

УДК 621.44 + 621.577

**МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ З ОЦІНЮВАННЯ  
ЕНЕРГОЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ  
ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З КОГЕНЕРАЦІЙНО-  
ТЕПЛОНАСОСНИМИ УСТАНОВКАМИ ТА ПІКОВИМИ  
ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛОТИ**

Остапенко О. П., к. т. н., доцент  
Вінницький національний технічний університет

**METHODICAL BASES OF EVALUATION OF THE ENERGY  
ECONOMIC EFFICIENCY OF ENERGY SUPPLY SYSTEMS  
WITH COGENERATION HEAT PUMP INSTALLATIONS AND  
PEAK SOURCES OF HEAT**

Ostapenko O. P., Ph.D., Associate Professor  
Vinnitsia National Technical University

**Анотація.** Запропоновано методичні основи з оцінювання енергоекономічної ефективності систем енергозабезпечення (СЕ) з когенераційно-теплонасосними установками (КТНУ) різних рівнів потужності та піковими джерелами теплоти (ПДТ), з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи СЕ, пікових джерел теплоти в СЕ, джерел приводної енергії КТНУ, та з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії.

**Abstract.** Methodical bases of evaluation of the energy economic efficiency of energy supply systems (ESS) with cogeneration heat pump installations (CHPI) of different power levels and peak sources of heat (PSH) are suggested, with taking into account the complex impact of variable operation modes of ESS, peak heat sources of heat in ESS, sources of drive energy of CHPI, and taking into consideration the energy losses of the process of generation, supply and transformation of electric energy. The suggested methodical bases, aimed at estimation of energy economic efficiency of ESS with CHPI and PSH have a number of advantages: it takes into account the energy efficiency and power levels of the elements of ESS; it takes into consideration the operation modes of steam compressor HPI; it takes into consideration the energy efficiency of PSH and ESS and type of the energy, consumed by them, with the account of energy losses of the process of generation, supply and transformation of electric energy to PSH and ESS; it takes into account the energy efficiency of variable operation modes of ESS with the change of load distribution between steam compressor CHPI and PSH in ESS; it enables to evaluate the complex impact of variable operation modes of ESS, peak sources of heat of ESS, sources of drive energy of steam compressor CHPI with the account of energy losses in the process of generation, supply and conversion of electric energy in CHPI and ESS; it allows to complex perform the energy economic efficiency evaluation of great number of ESS with CHPI and PSH variants on conditions of variable operation modes; as a result of complex approach to evaluation of ESS energy economic efficiency the most efficient and economic reasonable PSH for certain type of ESS could be chosen; methodical fundamentals, suggested in the given paper, could be used for estimation the energy economic efficiency of ESS with PSH and CHPI with various refrigerants, sources of low temperature heat and scheme solutions of HPI. The methodical fundamentals, suggested in the given paper, enable to determine areas of high energy economic efficiency of specified ESS and allow developing recommendations, aimed at high efficient operation of ESS with CHPI and PSH.

**Ключові слова:** методичні основи, енергоекономічна ефективність, система енергозабезпечення, когенераційно-теплонасосна установка, пікове джерело теплоти.

**Key words:** methodical bases, energy economic efficiency, energy supply system, cogeneration heat pump installation, peak source of heat.

**Вступ.** За останні роки питанням із дослідження енергетичної та економічної ефективності СЕ з КТНУ присвячено низку публікацій [1 – 8], виконано низку досліджень з розробки методів оцінки енергетичної та енергоекономічної ефективності застосування комбінованих КТНУ в теплових схемах дже-

рел енергопостачання. В публікаціях [6 – 8] проведено ряд досліджень з оцінки енергетичної та економічної ефективності систем енергозабезпечення на основі парокompресійних теплонасосних установок (ТНУ), а також когенераційно-теплонасосних установок. В публікаціях [6 – 8] підтверджена висока енергетична ефективність систем енергозабезпечення з КТНУ. В роботах [1 – 8] авторами не запропоновані методичні основи з оцінювання енергоекономічної ефективності систем енергозабезпечення з когенераційно-теплонасосними установками різних рівнів потужності та піковими джерелами теплоти, з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи СЕ, пікових джерел теплоти в СЕ, джерел приводної енергії КТНУ, та з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії.

**Метою дослідження** є розроблення методичних основ з оцінювання енергоекономічної ефективності систем енергозабезпечення з когенераційно-теплонасосними установками різних рівнів потужності та піковими джерелами теплоти, з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи СЕ, пікових джерел теплоти в СЕ, джерел приводної енергії КТНУ, та з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії.

