

АНОТАЦІЯ

Докишина С.Ю. Моделі та методи моніторингу енергоефективності регіонів України. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктор філософії за спеціальністю 141 –«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (14–Електрична інженерія). – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2023.

Дисертаційне дослідження «Моделі та методи моніторингу енергоефективності регіонів України» присвячене актуальному науковому завданню підвищення рівня енергоефективності регіонів України шляхом розроблення моделей та методів моніторингу, задля забезпечення енергетичної та екологічної безпеки країни. Для виконання аналізу було вибрано підсектор опалення сектору домогосподарств як найбільший споживач енергії серед інших секторів, та транспортний сектор як один із найбільших споживачів та забруднювачів CO₂. Дисертаційне дослідження відповідає пріоритетному напрямку розвитку країни: «Енергетика та енергоефективність» (Технології розроблення та використання нових видів палива, відновлюваних і альтернативних джерел енергії та видів палива; Енергоефективність і енергозбереження, ринки енергоресурсів, Екологічно збалансована енергетична безпека) що затверджений постановою Кабінету міністрів України від 7 вересня 2011 р. № 942 «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2023 року». Та виконувалось спільно з Університетом Лотарингії (Université de Lorraine), Франція, за програмою академічної мобільності ERASMUS+ KA107 у період з 03.04.2023 по 02.09.2023 р.

У першому розділі розглянуто стан енергоефективності в Україні, досліджено методи що застосовані в Енергетичних стратегіях, виконано SWOT-аналіз рівня енергоефективності регіонів України. Визначено мету та завдання дослідження. За оцінками моніторингово звіту індикаторів сталого розвитку в

Україні 2021 року, навіть у період до масштабного вторгнення 2022 року, 7 з 14 цілей індикаторів сталого розвитку, що стосувались енергоефективності, не були досягнуті. Енергетична стратегія України змінювалась тричі впродовж 11 років, причому, у Першій та Другій стратегіях застосовувався підхід прогнозування попиту на енергоносії за трьома сценаріями економічного зростання (середньорічного зростання ВВП), у Третій стратегії застосовувався метод складання алгоритмів заради досягнення бажаних результатів. Ключовими орієнтирами у напрямку розвитку енергетики України є зниження імпортозалежності нафтопродуктів, газу та атомних продуктів, поліпшення екологічної ситуації, що можуть бути досягнуті шляхом впровадження енергоефективних заходів модернізації систем виробітку та розподілу енергії, будівель, Євроінтеграції та розвитку відновлювальних джерел енергії та альтернативних видів палива.

Визначено позитивні та негативні чинники впливу на рівень енергоефективності України. Негативно на рівень енергоефективності України впливають наступні чинники: енергетичний чинник: енергоблоки атомних енергостанцій, водопровідні мережі, системи розподілу, та, особливо, споживання тепла знаходяться у незадовільному стані; екологічний чинник: рівень забруднення повітря станом на 2022 вважається підвищеним, економічний чинник: майже чверть ВВП в Україні перебуває в тіні, з початку воєнного вторгнення 24 лютого 2022 року, та станом на 1 вересня 2022 року, Україна понесла збитки у 127 млрд. доларів США, з яких на першому місці житлові будівлі, на другому інфраструктура, соціальний чинник: низька інформованість населення стосовно переваг енергоефективності, низький рівень життя населення байдужість населення.

Позитивно на рівень енергоефективності впливають: проекти з модернізації енергосистеми, розвиток енергосервісних компаній (ЕСКО), соціальні програми, програми міжнародної підтримки, розвиток ВДЕ та можливості отримання альтернативного виду палива.

Разом з тим, найбільшу вагу у рівні енергоефективності відіграють чинники технологічного та стратегічного характеру, на другому місці виявились чинники екологічного та соціального характеру, вагомими, але без можливості вплинути на них є чинники економічного та непередбачуваного характеру.

Мета. Підвищення рівня енергоефективності регіонів України шляхом розроблення регіональних моделей моніторингу.

Актуальність. Тема спрямована на підвищення енергетичної безпеки України та вирішення задачі оцінювання енергоефективності регіонів України.

