

Світове господарство і міжнародні економічні відносини

УДК 332.3:502.131.1:339.9

DOI <https://doi.org/10.5281/zenodo.14836816>

Смарт енергетика як основа сталого розвитку розумних міст

Цимбал Людмила Іванівна

д.е.н., професор, професор кафедри міжнародної економіки, Київського національного економічного університету імені Вадима Гетьмана, 03057, Україна, Київ, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0873-9227>,
Scopus ID: 57207890003

Ковальчук Таміла Григорівна

кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри міжнародної економіки Київського національного економічного університету імені Вадима Гетьмана, 03057, Україна, Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5810-5970>

Прийнято: 16.01.2025 | Опубліковано: 29.01.2025

***Анотація.** Метою статті є функціонування смарт енергетики в рамках смарт-екосистеми міста, взаємодіючи з іншими елементами міської інфраструктури задля підвищення ефективності, екологічності та зручності для мешканців. Розглянуто концепцію смарт енергетики як важливого елементу формування смарт міст, акцент зроблено на інтеграції інноваційних технологій у сферу енергозабезпечення для підвищення ефективності використання ресурсів, зниження негативного впливу на довкілля та покращення якості життя громадян. Проаналізовано ключові моменти смарт економіки, зокрема, використання відновлюваних джерел енергії, впровадження інтелектуальних мереж, енергозбереження та*



автоматизацію управління енергоресурсами. На прикладах розглянуто міжнародний досвід впровадження подібних рішень, їх переваги та недоліки. Під час написання статті використовувались методи аналізу для узагальнення теоретичних аспектів смарт енергетики та її ключових елементів, порівняльний метод допоміг проаналізувати міжнародний досвід впровадження смарт енергетичних технологій у різних країнах, системний підхід дозволив визначити взаємозв'язки між компонентами смарт енергетики та іншими елементами смарт міста, метод кейс-стаді використано для вивчення конкретних прикладів реалізації смарт енергетичних рішень у містах світу, емпіричний аналіз дозволив оцінити поточний стан впровадження смарт енергетики в урбаністичному контексті на основі статистичних даних, моделювання допомогло спрогнозувати можливі ефекти від впровадження інтелектуальних енергетичних систем у міське середовище. Результати дослідження можуть бути корисними для розробки стратегій розвитку смарт міст та формування сталої урбаністичної інфраструктури. У ході дослідження встановлено, що смарт енергетика є ключовим компонентом у формуванні смарт міст, забезпечуючи ефективність використання ресурсів, інноваційність, екологічність, соціальні аспекти, сталий розвиток урбаністичних територій та підвищуючи якість життя населення.

Ключові слова: глобалізація, смарт економіка, смарт місто, смарт енергетика, сталий розвиток, відновлювані джерела енергії, інтелектуальні мережі, енергозабезпечення.



Smart energy as a basis for sustainable development of smart cities

Tsymbal Liudmyla Ivanivna

Doctor of Economics, Professor, Professor of the Department of International Economics, Kyiv National Economic University, Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman, 03057, Ukraine, Kyiv, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0873-9227>, Scopus ID: 57207890003

Kovalchuk Tamila Grygorivna

PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of International Economics of the Kyiv National Economic University, Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman, 03057, Ukraine, Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5810-5970>

Abstract. *The purpose of the article is to analyse the functioning of smart energy within the smart ecosystem of the city, interacting with other elements of urban infrastructure to increase efficiency, environmental friendliness and comfort for residents. The article considers the concept of smart energy as an important element of smart cities, focusing on the integration of innovative technologies into the energy supply sector to increase resource efficiency, reduce negative environmental impacts and improve the quality of life of citizens. The key aspects of the smart economy will be analysed, including the use of renewable energy sources, the introduction of smart grids, energy savings and the automation of energy management. International experience in the implementation of such solutions, their advantages and disadvantages are considered through examples. In order to summarise the theoretical aspects of smart energy and its key elements, the following methods of analysis were used in the preparation of this article: the comparative method helped to analyse the international experience of implementing smart energy technologies in different countries; the systematic approach allowed to identify the*



relationships between smart energy components and other elements of a smart city; the case study method was used to study specific examples of smart energy solutions in cities around the world; the empirical analysis allowed to assess the current state of implementation. The results of the study may be useful in developing strategies for the development of smart cities and the creation of sustainable urban infrastructure. The study found that smart energy is a key component in the formation of smart cities, ensuring resource efficiency, innovation, environmental friendliness, social aspects, sustainable development of urban areas and improving the quality of life of the population.

