Наказ від 06.02.2025 № 168. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0284-25#Text>.

17. Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері забезпечення енергетичної ефективності будівель у частині збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії та затвердження Національного плану збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії : Розпорядж. Каб. Міністрів України від 29.01.2020 р. № 88-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/88-2020-p#n11>.

18. Національний план збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії : Розпорядж. Каб. Міністрів України від 29.01.2020 р. № 88-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/88-2020-p#n172>.

19. Building permit index overview - Statistics Explained. *Language selection | European Commission*. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Building_permit_index_overview.

20. Загальна площа будівель (нове будівництво), за видами на початок будівництва у січні-вересні 2019 року. *Укрстат*. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2019/bud/kzpb/kzpb_u/kzpb_0919u.htm.

21. Energy-Overview-Data. *Language selection | European Commission*.
URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/images/d/d7/Energy-Overview-Data-2021.xlsx>.

22. Кінцеве енергоспоживання за 2007 - 2021 роки / Final energy consumption for 2007 - 2021. *Укрстат*.
URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2020/energ/k_energospog/k_ensp_ue.xls.

23. РБК-Україна. Будівельна галузь у 2019 році показала рекордне зростання. *РБК-Україна*. URL: <https://www.rbc.ua/ukr/news/stroitel'naya-otrasl-2019-godu-pokazala-rekordnyy-1579790957.html>.

24. Про схвалення Національного плану з енергетики та клімату на період до 2030 року : Розпорядж. від 25.06.2024 № 587-р.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/587-2024-p#Text>.

25. Загальна сума збитків, завдана інфраструктурі України, зросла до майже \$155 млрд – оцінка KSE Institute станом на січень 2024 року - Kyiv School of Economics. *Kyiv School of Economics*. URL: <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/zagalna-suma-zbitkiv-zavdana-infrastrukturi-ukrayini-zroslo-do-mayzhe-155-mlrd-otsinka-kse-institute-standom-na-sichen-2024-roku/>.

26. Про реалізацію експериментального проекту щодо відновлення населених пунктів, які постраждали внаслідок збройної агресії Російської Федерації : Постанова від 25.04.2023 № 382. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/382-2023-p#Text>.

27. Питання Національної ради з відновлення України від наслідків війни : Указ Президента України від 21.04.2022 № 266/2022.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/266/2022#Text>.

28. Проект Плану відновлення України. 2022. 164 с.
URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/energy-security.pdf>.

29. The European Green Deal : of 11.12.2019. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1588580774040&uri=CELEX:52019DC0640>.

30. A Renovation Wave for Europe - greening our buildings, creating jobs, improving lives : of 14.10.2020. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1603122220757&uri=CELEX:52020DC0662>.

31. Офіційний початок перемовин про вступ України до ЄС: Нові перспективи для наукової сфери – Національний фонд досліджень України. *Національний фонд досліджень України – Віримо в нашу перемогу!*. URL: <https://nrfu.org.ua/news/oficzijnyj-pochatok-peremovyn-pro-vstup-ukrayiny-do-yes-novi-perspektyvy-dlya-naukovoyi-sfery/>.

32. Tsikaloudaki K., Laskos K., Bikas D. On the Establishment of Climatic Zones in Europe with Regard to the Energy Performance of Buildings. *Energies*. 2011. Vol. 5, no. 1. P. 32–44. URL: <https://doi.org/10.3390/en5010032> (date of access: 29.08.2023).

33. Heating and cooling degree days - statistics - Statistics Explained. *Language selection | European Commission*. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Heating_and_cooling_degree_days_-_statistics.

34. Anna Magrini, Giorgia Lentini, Sara Cuman, Alberto Bodrato, Ludovica Marengo. From nearly zero energy buildings (NZEB) to positive energy buildings (PEB): The next challenge - The most recent European trends with some notes on the energy analysis of a forerunner PEB example. *Developments in the Built Environment Volume 3*, August 2020, 100019.

35. Дешко В. І., Наумчук О. С. Аспекти використання nZEB концепції для будівель у Центральній та Східній Європі. *Технології та інжиніринг*. 2023. № 1 (12). С. 41–51. URL: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.1.4>

36. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. На заміну ДБН В.2.6-31:2016 ; чинний від 2022-09-01. Вид. офіц. Київ, 2022. 27 с. URL: https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/2022-05-31/57a9e1c6-d9b2-40e2-bde7-00af878fc444.pdf.

37. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель. На заміну ДБН В.2.6-31:2006 ; чинний від 2017-05-01. Вид. офіц. Київ, 2017. 37 с.