Новизна теми полягає у розробленні моделі оцінювання енергоефективності регіонів України житлового та транспортного секторів, що надасть можливість виробити стратегії підвищення рівня енергоефективності регіонів України.

Об'єкт: процес споживання тепло-, електро- енергії, газоспоживання та споживання моторних палив регіонами України.

Предмет: індикатори енергоефективності регіонів та їх зв'язки, чинники впливу на енергоефективність, моделі оцінювання енергоефективності регіонів, технології підвищення енергоефективності, методи оцінки складних багатофакторних систем.

Завдання:

1. Дослідити вимоги до індикаторів енергоефективності, світові індикатори енергоефективності та індикатори в Україні;
2. Дослідити методи оцінки складних багатофакторних систем;
3. Розробити алгоритм інтервального оцінювання індикаторів енергоефективності регіонів України;
4. Розробити алгоритм розрахунку споживання на опалення *житлового сектору* регіонів України;
5. Розробити алгоритм розрахунку споживання газу *транспортного сектору* регіонів України;
6. Виконати класифікацію *житлового сектору* регіонів України з використанням дискримінантного аналізу та аналізу головних компонент;

7. Виконати класифікацію *транспортного сектору* регіонів України з використанням дискримінантного аналізу та аналізу головних компонент;
8. Виконати порівняльний аналіз результатів класифікації *житлового та транспортного секторів* регіонів України;
9. Побудувати модель бенчмаркінгу регіонів України всередині кластерних груп;
10. Проаналізувати можливості застосування альтернативних технологій підвищення енергоефективності в Україні та шляхів їх оптимізації;
11. Розробити алгоритм та модель моніторингу енергоефективності регіонів України.

У Розділі 2 виконано аналіз сучасних баз даних з енергоефективності. Встановлено, що сучасні бази даних з енергоефективності та наведені стандарти відображають секторальний підхід до оцінювання енергоефективності за країнами. Поділ секторів за різними рівнями деталізації (на підсектори), розрахунок індикаторів та індексів енергоефективності, застосування методів коригування, наприклад, таких як кліматичні поправки, коригування за паритетом купівельної спроможності, підходи до вибору базового року для порівняння – дозволяють порівнювати рівні енергоефективності та обсяги серед країн на високому рівні. Для підвищення рівня енергоефективності окремої країни, ці методи можливо застосовувати на регіональному рівні з подальшим застосуванням бенчмаркінгу.

Запропоновано для оцінювання рівня енергоефективності всередині країни, застосовувати методи оцінки складних багатофакторних систем, серед яких є методи кластеризації, метод головних компонент та дискримінантний аналіз. Для кластерного аналізу було вибрано два методи кластеризації із попереднім заданням кількості кластерів (кластеризація методом k-середніх та агломеративна кластеризація), та методи без попереднього задання кластерів такі як кластеризація за щільністю (DBSCAN) та афініативна кластеризація (affinity clustering).

Класифікація споживачів енергії різними методами дозволить оцінити розбіжності за різними рівнями енергоефективності певного сектору та визначення кластерів, котрі потребують першочергових дій у енергоефективних заходах задля забезпечення сталого розвитку країни. Метод головних компонент дозволить зменшити розмірність даних за потреби задля підвищення якості кластеризації. Дискримінантний аналіз допоможе знайти ключові індикатори що впливають на рівень енергоефективності у заданому секторі. А подальший бенчмаркінг регіонів України дозволить додатково визначити рейтинг регіонів всередині кластерних груп.

Сектор домогосподарств має найбільші перспективи у підвищенні рівня енергоефективності, оскільки історично складає третину споживання, а підсектор опалення споживає найбільше серед даних підсекторів сектору споживання (напр., охолодження, освітлення, гаряче водопостачання). Транспортний сектор є одним з найбільших забруднювачів повітря. Однак, дані підходи можуть застосовуватись і до інших секторів.

У Розділі 3 побудовані інтервальні графіки індикаторів енергоефективності підсектору опалення сектору домогосподарств та транспортного сектору регіонів України, що дозволило оцінити динамічні зміни даних індикаторів у цих регіонах та виконати попереднє порівняння регіонів. Визначено найкращі моделі оцінювання для цих даних та вироблено стратегії розвитку кластерних груп регіонів України. Розроблено метод моніторингу енергоефективності та алгоритм оцінювання рівня енергоефективності на основі кластерної стабільності.

