

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ НАСОСНОГО ОБЛАДНАННЯ З РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

У статті представлено методику комплексної оцінки енергоефективності насосного обладнання, оснащеного регульованими електроприводами. Розглянуто вплив частотного регулювання на енергоспоживання насосних установок у різних режимах експлуатації. Запропоновано алгоритм розрахунку питомого енергоспоживання з урахуванням технічних характеристик електропривода, гідравлічного навантаження та профілю споживання. Наведено приклади практичного застосування методики на основі експериментальних та модельних даних. Отримані результати підтверджують доцільність впровадження регульованого електропривода як ефективного засобу підвищення енергетичної ефективності насосних систем. Розроблене програмне забезпечення може бути використана при техніко-економічному обґрунтуванні модернізації або проєктування нових об'єктів водопостачання, водовідведення та інших технологічних систем, що базуються на насосному обладнанні.

Застосування регульованого електроприводу, зокрема частотного перетворювача, дозволяє оптимізувати роботу насосів відповідно до змін навантаження, що сприяє зниженню енергоспоживання. Проте, для об'єктивної оцінки ефективності необхідний комплексний підхід, який враховує не лише зміну електроспоживання, але й гідравлічну ефективність, режимні характеристики, технічний стан обладнання та економічну доцільність інвестування у модернізацію.

Ключові слова: енергоефективність, насосне обладнання, регульований привід, частотне регулювання, гідравлічна ефективність, енергозбереження.

Вступ. Підвищення енергоефективності є пріоритетним напрямом розвитку сучасної енергетики та промисловості. Насосне обладнання, яке широко використовується у водопостачанні, тепlopостачанні, промислових і технологічних системах, споживає значну частку електроенергії. Застосування регульованого електроприводу (РЕП), зокрема частотного перетворювача, дозволяє оптимізувати роботу насосів відповідно до змін навантаження, що сприяє зниженню енергоспоживання. Проте, для об'єктивної оцінки ефективності необхідний комплексний підхід, який враховує не лише зміну електроспоживання, але й гідравлічну ефективність, режимні характеристики, технічний стан обладнання та економічну доцільність інвестування у модернізацію [1, 2, 3].

Постановка задачі дослідження. Надлишковий тиск на напірній лінії насоса створюється при його дроселюванні затвором, засувкою або іншим пристроєм. На подолання цього тиску додатково витрачається енергія. Регулювання кутової швидкості насоса замість дроселювання відбувається без додаткового витрачання енергії на подолання надлишкового тиску [4, 5].

Завдяки зняттю надлишкового тиску потужність (кВт), спожита насосом, зменшується на величину

$$\Delta N = 10^3 \frac{Q \Delta H}{\eta}, \quad (1)$$

де Q – продуктивність, м³/с; ΔH – надлишковий тиск, МПа; η – ККД насоса.

Напірна характеристика відцентрового насоса визначається рівнянням

$$H_H = H_\Phi \left(\frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^2 - S_\Phi Q^2, \quad (2)$$

де H_Φ і S_Φ – фіктивна висота водопідйому й гідравлічний опір насоса; Q – його продуктивність (рис.1).

Надлишковий тиск при частоті обертання насоса, яка дорівнює номінальній $n = n_{\text{ном}}$:

$$\Delta H = H_\Phi - S_\Phi Q^2 - H_\Pi - S_Q Q^2 = H_\Phi - H_\Pi - (S_\Phi + S) Q^2.$$

Позначимо $\Delta H_\Phi = H_\Phi - H_\Pi$, а гідравлічний опір насоса і трубопроводу виразимо через фіктивну висоту водопідйому насоса, а також максимальну для даної установки продуктивність

$$S_\Phi = \frac{H_\Phi - H_\Pi}{Q_\Phi^2}, \quad S = \frac{H_\Pi - H_\Pi}{Q_\Pi^2}.$$