**Основна частина.** В нашому дослідженні запропоновано методичні основи для комплексного оцінювання енергоекономічної ефективності систем енергозабезпечення з когенераційно-теплонасосними установками (з приводом від газопоршневого двигуна (ГПД)) різних рівнів потужності та піковими джерелами теплоти (наприклад, водогрійним паливним котлом, електрокотлом, сонячними колекторами тощо). Схеми досліджуваних СЕ наведені в роботі [1]. Застосування зазначених СЕ має ряд енергетичних переваг, що визначено у публікації [6]. Когенераційний привод компресорів ТНУ може бути забезпечений на основі газових двигунів-генераторів, що випускаються українськими підприємствами: «Первомайськдизельмаш» та ДП «Завод ім. В. О. Малишева». В дослідженні [6] запропоновано методичні основи з оцінювання енергетичної ефективності СЕ з КТНУ та піковими джерелами теплоти.

В роботі [7] обґрунтовано показники з оцінки енергоекономічної ефективності СЕ на основі комбінованих КТНУ та ПДТ з метою визначення енергоефективних та економічно обґрунтованих режимів роботи СЕ на основі комбінованих КТНУ та ПДТ, з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи, джерел приводної енергії для парокompресійних ТНУ, з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії.

Як зазначено у роботах [6 – 7], енергетична ефективність СЕ в значній мірі залежить від оптимального розподілу навантаження між елементами СЕ: когенераційно-теплонасосною установкою та піковим джерелом теплоти (наприклад, водогрійним паливним котлом, електрокотлом, сонячними колекторами тощо) у складі СЕ та рівнів енергоефективності цих елементів. Оптимальний розподіл навантаження між елементами СЕ характеризується часткою навантаження КТНУ у складі СЕ  $\beta$  [6 – 7], яка дорівнює співвідношенню теплових потужностей КТНУ (з урахуванням потужності утилізаційного обладнання когенераційного приводу КТНУ) та СЕ.

В наших дослідженнях [6 – 7] проаналізована енергетична ефективність системи «Джерело приводної енергії СЕ – СЕ – споживач теплоти від СЕ» на прикладі СЕ на основі парокompресійних ТНУ з когенераційним приводом та пікових джерел теплоти, з врахування втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії до ТНУ та ПДТ з метою визначення енергоефективних режимів роботи СЕ. В роботах [6 – 7] запропоновано здійснювати комплексну оцінку енергоефективності СЕ з КТНУ та ПДТ за комплексним безрозмірним критерієм енергетичної ефективності СЕ  $K_{СЕ}$ , який враховує безрозмірні критерії енергоефективності КТНУ  $K_{КТНУ}$  та ПДТ  $K_{ПДТ}$  та розподіл теплового навантаження між цими елементами СЕ. Безрозмірний критерій енергоефективності парокompресійних КТНУ  $K_{КТНУ}$ , запропонований в дослідженнях [6, 8], був одержаний на основі рівняння енергетичного балансу для системи «Джерело приводної енергії КТНУ – КТНУ – споживач теплоти від КТНУ» з урахуванням впливу джерел приводної енергії парокompресійних КТНУ та з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії до КТНУ.

Безрозмірний критерій енергоефективності ПДТ – електрокотла – у складі СЕ  $K_{ПДТ}$ , запропонований в дослідженні [6], був одержаний на основі рівняння енергетичного балансу для систем «Джерело електричної енергії – електричний котел – споживач теплоти від СЕ» з урахуванням впливу джерел енергії для пікового електрокотла та з урахуванням втрат енергії при генеруванні та постачанні електричної енергії до електрокотла. Безрозмірний критерій енергоефективності ПДТ – водогрійного паливного котла – у складі СЕ  $K_{ПДТ}$ , запропонований в дослідженні [6], був визначений на основі рівняння енергетичного балансу для систем «Джерела електричної енергії та палива – паливний котел – споживач теплоти від СЕ» з урахуванням впливу джерел енергії для пікового паливного котла та з урахуванням втрат енергії

при генеруванні та постачанні електричної енергії до котла. Для випадків використання альтернативних пікових джерел теплоти в СЕ (наприклад, сонячних колекторів для СЕ невеликої потужності) значення безрозмірного критерію енергоефективності ПДТ в СЕ  $K_{\text{ПДТ}}$  дорівнюватиме ККД альтернативного пікового джерела теплоти  $\eta_{\text{АПДТ}}$ , або ККД додаткової системи з альтернативним піковим джерелом теплоти  $\eta_{\text{АПДТ}}^c$ , що зазначено в дослідженні [6].

