

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

УДК 339.944; 620.621

DOI 10.20535/1813-5420.2.2023.279641

О.В. Новосельцев¹, чл. кор. НАН України, д-р техн.наук; ORCID 0000-0001-9272-6789

Т.О. Євтухова², канд. техн.наук., доцент; ORCID 0000-0003-4778-2479

Л.В. Чуприна¹, ORCID 0000-0002-7707-6615

¹Інститут загальної енергетики НАН України

²Міжрегіональна академія управління персоналом

МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ КОМПЛЕКСНО ЗБАЛАНСОВАНОЇ СИСТЕМИ ВІРТУАЛЬНОГО ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ

Системи енергоменеджменту є одним з найпотужніших і найпоширеніших інструментів вирішення проблем підвищення ефективності використання енергоресурсів, зменшення енергоємності виробництва і, як наслідок, підвищення конкурентоспроможності економіки будь-якої країни. Серед пріоритетних завдань енергоменеджменту одними з ключових є мінімізація негативних наслідків впливу енергоємних технологічних систем на навколишнє середовище та задоволення вимог споживачів до якості енергозабезпечення. Це потребує від систем енергоменеджменту організації та проведення закупівель обладнання і послуг для ефективного перетворення, розподілу та використання енергії з урахуванням економічних, енергетичних та екологічних (3-Е) обмежень. При цьому все більше актуальними стають завдання щодо оперативного управління процесами енергозабезпечення споживачів в реальному часі. Для комплексного, еко-збалансованого розв'язання цих проблемних завдань в даній роботі пропонується використовувати віртуальні системи енергоменеджменту, які реалізують замкнені цикли управління енерговикористанням. Це потребувало вирішення таких задач, як проведення порівняльного аналізу методів і механізмів підвищення 3-Е ефективності за рахунок впровадження комплексно збалансованої системи енергоменеджменту, побудови та структуризації багаторівневих систем управління, розроблення теоретичних засад координування взаємодії їх елементів. Реалізація цих завдань в рамках комплексно збалансованої системи віртуального енергоменеджменту здійснюється на базі інформаційно-комунікаційних технологій, які використовуються операторами системи для моніторингу, контролю та оптимізації параметрів бізнес-діяльності організації (компанії), у тому числі пов'язаних з діями персоналу по керуванню режимами роботи технологічного та допоміжного обладнання в реальному часі. Загалом, це дослідження систематизує основні напрямки, методи та моделі побудови систем віртуального комплексно збалансованого енергоменеджменту і пропонує концептуальні рішення для побудови такого роду систем.

Ключові слова: енергетична, економічна та екологічна ефективність; віртуально організовані системи енергоменеджменту

Вступ

Російська військова агресія проти України значно усугубляє проблеми забезпечення штатних режимів роботи систем енергопостачання підприємств і населення. Так, під час війни через втрати та руйнування інфраструктури пошкоджено чи зруйновано понад 227 підприємств, заводів та фабрик, близько 4% генеруючої потужності зруйновано під час бойових дій, ще 35% потужності знаходиться на окупованих територіях. Зруйновано або знаходяться на окупованих територіях близько 50% теплової генерації, 30% сонячної генерації та понад 90% вітрогенерації, знищені нафтопереробні заводи.

Оперативне (бажано в реальному часі) усунення негативних наслідків військової агресії вимагає застосування нових підходів, методів та моделей інформаційно-апаратного управління. Ситуацію усугубляє дефіцит енергоресурсів і зростання цін на світових ринках, що у сукупності потребує системно збалансованого розв'язання проблем оперативного управління наряду з завданнями щодо підвищення енергетичної, економічної та екологічної (3-Е) ефективності систем енергопостачання.

Найважна в Україні система енергозабезпечення споживачів за своєю складністю, протяжністю та багаторівневою структурою управління належить до систем соціально-виробничого типу, де розв'язання означених проблем потребує застосування апробованої у світовій практиці інструментальної бази, серед різноманіття яких системи енергоменеджменту займають провідне місце завдяки комплексному та

системно узгодженому використанню різних за своєю природою та спрямованістю інструментів. Це, насамперед, механізми заохочувального регулювання та економічного стимулювання підприємств, установ та кінцевих споживачів до енергозбереження, методологія інтегрованого ресурсного планування, перформанс-контрактинг та енергосервіс. Реалізацію цих інструментів, як правило, забезпечують енергосервісні компанії (ЕСКО), діяльність яких спрямована на отримання гарантованого результату від реалізації заходів з підвищення 3-Е ефективності на об'єктах споживачів (замовників) [1].