Тоді

$$S_{\phi} + S = \frac{H_{\phi} - H_{\Pi}}{Q_B^2}.$$

Підставляючи значення ΔH_{ϕ} і $S_{\phi} + S$ у рівняння (2), одержуємо

$$\Delta H = \Delta H_{\phi}(1 - (Q/Q_B)^2). \quad (3)$$

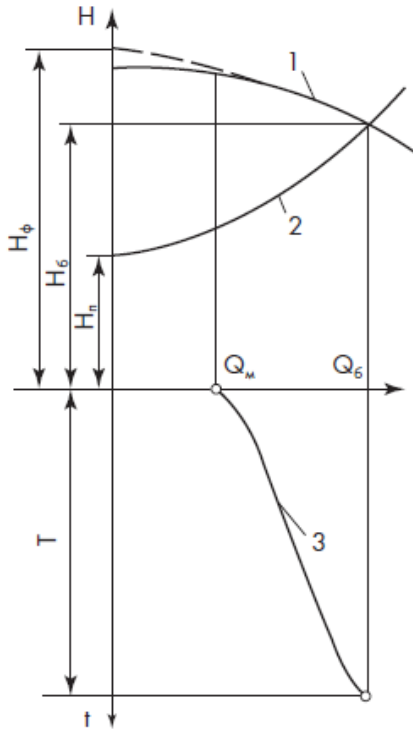


Рисунок 1 – Графік суміщеної роботи насоса з трубопроводом та впорядкована діаграма подачі води:
1 – напірна характеристика насоса, 2 – характеристика трубопровода, 3 – впорядкована діаграма водоподачі

Виразимо залежність продуктивності насоса від часу

$$\frac{Q - Q_M}{t} = \frac{Q_B - Q_M}{T}.$$

Звідси

$$Q = \frac{Q_B - Q_M}{T}t + Q_M.$$

Позначаючи $\lambda = \frac{Q_M}{Q_B}$, одержимо

$$Q = Q \left[(1 - \lambda) \frac{t}{T} + \lambda \right]. \quad (4)$$

Підставляючи в рівняння (1) і (3) значення продуктивності з (4), а потім значення ΔH з (3) – в рівняння (1), одержимо залежність

$$\Delta N = 10^3 \frac{Q_B}{\eta} \Delta H_{\phi} \left[\left[(1 - \lambda) \frac{t}{T} + \lambda \right] - \left[(1 - \lambda) \frac{t}{T} + \lambda \right]^3 \right]$$

Виконавши алгебраїчне перетворення, одержимо вираз Δ

$$N = 10^3 \frac{Q_B}{\eta} \Delta$$

$$H_{\phi} \left[\lambda(1 - \lambda^2) + (1 - \lambda)(1 - 3\lambda^2) \frac{t}{T} - 3(1 - \lambda)^2 \lambda \frac{t^2}{T^2} - (1 - \lambda)^3 \frac{t^3}{T^3} \right]$$

Праву і ліву частини отриманого виразу помножимо на ∂t , а потім інтегруємо в межах від 0 до T

$$W_{EK} = \int_0^T \Delta N dt = 10^3 \frac{Q_B}{\eta} \Delta H_{\phi} T \frac{1}{4} \left\{ (1 + \lambda) [2 - (1 + \lambda^2)] \right\}. \quad (5)$$

Після перетворень одержуємо вираз

$$W_{EK} = \int_0^T 10^3 \frac{Q_B H_B}{\eta} T \left\{ \frac{H_{\Pi}}{H_B} \left(\frac{1}{H_{\Pi} / H_{\phi}} - 1 \right) \frac{1}{4} (1 + \lambda) [2 - (1 + \lambda^2)] \right\}, \quad (6)$$

або

$$W_{EK} = N_B T \left\{ H_{\Pi}^* \left(\frac{H_{\phi}^*}{H_{\Pi}^*} - 1 \right) \frac{1}{4} (1 + \lambda) [2 - (1 + \lambda^2)] \right\}, \quad (7)$$

де $N_B = 10^3 Q_B H_B / \eta$ – спожита насосом потужність, кВт (Q , м³/с; H , МПа); H_{Π}^* і H_{ϕ}^* – відносні протитиск і фіктивна висота водопідйому. Для водопровідних насосів і насосів систем тепlopостачання зазвичай $H_{\phi}^* = 1,25$, отже формула (7) набуває вигляду

$$W_{EK} = N_B T \left\{ H_{\Pi}^* \left(\frac{1,25}{H_{\Pi}^*} - 1 \right) \frac{1}{4} (1 + \lambda) [2 - (1 + \lambda^2)] \right\}. \quad (8)$$

Рівняння (5) – (8) дозволяють обчислити економію енергії, одержувану зняттям надлишкового тиску.

