



<https://doi.org/10.15407/eip2021.04.74>

УДК 330.34; 332.14; 338.2; 620.9

JEL R11, R58, Q01, Q2, Q3, Q4, Q54, O1, O2

Олександр Дячук¹

Андрій Семенюк²

МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ОЦІНКИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПЕРЕХОДУ НА ПРИКЛАДІ ЖИТОМИРСЬКОЇ ОБ'ЄДНАНОЇ ТЕРИТОРІАЛЬНОЇ ГРОМАДИ

Представлено результати сценарного моделювання та оцінка здійснення енергетичного переходу до 2050 р. у Житомирській об'єднаній територіальній громаді (ОТГ), що передбачає зміну сьогоднішньої, заснованої на викопних вуглецеємних енергоресурсах, моделі функціонування енергетики ОТГ на найсучаснішу – таку, що на 100% використовує відновлювані джерела енергії (ВДЕ), задовольняючи при цьому усі енергетичні потреби і сприяє сталому розвитку ОТГ згідно з відповідними цілями ООН. Для цього вперше розроблено оптимізаційну економіко-математичну модель TIMES-Житомир (аналогів в Україні немає), що базується на національній моделі TIMES-Україна і включає 647 енергетичних технологій – уже наявних або таких, які найближчими роками можуть бути представлені на вітчизняному ринку.

Для розробки моделі TIMES-Житомир було опрацьовано малодоступну місцеву енергетичну статистику, за результатами якої за формою Міжнародного енергетичного агентства вперше сформовано енергетичний баланс для великого міста України – Житомира, а також побудовано базову енерго-технологічну систему Житомирської ОТГ.

Із використанням моделі TIMES-Житомир уперше розроблено та змодельовано чотири сценарії розвитку енергетичної системи Житомирської ОТГ, що охоплює усі економічні сектори, у т.ч. домогосподарства. Перший сценарій – базовий – показує можливу динаміку розвитку енергетичної системи без проведення цілеспрямованої політики з

¹ Дячук, Олександр Анатолійович – канд. техн. наук, провідний науковий співробітник ДУ "Інститут економіки та прогнозування НАН України" (вул. П.Мирного, 26, Київ, 01011, Україна), ORCID: 0000-0002-3281-6536, e-mail: diachuk@ief.org.ua

² Семенюк, Андрій Олегович – молодший науковий співробітник ДУ "Інститут економіки та прогнозування НАН України" (вул. П.Мирного, 26, Київ, 01011, Україна), ORCID: 0000-0003-2308-4713, e-mail: a_semeniuk@ief.org.ua



енергоефективності, розвитку ВДЕ тощо. Три інших сценарії націлені на дослідження можливостей переходу ОТГ до 2050 року на 100% відновлюваної енергетики та використання екологічно-чистих технологій.

Результати моделювання підтвердили, що наявний ресурс відновлюваної енергетики та технологічний потенціал дозволяє Житомирській ОТГ здійснити енергетичний перехід до 2050 р. в економічно доцільний та соціально прийнятний спосіб, суттєво скоротивши енергоємність і вуглецеємність місцевої економіки, практично усунувши викиди парникових газів (ПГ), підвищивши добробут громадян та створивши щонайменше 10 тис. нових робочих місць. Це також суттєво сприятиме Житомирській ОТГ досягнути щонайменше десяти із сімнадцяти Цілей сталого розвитку ООН.

Представлені результати дослідження завдяки своїй новизні та актуальності поставленого завдання можуть бути використані науковцями в рамках їхніх досліджень, органами влади та експертами при розробленні стратегій, планів, програм економічного, енергетичного, транспортного, кліматичного, екологічного та іншого характеру не тільки на локальному, а й на регіональному та національному рівнях. Також їх можна вважати одним із перших кроків у підготовці комплексної стратегії розвитку Житомирської ОТГ, спрямованої на досягнення кліматичної нейтральності відповідно до сучасних цілей Європейського Союзу.

Ключові слова: зміна клімату, сталий розвиток, енергетичний перехід, відновлювана енергетика, моделювання та прогнозування, модель TIMES

Постановка проблеми. Починаючи з кінця ХХ ст. людство зіткнулося із надзвичайним викликом – зміною клімату, що вплинула і продовжує нарощувати свій негативний вплив на природні системи та безпосередньо людей на всіх континентах. На цей момент зростаюча температура атмосфери, океанів, льодовиків, що тануть, аномальна та екстремальна погода (посухи, повені), як і зростаючий рівень Світового океану, є безсумнівними фактами.

У 2015 р. 195 країн світу ухвалили Паризьку угоду, в якій зміна клімату визнається нагальною і потенційно необоротною загрозою для людства та планети і для її можливого вирішення потрібно утримати приріст середньої температури на планеті набагато нижче за 2°C порівняно з доіндустріальним рівнем і докласти зусиль до обмеження зростання температури до 1,5°C [1].

Упродовж 1880–2012 рр. глобальна середня температура поверхні материків та океанів підвищилася на 0,85°C. Згідно зі звітом Всесвітньої метеорологічної організації "Стан глобального клімату 2020" [2] у 2020 р. – як в одному із трьох найтепліших зафіксованих років – середня глобальна



температура була на 1,2°C вища за доіндустріальний рівень, а також існує 90-відсоткова ймовірність, що принаймні один рік – між 2021 та 2025 роками – стане найтеплішим за усю історію спостережень і 40-відсоткова ймовірність того, що в цей період позначку у 1,5°C буде перетнуто.

Використання викопних енергетичних ресурсів, таких як вугілля, нафтопродукти, природний газ, негативно впливає на глобальну кліматичну ситуацію, оскільки супроводжується вивільненням парникових газів (ПГ) [3]. Водночас, за різними оцінками, 70–80% енергії споживається в містах і на них же лежить відповідальність за понад 60% усіх викидів ПГ [4]. Це зумовлює необхідність впровадження політики та заходів у енергетичному секторі, спрямованих на боротьбу зі зміною клімату та поліпшенням екологічного становища не лише на рівні центрального уряду, а й місцевих органів влади [5].

Муніципальна енергетика є важливим елементом енергетичної системи країни, адже надаючи населенню, локальним підприємствам та організаціям енергетичні послуги, вона суттєво впливає на розвиток соціально-економічних взаємовідносин у регіонах і країні загалом. Проте через низьку енергоефективність, що обумовлена насамперед моральним і фізичним зношуванням обладнання, мереж, браком коштів на їх модернізацію, і енергетика України загалом, і муніципальна енергетика зокрема не в змозі працювати ефективно та надійно, тож продукує викидів ПГ значно більше, ніж у європейських країнах, маючи при цьому значний потенціал для декарбонізації.

Напрями розв'язання проблеми. Найпоширенішою у світі програмою підтримки локальної декарбонізації є Угода мерів [6]. Завдяки своїм унікальним характеристикам та можливостям вона позиціонується як виняткова модель широкого руху та багаторівневого управління, що об'єднує місцеві, регіональні та національні сили за підтримки державних урядів. Вона була започаткована в ЄС у 2008 р., а наразі її підписантами є понад 7000 органів місцевої влади далеко за межами Європи. Згідно з положеннями Угоди мерів, місцеві та регіональні органи влади брали на себе добровільні зобов'язання зменшити викиди CO₂ щонайменше на 20% до 2020 р. та на 40% до 2030 р., *впроваджуючи заходи з енергоефективності та енергозбереження та розширюючи використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ)* – і, таким чином, сприяючи *низьковуглецевому економічному розвитку* або, іншими словами, – **енергетичному переходу** та підвищенню якості життя. Одним із основних інструментів планування заходів із декарбонізації в рамках угоди мерів є Плани дій зі сталого розвитку (ПДСЕР) до 2020 р. [7] та Плани дій зі сталого розвитку та клімату (ПДСЕРК) до 2030 р. [8]. Станом на початок 2021 р., в Україні 284 місцеві органи влади долучилися до Угоди мерів, у тому числі такі великі міста, як Київ, Харків, Дніпро, Запоріжжя, Львів та Житомир.

Багато міст не обмежуються зобов'язаннями щодо Угоди мерів та ставлять собі вищі цілі стосовно декарбонізації, використання низьковуглецевих джерел енергії та підвищенню енергоефективності. Наприклад, в законодавстві семи штатів США (зокрема, Нью-Йорка, Огайо, Каліфорнії, Нью-Джерсі та Род-Айленду) для муніципалітетів прописана можливість обирати постачальників енергетичних послуг. Такою можливістю



широко послуговуються ї, наприклад у Каліфорнії, – найбільш прогресивному стосовно розвитку ВДЕ штаті, 42 міста та округ Санта-Крус усю свою електроенергію отримують від постачальників "чистої" енергії [9]. Ще є п'ять таких міст у інших штатах – у них менші повноваження з вибору постачальників компенсуються власними потужностями ВДЕ. Кількість муніципалітетів та округів, які задекларували прагнення досягти повного забезпечення електроенергією від ВДЕ, у березні 2021 р. становить 173 і 6 відповідно. Українські міста Житомир, Львів, Кам'янець-Подільський, Чортків, Тростянець, а також Баранівська об'єднана територіальна громада (ОТГ) та Асоціація малих міст України (АММУ) також задекларували мету до 2050 року перейти на споживання всієї енергії з відновлюваних джерел [10].

Великі міжнародні інвестиційні банки переспрямовують свої інвестиції з вичерпного палива у "зелені" проекти. Наприклад, Європейський банк реконструкції та розвитку (ЄБРР) планує до 2030 р. вкласти 1 трлн євро у проекти з протидії зміні клімату та підтримки сталості навколишнього середовища, в числі яких і будівництво об'єктів ВДЕ [11]. ЄБРР є найбільшим іноземним інвестором в Україну за усі часи незалежності, тому демонстрація місцевими органами влади намірів діяти в напрямі низьковуглецевого розвитку дасть можливість залучити у розвиток власних громад значні інвестиції.

Мета та завдання дослідження. Актуальність проблеми декарбонізації та нові орієнтири її умови розвитку ОТГ обумовлюють необхідність пошуку в Україні нових засобів підвищення ефективності прийняття рішень щодо розвитку локальних систем енергозабезпечення. Враховуючи складність енергетичних систем, велику кількість технічних, соціально-економічних, просторових та екологічних факторів, а також довгостроковість проблеми, без використання сучасних інформаційних засобів та математичних моделей реалізувати ці завдання надто складно.