Мета та задачі дослідження.

Метою роботи є розроблення методологічної бази побудови багаторівневої системи віртуального енергоменеджменту, спрямованої на системно збалансоване розв'язання проблем оперативного управління та підвищення 3-Е ефективності функціонування систем енергозабезпечення споживачів.

Для досягнення цієї мети було поставлено та вирішено такі задачі: проведення співставного аналізу методів і механізмів підвищення 3-Е ефективності за рахунок впровадження комплексно збалансованої системи енергоменеджменту; побудови та структуризації елементів системи енергоменеджменту багаторівневих енерготехнологічних систем соціально-виробничого типу; розроблення теоретичних засад координування взаємодії елементів багаторівневої системи.

Матеріал і результати досліджень.

На сьогодні комплексно збалансовані системи енергоменеджменту на підприємствах є одним з основних інструментів вирішення проблеми дефіциту енергоресурсів, зменшення енергоємності виробництва і загалом підвищення конкурентоспроможності економіки будь-якої країни. Серед пріоритетних завдань енергоменеджменту, окрім реалізації заходів з ефективного використання енергії, є мінімізація наслідків для навколишнього середовища та задоволення соціальних вимог до якості життя. До сфери впливу енергоменеджменту відноситься також активна, організована та систематична координація процесів і процедур закупівель обладнання і послуг, перетворення, розподілу та використання енергії, спрямованих на задоволення потреб споживачів з урахуванням економічних, соціальних та екологічних цілей [1-4].

Під комплексно збалансованою системою 3-Е енергоменеджменту будемо розуміти систему управління підвищенням ефективності функціонування економіки країни у цілому, окремого її регіону або підприємства (організації), що реалізується технічно досяжними та економічно доцільними методами та засобами і здійснюється за системно узгодженими критеріями енергетичної, економічної та екологічної ефективності.

Вирішенню проблеми підвищення ефективності функціонування економіки країни присвячені фундаментальні наукові праці багатьох українських та зарубіжних вчених [5-7], але дослідженню сучасних віртуально організованих систем енергоменеджменту, що реалізують замкнені цикли управління з залученням використання енергетичних ресурсів, практично відсутні. Реалізація цих циклів дозволяє більш ефективно використовувати первинні ресурси (енергетичні та фінансово-економічні), послабити негативний вплив на екологію тощо [8].

Схема системи неперервного 3-Е енергоменеджменту, що одночасно відображає і елементи замкненого циклу циркулярної економіки [9], наведена на рис. 1. В нашому випадку вона складається з зовнішнього циклу, що охоплює блоки оперування з первинними ресурсами, виробництва основних товарів та комплектуючих виробів, кінцевого споживання, відновлення і переробки відходів, та внутрішніх замкнених циклів енергоменеджменту, що супроводжують кожен з блоків зовнішнього циклу. При цьому усі компоненти продукції мають бути виготовлені та використанні таким чином, щоб їх можна було відновити або переробити з мінімальним впливом на екологію [8, 9].

Структура систем замкненого циклу є визначальним фактором підвищення якості, результативності та ефективності процесів виробництва, розподілу і споживання продукції та послуг, зниження витрат ресурсів на одиницю виробленої продукції і наданих послуг. При цьому первинним завданням віртуально організованого менеджменту стає вибір виду та типу послуг, тоді як вибір їх постачальників стає вторинним. До переліку останніх зазвичай входять різні сервіс-орієнтовані організації, урядові організації і навіть окремі (незалежні) консультанти, які надають спеціалізовані юридичні або страхові послуги, проводять маркетингові експертизи тощо.

