УДК 004.02

В. О. Голець[1], О. В. Коваль[2]
[1]НТУУ «КПІ ім Ігоря Сікорського»
Проспект Берестейський, 37, 03056 Київ, Україна
[2]Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

Огляд існуючих методів і програмних інструментів керування та планування енергоспоживання

Наведено огляд існуючих методів і програмних інструментів керування та планування енергоспоживання, зокрема для суттєвих споживачів. Розглянуто такі методи керування попитом як цільове керування попитом, цінові сигнали, інтелектуальні системи реагування, енергія як послуга, цифрові двійники, агрегатори попиту та енергокоперативи, а також програмні інструменти для реалізації цих методів. Сформовано збірну характеристику з описом переваг і недоліків кожного методу та інструменту. Висновком статті є формування вимог і задач за результатами аналізу наявних методів і програмних інструментів, вирішення яких дасть можливість зменшити економічні збитки суттєвих споживачів енергоринку.

Ключові слова: *керування попитом, цільове керування попитом, цінові сигнали, інтелектуальні системи реагування, енергія як послуга, цифрові двійники, агрегатори ринку, енергокоперативи, програмні інструменти, програмне забезпечення, граничні обчислення, гранична аналітика.*

Вступ

Методи обліку та прогнозування витрат електроенергії промислових об’єктів у час цифровізації досі є вельми архаїчними. Хоча облік і виконується цифровими пристроями, збір та обробка даних переважно залишаються не автоматизованими. Це призводить до затримок, похибок та унеможливлює якісне планування енергоспоживання промислового обладнання, оскільки облік не включає в себе діагностику стану обладнання, зношення його вузлів і необхідність виведення з експлуатації для ремонту [1].

Отже стає зрозуміло, що без застосування сучасних систем диспетчеризації обладнання, розумного обліку та аналізу, керувати енергоспоживанням підприємст-

© В. О. Голець, О. В. Коваль

ва — неможливо [2]. Необхідні нові підходи, які засновані на цифровізації, розподіленні і автоматизації обчислень [3]. Такі рішення, що здатні розуміти витрати енергії і ресурсу обладнання, передбачати та прогнозувати експлуатаційні події, планувати бізнес процеси та в реальному часі керувати енергоспоживанням мають допомогти енергосистемам зменшити витрати електроенергії та фінансові збитки [4].

Постановка проблеми

Конвенційні методи планування енергоспоживання не враховують високу волатильність бізнес-процесів великих виробництв [3]. Це спричинено відсутністю впливу стану обладнання та позапланових експлуатаційних подій на кінцевий графік навантаження. В умовах енергоринку це спричиняє штрафи та стягнення, як у випадку перевикористання так і недовикористання замовленої кількості енергії. Ці витрати лягають на плечі споживачів товарів і послуг підприємства. Крім того, застосування електростанцій маневреної генерації, тобто мазутних і вугільних для компенсації відхилення від плану, призводить до забруднення довкілля викидами з процесів горіння, а також збільшує питому вартість одиниці енергії [5].

Таким чином, система керування та планування споживання (СКПС) має проводити моніторинг обладнання, технічну оцінку його стану та прогнозувати події, що впливають на графіки споживання електроенергії, і одночасно в реальному часі фіксувати потенційні відхилення та перерозподіляти енергію між суттєвими споживачами енергоринку для зменшення фінансових збитків. Усе це слід реалізовувати на кінцевих об’єктах споживачів у реальному часі автоматизовано, локально та приватно. Тобто вимогою до системи є наявність методів, які формують знання та реалізують інтелектуальні рішення прогнозування подій, що впливають на споживання користувача.

Значну кількість публікацій присвячено проблематиці розумного контролю за споживанням електроенергії. Видається можливим виокремити практики та підходи для вирішення цих задач. У статті авторами проведено огляд і порівняння існуючих методів і програмних інструментів керування попитом.