Економіко-математичні моделі є найпоширенішим способом вивчення існуючого стану та перспектив розвитку енергетичного функціонування міста чи ОТГ. За їх допомоги можна адекватно відобразити всю енергетичну систему ОТГ, представляючи енергетичні процеси за детальною технологічною структурою із визначеними економічними та екологічними параметрами, а також проводити багатоваріантні розрахунки її розвитку за різними сценаріями. Математичні моделі можуть також акцентувати увагу і на окремих аспектах розвитку енергетичних систем (наприклад, розрахунку вартості електроенергії, оцінках кількості нових робочих місць та економічних наслідків, потенціалу енергозбереження, попиту на енергоресурси, необхідних інвестицій тощо) [12, 13].

В європейських країнах та США великої популярності набули квазідинамічні оптимізаційні моделі енергетичних систем, що використовуються для стратегічного планування та прогнозування енергозабезпечення на локальному, національному, регіональному, міжрегіональному та глобальному рівнях. Найбільш поширеними серед них є динамічні оптимізаційні моделі типу TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System), що використовуються у понад 70 країнах світу більше ніж 80



науково-дослідними центрами [14]. Цільовою функцією в таких моделях є мінімізація зведених витрат енергосистеми при низці обмежень.

У секторі прогнозування розвитку ПЕК ДУ "Інститут економіки та прогнозування НАН України" розроблено модель енергетичної системи України [15]. Більш детальну інформацію щодо структури та методології розробки моделі TIMES-Україна наведено в [16, 17].

На основі національної моделі TIMES-Україна розроблено та апробовано муніципальну модель енергетичної системи Житомирської ОТГ, що відбувалося за підтримки неурядової організації "350.org" та Житомирської міської ради [18]. Метою цього дослідження було проведення моделювання та оцінка шляхів здійснення енергетичного переходу в Житомирській ОТГ до 2050 р. за різними сценаріями. Основні завдання дослідження полягали в аналізі сучасного стану енергетики Житомирської ОТГ, збиранні даних, безпосередній розробці моделі TIMES та низки сценаріїв і постоптимізаційному аналізі, ґрунтуючись на іноземному та українському досвіді.

Аналіз досліджень і публікацій. Про актуальність моделювання енергетичного переходу в іноземних муніципалітетах свідчить низка виконаних за останні роки досліджень [19–22], зокрема, з використанням TIMES-моделей [23, 24]. Для прикладу, дослідження [22] базується на використанні модельного інструментарію EnergyPLAN, який відтворює всю енергетичну систему задля розроблення стратегії переходу на відновлювані джерела енергії міста Ольборг (населення 211 тис. осіб). Інструментарій дозволяє обрати режим економічного або ж технічного моделювання і для цього дослідження було обрано другий, що означає надання пріоритету тим технологіям генерації енергії, що мають найвищу ефективність перетворення і використовують локальні енергетичні ресурси, а їх економічна ефективність відходить на другий план.

Автори [23] використовують модель TIMES для мінімізації приведених витрат при прогнозуванні низьковуглецевого розвитку систем опалення та гарячого водопостачання у Швеції трьох різних типів: індивідуального, локальної мережі та централізованого. При цьому попит на зазначені послуги заданий екзогенно, як і взаємозв'язки між змодельованою системою та сектором електроенергетики, транспорту та житлових будівель. У статті [24] на прикладі міста Осло (населення понад 650 тис. осіб) показано, як міста можуть здійснити сталий енергетичний перехід. Дослідження базується на використанні оптимізаційної моделі TIMES для віднаходження оптимальних шляхів скорочення викидів ПГ та зменшення енергоспоживання. Оскільки електроенергія в Норвегії переважно виробляється на гідроелектростанціях, то потенціал декарбонізації електроенергетичного сектора досить малий, а тому дослідження більшою мірою зосереджене на транспортному секторі, де потенціал декарбонізації більш суттєвий і може бути втілений шляхом повсюдного використання так званих електричних відновлюваних палив (e-fuels), у тому числі водню, а також завдяки розвитку велотранспорту. Також у цьому дослідженні визначено економічно доцільні заходи із декарбонізації з метою повної відмови в 2050 р. від викопного палива.



В Україні економіко-математичне моделювання національних енергосистем тільки набуває популярності, проте розповсюджене недостатньо, а кількість досліджень щодо моделювання енергетичних трансформацій на муніципальному чи регіональному рівнях вкрай мала. Тим не менше, приєднання українських міст до Угоди мерів [6] створило на такі дослідження попит з боку органів місцевого самоврядування і, тим самим, спровокувало появу низки робіт щодо прогнозування паливно-енергетичних балансів та динаміки викидів ПГ у рамках підготовки муніципальних планів дій сталого енергетичного розвитку та клімату до 2030 р.

Наприклад, муніципальний енергетичний план м. Запоріжжя на 2014–2030 рр. [25] враховує ключові положення Директив ЄС та зобов'язання в рамках Угоди мерів і передбачає побудову ощадливої та "зеленої" енергетики міста завдяки повному оновленню міських громадських та житлових будівель, систем енергозабезпечення та ін. Для розроблення цього плану його авторами було сформовано паливно-енергетичний баланс міста, який побудовано як суму товарних балансів основних підприємств комунальної інфраструктури, однак без урахування промисловості та автомобільного транспорту; розрахунки прогнозного споживання паливно-енергетичних ресурсів та їхньої вартості зроблені на підставі прогнозної моделі розвитку міста. Тобто повноцінної моделі енергетичних потоків міста Запоріжжя авторами не було розроблено. Більше про плани дій сталого енергетичного розвитку до 2030 р. деяких міст можна подивитися на сайті <http://seap.ecosys.com.ua/>

Серед наукових публікацій практично відсутні комплексні модельні дослідження трансформації усіх енергетичних потоків у містах чи територіальних громадах України. Натомість досить поширені публікації з результатами моделювання транспортних та пасажирських потоків [26, 27], впливу транспортних потоків на навколишнє середовище міста [28], прогнозування обсягів накопичення твердих комунальних відходів міста [29], моделювання окремих аспектів сталого розвитку міст [30]. Окремо досліджуються проблеми моделювання процесів розвитку регіональної енергетики [31].

Методологія дослідження. У цьому дослідженні під Житомирською об'єднаною територіальною громадою розуміється місто Житомир та село Вереси (станом на початок 2020 р.). У такому ж незмінному складі ця ОТГ є об'єктом дослідження протягом усього горизонту моделювання.

Початковим завданням було визначення поточного стану енергетичного сектора Житомирської ОТГ, для чого була опрацьована відповідна статистична база [32–35]. Базовим роком для моделювання обрано 2017 р., оскільки на той момент він був останнім із найбільш повною інформацією. У ході оброблення даних було виявлено численні розбіжності у статистичній звітності зі споживання окремих видів енергоресурсів, недостатню деталізацію статистичної інформації, відсутність даних щодо споживання населенням та іншими споживачами моторного палива. Зрештою, провівши необхідні розрахунки, на основі зазначених статистичних джерел даних було сформовано енергетичний баланс міста Житомир (табл. 1), який використано на наступних етапах дослідження.



Таблиця 1.

Енергетичний баланс міста Житомир за 2017 р.

Постачання та споживання	Вугілля та торф, т	Нафто-продукти, т	Природний газ, тис. м ³	Біоналиво та відходи, м ³	Електро-енергія, МВт·год	Тепло-енергія, Гкал
Виробництво	-	-	-	-	-	-
Постачання з-поза меж ОТГ	2943	31477	208450	24310	674270	-
Зміна запасів	-	-	-	-	-	-
Загальне постачання первинної енергії	2943	31477	208450	24310	674270	0
Статистичні розбіжності	-	-	-	-	-	-
Електростанції					361	-
Виробництво тепла	-349		-71643			738900
Житомиртеплокомуненерго (ЖТКЕ)		-	-68415	-	-595	
Інші підприємства з перетворення	-349	-8	-3227	2953	-	-
Втрати при транспортуванні та розподіленні	-	-	-27950	-	-87525	-49307
Кінцеве споживання	2594	31470	108857	21357	586745	689593
Транспорт		30800	2269	-	14900	-
Автомобільний	-	30800	2269	-	-	-
Електротранспорт	-	-	-	-	14900	-
Інші	2594	176	106588	21357	586745	689593
Побутовий сектор (населення)	-	-	78000	-	160746	517195
Промисловість	2594		22388	19004	242405	-
Сфера послуг (у т.ч., бюджетні, комунальні установи)	-	176	6200	2353	168695	172398
Несенергетичне використання		493	-	-	-	-

Джерело: складено авторами.



Крім того, вперше було розроблено схему енергетичної системи Житомирської ОТГ (рис. 1), що відображає технологічний ланцюжок виробництва, трансформації та споживання енергетичних ресурсів. На рис. 1 пунктиром позначено перспективні технології, що можуть з'явитися в процесі моделювання розвитку енергетики Житомирської ОТГ.

Модель TIMES-Житомир є оптимізаційною моделлю енергетичних потоків Житомирської ОТГ. Енергетична система в моделі представлена єдиним регіоном і складається з шести секторів (рис. 1): сектора постачання енергії (виробництво, імпорт, а також виробництво вторинних енергоресурсів); виробництва електроенергії і тепла; промисловості; транспорту; побутового сектора (населення); торгівлі та послуг. Тобто структура моделі відповідає структурі енергетичного балансу України [36] за формою MEA, за винятком лише відсутності сектора сільського господарства. На сьогодні в моделі TIMES-Житомир враховано 647 технологій, база даних моделі оновлена за даними 2017 р. і відкалібрована за цим же роком.

Майбутній розвиток енергетики міста чи країни сильно залежить від соціально-економічного розвитку. Відповідно до прогнозованої кількості виробництва промислової продукції, кількості населення, розвитку житлового фонду, цін на енергоресурси та інших макроекономічних та демографічних індикаторів визначатиметься потреба в енергоресурсах, а від економічної, енергетичної, екологічної та інших видів політики залежатиме технологічна структура та структура використовуваної енергії.

У зв'язку із відсутністю довгострокових (до 2050 р.) макроекономічних та демографічних показників розвитку Житомирської ОТГ, які визначають динаміку основних драйверів (керуючих параметрів попиту на енергетичні послуги), використано відповідні національні показники, що наведені в дослідженні [15]³. У табл. 2 представлено прогноз ВВП України, розроблений на початку 2019 р. і використаний для прогнозування економічного розвитку Житомирської ОТГ. Вплив пандемії COVID-19 на економіку не оцінювався, оскільки розрахунки проводилися до початку її розгортання.

