УДК 621.331:621.311.6.03 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.31

Н. П. СОКОЛОВА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації та енергоменеджменту
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0001-5190-2934

І. В. ПРОХОРЕНКО
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації та енергоменеджменту
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0002-3397-662X

Н. А. ТИМОШЕНКО
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації та енергоменеджменту
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0002-9713-7876

Т. А. МАЗУР
кандидат технічних наук,
доцент кафедри автоматизації та енергоменеджменту
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0001-8378-6763

СУЧАСНІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

У даній роботі представлено комплексний аналіз сучасних автоматизованих систем моніторингу та обліку електроенергії, розглядаючи їх як ключовий інструмент цифрової трансформації. Актуальність дослідження зумовлена зростанням вартості енергоресурсів, посиленням екологічних вимог та необхідністю підвищення операційної ефективності. Центральним елементом аналізу є розгляд багаторівневої архітектури сучасних систем обліку (АСКОЕ, Smart Metering), яка забезпечує гнучкість та масштабованість рішень. На нижньому, вимірювальному рівні, інтелектуальні лічильники та датчики здійснюють первинний збір даних. Середній, комунікаційний рівень, функціонує як «нервова система», агрегуючи дані через промислові контролери та концентратори. Верхній, серверний рівень, є «мозком» системи, де відбувається зберігання та обробка інформації. Нарешті, аналітичний рівень надає користувачам інструменти для візуалізації, аналізу та прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Особливу увагу в статті приділено комунікаційним технологіям, що є основою для надійного та безпечного двостороннього обміну даними. Підкреслюється, що не існує єдиного універсального рішення, тому на практиці часто використовується гібридний підхід, що поєднує різні технології. Дротові технології, зокрема PLC (Power Line Communication), яка використовує існуючі силові лінії для передачі даних, що значно здешевлює розгортання масових систем, особливо в житловому секторі.

Бездротові технології, такі як стільникові мережі GSM/GPRS/LTE (для віддалених об'єктів та великих споживачів) та локальні радіомережі ZigBee і LoRaWAN, що ідеально підходять для «Інтернету речей» (IoT) завдяки низькому енергоспоживанню та здатності створювати самовідновлювані mesh-мережі. Перспективні напрями розвитку пов'язані з інтеграцією штучного інтелекту для предиктивного аналізу, використанням цифрових двійників та переходом до концепції Smart Energy Management, що визначатиме майбутнє енергетичної ефективності.

Ключові слова: *автоматизовані системи моніторингу, облік електроенергії, цифрова трансформація, автоматизована система моніторингу та обліку електроенергії, Smart Metering, інтелектуальні лічильники, штучний інтелект.*

© Соколова Н. П., Прохоренко І. В., Тимошенко Н. А., Мазур Т. А., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

N. P. SOKOLOVA
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation and Energy Management
State University "Kyiv Aviation Institute"
ORCID: 0000-0001-5190-2934

I. V. PROKHORENKO
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation and Energy Management
State University "Kyiv Aviation Institute"
ORCID: 0000-0002-3397-662X

N. A. TYMOSHENKO
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation and Energy Management
State University "Kyiv Aviation Institute"
ORCID: 0000-0002-9713-7876

T. A. MASUR
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Automation and Energy Management
State University "Kyiv Aviation Institute"
ORCID: 0000-0001-8378-6763

MODERN ELECTRICITY MONITORING AND ACCOUNTING SYSTEMS

This paper presents a comprehensive analysis of modern automated electricity monitoring and accounting systems, considering them as a key tool for digital transformation. The relevance of the study is due to the increasing cost of energy resources, increasing environmental requirements and the need to increase operational efficiency. The central element of the analysis is a detailed consideration of the multi-level architecture of modern accounting systems (ASKOE, Smart Metering), which provides flexibility and scalability of solutions. At the lower, measuring level, smart meters and sensors perform primary data collection. The middle, communication level, functions as a "nervous system", aggregating data through industrial controllers and hubs. The upper, server level, is the "brain" of the system, where information is stored and processed. Finally, the analytical level provides users with tools for visualization, analysis and making informed management decisions.

The article pays special attention to communication technologies, which are the basis for reliable and secure two-way data exchange. It is emphasized that there is no single universal solution, therefore, in practice, a hybrid approach is often used that combines different technologies. Wired technologies, in particular PLC (Power Line Communication), which uses existing power lines for data transmission, which significantly reduces the cost of deploying mass systems, especially in the residential sector.