URL: <https://gazobeton.org/sites/default/files/sites/all/uploads/DBN-V.2.6-31-2016-Teplova-izolyatsiya-budivel.pdf>.

38. Directive (EU) 2018/2001. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). Effective from 2018-12-21. Official edition. 2018. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC.

39. Renewable energy directive. *Energy*. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en#directive-20182001eu.

40. Energy statistics - an overview - Statistics Explained. *European Commission*. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview#Final_energy_consumption.

41. Renewables 2022. Analysis and forecast to 2027. IEA. 159 p. URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>.

42. Erhorn-Kluttig H., Erhorn H. National applications of the NZEB definition – The complete overview. Status February 2018. Fraunhofer Institute for Building Physics, Germany. 4 p. URL: https://epbd-ca.eu/wp-content/uploads/2019/06/CT1-Factsheet-National_applications_of_NZEB_definition.pdf.

43. Renewable Energy. *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy*. URL: <https://www.energy.gov/eere/renewable-energy>.

44. Омельченко В. Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни. *Центр Разумкова*. URL: <https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-viyny>.

45. Біоенергетичний потенціал аграрного сектору і промисловості - джерело енергетичної стійкості України. *Національний інститут стратегічних досліджень*.

URL: <https://niss.gov.ua/news/komentari-ekspertiv/bioenerhetychnyy-potentsial-aharnoho-sektoru-i-promyslovosti-dzherele>.

46. Біомаса – переваги та особливості. *Проект USAID «Муніципальна енергетична реформа в Україні»*. Громадянська мережа ОПОРА. URL: <https://merp.org.ua/articles/167-2015-04-14-06-55-50.html>.

47. Techno-economic analysis of combined heat pump and solar PV system for multi-family houses: An Austrian case study / T. Schreurs et al. *Energy Strategy Reviews*. 2021. Vol. 36. P. 100666. URL: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100666> (date of access: 01.09.2023).

48. Commission Recommendation (EU) 2016/1318 of 29 July 2016 on guidelines for the promotion of nearly zero-energy buildings and best practices to ensure that, by 2020, all new buildings are nearly zero-energy buildings. 2016. 12 p. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f2a71495-5876-11e6-89bd-01aa75ed71a1>.

49. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Чинний від 1999-12-01. Вид. офіц. 1999. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=14283.

50. ДСТУ Б EN 15251:2011. Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики. Чинний від 2013-07-01. Вид. офіц. Держ. підприємство "Укрархбудінформ", 2012. 71 с. URL: http://www.mathcentre.com.ua/download/dstu_en_15251-2011.pdf.

51. Building Energy Management Systems (BEMS) | Climate Technology Centre & Network | Tue, 11/08/2016. *Climate Technology Centre & Network*. URL: <https://www.ctc-n.org/technologies/building-energy-management-systems-bems>.

52. Home - NZEB. *NZEB*. URL: <https://nzeb.in/>.

53. Design and performance predictions of plus energy neighbourhoods – Case studies of demonstration projects in four different European climates / I. Andresen et

al. *Energy and Buildings*. 2022. Vol. 274. P. 112447.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112447> .

54. Resources & Tools - NZEB. *NZEB*. URL: <https://nzeb.in/resources-tools-main/>.

55. Economic assessment of increasing thermal protection of municipal buildings to modern European requirements / V. Deshko et al. *POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology*. 2022. No. 2. URL: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2022.261277> .

56. Masoso O., Grobler L. A new and innovative look at anti-insulation behaviour in building energy consumption. *Energy and Buildings*. 2008. No. 40. P. 1889–1894.

57. Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), EnergyPlus Engineering Reference—The Reference for EnergyPlus Calculations, LBNL, 2007.

58. eQUEST. *DOE2.com Home Page*. URL: <https://www.doe2.com/equest/>.

59. Muhammad A., Karinka S. Comparative energy analysis of a laboratory building with different materials using eQUEST simulation software. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 52. P. 2160–2165. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.187> .

60. Xing J., Ren P., Ling J. Analysis of energy efficiency retrofit scheme for hotel buildings using eQuest software: A case study from Tianjin, China. *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 87. P. 14–24. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.045> (date of access: 31.08.2023).

61. Design and simulation software for renewable energy | Valentin Software. *Valentin Software | Planungs- und Simulationssoftware für erneuerbare Energien*. URL: <https://valentin-software.com/en/>.

62. Othman R., Hatem T. M. Assessment of PV technologies outdoor performance and commercial software estimation in hot and dry climates. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 340. P. 130819. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130819>.

63. PVsyst – Logiciel Photovoltaïque. URL: <https://www.pvsyst.com/>.

64. Sunny Design - planning of complete energy systems | SMA Solar. *Willkommen bei SMA! | SMA Solar*. URL: <https://www.sma.de/en/products/apps-software/sunny-design>.