Таблиця 2

Середньорічні темпи приросту ВВП України у 2020–2050 рр., %

Роки	2020–2030	2031–2040	2041–2050
ВВП України	3,8	3,5	3,2

Джерело: розрахунки авторів.

³ Базовий макроекономічний сценарій був підготовлений фахівцями ДУ "Інститут економіки та прогнозування НАН України" в 2016 р. у рамках проекту Агентства США з міжнародного розвитку (USAID) "Муніципальна енергетична реформа в Україні".

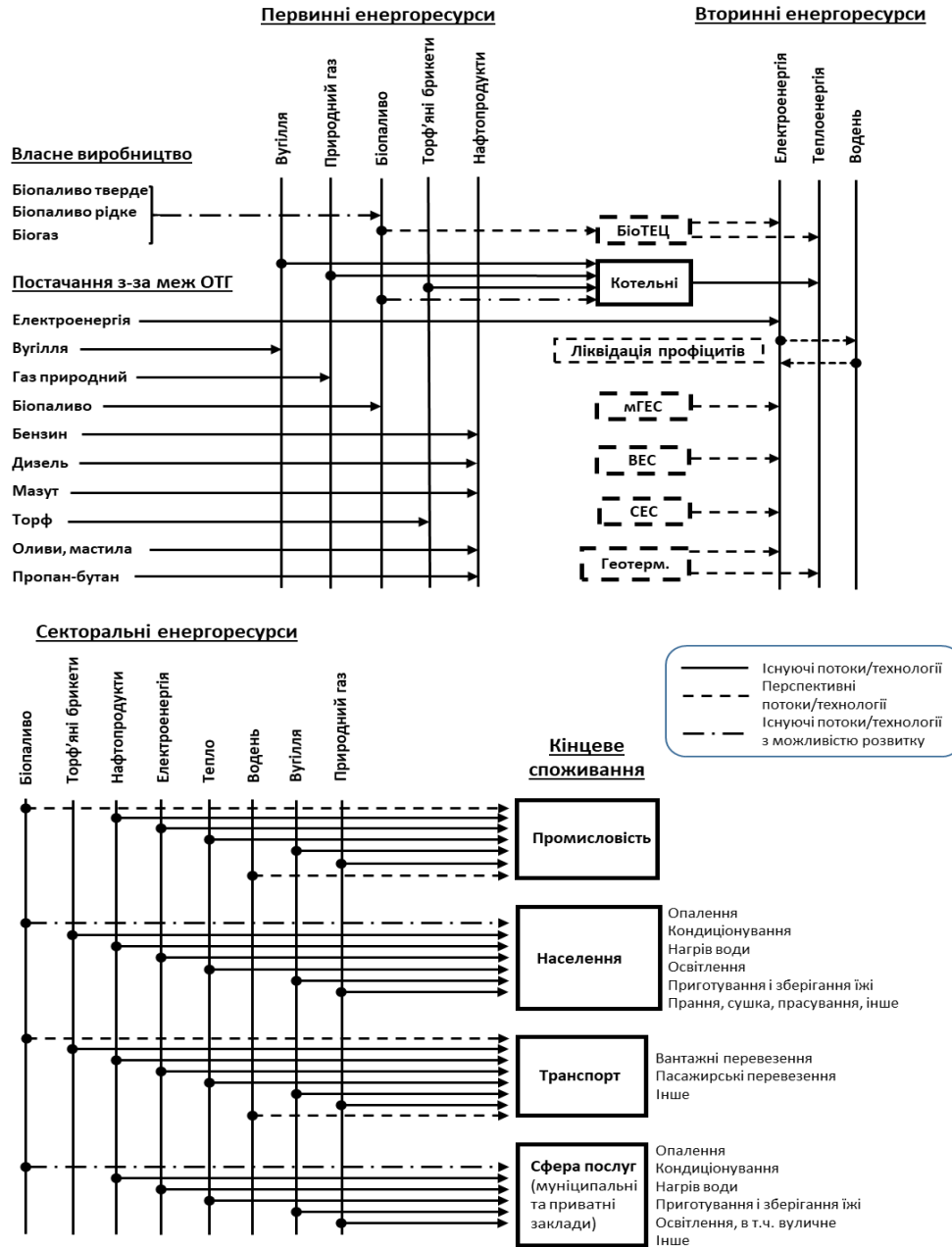


Рис. 1. Схема енергетичної системи Житомирської ОТГ у моделі TIMES-Житомир

Джерело: розроблено авторами.



Демографічний прогноз базується на прогнозних даних сценарію "ССС", Інституту демографії та соціальних досліджень НАН України [37], що є зіставними із відповідними прогнозами Департаменту ООН із соціальних та економічних питань [38], який передбачає середні темпи для народжуваності, тривалості життя та чистої міграції (табл. 3).

Таблиця 3

Прогнозна динаміка населення, тис. осіб

Чисельність:	2017	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Наявного населення міста Житомир	267.0	262.9	259.0	254.2	248.6	243.7	237.8	231.9
Населення України	44784	44396	43646	42766	41779	40816	39891	38915

Джерело: розрахунки авторів.

У цій статті розроблено **чотири модельні сценарії**, першим із них є **базовий сценарій**, припущення якого не передбачають принципової зміни умов функціонування енергосистеми Житомирської ОТГ, але він необхідний для порівняння з альтернативними (цільовими) сценаріями. Альтернативні сценарії передбачають три різні умови **енергетичного переходу на 100% ВДЕ** до 2050 р., тобто задоволення енергетичних потреб (попиту) в секторах кінцевого споживання виключно за рахунок ВДЕ, що має значно посилити енергетичну самодостатність та кліматичну стійкість ОТГ. При цьому має бути забезпечено зростання добробуту населення, надійне енергопостачання та енергетична достатність; економічна, енергетична, екологічна, продовольча та інші види безпеки. У табл. 4 узагальнено представлено умови та припущення усіх сценаріїв.

Перехід електроенергетичного сектора на 100% використання ВДЕ (за умови переважання вітрової та сонячної генерації) вимагатиме забезпечення достатньої кількості **маневрових потужностей, що дозволятимуть утримувати баланс між пропозицією та попитом на електроенергію**. Відтак розвиток енергетики має супроводжуватися розвитком технологій накопичення (акумуляторів), перенесення енергії (електролізний "зелений" водень) чи балансуєуючих потужностей (газопоршневі електростанції). Подібні заходи потребують значних додаткових інвестицій. З цієї причини для моделювання вирішено розробити три сценарії розвитку ВДЕ, в кожному з яких передбачається досягнення 100% ВДЕ у кінцевому споживанні тепла, електроенергії та інших енергоресурсів, однак обсяги *виробництва* електроенергії на території ОТГ різняться залежно від сценарію.

Модель TIMES-Житомир дозволяє розрахувати для всіх сценаріїв найменші загальні витрати на розвиток енергосистеми, а також здійснити відповідні оцінки структури постачання і використання енергії за галузями і видами палива, обсягів викидів ПГ за категоріями емітентів, визначити оптимальну технологічну структуру виробництва і споживання енергії тощо.



Таблиця 4

Ключові сценарії умови та припущення досягнення 100% ВДЕ в Житомирській ОТГ

БАЗОВИЙ	Сценарій, що не передбачає амбїтної енергетичної та кліматичної політики на рівні ОТГ	Енергетика ОТГ розвивається за тими ж принципами, як і зараз. Рівень впровадження енергоефективних, ВДЕ-заходів відповідає поточному. Нові електрогенеруючі потужності не будуються. Нові технології не займають значну нішу на ринку.
100% ВДЕ №1	<ul style="list-style-type: none"> 100% ВДЕ в теплоенергетиці та кінцевому споживанні енергоресурсів. 50% споживання забезпечується місцевим виробництвом електроенергії з ВДЕ, решта 50% – постачання «зеленої» електроенергії (e/e) з інших регіонів країни. Можливість укладання угод на постачання електроенергії з ВДЕ з'являється з 2040 р. 	Проводиться дієва політика з переходу кінцевих споживачів та сектора трансформації на ВДЕ. Будуються нові ВДЕ-об'єкти. Максимальна електрифікація, збереження централізованого теплозабезпечення, перехід на біопаливо чи енергію з нього. Річне виробництво електроенергії з ВДЕ в м. Житомир та прилеглих територіях станом на 2050 р. <i>не менше 50% від потреб ОТГ</i> . Постачання електроенергії від виробників ВДЕ з інших регіонів країни на рівні <i>не більше ніж 50% від потреб ОТГ</i> .
100% ВДЕ №2	<ul style="list-style-type: none"> 100% ВДЕ в теплоенергетиці та кінцевому споживанні енергоресурсів Обсяги виробництва електроенергії з ВДЕ не менше загального споживання електроенергії ОТГ. Нетто-постачання електроенергії з/до інших регіонів країни дорівнює нулю. Можливість укладання угод на постачання e/e з ВДЕ з'являється з 2040 р. 	Умови та припущення сценарію 100% ВДЕ № 2 практично співпадають з аналогічним сценарієм ВДЕ №1, за винятком: <ul style="list-style-type: none"> Виробництво e/e в місті та прилеглих територіях <i>не менше від 100% загальних потреб ОТГ</i>. Для забезпечення надійності та безпеки електрозабезпечення міста здійснюється постачання e/e у виробників ВДЕ з інших регіонів країни. Для забезпечення балансу здійснюється постачання електроенергії до Об'єднаної енергетичної системи України (ОЕСУ).
100% ВДЕ №3	<ul style="list-style-type: none"> 100% ВДЕ в теплоенергетиці та кінцевому споживанні енергоресурсів Обсяги виробництва електроенергії з ВДЕ не менше ніж 30% від загального споживання електроенергії ОТГ. 	У 2050 р. і надалі всеукраїнське електропостачання на 70% становитимуть ВДЕ згідно з проектом Концепції «зеленого» енергетичного переходу*. За таких умов Житомирська ОТГ, споживачи електроенергії тільки з ОЕСУ, на 70% споживатиме її з ВДЕ. Щоб досягти 100% електроенергії з ВДЕ, ОТГ необхідно мати додатково стільки генеруючих потужностей ВДЕ, щоб за рік вони виробляли <i>не менше 30% від загального споживання</i> . Таким чином, постачаючи цю електроенергію до ОЕСУ, ОТГ фактично компенсуватиме «брудну» частку в 30%, яку споживатиме з ОЕСУ. Всі інші умови та припущення аналогічні до тих, що у сценаріях 100% ВДЕ №1 та №2.

* Концепція «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року. URL: <https://mepr.gov.ua/news/34424.html>
Джерело: складено авторами.