За своїми енергетичними характеристиками РЕП поділяються на 3 основні групи [1]

- електроприводи (ЕП) з втратами ковзання (приводи з гідравлічними й електромагнітними муфтами ковзання, електродвигуни з реостатом у колі ротора);
- ЕП з рекуперацією енергії ковзання (асинхронно-вентильні, електромеханічні каскади);
- ЕП, які регулюються без втрат ковзання (частотні приводи (ЧРП), вентильні (ВД)).

Наведена коротка класифікація показує, що втрати в ЕП першої і другої груп значною мірою визначаються втратами ковзання [6, 7].

Втрати ковзання в ЕП істотно залежать від режиму роботи насосної установки і, як наслідок, від тих само параметрів, від яких залежить економія енергії.

Основні результати дослідження Розроблено програмне забезпечення (ПЗ) для оцінки енергетичної та економічної ефективності використання РЕП в системах тепло- водопостачання, призначене для роботи на персональному комп'ютері (ПК) в середовищі операційної системи Windows. Дане ПЗ розраховує доцільність використання основних видів РЕП, а саме ЧРП, ВД, муфти ковзання, асинхронно-вентильного каскаду в залежності від конкретних параметрів (потужності насоса, його ККД, глибини регулювання, відносного протитиску в системі, виду ЕП, ККД ЕП, ККД перетворювача, кількості працюючих насосів, періоду роботи насосної установки, вартості РЕП, цін на електроенергію, ставки дисконтування, очікуваного строку життя проекту).

Головне вікно ПЗ (рис. 2), куди необхідно ввести технічні параметри насосної установки (потужність насоса, ККД насоса, глибину регулювання, значення відносного протитиску в системі, виду ЕП, кількості працюючих насосів). В ПЗ закладені узагальнені значення ККД ЕП та перетворювачів, але якщо користувачу відомі конкретні значення цих параметрів, то він може ввести їх натиснувши на кнопку “Додаткові параметри” форми введення технічних даних.

Технічні дані установки

Номинальна потужність агрегату, кВт:

Глибина регулювання:

☐ Глибина регулювання невідома

Максимальна витрата води, куб.м/с:

Мінімальна витрата води, куб. м/с:

Відносний протитиск, МПа:

☐ Відносний протитиск невідомий

Протитиск у системі, МПа:

Напір, що відповідає максимальній продуктивності, МПа:

Вид привода:

- ☐ усі види приводів
- ☐ Асинхронний з короткозамкненим ротором
- ☐ Асинхронний із фазним ротором
- ☐ Синхронний

Число працюючих агрегатів, штук:

ККД насоса:

☐ з урахуванням змінів приводу

Додаткові параметри

Далі

Рисунок 2 - Вікно для введення технічних характеристик установки

Економічні параметри

Період опалення, год:

Ставка дисконтування, відс.:

Вартість електроенергії, грн./кВт*година:

Очікуваний термін життя проекту, років:

Коефіцієнт амортизації, відс.:

Вартість обладнання, грн.

Частотний:

Каскад:

Муфта ковзання:

Вентильний:

Рисунок 3 - Вікно для вводу фінансових показників

Для того, аби отримати інформацію про фінансову оцінку конкретного виду РЕП, треба натиснути на відповідні вкладки. При натисненні на вкладку “Порівняння результатів” користувач отримує порівняльну таблицю фінансової оцінки різних видів ЕП (рис. 4, 5).

Розрахунок ефективності застосування регульованого приводу в системах з...

Економія енергії при застосуванні різних видів регульованого приводу

Частотно - регульований привід, кВт * год / рік	75362
Муфта ковзання, кВт * год / рік	50241
Асинхронно - вентильний каскад кВт*год/рік	59099
Вентильний двигун, кВт * год / рік	73365

Довідка: порівняльний аналіз типів електроприводів

Назад Далі

Рисунок 4- Вікно з результатами розрахунків економії для різних видів РЕП

Розрахунок ефективності застосування регульованого приводу в системах опалення.