Огляд останніх досліджень та публікацій

Josephine Kakande та інші у своїй роботі [6] висвітлюють проблему промислового охолодження в Кенії і пропонують концепцію планування та керування попитом електроенергії (Demand Side Management, DSM) для оптимізації споживання холодильних установок. Таке рішення також зустрічається у роботі O. Candra [7]. Автор розглядає ціноутворення за гнучкою моделлю для визначення, як різні споживачі реагують на зміну ціни одиниці енергії. Таким чином, у статті демонструються результати, що свідчать про зменшення забруднення довкілля та зниження собівартості енергії на 11,3 % та 15,3 % у симуляціях за рахунок використання концепції керування попитом [7]. Концепція DSM є загальнометодологічною та включає в себе як набір підходів до планування та керування попитом електроенергії, так і реалізацію цих підходів і їхніх поєднань. Розглянемо ці підходи та програмні інструменти DSM, а також її альтернативи детальніше, з метою визначення переваг і недоліків цієї концепції з точки зору її імплементації на інфраструктурах суттєвих споживачів.

Підходи DSM до керування енергоспоживанням

1. Цільове керування навантаженням (Load Shaping).

Як вказує Robert Basmadjian у своїй роботі [8], основними елементами DSM є класичні зсуви споживання, дроблення піків і навантаження провалів (рис. 1).

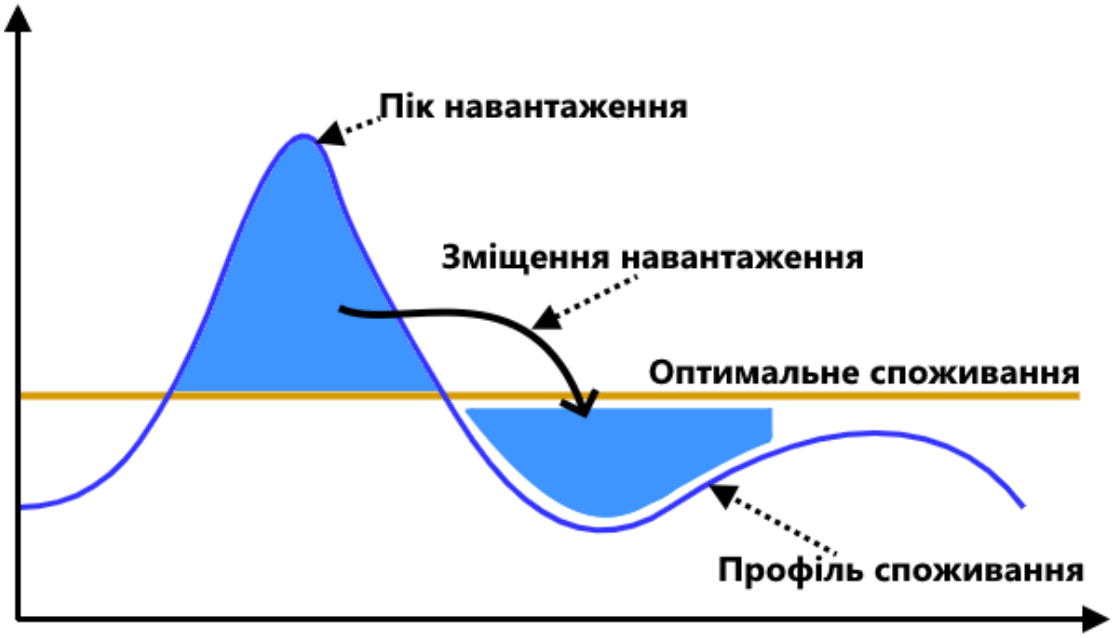

Рис. 1. Класичний підхід зсуву споживання

Таким чином, споживачі в системі керування попитом, за умови наявності альтернативних джерел енергії (акумуляторів, або генераторів), можуть проявляти варіативність на прохання мережі [11]. Це дозволяє згладжувати піки споживання, проте зазвичай вимагає значних витрат на диверсифікацію енергоджерел [12].

2. Цінові сигнали (Price-based DSM).

Одним із основних інструментів стимулювання, якими послуговується DSM, є сигнали ринку, тобто ціноутворення, як зазначає О. Коцар [10]. Мається на увазі система моментних цін і тарифів [9], які постійно оновлюються відповідно до реального та прогнозованого стану балансу між споживанням і генерацією. Ці тарифи повідомляються споживачам, а ті в свою чергу обирають вигідну для себе стратегію (рис. 2).

