

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЇ
«РОЗУМНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ» ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ РОЗПОДІЛЕНИХ
БАЗ ДАНИХ**

В. М. Павленко, кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів та природокористування України

E-mail: v.pavlenko@nubip.edu.ua

О. Ю. Воляник, кандидат технічних наук, доцент

Київський національний університет технологій та дизайну

E-mail: volyanik.oy@knuetd.edu.ua

І. В. Пономаренко, кандидат економічних наук, доцент

Державний торговельно-економічний університет

E-mail: i.ponomarenko@knute.edu.ua

Д. О. Даннільченко, кандидат технічних наук, доцент

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

E-mail: dmytro.danylchenko@khpi.edu.ua

Анотація. Дослідження енергетичних систем розумних міст набуває все більшої актуальності в контексті глобальних викликів, пов'язаних зі зміною клімату та необхідністю переходу до сталої енергетики. Зростання урбанізації та попиту на енергію стимулюють пошук інноваційних рішень для оптимізації енергоспоживання та зниження викидів парникових газів.

Метою дослідження є розробка концепції інтеграції технологій розподілених баз даних – «блокчейну» та штучного інтелекту в енергетичні системи розумних міст для досягнення максимальної ефективності, надійності та сталості.

Дослідження проводилося шляхом аналізу наукової літератури, збору та обробки даних про існуючі енергетичні системи, а також розробки математичних моделей для оцінки ефективності запропонованих рішень. Були використані методи статистичного аналізу, спостереження та опису досліджуваної наукової проблематики.

У результаті дослідження було розроблено структуру енергетичної системи розумного міста, яка передбачає інтеграцію блокчейну для забезпечення прозорості та безпеки обміну енергією, а також штучного інтелекту для оптимізації енергоспоживання та прогнозування попиту. Було доведено, що запропонована модель дозволяє досягти значної економічної ефективності та зниження викидів вуглецю. Перспективи подальших досліджень полягають у розробці детальних

алгоритмів для різних компонентів системи, а також у проведенні експериментальних досліджень на пілотних проєктах.

Інтеграція блокчейну та штучного інтелекту в енергетичні системи розумних міст є перспективним напрямком для підвищення їх ефективності та сталості. Запропонована модель дозволяє досягти значного рівня енергоефективності та зниження викидів парникових газів. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на розробку конкретних алгоритмів та їхнє тестування в реальних умовах.

Ключові слова: *розумне місто, енергетична система, блокчейн, штучний інтелект, сталий розвиток, енергоефективність*

Актуальність. Сучасний світ швидко змінюється завдяки інноваційним технологіям, які трансформують економічну діяльність як на локальному, так і глобальному рівнях. Розширення малих населених пунктів у багатьох регіонах світу сприяє розвитку міських територій, створюючи різні напрямки для трансформації малих агломерацій. У деяких країнах Азії, Західної Америки та Африки спостерігається розширення територій з підвищенням кількості населення, що живе за обмежених побутових умов. Водночас країни з високим рівнем доходів виявляють обережність у питанні модернізації інфраструктури на основі інноваційних технологій. Агломерації, які активно впроваджують сучасні технології для розвитку, відомі як «розумні міста».

Процеси автоматизації та цифрової трансформації сприяють генеруванню великих масивів даних, необхідних для ефективної роботи громадської інфраструктури та спеціалізованих сервісів. Важливим аспектом є аналіз і оптимізація сучасних математичних алгоритмів, зокрема штучного інтелекту, що дозволяє оптимізувати функціонування розумних міст і більш раціонально використовувати наявні ресурси. Запропонована концепція дає можливість враховувати особливості різних мешканців, створюючи умови для індивідуального підходу і підвищення комфорту життя в розумних агломераціях.

Технологія блокчейн забезпечує високу надійність зберігання даних на периферії, орієнтуючись на принципи децентралізації та залучення великої кількості учасників. Інтеграція блокчейн у майбутні енергетичні системи дозволяє досягти низки переваг, зокрема, прозорості операцій у процесах виробництва, доставки та

накопичення енергоресурсів, що сприяє зміцненню довіри між виробниками, посередниками та споживачами.