Найкращим результатом кластеризації для *підсектору опалення* виявився метод к-середніх з включенням м. Київ та з наступними даними: Середня температура за опалювальний період, °C, Споживання природного газу на житло, м³/житло, Споживання електроенергії на житло, кВт/год, Споживання вугілля на житло, тис. т/ житло, Середньомісячна заробітна плата штатних працівників, грн; Валовий регіональний продукт на одну особу (у фактичних цінах), грн. Даний метод має кластерну нестабільність лише в одному регіоні. Однак, більшу інформативність несуть результати агломеративної кластеризації з кластерною

нестабільністю у трьох регіонах. Тому опишемо стратегії розвитку за останнім згаданим аналізом.

Для кластерних груп підсектору опалення регіонів України доцільні наступні заходи: для *кластеру 0* доцільно застосувати для даних регіонів заходи з модернізації центрального теплопостачання з переходом на розсосереджені джерела енергії та розглядом альтернативних джерел енергії (оскільки температура середня серед інших регіонів – можливий розгляд біогазових установок та вітрогенераторів); для *кластеру 1* доцільно розглянути проектні рішення щодо переходу до розсосереджених джерел електричної енергії, оскільки температура найменша – доцільно встановлювати вітрогенератори у комбінації з водневими установками. Споживання газу відображає баланс між централізованим газопостачанням; для *кластеру 2*, що має регіони із сприятливим кліматом, варто розглянути проекти з опаленням від комбінованих установок з вітрогенераторами, сонячними панелями та водневими установками.

Для всіх регіонів доцільно розглянути перехід від опалювальних установок з використанням газу до установок з використанням альтернативних видів палива (як паливо з пластикових та гумових відходів та біогазу).

Найкращі результати для *транспортного сектору* показала модель за методом головних компонент (2 компоненти) з подальною кластеризацією методом к-середніх з кластерною нестабільністю у чотирьох регіонах. Для кластерних груп транспортного сектору доцільні наступні заходи. Доцільно, особливо для кластеру 2, котрий має найбільші показники серед інших регіонів: покращити громадський транспорт для зменшення використання особистих авто; запровадження програм лояльності для пасажирів громадського транспорту; оптимізувати логістику вантажів, сприяючи ефективному використанню вантажівок та мінімізації порожніх пробігів (задача комівояжера, додатки для покращення ефективності маршрутів та управління транспортом); використовувати технології моніторингу та аналітики для ефективного використання транспортних засобів; заохочувати використання гібридних технологій та систем відновлювальної енергії для автотранспорту; надавати

фінансові стимули для компаній, що використовують енергоефективні технології у транспорті.

У четвертому розділі було досліджено потенціал альтернативних джерел енергії, а саме отримання альтернативного моторного палива з пластикових відходів та відходів зношених шин в Україні та оптимізація біогазової установки анаеробного зброджування за допомогою штучної нейронної мережі.

Проведена аналітична оцінка з офіційних статистичних джерел показала, що потенціал отримання палива від переробки **пластику**, що накопичився на спеціально облаштованих звалищах к кінцю 2020 року, становить від 5,43 до 17,2 тис тон палива. При налагодженні екологістики, щорічно можливо отримувати від 9,39 до 29,74 тис. тон палива. А якщо поводження з пластиковими відходами не зміниться, при налагодженні збору неутилізованого пластику, до 2030 року можливо отримати від 137,54 до 435,53 тис. т палива. Потенціал отримання палива від переробки **зношених шин**, що утворились на спеціально облаштованих звалищах к кінцю 2020 року становить від 1,99 до 3,13 тис. т палива. При налагодженні екологістики, щороку можливо отримувати від 5,27 до 8,26 тис. т палива від зношених шин. Якщо поводження з утилізацією зношених шин не зміниться, до 2030 року, при налагодженні їх збору, можливо отримати від 110,45 до 173,04 тис. т палива. Однак, варто зазначити, що при непрямому оцінюванні потенціалу, обсяги отримання моторного палива можуть бути значно більшими.