Для того щоб досягнути 100% ВДЕ у структурі споживання енергетичних ресурсів у Житомирській ОТГ, необхідно вивчити потенціал ВДЕ, якого має бути достатньо для повного задоволення енергетичних потреб ОТГ.

Загальнодоступних оцінок *потенціалу відновлюваної енергетики* Житомирської ОТГ на момент проведення цього дослідження не було, тому авторами були проведені власні розрахунки потенціалу сонячної, вітрової та біоенергетики, результати яких представлені в табл. 5.

Таблиця 5

Потенціал відновлюваної енергетики в Житомирській ОТГ, МВт

Тип електростанцій/біопаливо	Потенціал
Наземні промислові сонячні електростанції (СЕС)	77,5 МВт
Дахові СЕС на приватних та комунальних підприємствах та інших закладах сфери послуг	37,5 МВт
Дахові приватні СЕС фізичних осіб	303 МВт
Вітрові електростанції	100 МВт
Біомаса	1016,5 т.н.е щорічно
Гідроенергія	5,5 млн кВт·год щорічно

Джерело: розрахунки авторів.

Оцінка *вітрового* потенціалу проводилася з використанням даних із джерел [39, 40], для *біоенергетичного* використано дані Регіональної цільової програми [35]. Розвиток *малої гідроенергетики* передбачений відповідно до екологічних критеріїв, а загальний потенціал оцінений на рівні 5,5 млн кВт·год на рік. Вартісні характеристики енергетичних технологій аналогічні даним національної моделі TIMES-Україна [41]. Також зроблено припущення, аналогічне використаному в моделі TIMES-Україна, що на кожен 1 МВт СЕС або ВЕС необхідно збудувати не менше 100 кВт акумулюючих потужностей (наприклад батарей).

Результати модельних розрахунків. Реалізація заходів з *енергоефективності та енергозбереження* (ЕЕ) відіграє надзвичайно вагомую роль у досягненні 100% ВДЕ у структурі кінцевого споживання енергії. Інвестиції в енергозбереження є економічно доцільними, адже, як показують результати моделювання, завдяки ним у 2050 р. кінцеве споживання енергії зросте лише на 26% відносно 2017 р., тоді як за базовим сценарієм, в якому заходи з ЕЕ практично не втілюються, споживання зросте на 63% (рис. 2).

Зауважимо, що на всіх графіках кінцевого споживання енергії категорія "сонячна енергія" відображає лише колектори для нагріву гарячої води та опалення приміщень. Електроенергія, вироблена з дахових СЕС, відпускається до загальнонаціональної мережі, тому не є кінцевим енергоресурсом і включена до сектора виробництва електроенергії.

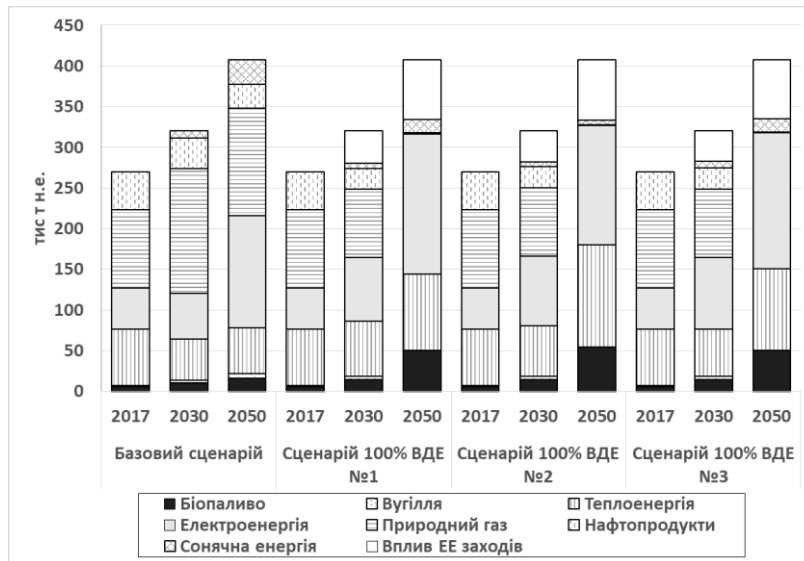


Рис. 2. Кінцеве споживання енергії за сценаріями, тис. т н.е.

Джерело: побудовано авторами.

У структурі кінцевого споживання енергії (рис. 3) зростає частка **промисловості**. Припускається, що енергетичні потреби нових видів промислового виробництва можуть бути задоволені виключно за рахунок відновлюваних джерел. При цьому нові вуглецево нейтральні технології й електрифікація промислових процесів дозволять витіснити з кінцевого споживання у промисловості викопні види палива. Неенергетичне використання викопних енергоресурсів як сировини не враховувалося.

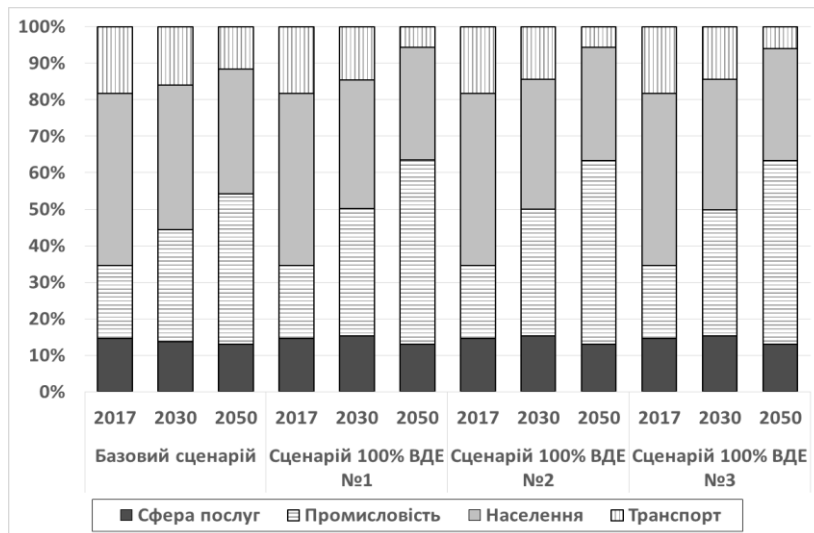


Рис. 3. Структура кінцевого споживання енергії, тис. т н.е.

Джерело: побудовано авторами.

Населення і сектор житлово-комунального господарства (ЖКГ) володіє одним із найбільших потенціалів із підвищення ЕЕ. У 2050 р. заходи з енергоефективності можуть зменшити споживання енергії за усіма альтернативними сценаріями на майже 428 млн кВт·год. Високі ціни на природний газ, подальше здешевлення ВДЕ-технологій, електрифікація сприятимуть поступовій відмові від природного газу. За сценаріями 100% ВДЕ №1 і №3 у 2050 р. населення припинить споживати природний газ завдяки повній електрифікації процесів приготування їжі, автономного опалення та гарячого водопостачання. При цьому *опалення* на 92% забезпечуватиметься вискоефективним централізованим теплопостачанням, інші 8% – автономним електричним опаленням у приватних будинках. За сценарію 100% ВДЕ №2 у 2050 р. центральне опалення займає 89%, а замість автономного електричного опалення 11% попиту покривають котли на біомасі у приватних будинках. *Попит на гарячу воду* у сценаріях 100% ВДЕ виглядає по-різному. Так, у сценарії 100% ВДЕ №1 66% вигідніше отримувати з домашніх електричних котлів та бойлерів, 12% – з центрального гарячого водопостачання (ЦГВП) і 22% – з дахових колекторів на сонячній енергії у приватних будинках. За сценарію 100% ВДЕ №2 90% припадає на ЦГВП, 7% – на дахові колектори на сонячній енергії у приватних будинках і лише 3% – на електричні котли та бойлери. У сценарії 100% ВДЕ №3 розподіл виглядає так: 48% – електричні котли і бойлери, 30% – ЦГВП і 22% – сонячна енергія. Ці модельні розрахунки можуть бути використані при розробленні муніципальної стратегії розвитку централізованого теплопостачання.

Попит на кондиціонування приміщень до 2050 року зростає більш ніж удвічі, проте повністю "перекривається" завдяки термосанації будинків, за рахунок чого житлові будинки протягом дня прогріваються значно менше. Такий результат певною мірою є умовним, однак він ще раз підтверджує ефективність та актуальність впровадження заходів з енергоефективності.

Модель втілює концепцію більш інтенсивного використання громадського *транспорту* замість особистого в межах міста. Так, якщо у базовому році пасажирообіг для легкових авто по місту становить 387,2 млн пасажиро-кілометрів, а громадського транспорту (автобуси, маршрутні таксі, тролейбуси та трамваї) – сукупно 645 млн пас.км, що становить відповідно 38 та 62%, то в 2050 р. прогнозується 558 і 1451,7 млн пас.км відповідно, що становитиме 28 і 72%. Попит на вантажні перевезення до 2050 р. також зросте вдвічі. У всіх трьох сценаріях 100% ВДЕ відбувається повна декарбонізація за рахунок витіснення авто з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) електричними авто, електробусами та вантажівками на біопаливі. При цьому загальне споживання енергії в секторі транспорту зменшиться на 40 і 35% відповідно для сценаріїв 100% ВДЕ №1–3. Водневий транспорт, за нинішніми характеристиками, все ще поступається електромобілям з акумуляторними батареями та транспортним засобам на біопаливі.

Потенціал підвищення енергоефективності на підприємствах *сфери послуг* (комерційний та бюджетний сектори) дещо менший, ніж у житловому секторі, проте дозволяє у 2050 р. скоротити споживання енергії порівняно з базовим сценарієм на 17%, завдяки чому відносно базового року воно зростає тільки на 10%. У структурі споживання за типом ресурсу найбільшу частку становитиме централізоване постачання тепла, виробленого з біомаси, на другому місці – електроенергія.

Загалом сценарії 100% ВДЕ розвиваються однаковим чином із незначними відмінностями. Для сценаріїв 100% ВДЕ №1 і №2, за умови, що постачання електроенергії з 2040 р. здійснюється від ВДЕ-виробників з інших регіонів країни, частка екологічно чистої енергії в кінцевому споживанні у 2050 р. досягає 99,71%. Для сценарію №3 вона становитиме 100%, якщо загальна частка електроенергії з ВДЕ в ОЕС України становитиме не менше 70%. Ключову роль на шляху до переходу на ВДЕ відіграватимуть електроенергія, вироблена централізованою та розподіленою фотовольтаїчною генерацією, вітровими електростанціями, а також сонячна енергія для нагріву води та опалення. Біопаливні ТЕЦ працюватимуть у режимі когенерації і разом з біопаливними котельнями постачатимуть теплову енергію переважній кількості споживачів. Водночас, завдяки електрифікації всіх секторів, практично зникає необхідність у використанні природного газу та нафтопродуктів.