Використання технологій блокчейн та штучного інтелекту в енергетичних системах розумного міста сприяє досягненню значних результатів завдяки мультиплікативному ефекту. Дослідження різних підходів до миттєвої інтеграції цих технологій допоможе міським адміністраціям обрати найефективніші способи генерації енергії та її утилізації з відновлюваних джерел. Розробка сучасних підходів до збереження та обробки даних за допомогою потужних алгоритмів штучного інтелекту дозволяє містам формувати політику інноваційної енергетичної автономії.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження у сфері сталого розвитку та енергоефективності «розумних» міст є нині надзвичайно актуальними сьогодні та широко представлені в роботах багатьох науковців з різних країн світу. Розробка інноваційних підходів для оптимізації енергетичних систем у міських агломераціях вимагає постійних досліджень у цій галузі, що обумовлено прискоренням науково-технічного прогресу та реальними потребами економічних систем «розумних» міст, які конкурують за переваги в глобальному масштабі.

У роботі [1] розглянуто особливості моделювання впливу різних сценаріїв і проектів розумного міста, що інкапсулюють різні підсистеми, такі як транспорт, енергетика, електронний уряд. Наголошено на важливості забезпечення ефективності взаємодії усіх систем у розумному місті у відповідності з кібернетичними підходами.

Робота [2] висвітлює напрями використання Інтернету речей (IoT), 5 G і хмарних обчислень для енергоефективності в розумних містах. Авторами запропоновано модель, яку можна використовувати для оптимізації споживання енергії в розумних будинках і розумних містах. Важливим елементом ефективної енергетичної інфраструктури розумного міста виступає високошвидкісна система збору та обробки інформації.

У роботі [3] розглянуто особливості функціонування «розумних» міст в аспекті ефективного управління, що дозволяє забезпечити раціональність використання

наявних технологій та ресурсів. Авторами проведено дослідження з метою виявлення викликів і можливостей, що впливають на ініціативи розумних міст.

Питання щодо використання відновлюваних джерел енергії і, як наслідок, суттєвого скорочення викидів забруднюючих речовин і покращення якості середовища проживання детально розглянуто в роботі [4]. Автори проводять детальний аналіз інтеграції відновлюваних джерел в енергетичні системи розумних міст на основі техніко-економічних критеріїв.

Робота [5] присвячена створенню сталих енергетичних систем «розумних» міст у межах концепції Енергетичного Інтернету. Пропонується впровадження розподіленої енергомережі для кожного міста, що дозволить підвищити ефективність генерації, зберігання та використання енергії. Автори підкреслюють необхідність використання блокчейну для підтримки зелених енергетичних систем у «розумних» містах, що забезпечить обмін енергією між різними виробниками і споживачами, розвиватиме «зелену» торгівлю та оптимізуватиме управління енергетичною інфраструктурою.

У роботі [6] висвітлено розвиток інтелектуальних енергетичних систем у «розумних» містах із застосуванням штучного інтелекту. Автори досліджують популярність представленої наукової проблематики в працях вчених. Визначено, що охорона здоров'я, мобільність, конфіденційність і безпека та енергетика мають більш значний вплив на впровадження ШІ в розумних містах.

Мета дослідження. Метою дослідження є розробка концепції інтеграції технологій розподілених баз даних – «блокчейну» та штучного інтелекту в енергетичні системи розумних міст для досягнення максимальної ефективності, надійності та сталості.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження проводилося шляхом аналізу наукової літератури, збору та обробки даних про існуючі енергетичні системи, а також розробки математичних моделей для оцінки ефективності запропонованих рішень. Були використані методи статистичного аналізу, спостереження та опису досліджуваної наукової проблематики.

Результати досліджень та їх обговорення. В управлінні енергосистемою розрізняють управління електричними процесами та управління інформацією. Їх у свою чергу можна розділити на фізичні області ланцюга перетворення електроенергії та ієрархічні зони управління електророзподілом.

З точки зору управління, доцільно проводити моніторинг сучасних енергетичних систем, виходячи з технічних характеристик мереж, при цьому, особливу увагу слід приділяти використаній інформаційній системі. Фізичні характеристики електромережі вимагають спеціальних методів керування за встановленими стандартами, а ієрархічні зони характеризуються спеціалізованим керуванням.