Розроблена модель ШНМ установки анаеробного зброджування дала змогу здійснити ідентифікацію оптимальних робочих параметрів реактора-метантенка, які призводять до збільшення виходу метану на понад 12,6%. Так, оптимальною температурою для підвищення виходу біогазу є 39°C; рівень рН 8,0; співвідношення органіки до сухої фракції повинно складати 98,8%. Для кращої роботи установки слід підвищувати вміст амонію азоту на 5%, проте вміст вільних летких жирних кислот у субстраті доцільно зменшити на 46%. Дослідження продемонструвало, що модель ШНМ є корисним інструментом для

моделювання та оптимізації виробництва біогазу з метантенку в різних робочих умовах.

Практичне значення отриманого потенціалу моторного палива полягає в подальшому розвитку налагодженню екологістики збору небезпечних відходів в Україні та їх подальшого перетворення у паливо, що може забезпечити транспортний сектор та використовуватись як сировина заміщення газу для опалення громад від котельних, що використовують газ, а також у комбінації з електротехнічними установками. Отримані оптимальні значення установки анаеробного зброджування, дозволяють підвищити ККД даних установок на 12,6% та сприятиме їх впровадженню для опалення громад. Все це дозволить забезпечити енергетичну та екологічну безпеку країни, а також сприятиме підвищенню рівня економіки.

Наукова новизна дослідження полягає у тому, що:

1. Набула подальшого розвитку реалізація моніторингу енергоефективності регіонів України, зокрема, кластерний підхід до розмежування регіонів України з використанням дискримінантного аналізу, та модель бенчмаркінгу всередині кластерів.
2. Вперше побудовано інтервальне оцінювання індикаторів енергоефективності, що дозволяє порівнювати регіони у динаміці крічних змін.
3. Запропоновано метод оцінювання рівня енергоефективності регіонів України, що дозволяє досягти кластерної стабільності та виробити стратегії розвитку для кожного кластеру.
4. Запропонована модель розрахунку зі статистичних джерел газо-, тепло- електроспоживання та споживання вугілля у розрахунку на опалення одиниці житла у регіонах та газоспоживання транспортним сектором регіонів.
5. Удосконалено систему виробництва біогазової установки за рахунок чого можливо досягти підвищення її ККД на 12,6% .

Практичне значення. Розроблені методологія розрахунку параметрів для оцінювання опалення житлового сектору, методологія розрахунку параметрів для оцінювання транспортного сектору регіонів України, методологія інтервального

оцінювання індикаторів енергоефективності регіонів України, модель бенчмаркінгу регіонів України, алгоритм оцінювання рівня енергоефективності регіонів України на основі кластерної стабільності, загальна модель моніторингу енергоефективності, та алгоритм оцінювання рівня енергоефективності можливо використовувати для оцінювання рівня енергоефективності у наступні роки та для інших секторів. Розрахований потенціал отримання моторного палива варто враховувати при розробленні Дорожньої карти збору та утилізації небезпечних відходів. Підвищення продуктивності біогазових установок анаеробного зброджування забезпечуватиметься за рахунок використання співвідношення робочих параметрів установки анаеробного зброджування, що отримані шляхом використання штучної нейронної мережі у даній роботі.

Дисертаційне дослідження складається з 231 сторінка, 5 додатків. Основна частина дисертації містить 53 рисунка та 16 таблиць.

Ключові слова: енергоефективність, моніторинг, кластерний аналіз, енергетична стратегія, регіональний розвиток, енергоефективність сектору домогосподарств, енергоефективність транспортного сектору, альтернативне паливо, оптимізація установки анаеробного зброджування, біогаз, утилізація небезпечних відходів, аналіз головних компонент, лінійний дискримінантний аналіз, коефіцієнт АКАІКЕ, нейронна мережа.

ABSTRACT

Dokshyna S.Y. Models and methods of monitoring energy efficiency of regions of Ukraine.

Thesis for obtaining the Doctor of Philosophy degree in the specialty 141 - "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics" (14-Electrical engineering). - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2023.