Keywords: *globalisation, smart economy, smart city, smart energy, sustainable development, renewable energy sources, smart grids, energy supply.*

Постановка проблеми. Смарт енергетика є важливим елементом побудови смарт міста, зважаючи на важливість енергетики у забезпеченні функціонування інфраструктури, будівництва та ін. Зростання урбанізації, кліматичні виклики та виснаження традиційних енергетичних ресурсів роблять питання впровадження розумних енергетичних рішень актуальним для сучасного суспільства. Інтеграція інноваційних технологій, таких як відновлювані джерела енергії, інтелектуальні мережі, системи накопичення енергії та енергетичний інтернет речей, дозволяє досягти нових рівнів енергоефективності та стійкості. Такі підходи сприяють зниженню енергетичних витрат, мінімізації викидів парникових газів і створенню енергетично автономних міських середовищ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження смарт енергетики є важливим елементом наукового пошуку. Роль інтелектуальних мереж у інтеграції сонячної та вітрової енергії в смарт містах розглядається в праці Фанга Х., Місри С. та ін. [11]. Смарт енергетика та розумні енергетичні мережі вивчаються в роботі Лунда Х. [21]. Розумна енергетика як елемент побудови смарт міста є об'єктом дослідження Торнбуша М., Голубчікова О.



[24] та Міхета-Попа Л. [18]. Аналіз можливості розподілених енергосистем у містах з акцентом на децентралізовану генерацію енергії розглядається в книзі Махапатри С. [15]. У праці Чена З. висвітлюються способи використання Інтернету речей для оптимізації енергоспоживання у міській інфраструктурі [5]. Однак важливим питанням наукового пошуку залишається місце смарт енергетики в структурі побудови смарт міста, системі всіх факторів та чинників становлення смарт екосистеми міста. Не вирішеним є питання комплексного розуміння екосистеми смарт міста та можливостей розвитку смарт енергетики як елемента цієї системи.

Відповідно до цього **метою дослідження** є функціонування смарт енергетики в рамках смарт-екосистеми міста, взаємодіючи з іншими елементами міської інфраструктури задля підвищення ефективності, екологічності та зручності для мешканців. Формування екосистеми міста знаходиться в постійній динаміці, що пов'язано в першу чергу з процесом містобудування, реконструкцій, розвитку технологій та ін., що потребує детального вивчення питання місця смарт енергетики.

Виклад основного матеріалу дослідження. Реалізація смарт проєктів в енергетиці на сучасному етапі розвитку глобальної економіки є необхідною передумовою формування смарт економіки. Це передбачає використання цифрових технологій для покращення ефективності функціонування міста, екологічності та комфорту життя, створення смарт систем на національному, регіональному, локальному чи рівні бізнесу, що має забезпечити оптимальне використання ресурсів. Ключовими характеристиками смарт проєктів є використання Інтернету речей (IoT), великих даних (Big Data), штучного інтелекту (AI) і блокчейну, за рахунок автоматизації відбувається мінімізація ручної роботи та негативного впливу на навколишнє середовище. Енергетика є важливим елементом побудови смарт міста і реалізується в багатьох площинах його прояву: інфраструктурі, транспорті, будівництві, енергоспоживанні та ін. (рис.1).