У базовому сценарії генерація електроенергії безпосередньо в Житомирській ОТГ практично відсутня, за винятком існуючої малої ГЕС. Тому на рис. 4 показано результати моделювання лише для сценаріїв 100% ВДЕ.

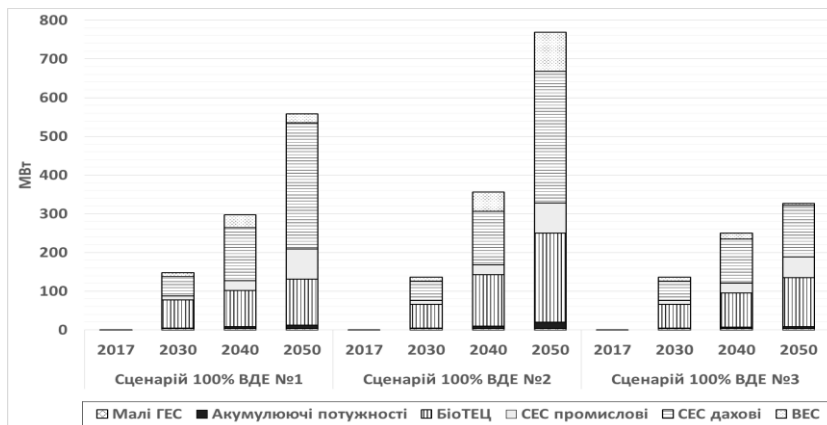


Рис. 4. Встановлена потужність об'єктів електрогенерації, МВт

Джерело: побудовано авторами.

Сценарій 100% ВДЕ №2 передбачає 768 МВт встановленої потужності ВДЕ-об'єктів у 2050 р., при цьому домінуючою є сонячна генерація, потужність якої є максимально можливою, з огляду на попередньо описані припущення. Сценарій 100% ВДЕ №1 передбачає будівництво нових потужностей в обсязі 558 МВт, а

сценарій 100% ВДЕ №3 – 326 МВт. Задля чіткої реалізації будь-якого сценарію 100% ВДЕ в період з 2020 по 2022 рр. необхідно увести щонайменше 39,5 МВт об'єктів електричної генерації. Лідером за співвідношенням "ціна-ефективність" серед фотовольтаїки є промислові СЕС із технологією трекінгу, що підвищує їхню ефективність та коефіцієнт використання встановленої потужності, хоча вони й є дорогими.

У цьому дослідженні, через недостатню вивченість в Україні, не розглядалася концепція Vehicle-to-grid⁴ (прибл. переклад – "автомобілі в мережі"), яка передбачає, що електромобілі, підключені до електричної мережі, стають диспетчеризованими учасниками ринку електроенергії.

Загальне виробництво електроенергії у сценаріях 100% ВДЕ №1, №2 і №3 (тут і надалі без урахування частки постачання з-поза меж ОТГ) становить 1075, 1845 та 795 млн кВт·год відповідно. Структура виробництва електроенергії (рис. 5) за сценаріями дещо відрізняється, проте основними виробниками електроенергії у всіх сценаріях є ТЕЦ на біомасі.

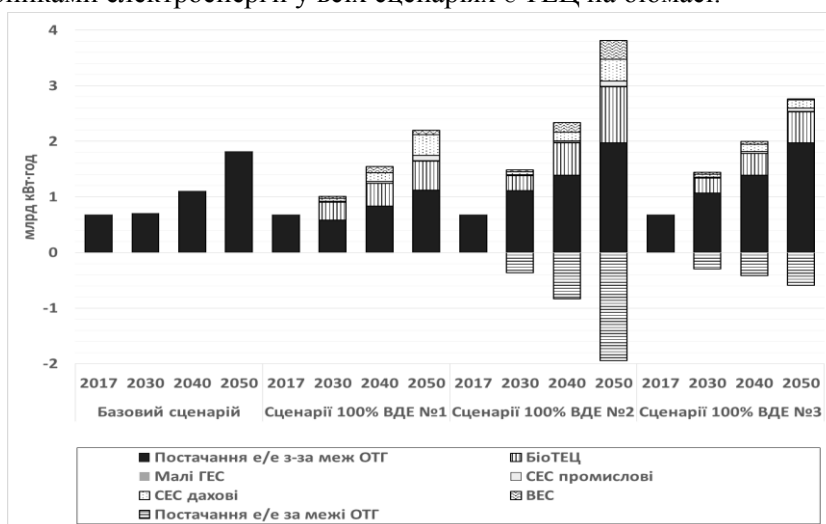


Рис. 5. Виробництво (відпуск) електроенергії, млн кВт·год

Джерело: побудовано авторами.

У секторі **централізованого постачання теплової енергії** спостерігається суттєве зростання обсягів її виробництва за рахунок поступової відмови промисловості від викопного палива і, натомість, переходу на споживання теплової енергії, що генерується біопаливними ТЕЦ (67% від загальних обсягів у сценаріях 100% ВДЕ №1 і №3, 97% – у сценарії 100% ВДЕ №3), районними та локальними котельнями (рис. 6). Водночас, зі зростанням обсягів генерації тепла, загальна встановлена потужність теплогенеруючого обладнання скорочується майже в 4 рази у сценаріях 100% ВДЕ №1 і №3 та

⁴ Vehicle-to-Grid (V2G) explained: What it is and how it works. URL: <https://www.ovoenergy.com/guides/electric-cars/vehicle-to-grid-technology.html>

більш ніж удвічі у сценарії 100% ВДЕ №2. Відбувається це завдяки проведенню заходів із термомодернізації і тому що існуючі котельні, маючи все ще досить високий ККД (згідно з даними КП "Житомиртеплокомуненерго" (ЖТКЕ)), вже давно не використовуються на повну потужність. У 2017 р. їх КВВП у середньому становив 20%, що є надзвичайно низьким показником і суттєво впливає на рентабельність. Тому котельні, що не використовують на повну потужності або відпрацювали свій ресурс, варто закривати. За сценаріями 100% ВДЕ №1 і №3, на 2050 р. достатньо мати близько 200 МВт теплової потужності з високим КВВП і ККД. Сценарій 100% ВДЕ №2 потребує більших потужностей біоТЕЦ.

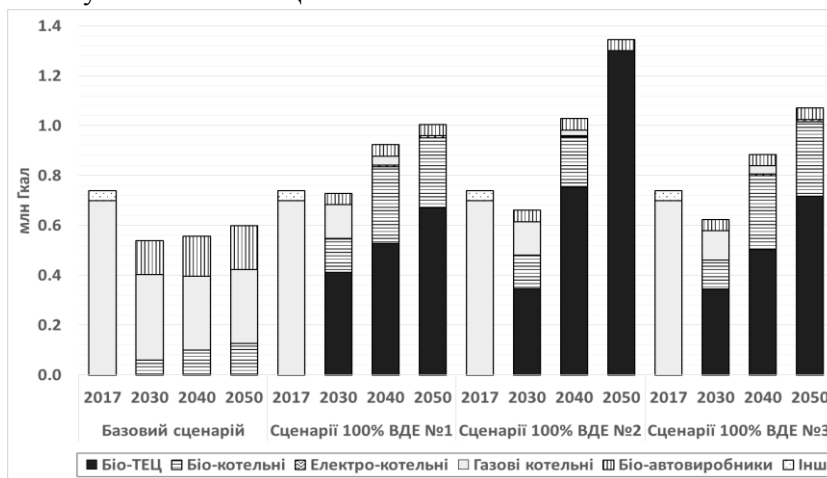


Рис. 6. Виробництво (відпуск) теплової енергії, тис. Гкал

Джерело: побудовано авторами.

Реалізація заходів зі скорочення втрат теплової енергії у мережах, що, за даними ЖТКЕ, становили 16,7% у 2017 р., у цій роботі не досліджувалася. Також не розглядалися технології акумулювання тепла. Зниження втрат і використання інноваційних технологій може дозволити знизити вартість енергетичного переходу на 100% ВДЕ для Житомирської ОТГ.

Інвестування в нове будівництво та обслуговування енергетичних об'єктів сприятиме створенню нових робочих місць, причому за деякими міжнародними оцінками встановлення кожного мегавату дахових СЕС може забезпечити роботою до 24 працівників, тобто при реалізації альтернативних сценаріїв може бути створено від 3,6 до 9,2 тис. нових робочих місць. Промислові СЕС та ВЕС можуть надати ще близько 400 робочих місць⁵. Біоенергетика також володіє значним потенціалом до створення робочих місць у сфері постачання сировини, проектуванні та будівництві станцій та їх

⁵ Powering jobs growth with green energy. URL: <https://www.nrdc.org/sites/default/files/jobs-growth-green-energy.pdf>



обслуговуванні – загалом близько 3,5 повних робочих місяців на 1 МВт встановленої теплової потужності, тобто ще майже 800 робочих місць⁶.

Викиди діоксиду вуглецю в усіх сценаріях 100% ВДЕ в 2050 р. порівняно з 2017 р. зменшуються у 308 разів: з 555,1 тис. т CO₂ до 1,8 тис. т CO₂. Вони можуть залишитися у невеликій кількості в транспорті та промисловості. **Загальні викиди ПГ** (не тільки CO₂) у 2050 р. можуть скоротитися на 94% порівняно з базовим сценарієм: з 525 тис. т CO₂-екв. до 31,4–46 тис. т CO₂-екв. (рис. 7).

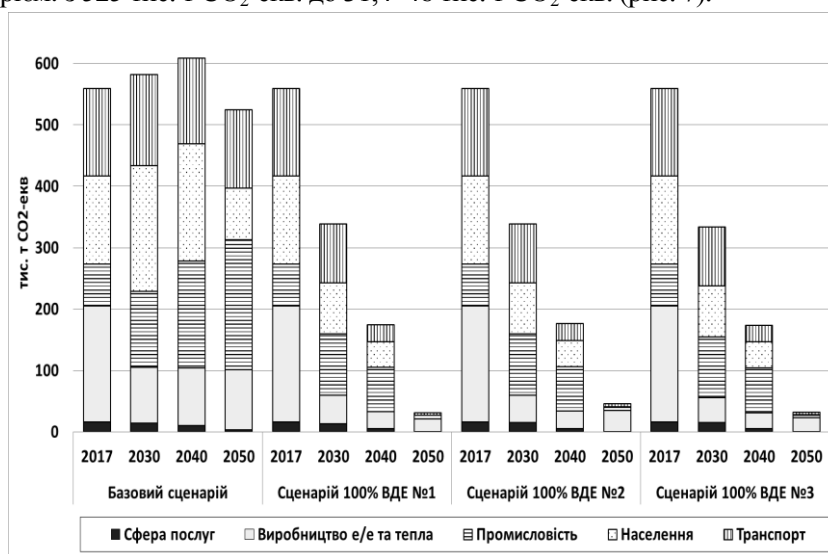


Рис. 7. Викиди парникових газів за секторами, тис. т CO₂-екв

Джерело: побудовано авторами.