Реалізація заходів з ефективного використання енергії в рамках комплексно збалансованої системи віртуального енергоменеджменту вже сьогодні, як правило, здійснюється на базі інформаційно-комунікаційних технологій, які використовуються операторами системи для моніторингу, контролю та оптимізації параметрів бізнес-діяльності організації (компанії), у тому числі пов'язаних з діями персоналу по керуванню режимами роботи технологічного та допоміжного обладнання [8]. Основними перевагами застосування віртуального енергоменеджменту є їх можливості для подальшого розвитку ринку послуг, які реалізуються шляхом: поліпшення оперативності надання послуг; більш стійкого та надійного залучення інвестицій; використання відновлюваних джерел енергії, накопичувачів енергії; впровадження віртуально організованих систем автоматизованого управління енергетичними об'єктами клієнтів тощо.



Рисунок 1 - Складний цикл неперервного 3-Е енергоменеджменту

Структурно-функціональна схема системи автоматизованого управління такого роду об'єктами, наведена на рис. 2, враховує технологічні, економіко-організаційні та екологічні фактори, які включають [1]:

- орган адміністративно-організаційного управління (ОАУ) (адміністрацію та відповідні служби підприємства);
- блоки вироблення цільових програмних завдань (БЦ) (позначені відповідними зворотним зв'язкам індексами);
- виконавчі органи (ВО), які виконують функції екстремальних регуляторів;
- зворотні зв'язки (ЗЗ), в яких нижніми індексами позначають фізичні (Q) та грошові (P) одиниці, а індекси E та C – відповідно екологічні та соціальні параметри та елементи підсистеми;
- елементи порівняння (ЕП), які враховують енергозберігаючий ефект.

На структурно-функціональній схемі (рис. 2) ОАУ здійснює зв'язки з зовнішнім (верхнім, BR) $U_{BP} = (U_Q, U_P, U_E, U_C)_{BP}$ і $Z_{BP} = (Z_Q, Z_P, Z_E, Z_C)_{BP}$ та внутрішнім (нижнім, HR) $U_{HP} = (U_Q, U_P, U_E, U_C)_{HP}$ і $Z_{HP} = (Z_Q, Z_P, Z_E, Z_C)_{HP}$ рівнями ієрархічної структури збалансованої системи неперервного енергоменеджменту, U відображає управляючі, а Z – зворотні впливи, X – обсяги спожитих ресурсів, а Y – обсяги виробленої продукції.

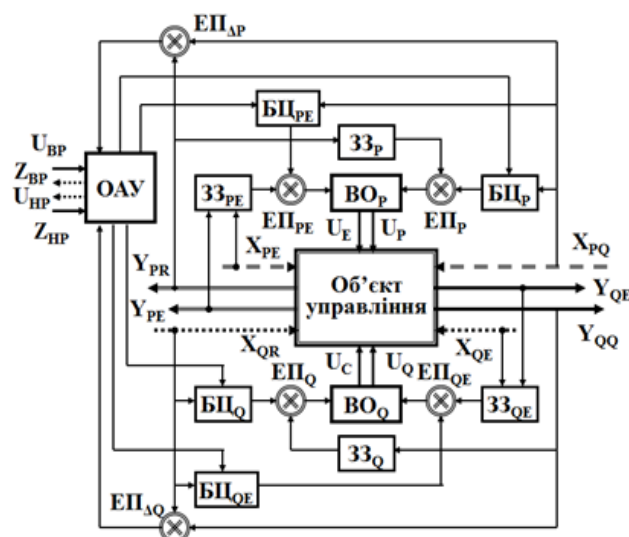


Рисунок 2 - Структурно-функціональна схема системи автоматизованого управління енергетичними об'єктами

Застосування для оптимального управління таких схем з багатьма локальними екстремальними характеристиками, значення показників ефективності та якості яких змінюються внаслідок зміни параметрів управління, дозволяє використовувати методи лінійного і нелінійного математичного програмування для їх аналізу та оптимізації за умов вживання сучасних способів і можливостей боротьби з “прокляттям розмірності”.