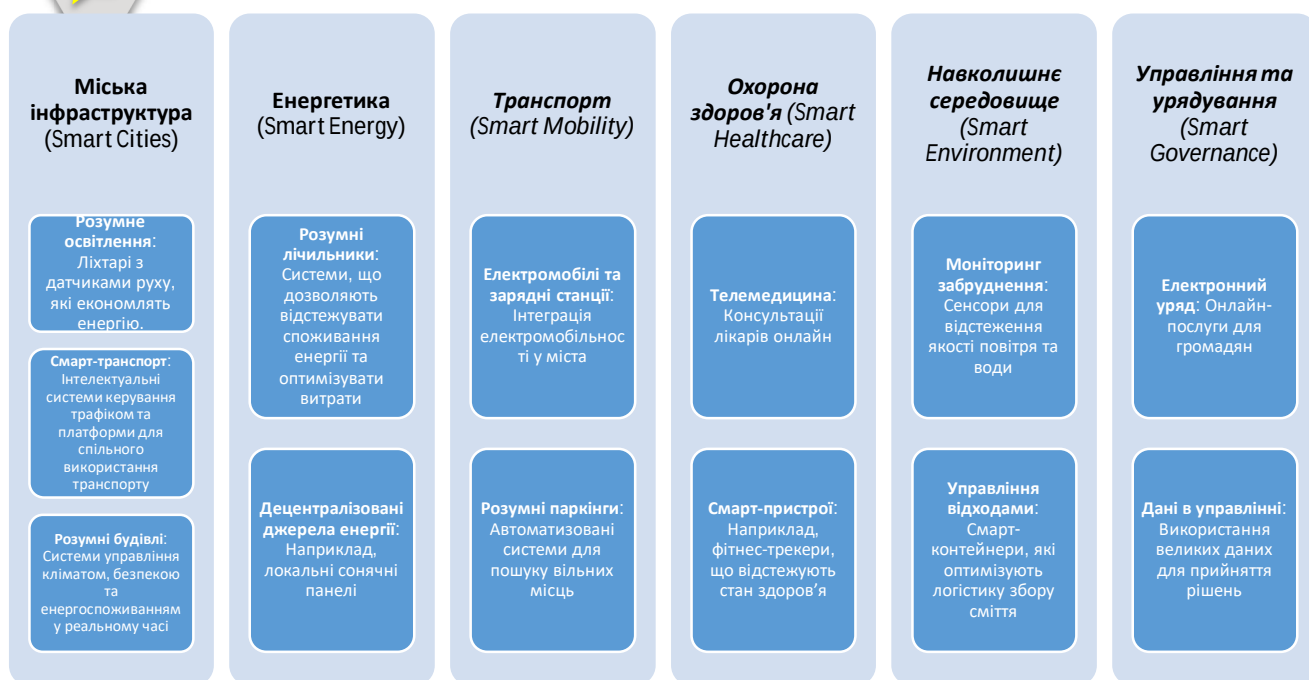


Рисунок 1 – Ключові напрями розвитку смарт енергетики в структурі смарт міста

Ключовими перевагами реалізації смарт енергетики є зниження витрат, в тому числі за рахунок підвищення ефективності та автоматизації процесів, мінімізацію негативного впливу через скорочення викидів, покращення комфортності середовища та обслуговування населення. Важливим елементом побудови смарт міста є використання розумної енергетики, в тому числі енергетичних систем. Кожна країна реалізує проєкти смарт енергетики виходячи зі своїх особливостей та потреб, так, в Копенгагені було впроваджено систему інтелектуальних лічильників, які дозволяють користувачам оптимізувати споживання енергії та інтеграцію відновлюваних джерел енергії в міські мережі [7; 6]. Енергоефективність міста реалізується в значній кількості проєктів, зокрема, в Торонто планується реалізувати проєкт «Sidewalk Labs», що передбачає комплексний підхід до створення розумного району з енергоефективними будівлями, цифровими платформами для громадських обговорень та екологічним транспортом [20]. Екологічно чисте місто з автономними транспортними засобами та відновлюваними джерелами