The thesis "Models and Methods of Monitoring Energy Efficiency of Ukrainian Regions" is devoted to the urgent scientific task of increasing the level of energy efficiency of Ukrainian regions by developing models and methods of monitoring to ensure the country's energy and environmental security. For the analysis, the heating sub-sector of the household sector was selected as the largest energy consumer among other sectors, and the transportation sector as one of the largest consumers and polluters of CO₂. The thesis corresponds to the priority direction of the country's development: "Energy and Energy Efficiency" (Technologies for the development and use of new fuels, renewable and alternative energy sources and fuels; Energy Efficiency and Energy Saving, Energy Markets, Environmentally Balanced Energy Security) approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of September 7, 2011, No. 942 "On Approval of the List of Priority Thematic Areas of Scientific Research and Scientific and Technical Development for the Period up to 2023". It was carried out jointly with the University of Lorraine, France, under the ERASMUS+ KA107 academic mobility program from 04/03/2023 to 09/02/2023.

The first section discusses the state of energy efficiency in Ukraine, examines the methods used in the Energy Strategies, and performs a SWOT analysis of the energy efficiency level of the regions of Ukraine. The purpose and objectives of the study are defined. According to the 2021 monitoring report of sustainable development indicators in Ukraine, even in the period before the large-scale invasion of 2022, 7 out of 14 targets of the sustainable development indicators related to energy efficiency were not achieved. Ukraine's energy strategy has been changed

three times in 11 years, with the First and Second Strategies using an approach to forecast energy demand under three scenarios of economic growth (average annual GDP growth), and the Third Strategy using a method of compiling algorithms to achieve the desired results. The key guidelines for the development of Ukraine's energy sector are to reduce import dependence on oil, gas and nuclear products, improve the environmental situation, which can be achieved through the implementation of energy-efficient measures to modernize energy generation and distribution systems, buildings, European integration and the development of renewable energy sources and alternative fuels.

Positive and negative factors affecting the level of energy efficiency in Ukraine are identified. The following factors have a negative impact on the level of energy efficiency in Ukraine: energy factor: nuclear power units, water supply networks, distribution systems, and especially heat consumption are in an unsatisfactory condition; environmental factor: the level of air pollution as of 2022 is considered to be elevated; economic factor: almost a quarter of GDP in Ukraine is in the shadow, since the beginning of the military invasion on February 24, 2022, and as of September 1, 2022, Ukraine has suffered losses of 127 billion USD. The social factor: low awareness of the population about the benefits of energy efficiency, low living standards, and indifference of the population.

Energy efficiency is positively influenced by projects to modernize the power system, the development of energy service companies (ESCOs), social programs, international support programs, the development of renewable energy sources, and opportunities to obtain alternative fuels.

At the same time, technological and strategic factors play the greatest role in the level of energy efficiency, followed by environmental and social factors, and economic and unpredictable factors are important but cannot be influenced.

Objective. To increase the level of energy efficiency in the regions of Ukraine by developing regional monitoring models.

Relevance. The topic is aimed at improving the energy security of Ukraine and solving the problem of assessing the energy efficiency of the regions of Ukraine.

The *novelty* of the topic is the development of a model for assessing the energy efficiency of the regions of Ukraine in the housing and transport sectors, which will make it possible to develop strategies for improving the energy efficiency of the regions of Ukraine.

Object: the process of consumption of heat, electricity, gas and motor fuels by the regions of Ukraine.

Subject: indicators of regional energy efficiency and their connections, factors influencing energy efficiency, models for assessing regional energy efficiency, technologies for improving energy efficiency, methods for assessing complex multifactorial systems.

Objectives:

1. To study the requirements for energy efficiency indicators, global energy efficiency indicators and indicators in Ukraine;
2. Investigate methods for assessing complex multifactorial systems;
3. To develop an algorithm for interval assessment of energy efficiency indicators in the regions of Ukraine;
4. To develop an algorithm for calculating the heating consumption of the residential sector in the regions of Ukraine;
5. Develop an algorithm for calculating gas consumption in the transport sector of the regions of Ukraine;
6. To classify the residential sector of the regions of Ukraine using discriminant analysis and principal component analysis;
7. To classify the transport sector of the regions of Ukraine using discriminant analysis and principal component analysis;
8. Perform a comparative analysis of the results of classification of the housing and transport sectors of the regions of Ukraine;
9. To build a model of benchmarking of Ukrainian regions within cluster groups;
10. Analyze the possibilities of using alternative energy efficiency technologies in Ukraine and ways to optimize them;