65. Zhang Y., Ma T., Yang H. A review on capacity sizing and operation strategy of grid-connected photovoltaic battery systems. *Energy and Built Environment*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.04.001>.

66. Дешко В. І., Наумчук О. С. Оцінка ефективності варіантів модернізації теплозабезпечення і теплового захисту офісної будівлі. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2023. № 204. С. 12–26. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2023/07/tht_zbirn_204.pdf.

67. Кінцеве енергоспоживання за 2007-2021 роки. *Державна служба статистики України*. URL: https://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2020/energ/z_post_pe/zp_pen_ue.xls.

68. Про бюджет Підгородненської міської територіальної громади на 2022 рік код бюджету 0456800000. *Головна | Підгородненська міська об'єднана територіальна громада*. URL: <https://pidgorodne.otg.dp.gov.ua/rishennya-gromadi/pro-byudzheth-pidgorodnenskoyi-miskoyi-teritorialnoyi-gromadi-na-2022-rik-kod-byudzhetu-0456800000-3>.

69. Реновація застарілого житла в Україні. Підводні камені. *finance.ua*. URL: https://finance.ua/ua/saving/renovacija-ustarevshego-zhilia-v-ukraine#headline_4.

70. DesignBuilder Software Ltd - Home. *DesignBuilder Software Ltd - Home*. URL: <https://designbuilder.co.uk/>.

71. EnergyPlus. *EnergyPlus*. URL: <https://energyplus.net/>.

72. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання : Держ. стандарт України від 06.10.2022 № 9190:2022. URL: https://gazobeton.org/sites/default/files/sites/all/uploads/dstu_91902022_energetichna_efektivnist_budivel_metod_rozrakh.pdf.

73. Тарифи для бізнесу. *Газопостачальна компанія "Нафтогаз"*. URL: <https://gas.ua/uk/business/tariffs>.

74. Офіційний сайт YASNO. URL: <https://kyiv.yasno.com.ua/business/b2b-tariffs>.

75. Carbon Footprint Calculator.

URL: <https://www.carbonfootprint.com/calculator.aspx>.

76. BFS 2011:6. Boverkets byggregler (föreskrifter och allmänna råd). Effective from 2011-04-19. Official edition. 2011. 146 p.

URL: https://www.boverket.se/contentassets/a9a584aa0e564c8998d079d752f6b76d/konsoliderad_bbr_2011-6.pdf.

77. Ринок електроенергії Швеції: виклики та можливості. *GOLAW*. URL: <https://golaw.ua/ua/insights/energy-alert/rinok-elektroenergiyi-shvecziyi-vikliki-ta-mozhливosti/>.

78. Управляющий директор энергоконсалтинговой компании Пер-Ерик Нильсен про те як працює енергоефективність в Швеції. *Українські новини*. URL: <https://ukranews.com/ua/interview/2276-per-erik-nilsen-pro-te-yak-pratsyuye-energoefektyvnist-v-shvetsiyi>.

79. Основні вимоги до будівель і споруд. Гігієна, здоров'я та захист довкілля : ДБН від 30.12.2021 № В.1.2-8:202. URL: <https://e-construction.gov.ua/files-token/552f981538bb40410d1c9ffcc72862fb>.

80. Yeretizian A., Karam J. Optimizing the use of natural ventilation while reducing energy cost_case study for retrofitting an old residential apartment in a Mediterranean city. *Energy and Buildings*. 2023. Vol. 296. P. 113371. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113371> (date of access: 22.10.2023).

81. I. Deshko V., Yu. Bilous I. Mathematical Models for Determination of Specific Energy Need for Heating and Cooling of the Administrative Building. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7, no. 4.3. P. 325. URL: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19826>.

82. Energy performance of buildings – Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads Part 1: Calculation procedures : ISO of 06.2017 no. 52016-1:2017.

83. Horvat I., Dovic D. Dynamic method for calculating energy need in HVAC systems. *Transactions of FAMENA* (Online). 2016. Vol. 40. P. 47–62. URL: https://www.researchgate.net/publication/304490732_Dynamic_method_for_calculating_energy_need_in_HVAC_systems.

84. Bilous, I.Yu., Deshko, V.I., Sukhodub, I. O. Building energy modeling using hourly infiltration rate. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. 96(4). Pp. 27–41. DOI:10.18720/MCE.96.3].

85. National energy Independence Strategy. Executive summary – energy for competitive Lithuania. URL: https://enmin.lrv.lt/uploads/enmin/documents/files/National_energy_independence_strategy_2018.pdf.