Wireless technologies, such as GSM/GPRS/LTE cellular networks (for remote sites and large consumers) and ZigBee and LoRaWAN local area radio networks, which are ideally suited for the "Internet of Things" (IoT) due to their low power consumption and the ability to create self-healing mesh networks. Promising development directions are associated with the integration of artificial intelligence for predictive analysis, the use of digital twins and the transition to the concept of Smart Energy Management, which will determine the future of energy efficiency.

Key words: *automated monitoring systems, electricity metering, digital transformation, automated electricity monitoring and metering system, Smart Metering, intelligent meters, artificial intelligence.*

Постановка проблеми

Розвиток сучасних енергетичних систем відбувається у тісному взаємозв'язку з глобальними процесами цифровізації. Підвищення вартості енергоресурсів, екологічні обмеження та вимоги до надійності енергопостачання зумовлюють необхідність удосконалення систем контролю та управління енергоспоживанням. У цьому контексті автоматизовані системи контролю та обліку енергоресурсів (АСКОЕ) виступають фундаментальною складовою сучасних підприємств і комунальних систем, оскільки забезпечують прозорість споживання, зниження енергетичних витрат та можливість оптимізації навантажень.

Проте розвиток технологій не обмежується лише класичними системами збору даних. Поява інтелектуальних лічильників та технологій Smart Metering стала якісно новим етапом у розвитку енергетики. На відміну від традиційних методів, орієнтованих лише на облік та комерційні розрахунки, Smart Metering передбачає інтеграцію з інформаційними мережами, двосторонній обмін даними, можливість управління навантаженням у режимі реального часу, а також залучення споживачів до процесу енергетичного менеджменту. Це створює підґрунтя для побудови Smart Grid – інтелектуальних енергетичних систем нового покоління.

Сьогодні більшість енергетичних компаній продовжують використовувати застарілі методи комерційного обліку, що базуються на ручному знятті показників або на періодичному автоматизованому зборі даних. Такий підхід має низку суттєвих недоліків:

По-перше, він не дозволяє здійснювати оперативний контроль параметрів споживання, що призводить до неможливості швидко реагувати на перевантаження, аварії чи несанкціоновані підключення.

По-друге, відсутність гнучкої тарифної політики не стимулює споживачів до зниження навантажень у години пікових потреб.

По-третє, різні виробники лічильників застосовують власні протоколи передачі даних, що ускладнює інтеграцію обладнання у єдину систему.

Таким чином, для вирішення окреслених проблем необхідна інтеграція нових комунікаційних технологій та створення єдиного цифрового середовища, здатного забезпечити безпечну, надійну та масштабовану інфраструктуру Smart Metering.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останнє десятиліття характеризується активними науковими розробками у сфері інтелектуального енергообліку. В українських і європейських роботах значна увага приділяється архітектурі АСКОЕ, методам їх інтеграції з корпоративними системами управління, а також економічному ефекту від впровадження таких рішень. У працях [1, 2] висвітлено методи підвищення енергоефективності за допомогою автоматизованих систем контролю, а також можливості інтеграції таких систем у загальну інфраструктуру енергоменеджменту підприємства. Автори [3, 4] розкривають сучасні підходи до систем енергоменеджменту, класифікацію SCADA-систем, архітектуру та функціональні можливості. Це становить базу для розуміння того, як SCADA інтегрується у виробниче середовище та які рішення підтримують енергетичний моніторинг. У працях [5, 6] розглядає аналіз комунікаційних технологій для Smart Metering у міських агломераціях. Вона підкреслює роль надійних комунікаційних систем для збору даних з численних вузлів обліку. У дослідженнях [7, 8] надається огляд штучного інтелекту, що є ключовим для підвищення динамічності та адаптивності систем управління енергією за допомогою AI-технологій.

Формулювання мети дослідження

Метою даної статті є систематизація підходів до побудови автоматизованих систем енергообліку, аналіз новітніх комунікаційних технологій Smart Metering, а також визначення перспективних напрямів розвитку таких систем у промисловості, енергетиці та житлово-комунальному господарстві.