3. Інтелектуальні системи реагування (Automated DR).

О. Коцар зазначає, що реагування з боку попиту (demand response, DR) покладає відповідальність за зростання попиту та динаміку ринку на власне суттєвих споживачів [10]. Такі системи можуть підвищити ефективність комплексів DSM та полегшити інтеграцію додаткових джерел електроенергії, і, як вказують оглядачі, Automated DR є ключем до низьковуглецевої енергетики [13].

Kim та інші, пропонують хмарну архітектуру ADR як альтернативу конвенційним рішенням задля забезпечення надійності, масштабування та безпеки [14]. Проте виникають очевидні проблеми нагромадження мережевого трафіка, що в свою чергу впливає на оперативність реагування та роботу інших систем, які корис-

туються мережею [15]. Саме цей елемент DSM є ключовим для оперативного керування споживанням, оскільки вхідними параметрами таких систем є інформація від ринку та політика DR підприємства (рис. 3), а вихідними даними є корекція споживання.

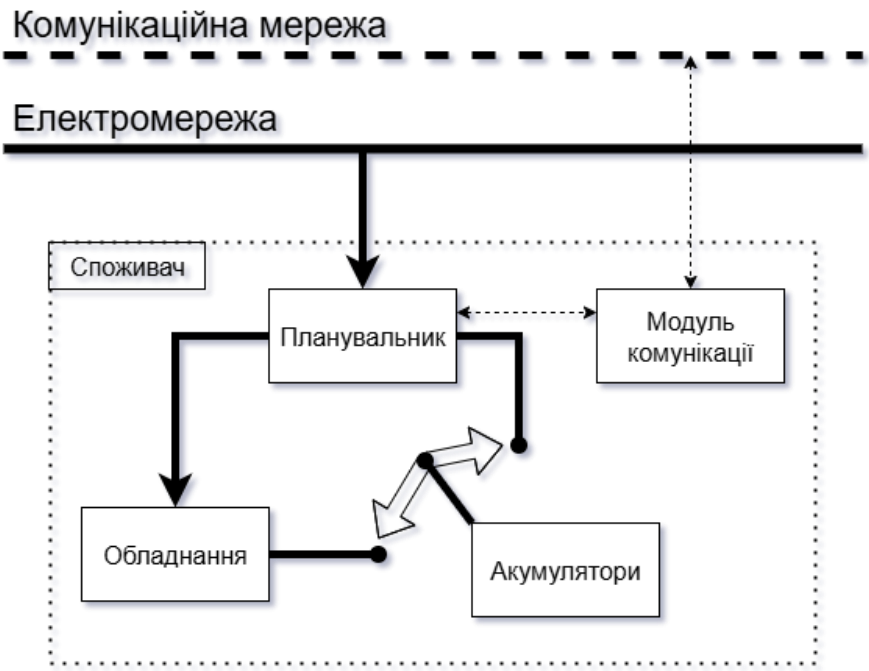

Рис. 2. Принципова схема споживача DSM

Рис. 3. Основні види політики реагування на попит

4. Енергія як послуга (Energy-as-a-Service, EaaS).

Ідея цього методу полягає у створенні проміжного постачальника енергетичних послуг, який бере на себе логістичні деталі енергоринку. Як вказує M. Hamwi, це надає можливість підприємству сконцентруватися на своїй бізнес-моделі, в яку входить споживання «електроенергетичної послуги» [16]. Такий підхід призводить до активної інтеграції відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) як невід'ємного елемента диверсифікованого ринку енергопослуг [17].

EaaS глибоко інтегрує в себе підходи DMS, тобто і його очевидні переваги, проте домішує можливість створення додаткових акторів ринку для забезпечення його високої клієнтоорієнтованості [18].

5. Цифрові двійники енергосистем (Digital Twins).