11. To develop an algorithm and model for monitoring energy efficiency of Ukrainian regions.

Section 2 analyzes current energy efficiency databases. It was found that modern energy efficiency databases and standards reflect a sectoral approach to energy efficiency assessment by country. The division of sectors at different levels of detail (into sub-sectors), the calculation of energy efficiency indicators and indices, the use of adjustment methods, such as climate adjustments, purchasing power parity adjustments, and approaches to choosing a base year for comparison, allow for a high level of comparison of energy efficiency levels and volumes among countries. To improve the energy efficiency level of an individual country, these methods can be applied at the regional level, followed by benchmarking.

To assess the level of energy efficiency within the country, it is recommended to use methods for assessing complex multifactorial systems, including clustering methods, principal component method and discriminant analysis. For cluster analysis, two clustering methods with a predefined number of clusters (k-means clustering and agglomerative clustering) and methods without predefined clusters such as density clustering (DBSCAN) and affinity clustering were selected.

Classification of energy consumers by different methods will allow assessing differences in different levels of energy efficiency in a particular sector and identifying clusters that require priority action in energy efficiency measures to ensure the country's sustainable development. The principal component method will allow to reduce the dimensionality of the data, if necessary, to improve the quality of clustering. Discriminant analysis will help to find key indicators that affect the level of energy efficiency in a given sector. Further benchmarking of Ukrainian regions will allow us to further determine the ranking of regions within cluster groups.

The household sector has the greatest potential for energy efficiency improvements, as it historically accounts for one-third of consumption, and the heating subsector consumes the most among these consumption subsectors (e.g., cooling, lighting, hot water). The transportation sector is one of the largest air polluters. However, these approaches can be applied to other sectors as well.

In Section 3, interval graphs of energy efficiency indicators for the heating sub-sector of the household sector and the transport sector of the regions of Ukraine are constructed, which allowed us to assess the dynamic changes in these indicators in these regions and to perform a preliminary comparison of regions. The best estimation models for these data were identified and strategies for the development of cluster groups of Ukrainian regions were developed. A method for monitoring energy efficiency and an algorithm for assessing the level of energy efficiency based on cluster stability were developed.

The best clustering result for the *heating sub-sector* was the k-means method with the inclusion of Kyiv and the following data: Average temperature for the heating period, oC, Natural gas consumption per dwelling, m³/dwelling, Electricity consumption per dwelling, kWh, Coal consumption per dwelling, thousand tons/dwelling, Average monthly salary of full-time employees, UAH; Gross regional product per capita (in actual prices), UAH. This method has cluster instability in only one region. However, the results of agglomerative clustering with cluster instability in three regions are more informative. Therefore, we will describe the development strategies based on the latter analysis.

For cluster groups of the heating sub-sector in the regions of Ukraine, the following measures are advisable: for *cluster 0*, it is advisable to apply measures to modernize the central heating supply in these regions with the transition to dispersed energy sources and consideration of alternative energy sources (since the temperature is average among other regions, biogas plants and wind generators may be considered); for *cluster 1*, it is advisable to consider design solutions for the transition to dispersed sources of electricity, since the temperature is the lowest - it is advisable to introduce Gas consumption reflects the balance between centralized gas supply; for *cluster 2*, which has regions with a favorable climate, it is worth considering projects with heating from combined plants with wind turbines, solar panels and hydrogen plants.

For all regions, it is advisable to consider the transition from gas-fired heating plants to plants using alternative fuels (such as fuel from plastic and rubber waste and biogas).

The best results for the *transport sector* were shown by the principal component model (2 components) followed by k-means clustering with cluster instability in four regions. The following measures are advisable for cluster groups of the transport sector. It is advisable, especially for cluster 2, which has the highest indicators among the other regions: to improve public transport to reduce the use of private cars; to introduce loyalty programs for public transport passengers; to optimize freight logistics by promoting efficient use of trucks and minimizing empty runs (the task of the salesman, applications to improve route efficiency and transport management); use monitoring and analytics technologies for the efficient use of vehicles; encourage the use of hybrid technologies and renewable energy systems for vehicles; provide financial incentives for companies using energy-efficient technologies in transportation.