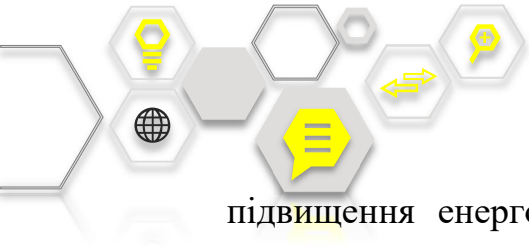


енергії реалізується в ОАЕ [17]. Багато інших міст впроваджують інноваційні рішення задля покращення рівня і можливостей функціонування енергетики як елементу смарт міст (табл.1)

Таблиця 1. Розумна енергетика в смарт містах

Місто	Технологія/Ініціатива	Обсяг фінансування (млн \$)	Опис	Результати
Копенгаген, Данія [7]	Інтелектуальна мережа Smart Grid	70	Встановлення інтелектуальних лічильників для оптимізації споживання та інтеграції відновлюваних джерел енергії.	Зниження енергоспоживання на 10–20%, скорочення викидів CO ₂ на 100 000 тонн щорічно.
Сан-Дієго, США [19]	Інтелектуальне освітлення Smart Lighting	30	Світлодіодне освітлення з сенсорами для адаптації яскравості в залежності від руху та погодних умов.	Зниження енергоспоживання на 60%, щорічна економія понад \$2 млн.
Сонгдо, Південна Корея [26]	Розподілене енергопостачання	120 млн – 40 млрд	Розподілені джерела енергії (сонячні панелі, міні-електростанції) для автономності будівель.	Автономне забезпечення енергією до 40% міських будівель.
Амстердам, Нідерланди [12]	Інтелектуальна зарядна інфраструктура	50	Зарядні станції для електромобілів, інтегровані з мережею, що працюють на відновлюваній енергії.	Скорочення пікового навантаження, частка електромобілів зросла до 25%.
Сінгапур [2]	Розумний контроль енергоспоживання в будівлях	85	Автоматизація енергоспоживання в будівлях для підвищення ефективності (освітлення, кондиціонування).	Зниження енергоспоживання в будівлях до 30%, скорочення витрат мешканців на електроенергію.
Відень, Австрія [4; 13]	Геотермальні теплові насоси та акумулятори енергії	100	Використання теплових насосів і акумуляторів для стабільного постачання тепла з низькими викидами.	Зниження викидів CO ₂ на 50%, зменшення залежності від викопних джерел енергії.
Барселона, Іспанія [14; 3]	ІоТ-система моніторингу енергоефективності	40	Сенсори ІоТ для відстеження та аналізу енергоспоживання в реальному часі.	Збільшення енергоефективності на 25%, підвищення частки зеленої енергії до 50%.

Зведення енергоефективних будівель є ключовим етапом у скороченні споживання енергії в смарт-містах. Такі споруди створюються з акцентом на



підвищення енергоефективності, зниження витрат енергії та генерування відновлюваної енергії безпосередньо на місці.

Це включає використання екологічно чистих будівельних матеріалів місцевого виробництва, встановлення інтелектуальних систем освітлення з датчиками руху та технологіями збору природного світла, а також проєктування вікон і скління для оптимального проникнення денного світла. Такий підхід знижує залежність від штучного освітлення та вентиляції, мінімізуючи теплові втрати чи перегрів приміщень. Прикладом такого підходу є торговий центр Togino в Італії [23].

Зростання потреби в забезпеченні смарт енергією в рамках смарт міст вимагає врахування просторових аспектів [16]. Постачання такої енергії значно збільшує попит на земельні ресурси, оскільки джерела смарт енергії, зокрема відновлювані, залежать від кожного квадратного метра поверхні землі, яка стає ключовим ресурсом для впровадження розумної енергетики [24]. Це робить планування міста, енергетичної інфраструктури та просторового розвитку нерозривно пов'язаними процесами. Їх слід розглядати як єдиний прогресивний континуум, який сприятиме підвищенню якості життя мешканців і загальному соціально-економічному розвитку смарт-міст [25].