Створення та використання цифрових двійників надає змогу створювати віртуальний клон обладнання або комплексу, чи навіть підприємства, що має зв'язок з оригіналом, його телеметрією та даними про нього із зовнішніх джерел [19]. Цікавим є можливість надання цифровому двійнику здатності проаналізувати стан обладнання як ще одного із параметрів, які впливають на споживання, та зробити висновок про його зношеність, відхилення від паспортних характеристик і близькість моменту ремонту чи обслуговування. Таким чином, цифрові двійники, що інтегровані в систему контролю попиту, дозволяють підвищити точність прогнозування споживання [20]. У табл. 1 наведено популярне програмне забезпечення для створення таких цифрових двійників.

Таблиця 1. Порівняння ПЗ для створення цифрових двійників

Критерій	**Siemens Energy Twin**	**ABB Ability™ Digital Powertrain**	**Schneider EcoStruxure™**
Призначення	Цифровий двійник енергосистеми підприємства для аналізу та прогнозування	Моніторинг і оптимізація приводів, двигунів, трансмісій	Цифрові двійники будівель, інфраструктури, енергосистем
Цільова аудиторія	Промислові підприємства, енергокомпанії	Машинобудування, виробництво, транспорт	Комерційні об'єкти, дата-центри, муніципалітети
Ключові функції	Прогнозування навантаження, аналіз сценаріїв, SCADA-інтеграція	Виявлення збоїв, прогнозне обслуговування, IoT-аналітика	Енергоменеджмент, BMS-інтеграція, кібербезпека, візуалізація в реальному часі
Технології	AI-моделювання, цифровий двійник енергосистеми	IoT-сенсори, хмарна аналітика, цифрові моделі приводів	IoT, відкриті протоколи (BACnet, Modbus), інтеграція з ETAP
Платформи	Хмарна, локальна	Хмарна, локальна	Хмарна, локальна
Інтеграція з двійниками	Повна модель енергосистеми з реальними даними та прогнозами	Цифровий двійник механічних систем з енергетичними параметрами	Повна інтеграція з ETAP Electrical Digital Twin для симуляцій та тренувань
Переваги	Прогнозування аварій	Зменшення простоїв, технічна діагностика	Оптимізація будівель, зниження ризиків, кіберзахист

6. Агрегатори попиту (Demand Aggregators).

Агрегація попиту є логічним продовженням концепції EaaS і полягає у створенні акторів енергоринку, що об'єднують споживачів у агрегаційні групи, де надмірні споживання одних користувачів компенсуються недоспоживаннями інших [21].

Цей підхід дозволяє підприємствам, у яких неможливо точно передбачити своє споживання, за рахунок дисбалансів у колег, вийти в загальний баланс та уникнути штрафів і стягнень від оператора ринку [10].

З програмних систем, що це реалізують, можна виділити такі:

1) Next Kraftwerke — один із найбільших агрегаторів європейського енергоринку. Серед учасників системи є велика кількість ВДЕ, суттєвих споживачів та акумуляторних об'єктів. Реалізує керування і агрегацію попитом [16];

2) Kiwi Power — альтернативна платформа з Великої Британії, є комерційним застосунком для участі користувачів у агрегаційних групах реагування з боку попиту [12];

3) Enel X Flex Platform — глобальний агрегатор попиту, що реалізує схожий функціонал а також надає можливості прогнозування та візуалізації метрик споживачів [21].

Також слід зазначити наукові розробки в цьому напрямку [10, 22, 23].

7. Енергетичні кооперативи / мікромережі (Micro Grid).

Широкої популярності набуває концепція мікромереж як способу сконцентрувати в одному місці генерацію, споживання та керування енергоресурсами [23]. Таке рішення призводить до створення автономних енергетичних анклавів і активно децентралізує енергомережу. Це дозволяє окремим мікромережам переслідувати власні стратегії користування енергоносіями, керувати фінансами та логістикою на порівняно малих ділянках [24].

До технічних компонентів мікромереж відносять:

— ВДЕ та подібні за масштабом енергоджерела;

— системи акумуляції;

— системи менеджменту з цифровими клонами;

— IoT як невід'ємний елемент моніторингу;

— SCADA для диспетчеризації і керування в реальному часі.