Площина інтелектуальної мережі охоплює в одному вимірі весь ланцюжок перетворення електричної енергії, розділений на п'ять доменів: генерація, передача, розподіл, диверсифіковані енергетичні ресурси (ДЕР) та споживання. А в іншому вимірі – ієрархічні рівні управління енергосистемою, розділені на шість зон: Переробка, Поле, Станція, Підстанція, Підприємство та Ринок. Ця площина інтелектуальної мережі дозволяє представити зони, в яких відбувається взаємодія в управлінні енергосистемою між доменами або всередині одного домену. Площина Smart Grid охоплює всі етапи перетворення електричної енергії. Домени перетворення електричної енергії: Велика генерація; Передача; Розподіл; Диверсифіковані електричні ресурси; Кінцеві споживачі електроенергії.

Зони SGAM (Smart Grid Architecture Model – Модель архітектури Smart Grid) представляють рівні управління енергосистемою. Ці зони відображають ієрархічну модель, яка враховує концепцію агрегації та функціонального розділення в управлінні енергосистемою. Концепція SGAM враховує багато аспектів в управлінні енергосистемою: Агрегація даних; Просторова агрегація.

Також, поділ на зони відповідає концепції функціонального розподілу. Функції, які охоплюють територію, кілька підстанцій або станцій, райони міста, зазвичай розташовані в зоні експлуатації.

Структура моделі архітектури інтелектуальних мереж створена шляхом об'єднання концепції рівнів функціональної взаємодії з попередньо представленою

площиною інтелектуальних мереж. Результатом цього злиття є модель, яка охоплює три виміри: Домени SGAM; Зони; Рівні функціональної взаємодії.

Тривимірне представлення моделі архітектури інтелектуальних мереж зображено на рисунку 1.

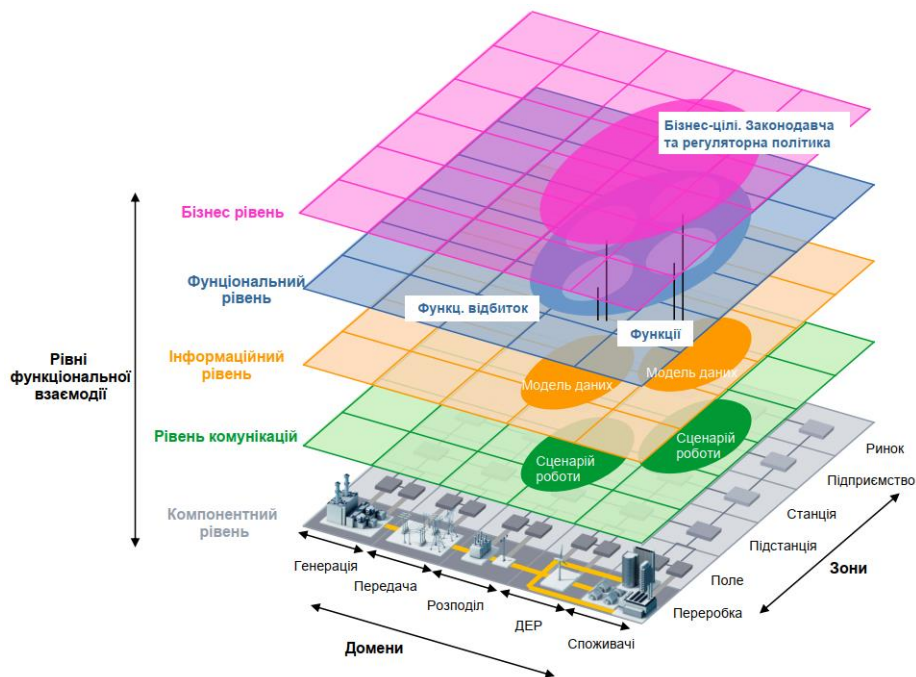


Рис. 1. Ієрархічна структура SGAM [7]

Складаючись з п'яти рівнів функціональної взаємодії, концепція SGAM дозволяє представляти об'єкти та їх взаємозв'язки в контексті доменів інтелектуальних мереж, ієрархій управління інформацією та з урахуванням аспектів функціональної сумісності:

1. Бізнес рівень представляє вузол для обміну комерційною інформацією, пов'язаною з інтелектуальними мережами. SGAM можна використовувати для відображення регуляторних і економічних (ринкових) структур (з використанням узгоджених ролей і обов'язків, бізнес-моделей і сценаріїв використання, продуктів і послуг, залучених учасників ринку. Також на цьому рівні можуть бути представлені економічні можливості, варіанти використання та бізнес-процеси.