Зазначимо, що при цьому обсяг викидів таких *парникових газів*, як CH₄ та N₂O, зростає з 4,3 тис. т у 2017 р. до 30–44 тис. т у 2050 р. унаслідок суттєвого збільшення спалювання біомаси та використання біопалива. Хоч використання біопалива в енергетиці умовно вважається вуглецево нейтральним, однак спалювання біомаси зумовлює забруднення повітря дрібно- та ультрадисперсними частками (PM₁₀, PM_{2,5} і менше 100 нм), тому *на димоходах спалювальних біоустановок необхідно обов'язково встановлювати фільтраційні агрегати*. Інакше, практично цілком припинивши впливати на кліматичну ситуацію, можна зіпсувати екологічну складову на всій території міста. На додачу, внаслідок шкідливої дії дисперсних часток на організм людини існує небезпека зростання рівня захворювань дихальних шляхів та кровоносної системи [42]. У моделі TIMES-Житомир капітальні витрати на нові генеруючі установки з біомаси включають витрати на фільтрувальні агрегати, що відповідають найвищим стандартам.

⁶ UK jobs in the bioenergy sectors by 2020.URL:

https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/48341/5131-uk-jobs-in-the-bioenergy-sectors-by-2020.pdf

У структурі загальних щорічних витрат на функціонування енергетичної системи (рис. 8), які включають інвестиції в енергетичні технології (модернізацію, придбання нових), експлуатаційні витрати, витрати на закупівлю, транспортування та постачання палива, переважну частину займатимуть інвестиції в технології кінцевого споживання енергетичних ресурсів (побутові прилади, транспортні засоби, освітлювальні прилади та ін.), оскільки вони мають значно менший термін експлуатації порівняно, наприклад, із технологіями виробництва електроенергії та тепла, та їхня кількість є незрівнянно більшою. Проте, за винятком муніципальних транспортних засобів, приладів для міських установ та витрат на фінансування заходів з енергоефективності, інвестиції в технології кінцевого споживання лежать на мешканцях міста. Наявні генеруючі потужності в довгостроковій перспективі в будь-якому разі необхідно змінювати на нові, тому капітальних інвестицій уникнути не вдасться, хоча за базового сценарію з нової генерації будуються лише котельні. За рахунок цього капітальні витрати на генеруючі потужності в базовому сценарії значно менші, ніж у альтернативних сценаріях, але витрати на паливо у 2050 р. удвічі більші.

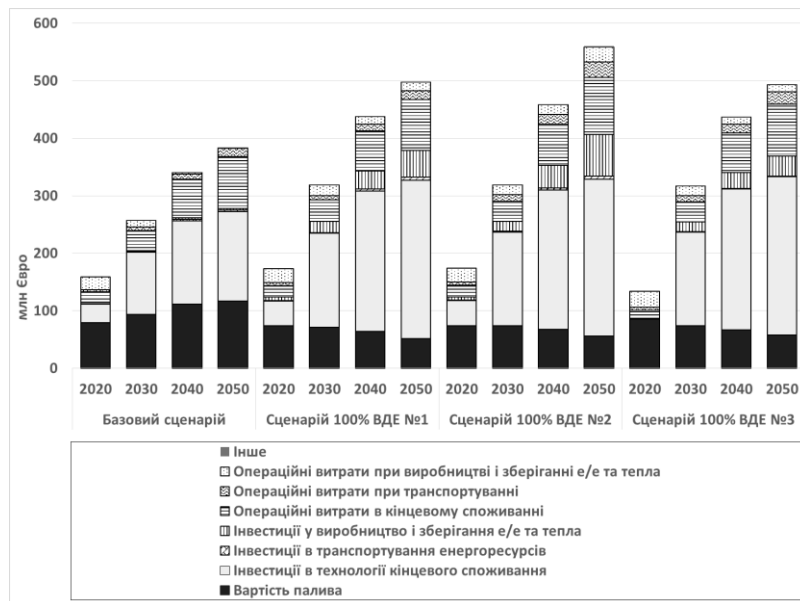


Рис. 8. Щорічні витрати на функціонування енергосистеми, млн євро

Джерело: побудовано авторами.

На рис. 9 відображено різницю між обсягом витрат у Базовому сценарії та альтернативних сценаріях. У від'ємній частині осі витрат наведено кошти, які заощаджуються порівняно із базовим сценарієм.

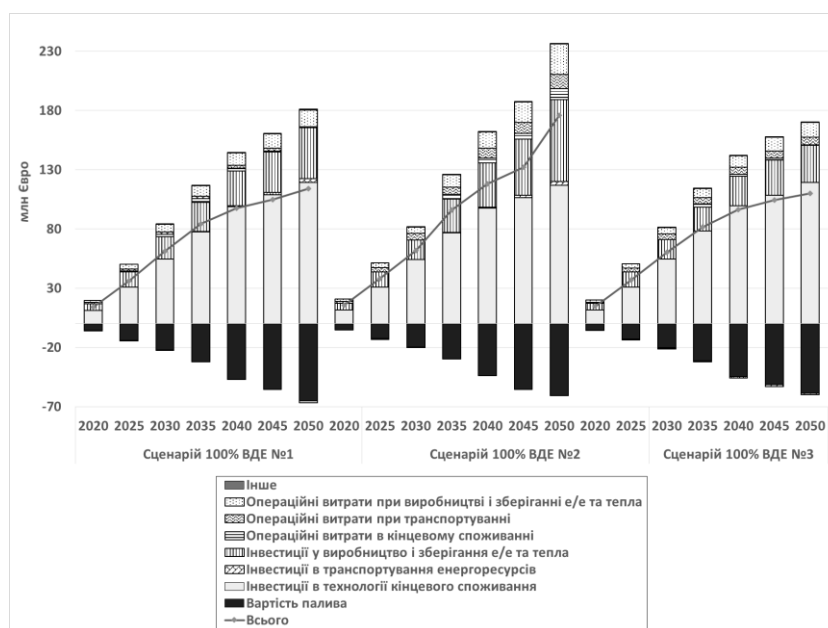


Рис. 9. Різниця між щорічними витратами на функціонування енергетичної системи між ВДЕ-сценаріями та базовим, млн євро

Джерело: побудовано авторами.

Загальні кумулятивні витрати (2,152 млрд євро за базовим сценарієм і 2,665 млрд євро, 2,790 млрд євро та 2,656 млрд євро за сценаріями 100% ВДЕ №1, №2 та №3 відповідно) на розвиток вуглецево нейтральної енергосистеми за період з 2020 р. до 2050 р. у сценаріях 100% ВДЕ №1 і №3 на 23%, а у сценарії 100% ВДЕ №2 – на 30% більші за витрати в базовому сценарії. При цьому різниця в **капітальних інвестиціях** (рис. 10) за весь період становить 45–47%, де найнижче значення – для сценарію 100% ВДЕ №3.

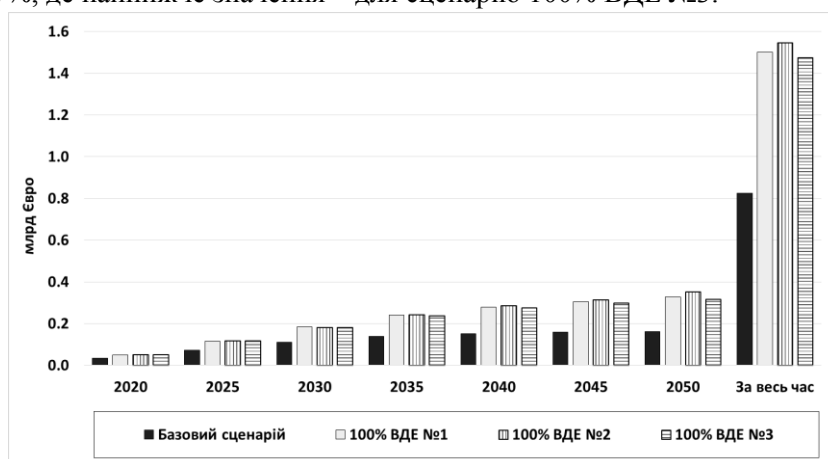


Рис. 10. Капітальні інвестиції за періодами в 5 років, млн євро

Джерело: побудовано авторами.

Висновки

За відсутності дієвої політики стимулювання енергоефективних заходів та інтенсифікації використання ВДЕ (базовий сценарій) у Житомирській ОТГ кінцеве споживання енергії у 2050 р. зросте на 63% порівняно з 2017 р. Водночас, за тих же соціально-економічних умов, *реалізація будь-якого з амбітних сценаріїв переходу на 100% ВДЕ дозволить ефективно й економічно доцільно обмежити зростання енергетичних потреб лише до 26%*. При цьому відбудеться кардинальне скорочення викидів ПГ, які в 2050 р. можуть становити не більше 6% від рівня 2017 р., або 0,14–0,20 т на душу населення.

Рекомендації для досягнення таких показників:

- широкомасштабна реалізація заходів з енергоефективності та енергозбереження;
- впровадження нових вуглецево нейтральних технологій як стороною виробництва енергії, так і стороною споживання, а також активізація процесів електрифікації промислового виробництва та транспорту;
- зупинка деградації централізованого теплопостачання і збільшення його частки в покритті попиту на опалення населенням, яке проживає в багатоквартирних будинках, а також бюджетним сектором до 90%;
- електрифікація та/або перехід на використання біопалива при індивідуальному опаленні;
- електрифікація індивідуального гарячого водопостачання, максимізуючи використання електроенергії від дахових сонячних панелей разом із розвитком дахових колекторів на сонячній енергії у приватних будинках, які би покривали попит на 20–25%;
- втілення концепції більш інтенсивного використання чистого громадського транспорту замість індивідуального в межах міста з повним витісненням авто з ДВЗ електричними авто, електробусами та вантажівками на біопаливі (можливим рішенням також є водневий транспорт, однак у цій роботі він досліджений недостатньо).