Програмні інструменти DSM керування споживанням

Серед програмних систем, які використовуються як програмні інструменти DSM можна навести такі:

1) OpenADR (Open Automated Demand Response) — система досліджень і стандартів з програмними засобами та відкритими протоколами, що широко поширена в США, ЄС та Японії як інструмент інтеграції споживачів у ринок енергетичних послуг і забезпечення його функціонування. Є відкритим рішенням, що об'єднує зусилля багатьох компаній і груп розробників у напрямку децентралізації енергоринку [25];

2) DRMS (Demand Response Management System) — спільна назва для комерційних інструментів від гігантів ринку, таких як Siemens, Schneider Electric, Honeywell та інших. Мають переважно подібний функціонал рішень з орієнтацією на власні продукти. Варто зазначити, що такі системи інтегруються зі SCADA та доповнюють її функціоналом Smart Grid-системи [26]. Проте існують і некомерційні рішення, як от наприклад приведена Toshi Mandloi система, що спрямована на вирішення завдань керування попитом, яку було викладено в його роботі [28].

У наведених таблицях сформовано стислий перелік переваг і недоліків підходів (табл. 2) та інструментів (табл. 3) DSM.

Таблиця 2. Порівняльна таблиця підходів DSM

Підхід	Переваги	Недоліки
Цільове керування навантаженням	Згладження піків Знижує вартість електроенергії	Не враховує специфіку режимів роботи обладнання Обмежена реакція на аварії та технічне обслуговування Потребує точних моделей споживання
Цінові сигнали	Просте впровадження Працює в реальному часі	Не враховує фізичні обмеження обладнання Не ефективний за умови критичних навантажень Не враховує ризик виходу з ладу обладнання
Інтелектуальні системи реагування	Автоматизована реакція Інтеграція з IoT Гнучкість у керуванні	Потребує складної та дороговартісної інфраструктури Обмежена аналітика про стан обладнання (телеметрія) Не охоплює бізнес-процеси
Енергія як послуга	Переносить відповідальність на постачальника Підходить для суттєвих споживачів Включає в себе обслуговування та фінансування	Залежність від зовнішнього постачальника Обмежена прозорість внутрішніх процесів Не завжди охоплює технічні ризики
Цифрові двійники	Високоточне моделювання Виявлення аномалій Прогнозування технічного стану	Висока вартість впровадження Потребує якісних даних Не охоплює бізнес-ризики без додаткової інтеграції
Агрегатори попиту	Консолідація навантаження Участь у ринку резервів Зниження пікових витрат	Орієнтований на зовнішній ринок Не має доступу до внутрішніх технічних даних Не враховують стан обладнання
Енергетичні кооперативи	Локальна автономія Гнучкість генерації Соціальна згуртованість	Відсутність глибокої аналітики Складність у прогнозуванні аварій Мала придатність для суттєвих споживачів

Таблиця 3. Порівняльна таблиця інструментів DSM

Назва системи	Переваги	Недоліки
AutoGrid Flex [14]	AI-аналітика Прогнозування навантаження Інтеграція ВДЕ Хмарна масштабованість	Висока вартість Обмежена інтеграція з внутрішніми ERP/CMMS Не охоплює глибоку технічну діагностику обладнання
Siemens DRMS [13]	SCADA-інтеграція Автоматизоване керування DR Підтримка OpenADR Надійність	Орієнтована на операторів Вимагає складної інфраструктури Обмежена гнучкість для кінцевих споживачів
Honeywell Energy Manager [15]	Реакція на цінові сигнали Інтеграція з BMS Підтримка OpenADR IoT-сумісність	Низька деталізація технічного стану обладнання Обмежена аналітика ризиків Не охоплює бізнес-процеси
Kiwi Power Platform [12]	Агрегація навантаження Участь у ринку потужності Візуалізація в реальному часі	Не має доступу до внутрішніх технічних даних Обмежена глибина аналітики