2. Функціональний рівень описує варіанти використання системи, функції та послуги, включаючи їх взаємозв'язки. Функції реалізуються залежно від

виконавців і фізичних можливостей застосувань в системах і компонентах архітектури.

3. Інформаційний рівень описує інформацію, яка використовується та передається між функціями, сервісами та компонентами. Він містить інформаційні об'єкти та базові моделі даних.

4. Основна увага на комунікаційному рівні приділяється опису сценаріїв роботи і механізмів для обміну інформацією між компонентами, пов'язаних з ними інформаційними об'єктами або моделями даних.

5. Основна увага на компонентному рівні приділяється фізичному розподілу всіх компонентів, що беруть участь в контексті інтелектуальної мережі. Сюди входять суб'єкти системи і пристрої, обладнання енергосистеми (зазвичай розташоване на технологічному і польовому рівнях), пристрої захисту і телеуправління, мережева інфраструктура (дротові / бездротові комунікаційні з'єднання, маршрутизатори, комутатори, сервери) і будь-які види комп'ютерів.

Комплексні наукові дослідження в галузі забезпечення сталого розвитку енергетичних систем розумних міст дають можливість оцінити поточний рівень ефективності використання ресурсів і перспективи майбутньої трансформації міської інфраструктури. Представлена наукова праця присвячена аналізу інтеграції технологій блокчейн та штучного інтелекту в енергетичні системи розумних міст. Розвиток серверних технологій і поява високопродуктивних алгоритмів обробки великих масивів даних є основою для нового рівня інформаційної підтримки функціонування розумних міст і прийняття більш результативних управлінських рішень у різних галузях, зокрема в енергетичній інфраструктурі міст. Планується дослідження специфіки накопичення великих даних в енергетичних системах розумних міст і використання блокчейн-технологій та алгоритмів штучного інтелекту для підвищення рівня цифровізації міської інфраструктури, що забезпечує прозорість функціонування системи та дозволяє оцінити реальну ефективність для економіки, соціальної сфери й екологічної стійкості [8, 9].

Виникнення нових, більш продуктивних технологій збору інформації про роботу енергетичних систем у розумних містах дозволяє не лише прискорити

обробку даних і оперативно коригувати роботу міської енергетичної інфраструктури, але й більш точно оцінювати поточний стан та виявляти існуючі недоліки в системі. З огляду на розвиток новітніх підходів до збору інформації, її зберігання за допомогою передових блокчейн-технологій, а також створення потужніших алгоритмів штучного інтелекту, виникає потреба у проведенні безперервних наукових досліджень для оптимізації функціонування енергетичних систем у розумних містах.

Сучасні енергетичні системи розумних міст представляють собою складні мережі, які включають пов'язані інфраструктурні об'єкти та працюють завдяки взаємодії їх елементів, забезпечуючи високий рівень технологічності та інновацій. Структура розумного міста охоплює системи генерації електроенергії, що поділяються на традиційні та відновлювані джерела. Згідно з принципами сталого розвитку, поступова відмова від традиційних джерел енергії (теплових електростанцій) спрямована на досягнення нульових викидів CO₂ та інших забруднювачів, які негативно впливають на довкілля. Концепція зеленої енергетики сприяє активному впровадженню відновлюваних джерел, таких як локальні системи опалення, сонячні панелі та вітрові генератори.

Згенеровані енергоресурси важливо зберігати, адже сучасні системи можуть виробляти велику кількість електроенергії та тепла протягом доби, тоді як споживання нерівномірно розподілене між денним та нічним часом. Надлишки ресурсів можна зберігати в акумуляторних батареях, на зарядних станціях та в теплових накопичувачах. Під час пікових навантажень на енергосистему міста акумулятори та зарядні станції компенсують дефіцит ресурсів від генеруючих потужностей.

Теплові сховища дозволяють накопичувати теплову енергію та використовувати її для підтримки комфортної температури в холодний період, що важливо для різних груп споживачів у розумних містах. Підвищення енергоефективності включає використання теплової енергії як важливого ресурсу для оптимізації виробництва тепла і впровадження заходів для мінімізації тепловтрат.