Викладення основного матеріалу дослідження

Типова архітектура автоматизованої системи комерційного обліку електричної енергії (АСКОЕ) (рис. 1) являє собою ієрархічну, багаторівневу структуру, розроблену для ефективного моніторингу, збору, обробки та аналізу даних про споживання електроенергії. Ця архітектура забезпечує високу точність обліку, прозорість даних та підтримку прийняття управлінських рішень.

Типова архітектура АСКОЕ включає кілька функціональних рівнів:

Рівень вимірювання – інтелектуальні лічильники, сенсори напруги та струму, датчики навантажень.

Рівень збору даних – локальні контролери та концентратори, що виконують первинну обробку інформації та її буферизацію.

Серверний рівень – системи управління базами даних, аналітичні модулі, SCADA-системи, що забезпечують централізований контроль.

Рівень управління холдингом – корпоративні платформи ERP та EMS, що дозволяють інтегрувати енергетичні дані у бізнес-процеси підприємства. До основних переваг такого багаторівневого структурування можна віднести:

Рис. 1. Типова архітектура АСКОЕ по рівнях

Масштабованість – можливість додавати нові пристрої на рівні вимірювання або розширювати функціонал на верхніх рівнях без значної перебудови всієї системи.

Модульність – окремі рівні та їх компоненти можуть оновлюватися або замінюватися незалежно, що спрощує обслуговування та модернізацію.

Надійність та відмовостійкість – розподіл функцій між рівнями підвищує загальну надійність. Наприклад, втрата зв'язку з серверним рівнем не призводить до втрати даних на рівні збору, завдяки буферизації.

Оптимізація потоків даних – фільтрація та первинна обробка даних на нижчих рівнях зменшує обсяг інформації, що передається та обробляється на верхніх рівнях, знижуючи навантаження на мережу та сервери.

Гнучкість та інтеграція – завдяки стандартизованим інтерфейсам та протоколам, АСКОЕ легко інтегрується з іншими корпоративними системами, створюючи єдиний інформаційний простір.

Безпека – можливість реалізації багаторівневих стратегій кібербезпеки, що включають фізичний захист на рівні вимірювання, мережеву безпеку на рівні збору даних та захист застосунків на серверному рівні.

Таке багаторівневе структурування дозволяє не лише оптимізувати потоки даних, а й забезпечує масштабованість системи, можливість поступового оновлення компонентів та інтеграцію з новими технологіями. Саме цей підхід приводить нас до концепції Smart Metering – системи передачі та аналізу даних споживання електроенергії в реальному часі або близько до нього. Еволюція систем енергообліку від AMR (Automatic Meter Reading) до AMM (Automated Meter Management), та, зрештою, до Smart Grid свідчить про зростаючу роль інформаційних технологій в енергетиці. Якщо AMR забезпечувала лише автоматизоване зчитування показників, то AMI вже дозволяє двосторонню комунікацію, управління навантаженням, діагностику обладнання та впровадження гнучких тарифів.

Особливість Smart Metering (рис. 2) полягає у створенні динамічного енергетичного середовища, де кожен споживач може бути не лише користувачем, а й виробником енергії (prosumer). Це відкриває можливості для інтеграції відновлюваних джерел енергії, розвитку локальних мікромереж та застосування блокчейн-технологій у комерційному обліку.