Назва системи	Переваги	Недоліки
Next Kraftwerke VPP [16]	Віртуальна електростанція Балансування Контроль ВДЕ AI-прогнозування	Складна інтеграція з локальними системами Не охоплює стан обладнання Відсутність бізнес-аналітики
Enel X Flex Platform [21]	Контрактне керування з боку попиту Прогнозування Інтеграція з ВДЕ Глобальна підтримка	Обмежена прозорість внутрішніх процесів Не охоплює ризики поломок та ТО Вимагає зовнішньої підтримки
OpenADR [25]	Відкритий стандарт Підтримка автоматизованого DR Підтримка різних політик керування з боку попиту Широке застосування в США, ЄС, Японії	Це протокол, а не повноцінна система Потребує окремої реалізації Не включає аналітику стану обладнання чи бізнес-процеси

Висновок

З метою урахування визначених недоліків розглянутих підходів та інструментів планування та керування попитом необхідно розробити архітектуру програмної системи як інструменту, в основу якої буде покладено граничні обчислення та аналітику для оцінки стану обладнання, флуктуацій у бізнес-процесах і факторів ризиків поламок і ремонту установок, зміни в плані споживання яких призводять до порушення балансу споживання. На основі використання такої системи стане можливо комплексно вирішувати задачу планування та керування енергоспоживанням, зокрема для суттєвих споживачів, послуговуючись знаннями про бізнес-процеси їхніх виробничих дільниць і підприємства в цілому.

1. Kummari, Dwaraka. (2023). Energy Consumption Optimization in Smart Factories Using AI-Based Analytics: Evidence from Automotive Plants. Journal for Reattach Therapy and Development Diversities. 6. 10.53555/jrtdd.v6i10s(2).3572.

2. Laayati, O.; Bouzi, M.; Chebak, A. Smart Energy Management System: Design of a Monitoring and Peak Load Forecasting System for an Experimental Open-Pit Mine. *Appl. Syst. Innov*. 2022, 5, 18. https://doi.org/10.3390/asi5010018

3. Avazov, Kuldashbay & Sevinov, Jasur & Temerbekova, Barnokhon & Bekimbetova, Gulnora & Mamanazarov, Ulugbek & Abdusalomov, Akmalbek & Cho, Young. (2025). Hybrid Cloud-Based Information and Control System Using LSTM-DNN Neural Networks for Optimization of Metallurgical Production. Processes. 13. 2237. 10.3390/pr13072237.

4. Kumari, Priti & Dubey, Vandana & Jain, Meenal & Mishra, G.. (2023). Machine Learning-Based Model for Predicting Failure of Physical Machines in Cloud Computing. 10.1007/978-981-99-4795-9_39.

5. Pope, Jason & Coburn, Timothy & Bradley, Thomas. (2024). Committed emissions reductions available from replacement of coal-fired power plants with nuclear plants. Environmental Research: Energy. 1. 10.1088/2753-3751/ad7508.

6. Kakande, Josephine Nakato & Philipo, Godiana & Krauter, Stefan. (2025). Optimized Demand Side Management for Refrigeration: Modeling and Case Study Insights from Kenya. Energies. 18. 3258. 10.3390/en18133258.

7. Candra, O.. (2025). Energy Management of Smart Microgrid Considering Hybrid Optimal Consumption of Demand Side. Operations Research Forum. 6. 10.1007/s43069-025-00451-y.

8. Basmadjian R. Demand-Side Energy and Power Management in Data Centers. Cham : Springer Nature Switzerland, 2025. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-85956-4 (date of access: 21.11.2025).

9. Porter V., Oke P. Predictive analytics in strategic decision-making: Applying machine learning to transform market signals into growth execution. GSC Advanced Research and Reviews. 2025. Vol. 25, no. 1. P. 156–164. URL: https://doi.org/10.30574/gscarr.2025.25.1.0315 (date of access: 21.11.2025).

10. Kotsar, Oleg & Rasko, I.O.. (2023). Improvement of methodical and instrumental support for demand side management in the liberalized electricity markets. Tekhnichna Elektrodynamika. 2023. 68-79. 10.15407/techned2023.03.068.