86. End-Use Prices Data Explorer – Data Tools - IEA. *IEA*. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/end-use-prices-data-explorer?tab=Overview>.

87. Буйак Н. А. 1. Оцінювання ефективності енергетичної системи будівлі в умовах теплового комфорту : дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2017. 214 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/21401/1/diss_Buiak.pdf.

88. Gas prices and gas contracts. *Statistiska Centralbyrån*. URL: <https://www.scb.se/en/finding-statistics/statistics-by-subject-area/energy/price-trends-in-the-energy-sector/gas-prices-and-gas-contracts/>.

89. Electricity prices and electricity contracts. *Statistiska Centralbyrån*. URL: <https://www.scb.se/en/finding-statistics/statistics-by-subject-area/energy/price-trends-in-the-energy-sector/electricity-prices-and-electricity-contracts/>.

90. ДСТУ Б EN 15459:2014. Енергетична ефективність будівель. Процедура економічної оцінки енергетичних систем будівництва. Чинний від 2014-07-14. Вид. офіц. Київ, 2015. URL: https://dnaop.com/html/62766/doc-ДСТУ_Б_EN_15459_2014.

91. Hermelink A. H., de Jager D. Evaluating our future - The crucial role of discount rates in European Commission energy system modelling. 2015. 44 p.

URL: https://www.researchgate.net/publication/324170334_Evaluating_our_future_-_The_crucial_role_of_discount_rates_in_European_Commission_energy_system_modelling?channel=doi&linkId=5ac36e3e45851584fa77fe9d&showFulltext=true.

92. Про затвердження Державної цільової економічної програми підтримки термомодернізації будівель до 2030 року : розпорядж. від 14.07.2025 № 694-р.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/694-2025-p#n9>.

93. Кіотський протокол до Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату : від 04.02.2004 р.
URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_801#Text.

94. Економічна статистика / Економічна діяльність / Енергетика. *Укрстат*.
URL: https://ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/energ.htm.

95. Енергетична стратегія України на період до 2030 р.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13#Text>.

96. Про схвалення Стратегії енергетичної безпеки : Розпорядж. Каб. Міністрів України від 04.08.2021 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/907-2021-p#Text>.

97. Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни. *Центр Разумкова*. URL: <https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-viyny>.

98. Енергобізнес. Розвиток малої гідроенергетики підніме промисловість та зміцнить безпеку України. *Журнал Енергобізнес*. URL: <https://e-b.com.ua/rozvitok-maloyi-gidroenergetiki-pidnime-promislovist-ta-zmicnit-bezpeku-ukrayini-5272>.

99. Теплові насоси у центральному опаленні. Досвід Данії. *Екодія*.
URL: <https://ecoaction.org.ua/teplovi-nasosy-u-opalenni.html>.

100. Дорожня карта розвитку біоенергетики в Україні до 2050 року і План дій до 2025 року. *UABIO*. URL: <https://saf.org.ua/wp-content/uploads/2021/06/Dorozhnya-karta-rozvytku-bioenergetyky-v-Ukrayini-do-2050-roku-i-Plan-dij-do-2025.pdf>.

101. Muzyka P., Urba S., Goncharenko L. ANALYSIS AND EFFICIENCY OF USING LAND RESOURCES IN UKRAINE. *Scientific Notes of Taurida National V.I.*

Vernadsky University. Series: Economy and Management. 2019. Vol. 4, no. 69.
URL: <https://doi.org/10.32838/2523-4803/69-4-33> (date of access: 22.10.2023).

102. Війна змінює структуру посівних площ - перші прогнози урожаю 2023 року. *Міністерство аграрної політики та продовольства України.*
URL: <https://minagro.gov.ua/news/vijna-zminyuye-strukturu-posivnih-ploshch-pershi-prognozi-urozhayu-2023-roku>.

103. Analysis of directions to increase the energy efficiency of office buildings in Ukraine to the nZEB level / V. Deshko et al. *Energy and automation.* 2023. Vol. 2023, no. 1. URL: [https://doi.org/10.31548/energiya1\(65\).2023.150](https://doi.org/10.31548/energiya1(65).2023.150).

104. Рецепти Житомирського енергопереходу: власні ресурси та ефективність. *Українська Енергетика.* URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/retsepty-zhytomyrskoho-enerhoperekhodu-vlasni-resursy-ta-efektyvnist>.

105. Урожай-2019: В Україні вже перевищено минулорічний збір зернових. *Міністерство аграрної політики та продовольства України.*
URL: <https://minagro.gov.ua/news/urozhaj-2019-v-ukrayini-vzhe-perevishcheno-minulorichnij-zbir-zernovih>.