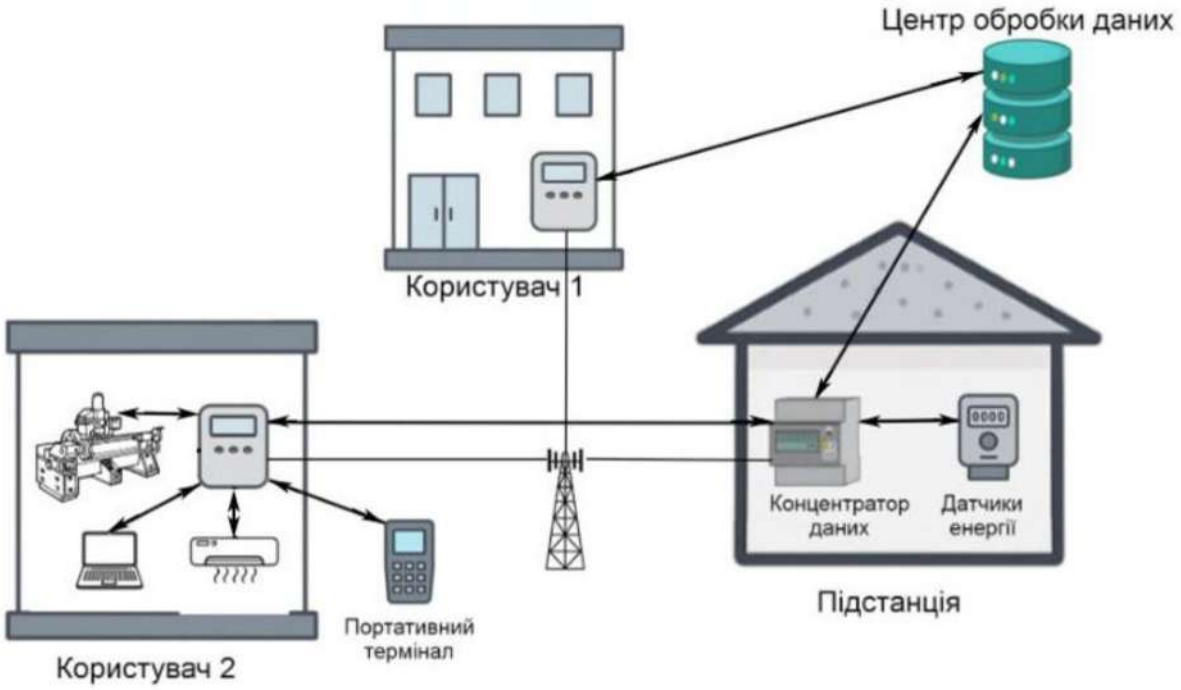

Рис. 2. Система Smart Metering та її компоненти

Надійна робота Smart Metering безпосередньо залежить від вибору телекомунікаційної інфраструктури. На даний час застосовуються такі технології:

Бездротові – GSM/GPRS/EDGE, LTE, 5G – забезпечують високу швидкість передачі даних і охоплюють значні території. ZigBee та 6LoWPAN орієнтовані на локальні енергоефективні мережі з низьким енергоспоживанням. WiMAX та Wi-Fi застосовуються у корпоративних мережах.

Дротові – PLC (Power Line Communication) із стандартами PRIME і SITRED, що використовують наявні електричні мережі як канал зв'язку; M-Bus для теплових, газових і водяних лічильників; DLMS/COSEM та IEC 61850 як протоколи стандартизації. Гібридні рішення поєднують дротові та бездротові технології, що підвищує надійність і дає змоги балансувати навантаження на комунікаційну мережу. Міжнародний досвід підтверджує

ефективність таких технологій. В Італії вже встановлено понад 30 мільйонів інтелектуальних лічильників на базі PLC, у Франції реалізується програма Linky, що передбачає масове розгортання Smart Metering із двостороннім зв'язком, а у країнах Скандинавії успішно використовується LTE для управління енергетичними мережами.

Подальший розвиток Smart Metering пов'язаний із впровадженням індустріального інтернету речей (IIoT), технологій Big Data та штучного інтелекту. Завдяки цьому можливо здійснювати:

– прогнозування навантажень з урахуванням погодних умов та поведінки споживачів;
– виявлення аномалій у споживанні, що свідчать про аварійні стани чи крадіжки енергії;
– оптимізацію генерації та розподілу, включаючи балансування відновлюваних джерел;
– створення цифрових двійників енергетичних систем для моделювання та тестування режимів роботи.

Таким чином, Smart Metering стає не лише системою обліку, а комплексною платформою управління енергетичними процесами.

Висновки

Проведене дослідження підтверджує, що впровадження автоматизованих систем контролю та обліку енергоресурсів у поєднанні з технологіями Smart Metering є необхідною умовою сучасної цифрової трансформації енергетики. Такі системи дозволяють не лише здійснювати комерційний облік, а й формувати комплексне інформаційне середовище, у якому забезпечується прозорість енергоспоживання, оперативність реагування на аварійні ситуації та підвищення ефективності використання енергоресурсів.

Важливим аспектом розвитку Smart Metering є створення надійної комунікаційної інфраструктури. Результати аналізу свідчать, що застосування різних каналів передачі даних – від PLC-технологій до сучасних мобільних стандартів LTE та 5G – дозволяє реалізувати масштабовані й стійкі до збоїв системи, адаптовані до потреб як промислових підприємств, так і житлово-комунального сектору. При цьому міжнародні стандарти IEC та IEEE, а також ініціативи Європейського Союзу щодо відкритих протоколів забезпечують сумісність обладнання різних виробників і сприяють розвитку конкурентного ринку. Інтеграція Smart Metering з корпоративними інформаційними системами, такими як SCADA, ERP та EMS, розширює його функціональні можливості, перетворюючи традиційну систему обліку на інтелектуальну аналітичну платформу.