Ключову роль на шляху до переходу на ВДЕ відіграватимуть електроенергія, вироблена централізованою та розподіленою фотовольтаїчною генерацією і вітровими електростанціями, а також сонячна енергія для нагріву води та опалення. Біопаливні ТЕЦ працюватимуть у режимі когенерації і разом з біопаливними котельнями постачатимуть переважній кількості споживачів теплову енергію. Водночас, завдяки електрифікації всіх секторів, практично зникає необхідність у використанні природного газу та нафтопродуктів.

У 2050 р. потреба в нових електрогенеруючих ВДЕ-потужностях оцінюється на рівні 326–768 МВт, а теплогенеруючих з високим КВВП і ККД – на рівні 200–350 МВт, що потенційно може створити до 10,5 тис. нових робочих місць, а кошти, залучені в їх будівництво, сприятимуть соціальному розвитку.

Кумулятивні витрати на функціонування енергетичної системи Житомирської ОТГ у 2020–2050 рр. у базовому сценарії на 23–30% менші ніж, в альтернативних сценаріях, зокрема завдяки меншій потребі в



капітальних інвестиціях – на 45–47%. Однак витрати на паливо в базовому сценарії у 2050 р. можуть бути вдвічі більшими, ніж в альтернативних сценаріях.

Отримані результати дослідження ще раз підтверджують, що заощадження енергоресурсів (підвищення енергоефективності та енергозбереження) є найбільш дешевим способом задоволення енергетичних потреб населення та економіки загалом, а необхідні для цього інвестиції є більш економічно виправданими порівняно з тими, які необхідні для виробництва додаткових обсягів енергоресурсів для задоволення тих же потреб.

Список використаних джерел

1. Adoption of the Paris Agreement. The Framework Convention UN on Climate Change. 2015. URL: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/rus/109r01r.pdf>
2. The State of the Global Climate 2020. URL: <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate>.
3. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change / IPCC. 2013. URL: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf
4. Cities and Pollution / UN. URL: <https://www.un.org/en/climatechange/climate-solutions/cities-pollution>.
5. Hodson M. and Marvin S. 'Urban Ecological Security': A New Urban Paradigm? *International Journal of Urban and Regional Research*. March 2009. P. 193–215. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2427.2009.00832.x>
6. The Covenant of Mayors. URL: <https://www.eumayors.eu/about/covenant-initiative/origins-and-development.html>
7. Guidebook "How to Develop a Sustainable Energy Action Plan (SEAP)" / Institute for Energy and Transport (Joint Research Centre). Publication Office of the European Union, 2010.
8. Guidebook "How to develop a Sustainable Energy and Climate Action Plan (SECAP)" / Joint Research Centre, European Commission. Part 1: The SECAP process, step-by-step towards low carbon and climate resilient cities by 2030. Publications Office of the European Union, 2018.
9. Ready for 100. *Sierra club*. URL: <https://www.sierraclub.org/ready-for-100/>
10. Кампанія 100% ВДЕ в Україні.. *350.org*. *Україна*. URL: <http://ukraine.350.org/projects/kampaniya-100-vde-v-ukrayini/>
11. A plan for the future of the planet / European investment bank. URL: <https://www.eib.org/en/stories/climate-bank-roadmap#>
12. Energy toolkit 2.0 - Leading Instruments and Methodologies for Sustainable Energy Planning / LEADS. 2016.
13. Markovic D., Cvetkovic D. and Masic B. Survey of software tools for energy efficiency in a community. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15, № 9. P. 4897–4903. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.06.014>
14. Overview of TIMES Modelling Tool / IEA. URL: <https://iea-etsap.org/index.php/etsap-tools/model-generators/times>
15. Подолець Р.З., Дячук О.А. TIMES-Україна. URL: <https://timesukraine.tokni.com/about>



16. Точилін В., Подолець Р., Дячук О., Олександренко Ю. Прикладна економіко-математична модель "Times-Україна" для оптимізації енергетичних потоків та прогнозування енергетичного балансу України. *Наука та інновації*. 2010. Т. 6, № 2. Р. 48–66. <https://doi.org/10.15407/scin6.02.048>
17. Chepeliev M., Diachuk O. та Podolets R. Economic Assessment of Low-Emission Development Scenarios for Ukraine. *Limiting Global Warming to Well Below 2 °C: Energy System Modelling and Policy Development*. Springer International Publishing, 2018. P. 277–295. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74424-7_17
18. Житомир отримав інформаційно-аналітичну записку "Моделльні сценарні оцінки переходу м. Житомир на 100% відновлюваних джерел енергії до 2050 року". 19 квітня 2021. URL: [https://zt-rada.gov.ua/?3398\[0\]=13417](https://zt-rada.gov.ua/?3398[0]=13417)
19. Keirstead J., Jennings M., Sivakumar A. A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16, No. 6. P. 3847–3866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.047>
20. Keirstead J. and Calderon C. Capturing spatial effects, technology interactions, and uncertainty in urban energy and carbon models: Retrofitting newcastle as a case-study. *Energy Policy*. 2012. Vol. 46. P. 253–267. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.058>
21. Dagoumas A. Modelling socio-economic and energy aspects of urban systems. *Sustainable Cities and Society*. 2013. Vol. 13. P. 192–206. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.11.003>
22. Thellufsen J., Lund H., Sorknæs P., Østergaard P., Chang M., Drysdale D. Smart energy cities in a 100% renewable energy context. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 129. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109922>
23. Sandvall A.F., Ahlgren E.O. and Ekvall T. Low-energy buildings heat supply – Modelling of energy systems and carbon emissions impacts. *Energy Policy*. 2017. Vol. 111. P. 371–382. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.09.007>
24. Lind A., Espegren K. The use of energy system models for analysing the transition to low-carbon cities - The case of Oslo. *Energy Strategy Reviews*. 2017. Vol. 15. P. 44–56. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.01.001>
25. Муніципальний енергетичний план м. Запоріжжя на 2014–2030 pp. / Запорізька міська рада. 2 червня 2014. URL: https://zp.gov.ua/upload/editor/1-1-_municipalnij_energetichnij_plan_zaporizhzhya.pdf
26. Черненко О. Щодо моделювання транспортних потоків для аналізу завантаженості доріг в містах. *Транспортні системи та технології перевезень: збірник наукових праць / Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2016. № 12.
27. Понкратов Д. Особливості моделювання пасажиропотоків у містах. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2016. С. 175–179ю
28. Бакуліч О.О., Дудник А.І. Моделювання впливу транспортних потоків на навколишнє середовище міста. *Вісник ДІТБ. Серія: Економіка, організація та управління підприємствами туристичної індустрії та туристичної галузі в цілому*. 2013. С. 312–316.
29. Подчашинський Ю., Коцюба І., Лико С., Лук'янова В. Математичне моделювання та прогнозування обсягів накопичення твердих комунальних



- відходів міста. *Вісник Національного транспортного університету*. 2017. № 3. С. 109–116.
30. Ільченко К., Лісогор А. Моделювання сталого розвитку міст для країн, що розвиваються. *ScienceRise*. 2015. С. 21–29.
31. Галущенко І. Проблеми моделювання процесів розвитку регіональної енергетики. *Економіко-математичне моделювання соціально-економічних систем*: зб. наук. пр. 2014. С. 102–114.
32. Житомир-2017: статистичний збірник / Державна служба статистики України, Головне управління статистики у Житомирській області. Житомир, 2018.
33. Міська цільова програма "Муниципальний енергетичний план міста Житомира на 2017–2020 роки" / Житомирська міська рада. Житомир, 2017.
34. План дій зі сталого енергетичного розвитку міста Житомира на 2015–2024 рік / Житомирська міська рада. Житомир, 2017.
35. Регіональна цільова програма використання біоенергетичних технологій у тепло- та гарячому водопостачанні у Житомирській області на 2017–2020 роки / Житомирська обласна рада. Житомир, 2017.
36. Енергетичний баланс України / Державна служба статистики України. URL: <http://ukrstat.gov.ua>
37. Національні демографічні прогнози / Інститут демографії та соціальних досліджень ім. М.В. Птухи НАН України. URL: <http://www.idss.org.ua/monografii/popforecast2014.rar>
38. World Population Prospects 2019 / Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat. URL: http://esa.un.org/unpd/wpp/unpp/panel_population.htm
39. Zeng Z., Ziegler A., Searchinger T. et al. A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production. *Nature Climate Change*. 2019. № 9. P. 979–985. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0622-6>
40. Антоненко Т., Гніздовський О. Звіт з оцінки впливу на довкілля, нове будівництво приморської ВЕС-2. 2019. URL: <http://www.eia.menr.gov.ua/uploads/documents/2974/reports/a3f16a0282d4b88913615921ad447d55.pdf>
41. Diachuk O., Chepeliev M., Podolets R., Trypolska G. et al. Transition of Ukraine to the Renewable Energy by 2050. Kyiv: Publishing house "Art Book" Ltd., 2017.
42. Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM) / United States Environmental Protection Agency. URL: <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>
43. Указ Президента України "Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року" від 30 вересня 2019 №722/2019. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/7222019-29825>

Надійшла до редакції 15.08.2021 р.

Прорецензовано 06.10.2021 р.

Підписано до друку 28.12.2021 р.



Oleksandr Diachuk⁷
Andrii Semeniuk⁸

**METHODS AND MODELS OF ESTIMATING ENERGY
TRANSITION ON THE EXAMPLE
OF ZHYTOMYR UNITED TERRITORIAL COMMUNITY**

The paper presents results of scenario modelling and assessment of energy transition to 2050 in the Zhytomyr territorial community (TC), which provides for a switching from fossil carbon based energy resources in the current TC energy system functioning to 100% use of renewable energy sources (RES) which meets all energy demands and supports the Sustainable Development of TC in accordance with the relevant UN goals. For this purpose, the optimizational economic and mathematical TIMES-Zhytomyr model (no analogues in Ukraine), based on the TIMES-Ukraine model, was developed. It includes 647 energy technologies that are currently available or may be presented in the coming years in Ukrainian market.

For the development of the TIMES-Zhytomyr model, a low-available local energy statistics was processed. As a result, the first energy balance by the form of the International Energy Agency for the large Ukrainian city and the basic energy-technological system of Zhytomyr TC were developed.