106. Названо регіони з найвищою врожайністю соняшнику в Україні – Урожай Онлайн 2019. *Superagronom. Головний сайт для агрономів.*
URL: <https://superagronom.com/news/8289-nazvano-regioni-z-nayvischoyu-vrojajnistyu-sonyashniku-v-ukrayini--urojay-onlayn-2019>.

107. Названо області-лідери за валовим збором кукурудзи в Україні. *Superagronom. Головний сайт для агрономів.*
URL: <https://superagronom.com/news/8479-nazvano-oblasti-lideri-za-valovim-zborom-kukurudzi-v-ukrayini>.

108. Площа озимого ріпаку в Україні під урожай 2019 року майже на 30% вища за минулорічну. *Superagronom. Головний сайт для агрономів.*
URL: <https://superagronom.com/news/6087-ploscha-ozimogo-ripaku-v-ukrayini-pid-urojay-2019-roku-mayje-na-30-vischa-za-minulorichnu>

109. Пеллети из соломы. *Baza Drov*. URL: <https://baza-drov.com.ua/pelletyi/pelletyi-iz-solomyi>.

110. Пелети з лущиння соняшника. *Bioopt. Оптова та роздрібна торгівля пелетами та брикетами в Україні*. URL: <https://bioopt.com.ua/ua/p65546799-pellety-luzgi-podsolnechnika.html>.

111. Паливний брикет дубовий, із соняшника RUF, Piny Key, Nestro. *OLX*. URL: <https://www.olx.ua/d/uk/obyavlenie/palivniy-briket-duboviy-z-sonyashnika-ruf-piny-key-nestro-IDPYVKh.html?sd=1#0676b448f0>.

112. Паливні гранули з кукурудзи. *Bigl. Паливні пелети та брикети*. URL: <https://bigl.ua/ua/p1729136057-toplivnye-granuly-kukuruzy>.

113. Паливна пелета з соломи ріпака. *Flagma*. URL: <https://flagma.ua/uk/palyvna-peleta-z-solomy-ripaka-toplyvnaia-pelleta-hranula-s-rapsa-o14147906.html>.

114. Якість газу. *Оператор газотранспортних систем України*. URL: <https://tsoua.com/prozorist/yakist-gazu/>.

115. Гелетуха Г., Железная Т. Обзор технологий сжигания соломы с целью выработки тепла и электроэнергии. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. № 6. URL: https://scholar.google.com.ua/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=e2SQtQAAAAJ&citation_for_view=e2SQtQAAAAJ:bKqednn6t2AC.

116. Склярєнко Є., Воробйов Л. Енергетичні характеристики композитних біопалив на основі лущиння соняшнику. *Traektoria Nauki=Path of Science*. 2019. №3. С. 3001 – 3010. URL: [Energy Characteristics of Composite BioFuel Based on Sunflower Husk | Sklyarenko | Path of Science](#)

117. Желєзна Т. АГРОБІОМАСА - основні види та характеристики. 36 с. URL: https://uabio.org/wp-content/uploads/2022/03/ABH_D6.3_Training_AgroBM_Zheliezna_full.pdf.

118. Переробка соломи в паливні брикети. *Біопаливо та котли України*. URL: <https://bio.ukr.bio.ua/articles/2945>.

119. ТОП-6 виробників пелет в Україні. *Агробізнес сьогодні*. 2020.
URL: <http://agro-business.com.ua/agrobusiness/item/16443-top6-vyrobnykiv-pelet-v-ukraini.html>.

120. Котел Ретра-4М Віо 550 кВт промисловий на щепі від заводу виробника. Доставка і представництва по Україні. *Завод опалювальної техніки Ретра - виробництво твердопаливних котлів. Доставка по Україні*.
URL: <https://retra.com.ua/kotel-retra-4m-550-kvt>.

121. Ідмар KW-GSN 350 кВт: продаж, ціна у Києві. *""Теплопункт""*.
URL: <https://tpt.com.ua/ua/p88677319-idmar-gsn-350.html>.

122. Пелетний котел 150 кВт FOCUS, діапазон потужності (50-175 кВт). *"Котел-Клуб м.Харків"*. URL: <https://kotel-club.shop/p1413180140-pelletnyj-kotel-150.html>.

123. Пеллетный котел Ретра 4М Trio 150 кВт. *Тепла хата*.
URL: <http://teplahata.biz.ua/tverdotoplivnye-kotly/pelletnye-kotly/retra-4m150/>.

124. Пелетний котел КТ-3Е-SH ALTEP 125-150 кВт. *«Дом каминов»*.
URL: <https://kamin-kupi.com.ua/ua/p76744599-pelletnyj-kotel-altep.html>.