В площині практичної реалізації це надає можливості вирішення таких основних задач: розробка прогнозів та програм підвищення енергоефективності та енергозбереження; техніко-економічне планування залучення інвестицій в енергоефективність та енергозбереження; організація управлінської діяльності, забезпечення обліку і контролю; економічне стимулювання, планування та управління оновленням матеріально-технічної бази. При цьому критерії якості (ефективності) надають кількісну оцінку можливостей досягнення мети управління декількома різними способами, серед яких необхідно вибирати такий, що потребує найменших витрат ресурсів.

Розв’язання такого роду задач екстремального управління пропонується здійснювати шляхом їх декомпозиції на ряд більш простих задач за наступним алгоритмом:

–досягнення екстремальної мети у системі шляхом проведення виключно організаційно-технічних заходів з енергоефективності та енергозбереження (тобто шляхом варіації організаційно-технологічних параметрів управління при незмінних інших);

–варіювання технологічних параметрів об’єкта управління методами планування оптимального експерименту.

У загальному випадку структурно-функціональна схема системи енергоменеджменту є багаторівневою і охоплює державний рівень, рівні міст, областей і регіонів у країні, а також рівень підприємств та споживачів послуг.

Взаємозв’язки державного рівня ієрархії управління з рівнями місцевого управління будемо розглядати у вигляді дворівневої схеми з локальними управляючими елементами підпорядкованими єдиному управляючому елементу DM (центральному органу управління). При цьому місцевий рівень представимо у вигляді узагальненого ланцюга

$$(RM) \leftrightarrow (U_M) \leftrightarrow (RO) \leftrightarrow (U_O) \leftrightarrow (RR) \leftrightarrow (U_R), \quad (1)$$

що складається з множин міст (RM), областей (RO), регіонів (RR) та підприємств і споживачів послуг (HC) у країні, взаємодіючих з центральним органом управління за допомогою згрупованих за відповідними рівнями множин управляючих впливів U .

Для ланцюга (1) взаємозв’язаних підсистем міського, обласного і регіонального управління маємо наступну основну систему відображень 3-Е ефективності управління (2) цими підсистемами [10]:

$$\begin{aligned} H^{RM}: U^{DW} \times Z^{HC_M} &\rightarrow U^{RM}; \\ H^{RO}: U^{DW} \times Z^{U_M} \times Z^{HC_O} &\rightarrow U^{RO}; \\ H^{RR}: U^{DW} \times Z^{U_O} \times Z^{HC_R} &\rightarrow U^{RR}; \\ U^{DW} &= U^{DS} \times U^{DF} \times U^{DM} \times U^{DC} \times U^{DR} \times U^{DG} \end{aligned} \quad (2)$$

де верхні індекси DS, DF, DM, DC, DR і DG перелічують центральні органи влади у сфері енергетики, енергоефективності та енергозбереження, а HC_M, HC_O, HC_R визначають множини підприємств і споживачів послуг за містами, областями і регіонами країни відповідно.

Аналогічно для центрального органу DM управління та сукупності локальних управляючих елементів DS, DF, DC, DR і DG маємо відповідну систему відображень ефективності організаційних структур адміністративного управління та економічного стимулювання 3-Е ефективності на державному рівні:

$$\begin{aligned} H^{DM}: U^{SW} \times Z^{RW} \times Z^{DS} \times Z^{DF} \times Z^{DC} \times Z^{DR} &\rightarrow U^{DM}; \\ H^{DS}: U^{SW} \times Z^{RW} \times Z^{DM} &\rightarrow U^{DS}; \\ H^{DF} : U^{SW} \times Z^{RW} \times U^{DM} &\rightarrow U^{DF}; \\ H^{DC}: U^{SW} \times Z^{RW} \times Z^{DG} \times U^{DM} &\rightarrow U^{DC}; \\ H^{DR}: U^{SW} \times Z^{RW} \times Z^{DG} \times U^{DM} &\rightarrow U^{DR}; \\ H^{DI}: Z^{RW} &\rightarrow U^{DG}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{Де } U^{SW} = U^{PR} \times U^{VR} \times U^{CM} \times U^{SF}, Z^{RW} = Z^{RM} \times Z^{RO} \times Z^{RR} \times Z^{U_M} \times Z^{U_O} \times Z^{U_R} .$$

Відмітимо, що у моделях енергоменеджменту (1)-(3) на державному та місцевому рівнях головним питанням є координування взаємодії об'єктів (елементів) системи на всіх ієрархічних рівнях задля досягнення загальносистемної (глобальної) мети. При цьому, головна системна задача для ОАУ є координування, у процесі якого вони повинні знайти ресурси для стимулювання розміщених нижче локальних елементів до реалізації глобальної мети навіть поступаючись власним інтересам. Це, безумовно сприяє виникненню конфліктів, наслідки яких мають бути мінімізовані системно узгодженими діями, які повинні базуватися на теоретично обґрунтованих та практично вивірених методах і засобах управління, у першу чергу економічного стимулювання впровадження заходів з 3-Е ефективності.