Важливу роль відіграють системи розподілу та передачі, які здійснюють доставку енергоресурсів до споживачів. У розумному місті діє міська енергомережа, яка поділена на локальні мережі для забезпечення ресурсами окремих районів і будівель. Науково-технічний прогрес сприяє поширенню інтелектуальних систем передачі та розподілу енергії, що дає змогу контролювати ефективність мережі та визначати оптимальні напрямки її розвитку.

Використання технології блокчейн набуває все більшої популярності в багатьох видах економічної діяльності, що пов'язано з високим рівнем надійності транзакцій з використанням представленої технології. Для розумних міст, як центрів концентрації інноваційних технологій, блокчейн дозволяє отримати велику кількість переваг, в тому числі оптимізувати функціонування енергетичної системи міста.

Децентралізовані підходи також є основою для розвитку «розумних» електромереж. Електромережі з відновлюваними розподіленими джерелами та електричні інтелектуальні транспортні засоби розширили сферу досліджень. Технологія блокчейн є бажаним рішенням для розумних електромереж, що викликає інтерес до її адаптації. Блокчейн працює в різних частинах мережі, таких як виробництво електроенергії, передача і розподіл електроенергії та споживання електроенергії. Інфраструктура інтелектуальних мереж з інтеграцією блокчейну показана на рисунку 2.

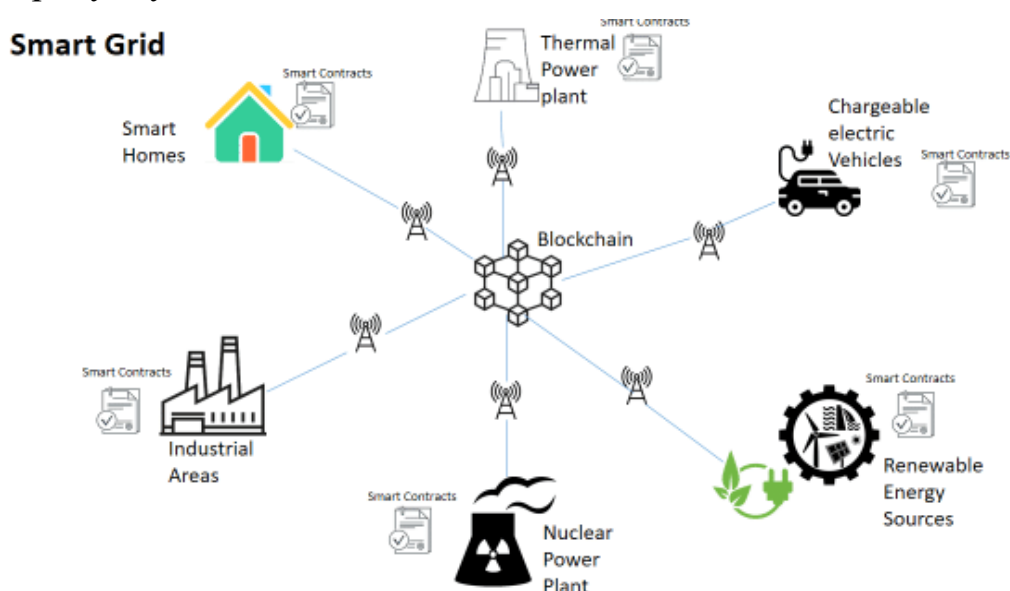


Рис. 2. Інтегровані електромережі з використанням блокчейну [10]

Постійний розвиток блокчейн-технологій та алгоритмів штучного інтелекту зумовлює необхідність впровадження інноваційних рішень у систему управління енергетичною інфраструктурою. Якісна трансформація дозволяє досягти нового рівня ефективності енергетичних систем завдяки автоматизованому регулюванню, яке штучний інтелект здійснює безперервно. Технології блокчейн роблять енергетичні системи прозорішими для споживачів, а також надають можливість використовувати смарт-контракти для забезпечення безпечних фінансових операцій.