Важливість використання смарт енергії підкреслено в інституційних документах Європейського Союзу, так, Директива про енергетичну ефективність будівель [9] орієнтована на інтеграцію смарт технологій в будівлі, з метою підвищення їх енергоефективності. Важливою програмою є також Horizon Europe: 100 кліматично нейтральних міст, що є стратегічною ініціативою Європейського Союзу в межах програми Horizon Europe, спрямована на досягнення кліматичної нейтральності ста європейських міст до 2030 року. Ця амбітна місія є складовою Європейського зеленого курсу (European Green Deal) і має на меті продемонструвати роль урбаністичних центрів як зразкових моделей сталого розвитку для протидії змінам клімату



[10]. Відповідно до цієї програми міста задекларували готовність досягти кліматичної нейтральності до 2030 року. Вибір базувався на спроможності реалізувати інноваційні підходи та активному залученні місцевих спільнот до процесів змін та зменшенні шкідливих викидів, в першу чергу через енергетику. Відповідно до цього розробляються і впроваджуються «кліматичні договори», що включає конкретні заходи для скорочення викидів парникових газів. Договір також передбачає активну співпрацю з громадськістю та бізнесом для забезпечення сталого розвитку. Фінансування цих проєктів відбувається через централізовану програму і кошти спрямовуються на реалізацію інноваційних проєктів у сферах енергетики, транспорту, будівництва та цифрових технологій. Це сприяє впровадженню передових рішень у міське середовище. Учасники програми застосовуватимуть новітні технології, включаючи відновлювані джерела енергії, інтелектуальні енергомережі, низьковуглецевий транспорт, а також рішення для циркулярної економіки. Результатом реалізації програми являються досягнення кліматичної нейтральності в обраних містах до 2030 року; створення підходів, які можуть бути адаптовані та впроваджені в інших міських середовищах Європи та за її межами. Ініціатива має на меті забезпечити якісне поліпшення міського середовища, сприяти соціально-економічному розвитку та стати рушієм сталих трансформацій для майбутніх поколінь.

Важливим елементом інституційного забезпечення формування смарт енергетики є переглянута Директива про енергетичну ефективність будівель (EPBD) в 2024 році, де запропоновано низку заходів, спрямованих на підвищення енергоефективності будівельного фонду, адже 40% енергії, що споживається в ЄС припадає саме на будівлі [9]. Зокрема визначено мінімальні стандарти енергоефективності як для житлових так і для нежитлових будівель, цілі з покращення енергоефективності житлового фонду на 16% до 2030 року відносно 2020 року та на 20-25% до 2035 року. Відповідно до цього,



розробляються нові стандарти для будівництва нових будівель та реконструкції. Всі будинки отримують сертифікат енергоефективності, відповідно до визначеного класу енергоефективності на основі глибокої енергетичної модернізації будівель. Відповідно до цієї директиви визначається необхідність впровадження сонячних енерготехнологій, в тому числі через забезпечення технічної готовності новобудов для встановлення сонячних панелей. Це передбачає відмову від викопного палива через припинення субсидіювання їх встановлення з 1 січня 2025 року [8].

Збільшення енергоефективності смарт міст відбувається і через формування розгалуженої інфраструктури для електромобілів та велосипедистів, розширення доступу до пунктів зарядки електромобілів у будівлях, усунення бар'єрів для їх встановлення, інтеграція системи інтелектуального заряджання та забезпечення інфраструктури для паркування велосипедів. Ці заходи спрямовані на підвищення енергетичної ефективності, зменшення викидів парникових газів та сприяння сталому розвитку будівельного сектора в Європі [22].

Водночас відбувається формування системи накопичення енергії (ESS), інноваційних технологій, які дозволяють розумним містам зберігати надлишкову електроенергію, вироблену під час пікової генерації, та використовувати її у моменти підвищеного попиту. Завдяки ESS усувається дисбаланс між виробництвом та споживанням енергії, забезпечуючи гнучке та стабільне управління енергоресурсами. У смарт-містах ці системи виконують більше, ніж просто функцію зберігання: вони гарантують надійне постачання енергії, підвищуючи її ефективність і стабільність.