125. Типи і види теплових насосів, які бувають теплові насоси. *https://dimplex.org.ua*. URL: <https://dimplex.org.ua/blog/typy-teplovyyh-nasosov-kakie-oni-byvayut>.

126. Опалення тепловим насосом. Особливості опалювальних систем. *FREENERGY*. URL: <https://freenergy.com.ua/opalennya-teplovim-nasosom/>.

127. VDI 4650. Blatt 1: Calculation of the Seasonal Coefficient of Performance of Heat Pumps - Electric Heat Pumps for Space Heating and Domestic Hot Water. Official edition. 2016. 58 p.

128. ДСТУ EN 14511-2:2016. Кондиціонери повітряні, агреговані охолоджувачі рідини та теплові насоси з компресором, оснащеним електроприводом для обігрівання й охолодження приміщень. Частина 2. Умови випробування (EN 14511-2:2013, IDT). На заміну ДСТУ EN 14511-2:2007 ; чинний від 2017-10-01. Вид. офіц. 2016.

129. Sims R. E., Schock R. N. Energy Supply. URL: <http://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg3-chapter4-1.pdf>.
130. 5 facts about the EU's goal of climate neutrality. *European Council Of The European Union*. URL: <https://www.consilium.europa.eu/en/5-facts-eu-climate-neutrality/>.
131. Паризька угода : Угода Орг. Об'єдн. Націй від 12.12.2015 : станом на 14 лип. 2016 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_161#Text.
132. Buildings – Topics - IEA. *IEA*. URL: <https://www.iea.org/topics/buildings>.
133. Why The Built Environment – Architecture 2030. *Architecture 2030*. URL: <https://architecture2030.org/why-the-built-environment/>.
134. GHG Protocol. *European Climate Pact*. URL: https://climate-pact.europa.eu/resources/climate-policy/ghg-protocol_en.
135. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року : Розпорядж. Каб. Міністрів України від 21.04.2023 № 373-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-p#Text>.
136. News | Держенергоефективності України. *Держенергоефективності України*. URL: <https://saee.gov.ua/uk/news>.
137. Розрахунок викидів забруднюючих речовин та парникових газів в атмосферу при спалюванні природного газу. *Головне управління статистики у Тернопільській області*. URL: <http://www.te.ukrstat.gov.ua/files/respondent/2tp.pdf>.
138. ГДК 34.02.305-2002. Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. На заміну РД 34.02.305-90 ; чинний від 2002-07-01. Вид. офіц. 2002.
139. Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель : Наказ М-ва регіон. розвитку, буд-ва та житлово-комун. госп-ва України від 11.07.2018 № 169 : станом на 12 верес. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0822-18#Text>.

140. Виробництво е/е в Україні у січні-квітні 2023 року зменшилося на 19,4%. *Українська Енергетика*. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/vyrobnytstvo-ee-v-ukraini-u-sichni-kvitni-2023-roku-zmenshylosia-na-194>.

141. Rehm T. E. Advanced nuclear energy: the safest and most renewable clean energy. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2023. Vol. 39. P. 100878. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coche.2022.100878>.

142. IAEA Office of Public Information and Communication. International Day of Clean Energy: Why Nuclear Power?. *International Atomic Energy Agency | Atoms for Peace and Development*. URL: <https://www.iaea.org/newscenter/news/international-day-of-clean-energy-why-nuclear-power>.

143. У разі зупинки роботи АЕС в Україні викиди CO₂ збільшаться на 70 млн т в рік. *Exploration&Production Consulting (EXPRO)*. URL: <https://expro.com.ua/novini/u-raz-zupinki-roboti-aes-v-ukran-vikidi-so2-zblshatsya-na-70-mln-t-v-rk>.

144. Renewable energy statistics - Statistics Explained. *Eurostat*. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics.

145. Cheung J. Carbon Pricing and Carbon Tax in Sweden | Earth.Org. Earth.Org. URL: <https://earth.org/carbon-tax-in-sweden/>.

146. Mengden, Alex. “Carbon Taxes in Europe.” Tax Foundation, 5 Sept. 2023, Online]. Available: <https://www.taxfoundation.org/data/all/eu/carbon-taxes-in-europe-2023/>.

147. Renewable energy for heating & cooling up to 25% in 2022. Language selection | European Commission. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20240227-2>.

148. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 № 27-28 : станом на 21 серп. 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/en/2019-19/ed20240918#Text>.

149. Про внесення змін до деяких законів України щодо запобігання зловживанням на оптових енергетичних ринках : Закон України від 10.06.2023 № 77 : станом на 14 січ. 2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/en/3141-20?lang=en#Text>.