Висновки

Серед основних цілей енергоменеджменту пріоритетом є поглиблений аналіз зусиль щодо підвищення 3-Е ефективності функціонування користувачів, що досягається шляхом системної координації етапів проектування, закупівлі, монтажу та експлуатації енергоефективного обладнання, моніторингу та перевірки досягнутих результатів з урахуванням екологічних завдань та економічних обмежень. Досягнення цих цілей має базуватися на використанні хмарних інформаційно-комунікаційних технологій на всіх етапах їх реалізації, у тому числі пов'язаних з діями персоналу з управління технологічними режимами роботи обладнання. Віртуальні системи енергоменеджменту стають базовою платформою для інтеграції нових технологій у виробництво, покращення доступу до цих технологій, стимулюють спільну взаємодію учасників такого роду систем, посилюючи їх можливості щодо реалізації масштабних інвестиційних проєктів. Загалом, це дослідження систематизує основні напрямки, методи та моделі побудови систем віртуального енергоменеджменту і пропонує концептуальні рішення для подолання визначених труднощів. У майбутньому автори планують більш детально зосередитися на розробці алгоритмів та процедур організації віртуальної співпраці учасників систем енергоменеджменту з постачальниками енергоефективного обладнання та матеріалів.

Список використаної літератури

1. Ковалко О.М., Новосельцев О.В., Євтухова Т.О. Вступ до теорії енергоефективності багаторівневих систем: методи та моделі енергетичного менеджменту в системі житлово-комунального господарства. – Київ: НАН України, ІТТФ, 2014, 252 с.
2. Cooremans C, Schönberger A. Energy management: A key driver of energy-efficiency investment? // *Journal of Cleaner Production* Vol. 230(4), 2019, P. 264-275. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.333
3. Maya G., Barlett I., Stahla B., Taischa M. Energy management in production: A novel method to develop key performance indicators for improving energy efficiency // *Applied Energy*, Vol. 149, 2015, P. 46-61. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.03.065
4. Eutukhova T., Kovalko O., Novoseltsev O., Woodroof E. Energy Services: A Proposed Framework to Improve Results // *Energy Engineering*, 2020, Vol.117(3), P. 99-110. DOI:10.32604/EE.2020.010864
5. Економіка України: Стратегія і політика довгострокового розвитку / За ред. В.М. Гейця. – К.: Ін-т екон. прогноз., Фенікс, 2003. – 1008 с.
6. Суходоля О.М. Енергоефективність національної економіки: методологія дослідження та механізми реалізації. – К.: Вид-во НАДУ, 2006. – 400 с.
7. Eurostat-OECD Methodological Manual on Purchasing Power Parity / Chaired by S. Stapel and drafted by D. Roberts. – Paris: OECD Publications, 2006. – 280 p.
8. Chupryna L., Kovalko O., Novoseltsev O., Woodroof E.. Virtual Organization of Energy Management: Service-Oriented Framework to Improve Results // *International Journal of Energy Management*, Vol. 2, No. 6, 2020, P. 47-63. <https://www.researchgate.net/publication/356980815>
9. Korhonen, J., Honkasalo, A., Seppälä, J. Circular Economy: The Concept and its Limitations // *Ecological Economics*, Vol. 143, 2018, P. 37-46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
10. Ковалко О. М., Євтухова Т. О. Теоретико-множинна модель багаторівневої системи організаційно-технологічного управління енерговикористанням у системах з ієрархічною структурою // *Енергетика: економіка, технології, екологія*, №2, 2010. – С. 42-49.