Using the TIMES-Zhytomyr model, based on foreign and Ukrainian experience, for the first time, four scenarios of Zhytomyr TC energy system development were designed and modelled, covering all economic sectors and household sector (population). The first one is the Baseline scenario, which displays the possible dynamics of the energy system development without a purposeful energy efficiency policy, the development of RES, etc. Three other scenarios are aimed at studying TC's transition capabilities by 2050 to 100% renewable energy and environmentally friendly technologies use.

The results of modelling confirmed that the available renewable energy resource and technological potential allows Zhytomyr TC to perform the energy transition to 2050 in an economically feasible and socially acceptable way, significantly reducing energy and carbon intensity of the local economy, substantially eliminating GHG emissions, increasing the welfare of citizens and creating at least 10 thousand new workplaces. It will also significantly contribute to Zhytomyr TC to reach at least 10 of the 17 UN Sustainable Development Goals.

⁷ **Diachuk, Oleksandr Anatoliiovych** – Ph.D. Engineering, Leading Research Officer, Institute for Economics and Forecasting National Academy of Sciences of Ukraine (26, Panasa Myrnoho St., Kyiv, 01011. Ukraine), ORCID: 0000-0002-3281-6536, e-mail: diachuk@ief.org.ua

⁸ **Semeniuk Andrii Olehovych** – Junior Research Officer, Institute for Economics and Forecasting National Academy of Sciences of Ukraine (26, Panasa Myrnoho St., Kyiv, 01011. Ukraine), ORCID: 0000-0003-2308-4713, e-mail: a_semeniuk@ief.org.ua



The research results presented, due to a significant novelty and large-scale relevance of the task, are essential in both the theoretical and practical significance. They can be used by scientists for their research and by authorities and experts for development of local, regional or national level strategies, plans or programs of economic, energy, transport, climate and ecology scope. It can also be considered as one of the first steps in preparation of a comprehensive strategy for the Zhytomyr TC development to achieve climate neutrality in accordance with the current objectives of the European Union.

Key words: climate change, sustainable development, energy transition, renewable energy, modelling and forecasting, TIMES model.

References

1. Adoption of the Paris Agreement. The Framework Convention UN on Climate Change (2015). Retrieved from <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/rus/109r01r.pdf>
2. The State of the Global Climate 2020. Retrieved from <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate>
3. IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change. Retrieved from http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf
4. UN. Cities and Pollution. Retrieved from <https://www.un.org/en/climatechange/climate-solutions/cities-pollution>
5. Hodson M. and Marvin S. (2009, March). 'Urban Ecological Security': A New Urban Paradigm? *International Journal of Urban and Regional Research*, 193-215. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2427.2009.00832.x>
6. The Covenant of Mayors. Retrieved from <https://www.eumayors.eu/about/covenant-initiative/origins-and-development.html>
7. Guidebook "How to Develop a Sustainable Energy Action Plan (SEAP)" (2010). Institute for Energy and Transport (Joint Research Centre). Publication Office of the European Union.
8. European Commission (2018). Guidebook "How to develop a Sustainable Energy and Climate Action Plan (SECAP)". Part 1: The SECAP process, step-by-step towards low carbon and climate resilient cities by 2030. Joint Research Centre. Publications Office of the European Union.
9. Ready for 100. *Sierra club*. Retrieved from <https://www.sierraclub.org/ready-for-100/>
10. Campaign 100% RES in Ukraine. *350.org*. Retrieved from <http://ukraine.350.org/projects/kampaniya-100-vde-v-ukrayini/> [in Ukrainian].
11. A plan for the future of the planet. European investment bank. Retrieved from <https://www.eib.org/en/stories/climate-bank-roadmap#>
12. LEDES (2016). Energy toolkit 2.0 - Leading Instruments and Methodologies for Sustainable Energy Planning.
13. Markovic, D., Cvetkovic, D. and Masic, B. (2011). Survey of software tools for energy efficiency in a community. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15: 9, 4897-4903. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.06.014>



14. Overview of TIMES Modelling Tool. IEA. Retrieved from <https://iea-etsap.org/index.php/etsap-tools/model-generators/times>
15. Podolets', R.Z. Diachuk, O.A. TIMES-Ukraine. Retrieved from <https://timesukraine.tokni.com/about> [in Ukrainian].
16. Tochylin, V., Podolets', R., Diachuk, O. ta Oleksandrenko, Yu. (2010). Applied Economic and Mathematical Model "Times-Ukraine" to optimize energy flows and forecasting the energy balance of Ukraine. *Nauka innov. – Science and innovation*, 6: 2, 48-66. <https://doi.org/10.15407/scin6.02.048> [in Ukrainian].
17. Chepeliev, M., Diachuk, O. and Podolets R. (2018). Economic Assessment of Low-Emission Development Scenarios for Ukraine. *Limiting Global Warming to Well Below 2 °C: Energy System Modelling and Policy Development* (p. 277-295). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74424-7_17
18. Zhytomyr received an informational and analytical note "Model scenario estimates of the transition of Zhytomyr per 100% renewable energy sources by 2050" (2021, April, 19). Retrieved from [https://zt-rada.gov.ua/?3398\[0\]=13417](https://zt-rada.gov.ua/?3398[0]=13417) [in Ukrainian].
19. Keirstead, J., Jennings, M. and Sivakumar, A. (2012). A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16: 6, 3847-3866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.047>
20. Keirstead, J. and Calderon C. (2012). Capturing spatial effects, technology interactions, and uncertainty in urban energy and carbon models: Retrofitting newcastle as a case-study. *Energy Policy*, 46, 253-267. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.058>
21. Dagoumas, A. (2013). Modelling socio-economic and energy aspects of urban systems. *Sustainable Cities and Society*, 13, 192-206. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.11.003>
22. Thellufsen, J., Lund, H., Sorknæs, P., Østergaard, P., Chang, M. and Drysdale, D. (2020). Smart energy cities in a 100% renewable energy context. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 129. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109922>
23. Sandvall, A.F., Ahlgren, E.O. and Ekvall, T. (2017). Low-energy buildings heat supply–Modelling of energy systems and carbon emissions impacts. *Energy Policy*, 111, 371-382. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.09.007>
24. Lind, A. and Espegren, K. (2017). The use of energy system models for analysing the transition to low-carbon cities - The case of Oslo. *Energy Strategy Reviews*, 15, 44-56. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.01.001>
25. Zaporizhzhya City Council (2014, June 2). Municipal Energy Plan of Zaporizhzhia for 2014-2030. Retrieved from https://zp.gov.ua/upload/editor/1-1-_municipalnij_energetichnij_plan_zaporizhzhya.pdf [in Ukrainian].
26. Chernenko, O. (2016). Regarding the modeling of traffic flow to analyze roads in cities. *Transportni systemy ta tekhnolohii perevezhen'. Zbirnyk naukovykh prats' Dnipropetrovs'koho natsional'noho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana – Transport systems and traffic technologies. Collection of scientific works of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 12 [in Ukrainian].
27. Ponkratov, D. (2016). Features of modeling passenger traffic in cities. *Visnyk Skhidnoukrains'koho natsional'noho universytetu imeni Volodymyra Dalia – Bulletin of the East Ukrainian National University named after Vladimir Dahl*, 175-179 [in Ukrainian].



28. Bakulich, O.O., Dudnyk, A.I. (2013). Modeling the impact of traffic flows on the city's surroundings. *Visnyk DITB. Serii: Ekonomika, orhanizatsiia ta upravlinnia pidpriemstvamy turystychnoi industrii ta turystychnoi haluzi v tsilomu – Bulletin of DITB. Series: Economics, Organization and Management of Tourist Industry and Tourist Industry as a whole*, 312-316 [in Ukrainian].
29. Podchashyns'kyj, Yu.O., Kotsiuba, I.H., Lyko, S.M., Luk'ianova, V.V. (2017). Mathematical modeling and prediction of volumes of accumulation of solid communal waste of the city. *Visnyk Natsional'noho transportnoho universytetu – Bulletin of the National Transport University*, 3, 109-116 [in Ukrainian].
30. Il'chenko, K. and Lisohor, A. (2015). Modeling of sustainable development of cities for developing countries. *ScienceRise*, 21-29 [in Ukrainian].
31. Haluschenko, I. (2014). Problems of modeling of regional energy development processes. *Ekonomiko-matematychne modeliuвання sotsial'no-ekonomichnykh system – Economic and mathematical modeling of socio-economic systems*, 102-114 [in Ukrainian].
32. State Statistics Service of Ukraine, Main Department of Statistics in Zhytomyr region (2018). *Zhytomyr 2017: Statistical Collection Zhytomyr* [in Ukrainian].
33. Zhytomyr City Council (2017). City Target Program "Municipal Energy Plan of Zhytomyr in 2017-2020. Zhytomyr [in Ukrainian].
34. Zhytomyr City Council (2017). Action Plan for Sustainable Energy Development of Zhytomyr in 2015-2024. Zhytomyr [in Ukrainian].
35. Zhytomyr City Council (2017). Regional target program of bioenergy technologies in heat and hot water supply in Zhytomyr region for 2017-2020. Zhytomyr [in Ukrainian].
36. State Statistics Service of Ukraine. Energy balance of Ukraine. Retrieved from <http://ukrstat.gov.ua> [in Ukrainian].
37. National demographic forecasts. Ptoukha Institute for Demography and Social Studies of the National Academy of Sciences of Ukraine. Retrieved from <http://www.idss.org.ua/monografii/popforecast2014.rar> [in Ukrainian].
38. World Population Prospects 2019. Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat. Retrieved from http://esa.un.org/unpd/wpp/unpp/panel_population.htm [in Ukrainian].
39. Zeng, Z., Ziegler, A. and Searchinger, T. et al. (2019). A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production. *Nature Climate Change*, 9, 979-985. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0622-6>
40. Antonenko, T. and Hnizdovs'kyj, O. (2019). Environmental Impact Assessment Report, New Construction of Primorsk VES-2. Retrieved from <http://www.eia.menr.gov.ua/uploads/documents/2974/reports/a3f16a0282d4b88913615921ad447d55.pdf> [in Ukrainian].
41. Diachuk, O., Chepeliev, M., Podolets, R., Trypolska, G. et al. (2017). Transition of Ukraine to the Renewable Energy by 2050. Kyiv: Publishing house "Art Book" Ltd.
42. United States Environmental Protection Agency. Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM). Retrieved from <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>
43. Decree of the President of Ukraine "On Objectives of Sustainable Development of Ukraine for the period up to 2030" from September 30, 2019 No. 722/2019. Retrieved from <https://www.president.gov.ua/documents/7222019-29825> [in Ukrainian].