Смарт-освітлення виходить за межі традиційних підходів, використовуючи сучасні технології, датчики та системи управління. Воно забезпечує адаптивне освітлення, яке підвищує енергоефективність, покращує комфорт користувачів, підсилює безпеку та додає естетичної привабливості міському середовищу. У контексті розумних міст такі системи відіграють



важливу роль у створенні сталого та взаємопов'язаного міського простору. Завдяки датчикам освітлення автоматично регулює яскравість відповідно до руху або часу доби, знижуючи споживання енергії та рівень світлового забруднення.

Енергетичні підлоги стають інноваційним джерелом енергії для освітлення смарт-міст. Кінетичне освітлення перетворює рухи пішоходів і транспортних засобів на відновлювану енергію. Це не лише знижує споживання енергії, але й покращує громадську безпеку та додає естетичної привабливості міському ландшафту [1].

Ключовими перевагами використання смарт енергетики як елементу концепту смарт міста є зменшення викидів забруднюючих речовин [10], можливість швидкої адаптації енергетичних систем до змін чи перевантажень, зменшення витрат та формування енергонезалежності. Перевагою є також інтеграція екологічних стандартів та уніфікація вимог відповідно до Глобальних ініціатив, однак інвестиції в зелені технології (сонячна енергія, енергоефективні будівлі) часто є більш капіталомісткими, але потребують довгострокових фінансових стратегій.

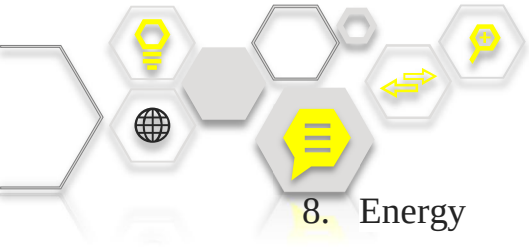
Висновки. Розумні енергетичні рішення відіграють ключову роль у розвитку смарт-міст, забезпечуючи енергоефективність, стійкість та підвищення якості життя мешканців. Інтеграція таких технологій, як системи накопичення енергії, інтелектуальне освітлення, використання відновлюваних джерел енергії та кінетичних підлог, дозволяє оптимізувати енергетичне споживання, зменшити викиди парникових газів і сприяти екологічній сталості. Сучасні підходи до планування та впровадження енергетичних рішень у смарт-містах демонструють, що поєднання інновацій, технологій і людської участі є критично важливим для формування енергетично незалежного та екологічно чистого міського середовища. Загалом, смарт енергетика стає одним з ключових елементів розвитку смарт міст, забезпечуючи функціонування всіх систем міста, проявляючись як підґрунтя



для розвитку смарт транспорту, інфраструктури, охорони навколишнього середовища, декарбонізації загалом. Інноваційні прояви смарт енергетики стають «непомітним» рушієм всіх процесів містобудування. Подальші дослідження та впровадження цих рішень сприятимуть ефективнішому використанню ресурсів, покращенню міської інфраструктури та досягненню кліматичних цілей на глобальному рівні.

Перелік використаних джерел:

1. 10 Smart City Energy Solutions. 2023. URL: <https://energy-floors.com/10-smart-city-energy-solutions-kinetic-floors/> (date of access: 23.12.2024).
2. A Smart Nation that we can trust. URL: <https://www.smartnation.gov.sg/https://www.smartnation.gov.sg/> (date of access: 23.12.2024).
3. Barcelona Ciutat Digital. URL: <https://ajuntament.barcelona.cat/digital/ca> (date of access: 23.12.2024).
4. Best Practice Examples Case Studies Heat Pumps in Multi Family Buildings. URL: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex62/wp-content/uploads/sites/7/5/2023/11/fact-sheet-d12.pdf> (date of access: 24.12.2024).
5. Chen Z., Sivaparthipan C. B., Muthu B. IoT based smart and intelligent smart city energy optimization. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. Vol. 49. P. 101724. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101724> (date of access: 24.12.2024).
6. City Portrait: Smart City Copenhagen. 2023. URL: <https://www.beesmart.city/en/smart-city-blog/copenhagen> (date of access: 24.12.2024).
7. Denmark: A European Smart Grid Hub. URL: https://cdn.copcap.com/hubfs/Downloads/Dokumenter/Denmark_A_European_Smart_Grid_Hub_2011.pdf (date of access: 24.12.2024).