Фінансова оцінка проектів

Частотний | **ABK** | Муфта ковзання | Вентильний двигун | Порівняння результатів

	Частотний	ABK	Гідромуфта	Вентильний
Термін окупності, міс	33 міс.	35 міс.	38 міс.	37 міс.
Дисконтований термін окупності, міс	139 міс.	42 міс.	45 міс.	44 міс.
Чистий наведений прибуток, грн.	16381	10753	7370	11981
Внутрішня норма рентабельності, відс.	35	32	29	30

Назад Графіки

Рисунок 5 - Вікно фінансової оцінки проектів

ПЗ дає змогу отримати графіки залежності фінансових показників (чистої приведенної вартості (NPV), внутрішньої норми рентабельності (IRR), строку окупності, дисконтованого строку окупності) від параметрів (потужності, глибини регулювання, відносного протитиску, кількості насосів, тарифа на електроенергію, ставки дисконту, строку життя проекту, періоду опалення, коефіцієнту амортизації) для різних видів РЕП (рис. 6). ПЗ надає можливість роздрукувати звіт з інвестиційної оцінки заходу.

За допомогою графіків залежності NPV від суттєвих параметрів, побудованих ПЗ, отримуємо можливість порівняння області застосування ЧРП та ВД в залежності від зміни одного з цих параметрів (рис. 7 – рис. 12).

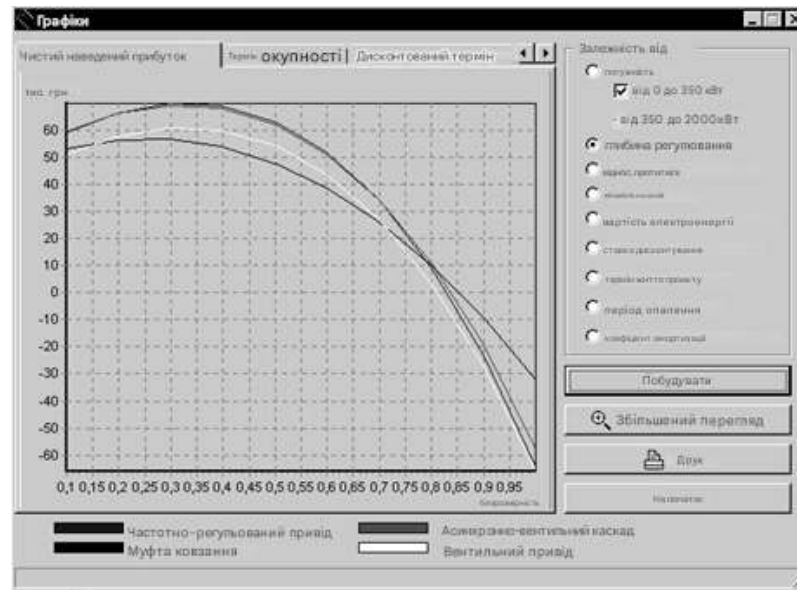


Рисунок 6 – Вікно фінансових показників в залежності від діапазону вхідних параметрів