11. Jiang, Tao & Cao, Yang & Yu, Liang & Wang, Zhiqiang. (2014). Load Shaping Strategy Based on Energy Storage and Dynamic Pricing in Smart Grid. IEEE Transactions on Smart Grid. 1. 10.1109/TSG.2014.2320261.

12. Gellings, Clark. (2017). Evolving practice of demand-side management. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 5. 1-9. 10.1007/s40565-016-0252-1.

13. Yan, Huaguang & Li, Bin & Chen, Songsong & Zhong, Ming & Li, Dezhi & Jiang, Limin & He, Guixiong. (2015). Future evolution of automated demand response system in smart grid for low-carbon economy. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 3. 10.1007/s40565-015-0103-5.

14. Kim, Hongseok & Kim, Young-Jin & Yang, Kai & Thottan, Marina. (2011). Cloud-based demand response for smart grid: Architecture and distributed algorithms. 2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications, SmartGridComm 2011. 10.1109/SmartGridComm.2011.6102355.

15. Stanelyte, Daiva & Radziukyniene, Neringa & Radziukynas, Virginijus. (2022). Overview of Demand-Response Services: A Review. Energies. 15. 1659. 10.3390/en15051659.

16. Hamwi, Michael & Lizarralde, Iban. (2019). Demand-side management and renewable energy business models for energy transition A systematic review.

17. Bakare, Mutiu & Abdulkarim, A. & Zeeshan, Mohammad & Nuhu, Aliyu. (2023). A comprehensive overview on demand side energy management towards smart grids: challenges, solutions, and future direction. Energy Informatics. 6. 10.1186/s42162-023-00262-7.

18. Apajalahti, Eeva-Lotta & Lovio, Raimo & Heiskanen, Eva. (2015). From demand side management (DSM) to energy efficiency services: A Finnish case study. Energy Policy. 81. 10.1016/j.enpol.2015.02.013.

19. Doroshenko, Volodymyr & Kravchenko, Volodymyr. (2020). How the concept of a digital double can modernize the theory and practice of foundry processes using the example of the Lost Foam Casting process // Casting of Ukraine, 2020. No. 10. pp. 22-31..

20. Kovalevskyy S.V., Sydiuk D.M., Kovalevska O.S. (2024). Aspekty vprovadzhennia shtuchnoho intelektu v tekhnolohichne zabezpechennia zhyttievoho tsyklu vyrobiv mashynobuduvannia. Obrobka materialiv tyskom. 109-115. DOI: 10.37142/2076-2151/2024-1(53)109.

21. Oluokun, Odunayo & Akinsooto, Oluwadayomi & Ogundipe, Olorunshogo & Ikemba, Samuel. (2024). Optimizing Demand Side Management (DSM) in Industrial Sectors: A Policy-Driven Approach. International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation. 5. 1009-1021.

22. Rajesh, K. & Visali, N. (2023). Implementation of Evolutionary Algorithms on Day Ahead Demand Side Management With Unit Commitment. 10.21203/rs.3.rs-2710420/v1.

23. Pan, Hao & Ding, Ming & Bi, Rui & Sun, Lei. (2019). Research on Cooperative Planning of Distributed Generation Access to AC/DC Distribution (Micro) Grids Based on Analytical Target Cascading. Energies. 12. 1847. 10.3390/en12101847.

24. Lypov, Volodymyr. (2024). THE CONCEPT OF THE COOPERATIVE-LOCAL MICRO-NETWORK AS AN INSTRUMENT OF INCLUSIVE DEVELOPMENT AND SUPPORT OF UKRAINE'S ENERGY SECURITY.

25. Holmberg, David & Ghatikar, Rish & Koch, Edward & Boch, Jim. (2012). OpenADR advances. ASHRAE Journal. 54. BS16-BS19.

26. Opryshko V.P. Mekhanizmy realizatsiyi prohram keruvannia popytu na elektrychnu enerhiiu u svitovii praktytsi. Zhurnal Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiia. No. 3 2018:53. DOI: https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2018.164340.

27. Choube, Toshi. (2025). Energy Management in Grid Integrated Microgrid System using Demand Response. Power System Technology. 49. 767-783. 10.52783/pst.1621.

Надійшла до редакції 13.08.2025