Novoseltsev O. V.¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0001-9272-6789
Eutukhova T. O.², Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4778-2479
Chupryna L. V.¹ ORCID 0000-0002-7707-6615

¹Institute of General Energy of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Interregional Academy of Personnel Management, Kyiv, Ukraine

METHODS AND MODELS OF COMPLEX-BALANCED VIRTUAL ENERGY MANAGEMENT SYSTEM

Energy management systems are one of the most powerful and widespread tools for solving problems of increasing the efficiency of energy use, reducing the energy intensity of production and, as a result, increasing the competitiveness of any country's economy. Among the priority tasks of energy management, one of the key ones is the minimization of the negative consequences of the impact of energy-intensive technological systems on the environment and the satisfaction of consumer demands for the quality of energy supply. This requires the energy management systems of the organization and the procurement of equipment and services for the effective transformation, distribution and use of energy, taking into account economic, energy and environmental (3-E) restrictions. At the same time, tasks related to operational management of energy supply processes for consumers in real time are becoming more and more relevant. For a comprehensive, eco-balanced solution to these problematic tasks, this work proposes to use virtual energy management systems that implement closed cycles of energy management. This required the solution of such tasks as conducting a comparative analysis of methods and mechanisms for increasing 3-E efficiency due to the implementation of a comprehensively balanced energy management system, building and structuring multi-level management systems, developing theoretical principles for coordinating the interaction of their elements. The implementation of these tasks within the framework of a comprehensively balanced system of virtual energy management is carried out on the basis of information and communication technologies, which are used by system operators to monitor, control and optimize the parameters of the business activities of the organization (company), including those related to the actions of personnel for managing work modes technological and auxiliary equipment in real time. In general, this study systematizes the main directions, methods and models of organizing virtual complex-balanced energy management systems and offers conceptual solutions for building such systems.

Keywords: energy, economic and environmental efficiency; virtually organized energy management systems

References

1. Kovalko O. M., Novoseltsev O. V., Yevtukhova T. O. Introduction to the theory of energy efficiency of multi-level systems: methods and models of energy management in the system of housing and communal services. - Kyiv: NAS of Ukraine, ITTF, 2014, 252 p.
2. Cooremans C., Schönenberger A. Energy management: A key driver of energy-efficiency investment? // Journal of Cleaner Production Vol. 230(4), 2019, P. 264-275. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.333
3. Maya G., Barlett I., Stahla B., Taischa M. Energy management in production: A novel method to develop key performance indicators for improving energy efficiency // Applied Energy, Vol. 149, 2015, P. 46-61. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.03.065
4. Eutukhova T., Kovalko O., Novoseltsev O., Woodroof E. Energy Services: A Proposed Framework to Improve Results // Energy Engineering, 2020, Vol.117(3), P. 99-110. DOI:10.32604/EE.2020.010864
5. Economy of Ukraine: Strategy and policy of long-term development / Ed. V.M. gay woman - K.: Institute of Economics. prognostication; Phoenix, 2003. - 1008 p.
6. Sukhodolya O. M. Energy efficiency of the national economy: research methodology and implementation mechanisms. - K.: Publishing House of NADU, 2006. - 400 p.
7. Eurostat-OECD Methodological Manual on Purchasing Power Parity / Chaired by S. Stapel and drafted by D. Roberts. – Paris: OECD Publications, 2006. – 280 p.
8. Chupryna L., Kovalko O., Novoseltsev O., Woodroof E.. Virtual Organization of Energy Management: Service-Oriented Framework to Improve Results // International Journal of Energy Management, Vol. 2, No. 6, 2020, P. 47-63. <https://www.researchgate.net/publication/356980815>
9. Korhonen J., Honkasalo A., Seppälä J. Circular Economy: The Concept and its Limitations // Ecological Economics, Vol. 143, 2018, P. 37-46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
10. Kovalko O. M., Yevtukhova T. O. Set-Theoretic Model of the Hierarchical Multilevel Organizing-and-Technological Energy Management System, No. 2, 2010 // Power engineering: economics, technique, ecology, pp. 42-49, <http://energy.kpi.ua/issue/view/10693>

Надійшла: 30.01.2023

Received: 30.01.2023