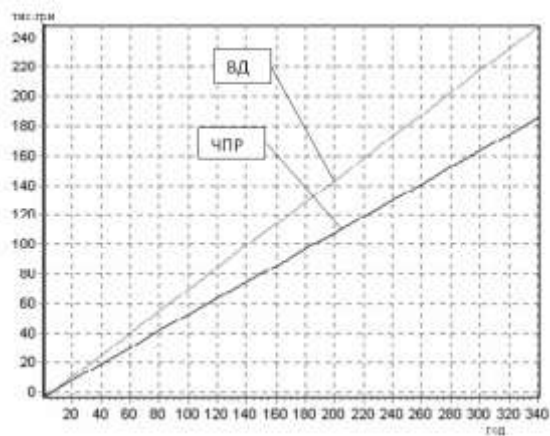


Рисунок 7 - Залежність NPV від потужності ЕП

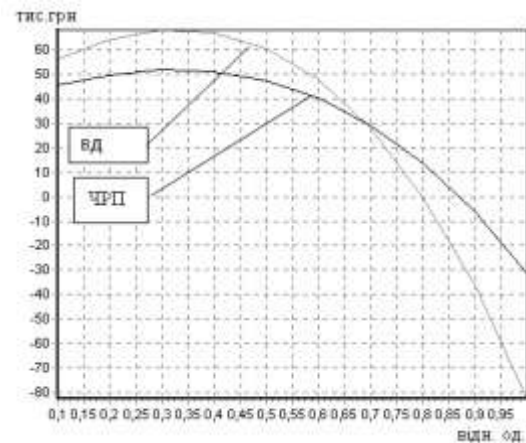


Рисунок 8 - Залежність NPV від глибини регулювання

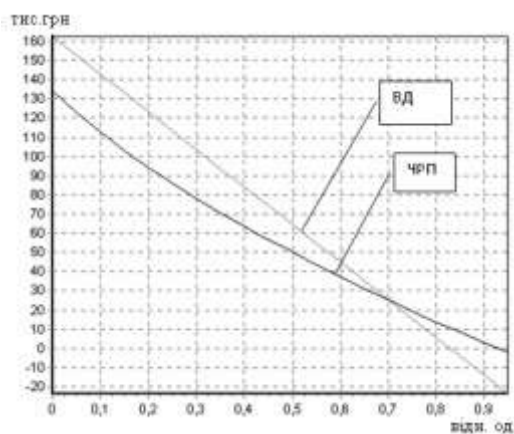


Рисунок 9 - Залежність NPV від відносного протитиску

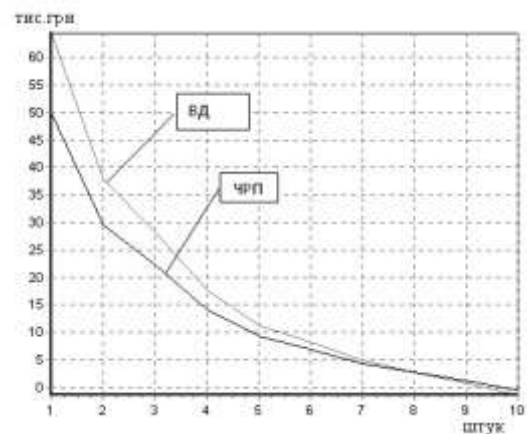


Рисунок 10 - Залежність NPV від кількості паралельно працюючих насосів

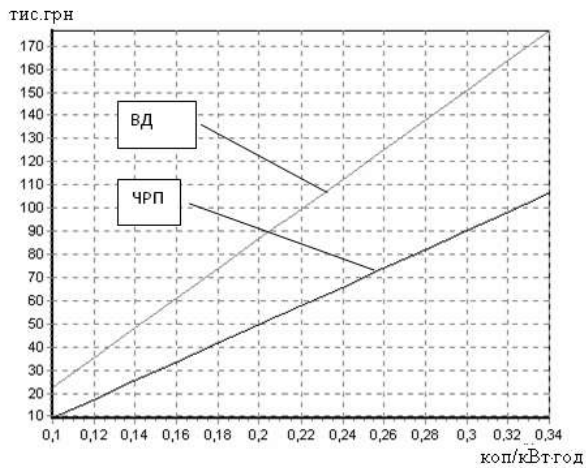


Рисунок 11 - Залежність NPV від ціни на електроенергію

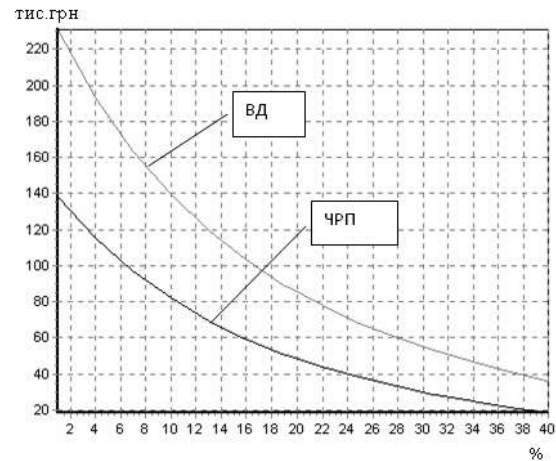


Рисунок 12 - Залежність NPV від ставки дисконтування

Висновок. Розроблено методику та ПЗ для оцінки енергетичної та економічної ефективності використання РЕП в системах тепло- водопостачання, призначене для роботи на ПК в середовищі операційної системи Windows. ПЗ розраховує доцільність використання основних видів РЕП, а саме ЧРП, ВД, муфти ковзання, асинхронно-вентильного каскаду в залежності від конкретних параметрів (потужності насоса, його ККД, глибини регулювання, відносного протитиску в системі, виду ЕП, ККД ЕП, ККД перетворювача, кількості працюючих насосів, періоду роботи насосної установки, ціни на РЕП, тарифу на електроенергію, коефіцієнта амортизації, ставки дисконтування, очікуваного строку життя проекту).

Особливістю ПЗ є те, що воно дозволяє отримати графіки залежності фінансових показників (NPV, IRR, строку окупності, дисконтованого строку окупності) від параметрів (потужності, глибини регулювання, відносного протитиску, кількості насосів, ціни на електроенергію, ставки дисконту, строку життя проекту, періоду опалення, амортизації) для приведених типів РЕП.

Результати дослідження підтверджують високу чутливість фінансових показників до зміни ключових техніко-економічних параметрів. Це вказує на доцільність використання запропонованого ПЗ як інструменту підтримки прийняття рішень при проектуванні або модернізації насосних станцій з урахуванням конкретних умов експлуатації.

Методика та ПЗ можуть бути ефективно використані в рамках енергетичного аудиту, при техніко-економічному обґрунтуванні інвестицій, а також у навчальному процесі для підготовки фахівців з енергоменеджменту та автоматизації технологічних систем.

O. Zakladnyi¹, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-2813-3692

V. Prokopenko¹ Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-5518-5802

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF PUMPING EQUIPMENT WITH ADJUSTABLE DRIVE