Висновки і перспективи. Розвиток інновацій у сфері зберігання та обробки даних, а також створення швидших та ефективніших математичних алгоритмів дозволяють адміністраціям точніше оцінювати роботу енергетичних систем у розумних містах. Паралельно з розвитком енергетичної інфраструктури змінюються підходи до збору даних і побудови більш ефективних систем енергоменеджменту. Створення комплексної системи управління енергетичним сектором розумного міста з моніторингом ключових показників передбачає використання точніших датчиків та спеціалізованого програмного забезпечення.

References

1. Lom, M., & Pribyl, O. (2021). Smart city model based on systems theory. *International Journal of Information Management*, 56, 102092.
2. Humayun, M., Alsaqer, M. S., & Jhanjhi, N. (2022). Energy optimization for smart cities using iot. *Applied Artificial Intelligence*, 36(1), 2037255.
3. Mondschein, J., Clark-Ginsberg, A., & Kuehn, A. (2021). Smart cities as large technological systems: Overcoming organizational challenges in smart cities through collective action. *Sustainable Cities and Society*, 67, 102730.
4. Hoang, A. T., & Nguyen, X. P. (2021). Integrating renewable sources into energy system for smart city as a sagacious strategy towards clean and sustainable process. *Journal of Cleaner Production*, 305, 127161.
5. Ramu, S. K., Saravanan, S., Surya, S., Krishnan, S. S., Sofiya, L., & Geetha, J. S. (2023). Blockchain-based green energy for smart cities. In *Green Blockchain Technology for Sustainable Smart Cities* (pp. 145-166). Elsevier.
6. Herath, H. M. K. K. M. B., & Mittal, M. (2022). Adoption of artificial intelligence in smart cities: A comprehensive review. *International Journal of Information Management Data Insights*, 2(1), 100076.
7. A. Leonardi, K. Mathioudakis, A. Wiesmaier, and F. Zeiger. Towards the smart grid: substation automation architecture and technologies. *Advances in electrical engineering*, 2014, 2014.1: 896296.

8. Szpilko, D., Naharro, F. J., Lăzăroiu, G., Nica, E., & de la Torre Gallegos, A. (2023). Artificial intelligence in the smart city—a literature review. *Engineering Management in Production and Services*, 15(4), 53-75.

9. Ullah, Z., Naeem, M., Coronato, A., Ribino, P., & De Pietro, G. (2023). Blockchain applications in sustainable smart cities. *Sustainable Cities and Society*, 97, 104697.

10. Ullah, H. S., & Aslam, S. (2020). A review of blockchain-based smart grid: Applications, opportunities, and future directions. arXiv preprint arXiv:2002.05650.

STUDY OF TECHNOLOGY DEVELOPMENT PROSPECTS "INTELLIGENT ENERGY SYSTEMS" USING DISTRIBUTED DATABASES

V. Pavlenko, O. Volianyk, I. Ponomarenko, D. Danylchenko

Abstract. *The study of energy systems in smart cities is becoming increasingly relevant in the context of global challenges related to climate change and the need to transition to sustainable energy. The growth of urbanization and the energy demand stimulate the search for innovative solutions to optimize energy consumption and reduce greenhouse gas emissions.*

The purpose of the research is to develop the concept of integrating technologies of distributed databases – "blockchain" and artificial intelligence into the energy systems of smart cities to achieve maximum efficiency, reliability, and sustainability.

The research was conducted by analyzing the scientific literature, collecting and processing data on existing energy systems, and developing mathematical models to evaluate the effectiveness of the proposed solutions. Methods of statistical analysis, machine learning, and simulation modeling were used.

As a result of the research, the structure of the energy system of a smart city was developed, which involves the integration of blockchain to ensure transparency and security of energy exchange, as well as artificial intelligence to optimize energy consumption and forecast demand. The proposed model proved to achieve significant economic efficiency and reduce carbon emissions. Prospects for further research consist in the development of detailed algorithms for various components of the system, as well as in conducting experimental studies on pilot projects.

The integration of blockchain and artificial intelligence into the energy systems of smart cities is a promising direction for increasing their efficiency and sustainability. The proposed model allows for achieving significant energy savings and reducing greenhouse gas emissions. Further research should be directed to the development of specific algorithms and their testing in real conditions.

Key words: *smart city, energy system, blockchain, artificial intelligence, sustainable development, energy efficiency*