150. Regulation (EU) No 1227/2011 of the European Parliament and of the Council of 25 October 2011 on wholesale energy market integrity and transparency : of 25.10.2011 : as of 5 July 2024. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2011.326.01.0001.01.ENG&toc=OJ:L:2011:326:TOC.

151. Z. Gjorgievski et al. (2022). Virtual net-billing: A fair energy sharing method for collective self-consumption. *Energy*. P. 124246. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124246>.

152. Dufo-López R., Bernal-Agustín J. L. (2015) A comparative assessment of net metering and net billing policies. Study cases for Spain. *Energy*. Vol. 84. P. 684–694. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.031>.

153. K. G. H. Kong et al. (2022) Shaving electric bills with renewables? A multi-period pinch- based methodology for energy planning. *Energy*. Vol. 239. P. 122320. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122320>.

154. Assessment of strategies for low-carbon regeneration of buildings in Eastern Europe / N. Buyak et al. *Energy*. 2025. Vol. 325. P. 136069. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136069>.

155. PV*SOL – Take your solar installations to the next level of efficiency. PV*SOL – Plan and design better pv systems with professional solar software | PV*SOL and PV*SOL premium. URL: <https://pvsol.software/en/features-pricing#features>.

156. Найкращий напрямок для сонячних панелей. *Рішення для зберігання енергії, система сонячної енергії - Uniz Solar*. URL: <https://uk.unizsolar.com/news/industry-news/best-direction-for-solar-panels-to-face.html>.

157. Сонячні електростанції типу “Схід-Захід” | AVENSTON. *Авенстон*. URL: <https://avenston.com/articles/east-west-case/>.

158. Схема підключення сонячних панелей: повний гід з оптимального з’єднання. *Solar Invest Group*. URL: <https://www.sig.energy/shema-pidklyuchennya-sonyachnyh-panelej-povnyj-gid-z-optymalnogo-zyednannya/>.

159. Декарбонізація секторів економіки України. *Екодія*. URL: <https://ecoaction.org.ua/dekarbonizatsia-ekonomiky-ua.html>.

160. Engineering Reference : EnergyPlus™ Version 22.1.0 Documentation. U.S. Department of Energy, 2022. 1774 p. URL: https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v22.1.0/EngineeringReference.pdf.

ДОДАТОК 1



МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ ГРОМАД, ТЕРИТОРІЙ
ТА ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ
(МІНІНФРАСТРУКТУРИ)

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
„ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ”
(ДП НДІБК)



юридична адреса: вул. І. Кліменка, 5/2, м. Київ-37, 03680, поштова адреса: вул. Преображенська, 5/2,
м. Київ-37, 03037; тел. (044) 249-38-00, (050) 415-36-22
www.ndibk.com; e-mail ndibk@ndibk.gov.ua; ndibk-office@ndibk.gov.ua; код ЄДРПОУ 02495431

27.11.2023 № 208-1675

ДОВІДКА

використання результатів дисертаційної роботи аспірантки

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

НАУМЧУК ОЛЕНИ СЕРГІЇВНИ

В дисертаційній роботі Наумчук О.С. проведено оцінку енергоефективності офісної будівлі при покращенні теплової оболонки будівлі до регіональних та європейських вимог за використання різних джерел теплозабезпечення: котла, що працює на природному газі; котла, що працює на біомасі; теплового насоса, що працює у комбінації з котлом на біомасі та додатковим електричним нагрівачем. Здійснено оцінку результатів динамічного моделювання обсягу генерації теплової енергії. Проведено оцінку скорочення викидів діоксиду вуглецю при заміщенні природного газу відновлювальними джерелами енергії.

Ефективність використання приведених у роботі методів забезпечення підвищення енергоефективності при реалізації концепції модернізації будівлі до майже нульового споживання енергії будівлями оцінена на основі змін інтегральних витрат на енергозабезпечення.

Результати зазначених наукових досліджень використовуються ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» при розробці сучасних стандартів щодо методів оцінки енергоспоживання будівель та енергоефективності інженерних систем.

Директор ДП НДІБК,
докт. техн. наук, проф.



Г.Г. Фаренюк

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор навчально-наукового
інституту атомної та теплової енергетики
Національного технічного
університету України
«Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»



д.т.н., проф.

Євген ПИСЬМЕННИЙ

2023р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи аспірантки кафедри
теплової та альтернативної енергетики Наумчук О.С.
у навчальний процес КПІ ім. Ігоря Сікорського

Комісія у складі завідувачки кафедри теплової та альтернативної енергетики д.т.н., проф. Черноусенко О.Ю. та голови методичної комісії ННІ АТЕ к.т.н., доц. Шевеля Є.В. склали цей акт про те що результати дисертаційної роботи Наумчук О.С. використовуються у навчальному процесі кафедри теплової та альтернативної енергетики КПІ ім. Ігоря Сікорського для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика», освітньої програми «Енергетичний менеджмент та інжиніринг теплоенергетичних систем».