8. Energy and smart cities. 2024. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/research-and-technology/energy-and-smart-cities_en (date of access: 24.12.2024).
9. Energy Performance of Buildings Directive. 2024. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en (date of access: 24.12.2024).
10. EU Mission: Climate-Neutral and Smart Cities. URL: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe/eu-missions-horizon-europe/climate-neutral-and-smart-cities_en (date of access: 24.12.2024).
11. Fang, X., Misra, S., Xue, G. and Yang, D. (2012) Smart Grid—The New and Improved Power Grid: A Survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 14, 944-980. URL: <https://doi.org/10.1109/SURV.2011.101911.00087> (date of access: 24.12.2024).
12. Flexpower Amsterdam. URL: https://www.evdata.nl/wp-content/uploads/2019/04/Information-FlexPower-Amsterdam_EN02.pdf (date of access: 26.12.2024).
13. Heat pumps for multi-family residential buildings in cities. URL: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex62/> (date of access: 26.12.2024).
14. How Smart City Barcelona Brought the Internet of Things to Life. 2016. URL: <https://datasmart.hks.harvard.edu/news/article/how-smart-city-barcelona-brought-the-internet-of-things-to-life-789> (date of access: 26.12.2024).
15. Mahapatra, C.; Moharana, A.K.; Leung, V.C.M. Energy Management in Smart Cities Based on Internet of Things: Peak Demand Reduction and Energy Savings. *Sensors* 2017, 17, 2812. URL: <https://doi.org/10.3390/s17122812> (date of access: 26.12.2024).
16. Maier, S. Smart energy systems for smart city districts: Case study Reininghaus District. *Energy Sustain. Soc.* 2016, 6, 23.



17. Masdar City - Home Page. URL: <https://www.masdarcity.ae/tech-and-innovation/tech> (date of access: 26.12.2024).

18. Mihet-Popa, L. (Ed.). (2023). Smart Grids Technology and Applications. IntechOpen. URL: doi: 10.5772/intechopen.97969 (date of access: 26.12.2024).

19. San Diego Investing \$30M for Smart Street Lights. 2017. URL: <https://www.pcmag.com/news/san-diego-investing-30m-for-smart-street-lights> (date of access: 26.12.2024).

20. Sidewalk Toronto, the vision behind Google's failed city. 2024. URL: <https://www.tomorrow.city/sidewalk-toronto-the-vision-behind-googles-failed-city/> (date of access: 26.12.2024).

21. Smart energy and smart energy systems / H. Lund et al. Energy. 2017. Vol. 137. P. 556–565. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.123> (date of access: 26.12.2024).

22. Strategic Energy Technology Plan. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/research-and-technology/strategic-energy-technology-plan_en (date of access: 26.12.2024).

23. Sustainable Shopping Centres: Green Pea Mall Turin. URL: <https://energy-floors.com/portfolio/green-pea-mall-sustainable-shopping/> (date of access: 26.12.2024).

24. Thornbush M., Golubchikov O. Smart energy cities: The evolution of the city-energy-sustainability nexus. Environmental Development. 2021. Vol. 39. P. 100626. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2021.100626> (date of access: 26.12.2024).

25. Yarashynskaya A., Prus P. (2022). Smart Energy for a Smart City: A Review of Polish Urban Development Plans. *Energies*, 15(22), 8676. URL: <https://doi.org/10.3390/en15228676> (date of access: 26.12.2024).

26. Розумне, дороге та порожнє: як у Південній Кореї з нуля побудували smart city Сонґдо і чим це закінчилося. 2021. URL: <https://hromadske.ua/posts/rozumne-doroge-ta-porozhnye-yak-u-pivdennij-koreyi->



[z-nulya-pobuduvali-smart-city-songdo-i-chim-ce-zakinchilosya](#) (date of access:
26.12.2024).