The article presents a methodology for comprehensive assessment of the energy efficiency of pumping equipment equipped with variable-speed drives. The influence of frequency control on the energy consumption of pumping systems under various operating conditions is analyzed. An algorithm for calculating specific energy consumption is proposed, taking into account the technical characteristics of the drive, hydraulic load, and consumption profile. Practical application examples of the methodology are provided based on experimental and simulation data. The results obtained confirm the feasibility of implementing variable-speed drives as an effective means of improving the energy efficiency of pumping systems. The proposed methodology can be used for the techno-economic justification of modernization or the design of new facilities for water supply, wastewater treatment, and other technological systems based on pumping equipment.

The use of a regulated electric drive, in particular a frequency converter, allows you to optimize the operation of pumps in accordance with changes in load, which helps reduce energy consumption. However, for an objective assessment of efficiency, a comprehensive approach is required, which takes into account not only changes in electricity consumption, but also hydraulic efficiency, operating characteristics, technical condition of the equipment and the economic feasibility of investing in modernization.

Keywords: energy efficiency, pumping equipment, variable speed drive, frequency control, hydraulic efficiency, energy saving.

References

1. O. M. Zakladnyi, A. V. Prakhovnyk, and O. I. Solovei, *Energy Saving in Industrial Electric Drives: A Textbook*. Kyiv: Kondor, 2005, 408 p.
2. O. O. Zakladnyi, "Energy efficiency of a brushless motor," *Energy: Economics, Technology, Ecology*, no. 4(58), pp. 99–105, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2019.200507>.
3. O. M. Zakladnyi and O. O. Zakladnyi, *Energy-Efficient Electric Drive with Brushless Motors* (in Ukrainian), 2nd ed., revised and extended. Kyiv: Libra Publishing House, 2013, 212 p. [Online]. Available: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/70374>.
4. Assessing the Energy Efficiency of Pumps and Pump Units: Background and Methodology. Dr.-Ing Bernd Stoffel, Elsevier, 2015 – 158 p.
5. Optimizing Pumping Systems: A Guide to Improved Energy Efficiency, Reliability, and Profitability, Hydraulic Institute, 2008, -254p.
6. Pumps and pumping system. Bureau of Energy Efficiency pp 113-134, Government of India, Ministry of Power, 2024.
7. Pump System Energy Efficiency Optimization Management and Technical Guide, SAARS energy center, 2021 – 16p.

Надійшла: 15.04.2025

Received: 15.04.2025