Використання технологій штучного інтелекту, великих даних і цифрових двійників дозволяє прогнозувати енергетичні навантаження, виявляти аномалії у споживанні та оптимізувати роботу генеруючих і розподільчих систем.

Отже, інтелектуальні системи енергообліку та комунікаційні технології Smart Metering становлять основу для побудови енергетики нового покоління, орієнтованої на сталий розвиток, енергоефективність та інтеграцію відновлюваних джерел. Перспективи подальших досліджень полягають у розробці методів використання блокчейн-технологій у комерційному обліку, впровадженні мобільних сервісів для взаємодії з кінцевим споживачем, а також у дослідженні можливостей мереж 5G та 6G для побудови повноцінних енергетичних екосистем.

Список використаної літератури

1. ISO 50001:2018. Energy management systems – Requirements with guidance for use. International Organization for Standardization, 2018. 36 p.
2. ДСТУ EN 62053-21:2017. Прилади для вимірювання електричної енергії (стаціонарні прилади) класів точності 1 і 2. [Чинний від 01.07.2019]. К.: ДП «УкрНДНЦ», 2017.
3. Мазур І. І., Остроух А. В., Кондратюк Д. М. Системи енергоменеджменту: сучасні підходи та інструменти // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Енергетика. 2021. № 2. С. 22–29.
4. Бурмістров С. Ю. Автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ): технології та досвід впровадження // Електротехніка і електромеханіка. 2020. № 4. С. 14–19.
5. Гаврилюк В. М., Черненко О. О. Енергетичний аудит та енергоефективність підприємств: монографія. Київ : НТУУ «КПІ», 2019. 164 с.
6. Козлов В. А. Технології SCADA в енергетиці: огляд можливостей // Електротехніка і автоматизація. 2022. № 1. С. 40–45.
7. Поліщук, В. Й. Аналіз комунікаційних технологій для Smart Metering в умовах міських агломерацій / В. Й. Поліщук, О. В. Мороз // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електроенергетики». 2019. Частина 3. С. 102–106.
8. Singh, S., & Singh, J. (2018). Artificial intelligence in smart grid: A review. Journal of Cleaner Production, 172, 481–494.
9. Galli, S., Scaglione, A., & Wang, Z. (2011). For the grid and through the grid: the role of power line communications in the smart grid. Proceedings of the IEEE, 99(6), 998–1027.

References

1. ISO. (2018). *ISO 50001:2018 – Energy management systems – Requirements with guidance for use*. International Organization for Standardization.

2. Ukrainian Research and Training Center for Standardization. (2017). *DSTU EN 62053-21:2017. Electricity metering equipment (stationary meters) classes 1 and 2*.

3. Mazur, I. I., Ostroukh, A. V., & Kondratiuk, D. M. (2021). Energy management systems: modern approaches and tools. *Bulletin of NTUU "KPI". Series: Power Engineering*, (2), 22–29.

4. Burmistrov, S. Y. (2020). Automated systems for commercial electricity metering (ASCEM): technologies and implementation experience. *Electrical Engineering and Electromechanics*, (4), 14–19.

5. Havryliuk, V. M., & Chernenko, O. O. (2019). Energy audit and energy efficiency of enterprises: Monograph. Kyiv : NTUU "KPI".

6. Kozlov, V. A. (2022). SCADA technologies in energy: capabilities overview. Electrical Engineering and Automation, (1), 40–45.

7. Polyshchuk, V. Y., & Moroz, O. V. (2019). Analysis of communications technologies for Smart Metering in urban agglomerations. In Technical Electrodynamics: Thematic Issue "Problems of Modern Electric Power Industry" (Part 3, pp. 102–106).

8. Singh, S., & Singh, J. (2018). Artificial intelligence in smart grid: A review. Journal of Cleaner Production, 172, 481–494.

9. Galli, S., Scaglione, A., & Wang, Z. (2011). For the grid and through the grid: the role of power line communications in the smart grid. Proceedings of the IEEE, 99(6), 998–1027.

Дата першого надходження рукопису до видання: 18.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 14.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025