Chapter 4 investigated the potential of alternative energy sources, namely the production of alternative motor fuel from plastic waste and waste tires in Ukraine and the optimization of an anaerobic digestion biogas plant using an artificial neural network.

An analytical assessment based on official statistical sources showed that the potential for fuel production from **plastic** recycling accumulated at specially equipped landfills by the end of 2020 ranges from 5.43 to 17.2 thousand tons of fuel. With environmental management, it is possible to receive from 9.39 to 29.74 thousand tons of fuel annually. And if the management of plastic waste does not change, with the collection of unrecycled plastic, it is possible to obtain from 137.54 to 435.53 thousand tons of fuel by 2030. By the end of 2020, the potential for fuel production from recycling worn-out tires generated at specially equipped landfills is from 1.99 to 3.13 thousand tons of fuel. With environmental management in place, 5.27 to 8.26 thousand tons of fuel can be produced annually from **worn tires**. If the management of worn tires remains unchanged, by 2030, if their collection is

organized, it is possible to obtain from 110.45 to 173.04 thousand tons of fuel. However, it is worth noting that an indirect assessment of the potential could result in much higher volumes of motor fuel.

The developed ANN model of the anaerobic digestion unit's made it possible to identify the optimal operating parameters of the digester, which lead to an increase in methane yield by more than 12.6%. Thus, the optimum temperature for increasing biogas yield is 39°C; pH is 8.0; the ratio of organic to dry fraction should be 98.8%. For better operation of the plant, the content of nitrogen ammonium should be increased by 5%, but the content of free volatile fatty acids in the substrate should be reduced by 46%. The study demonstrated that the ANN model is a useful tool for modeling and optimizing biogas production from the digester under different operating conditions.

The practical significance of the obtained motor fuel potential lies in the further development of the environmental management of hazardous waste collection in Ukraine and its further conversion into fuel that can supply the transport sector and be used as a raw material to replace gas for community heating from gas-fired boiler houses, as well as in combination with electrical installations. The obtained optimal values of the anaerobic digestion plant allow to increase the efficiency of these plants by 12.6% and will facilitate their implementation for community heating. All this will ensure the energy and environmental safety of the country and contribute to the economic growth.

The scientific novelty of the study is that:

1. The implementation of energy efficiency monitoring in the regions of Ukraine has been further developed, in particular, the cluster approach to the differentiation of regions of Ukraine using discriminant analysis, and the model of benchmarking within clusters.

2. For the first time, an interval assessment of energy efficiency indicators was built, which allows comparing regions in the dynamics of incremental changes.

3. A method for assessing the level of energy efficiency of Ukrainian regions is proposed, which allows to achieve cluster stability and develop development strategies for each cluster.

4. A model for calculating from statistical sources gas, heat and electricity consumption and coal consumption per unit of housing in the regions and gas consumption by the transport sector of the regions is proposed.

5. The system of biogas plant production has been improved, due to which it is possible to increase its efficiency by 12.6%.

Practical significance. The developed methodology for calculating parameters for assessing residential heating, methodology for calculating parameters for assessing the transport sector of the regions of Ukraine, methodology for interval assessment of energy efficiency indicators in the regions of Ukraine, model for benchmarking the regions of Ukraine, algorithm for assessing the level of energy efficiency in the regions of Ukraine based on cluster stability, general model for energy efficiency monitoring, and algorithm for assessing the level of energy efficiency can be used to assess the level of energy efficiency in the regions of Ukraine. The calculated potential for motor fuel production should be taken into account when developing the Roadmap for Hazardous Waste Collection and Utilization. Increasing the productivity of anaerobic digestion biogas plants will be ensured by using the ratio of the operating parameters of the anaerobic digestion plant, which was obtained by using an artificial neural network in this thesis.

The dissertation consists of 231 pages and 5 appendices. The main part of the thesis contains 53 figures and 16 tables.

Keywords: energy efficiency, monitoring, cluster analysis, energy strategy, regional development, energy efficiency of the household sector, energy efficiency of the transport sector, alternative fuels, optimization of anaerobic digestion plant, biogas, hazardous waste disposal, principal component analysis, linear discriminant analysis, AKAIKE coefficient, neural network.