Зокрема:

- динамічні моделі офісної будівлі для розроблення комп'ютерних практикумів з дисциплін «Прикладні задачі енергозбереження» та «Методи аналізу енергоефективності будівель»;

- методика завдання погодинних графіків експлуатації та роботи інженерних систем будівель під час розробки практичних та лабораторних занять з дисципліни «Прикладні задачі енергозбереження»;

- визначення економічної ефективності заходів енергоефективності під час розробки практичних занять з дисципліни «Основи інжинірингу життєвого циклу проєктів з енергоефективності».

Голова методичної комісії ННІ АТЕ,
к.т.н., доц.



Євген ШЕВЕЛЬ

Завідувачка кафедри теплової
та альтернативної енергетики,
д.т.н., проф.



Ольга ЧЕРНОУСЕНКО

ДОДАТОК 2

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. N. Buyak, V. Deshko, A. Borodinecs, I. Bilous, O. Naumchuk та I. Sukhodub, “Assessment of strategies for low-carbon regeneration of buildings in Eastern Europe”, *Energy*, т. 325, с. 1–14, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136069>. (іноземне видання, включене до бази даних **Scopus**, квартиль **Q1**).
2. V. Deshko, I. Bilous, N. Buyak та O. Naumchuk, “Prospects for the Use of Renewable Energy Sources while Increasing the Energy Efficiency Level of Office Buildings to the Level of nZEB”, *Rocznik Ochrona Środowiska*, т. 25, с. 148–158, 2023. <https://doi.org/10.54740/ros.2023.015>. (іноземне видання, включене до бази даних **Scopus**, квартиль **Q3**).
3. В. І. Дешко та О. С. Наумчук, “Оцінка ефективності варіантів модернізації теплозабезпечення і теплового захисту офісної будівлі”, *Зб. наук. пр. укр. держ. ун-ту залізн. трансп.*, № 204, с. 12–26, 2023. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.204.2023.283743>. (фахове видання).
4. В. І. Дешко, І. Ю. Білоус, Н. А. Буяк та О. С. Наумчук, “Аналіз напрямків підвищення енергоефективності офісних будівель в Україні до рівня nZEB”, *Енергетика і автоматика*, № 1 (2023), с. 150–164, 2023. [https://doi.org/10.31548/energiya1\(65\).2023.150](https://doi.org/10.31548/energiya1(65).2023.150). (фахове видання).
5. В. І. Дешко та О. С. Наумчук, “Аспекти використання nZEB концепції для будівель у Центральній та Східній Європі”, *Технології та інжиніринг*, № 1 (12), с. 41–51, 2023. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.1.4>. (фахове видання).
6. В. І. Дешко, Н. А. Буяк, І. Ю. Білоус та О. С. Наумчук, “Економічна оцінка підвищення теплового захисту громадських будівель до сучасних європейських вимог”, *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 2, с. 7–18, 2022. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2022.261277>. (фахове видання).

7. Наумчук О., Яценко О., Дешко В. Особливості техніко-економічної оцінки споживання енергії будівлями. *Енергетика. Екологія. Людина*: матеріали XII науково-технічної конференції Інституту енергозбереження та енергоменеджменту, м. Київ, 7-8 травня 2020 р. – Київ: ІЕЕ, 2020. С. 269–272.

8. Наумчук О., Дешко В. Динаміка тарифів на енергетичні носії як ключовий фактор впливу на економічну оцінку енергетичних систем. *Аспірантські читання пам'яті професора Артура Праховника, присвячені 75-річчю ІЕЕ*: матеріали читань (збірник наукових праць), м. Київ, 10-11 березня 2021 р. – Київ: ІЕЕ, 2021. С. 19–21.

9. Наумчук О. Будівлі, споживання енергії яких близьке до нуля, як метод усунення залежності від імпортованого викопного палива”. *Енергетика. Екологія. Людина*: матеріали XIV науково-технічної конференції Інституту енергозбереження та енергоменеджменту, м. Київ, 2-3 червня 2022 р. – Київ: ІЕЕ, 2022. С. 75-80.

10. Наумчук О., Дешко В. Оцінювання модернізації офісних будівель у напрямку nZEB за різних економічних сценаріїв. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики*: матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених і студентів, м. Київ, 25 квіт. 2023 р. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, видавництво «Політехніка», С. 238-239.