Комплексний безрозмірний критерій енергоефективності СЕ  $K_{\text{СЕ}}$  з досліджень [6–7] запропонований також для вибору найбільш ефективного ПДТ для певного виду СЕ. В роботі [6] зазначено, що комплексний безрозмірний критерій енергоефективності СЕ  $K_{\text{СЕ}}$  може бути використаний для вибору найбільш ефективного пікового джерела теплоти для певного виду СЕ та енергоефективних режимів роботи СЕ за умови  $K_{\text{СЕ}} > 1$ .

В дослідженні [7] запропоновано здійснювати комплексну оцінку енергоекономічної ефективності СЕ на основі КТНУ та ПДТ за комплексним узагальненим безрозмірним критерієм енергоекономічної ефективності СЕ з КТНУ та ПДТ:

$$K_{\text{СЕ}}^{\text{ен.ек.}} = K_{\text{СЕ}} + \Delta E_i^{\text{СЕ}} = (1-\beta) \cdot K_{\text{ПДТ}} + \beta \cdot K_{\text{КТНУ}} + \Delta E_i^{\text{СЕ}}, \quad (1)$$

де  $\Delta E_i^{\text{СЕ}}$  – відносна економічна ефективність (у частках) для СЕ на основі КТНУ та ПДТ для  $i$ -го режиму роботи СЕ, яка визначається наступним чином:

$$\Delta E_i^{\text{СЕ}} = \frac{(E_{\text{ДТ}})_i - (E_{\text{СЕ}})_i}{(E_{\text{ДТ}})_i}, \quad (2)$$

де  $(E_{\text{ДТ}})_i$  – експлуатаційні витрати для  $i$ -го режиму роботи заміщуваного джерела теплової енергії (ДТ),  $(E_{\text{СЕ}})_i$  – експлуатаційні витрати для  $i$ -го режиму роботи СЕ.

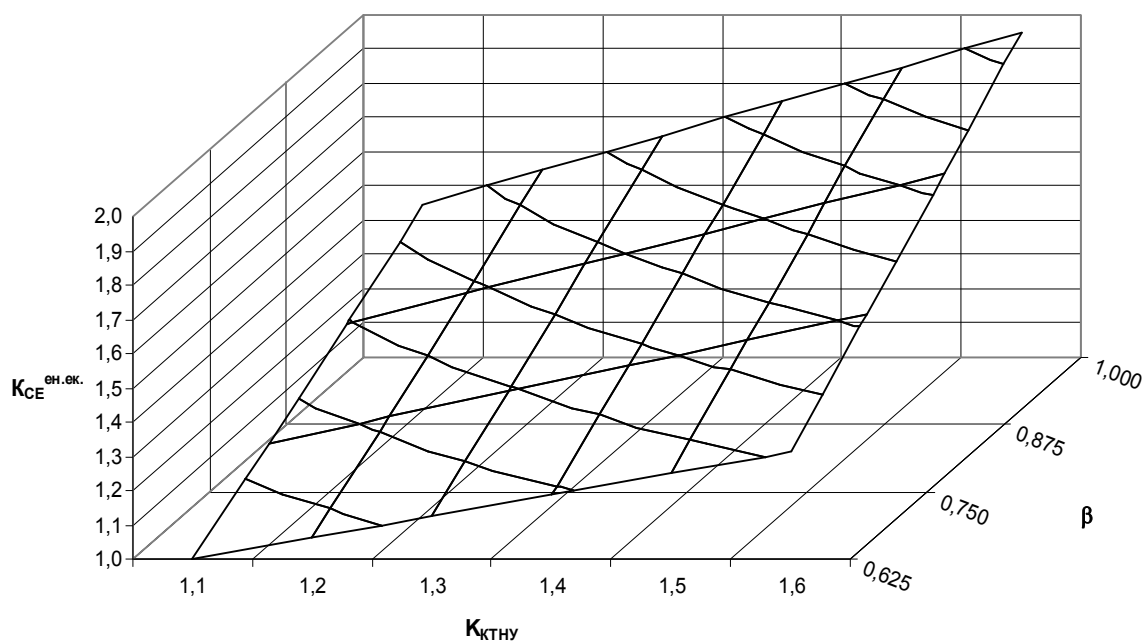
Як зазначено в [7] економічно ефективні режими роботи СЕ будуть забезпечуватись за умови  $\Delta E_i^{\text{СЕ}} > 0$ . Енергоефективні та економічно обґрунтовані режими роботи СЕ з комбінованими КТНУ та ПДТ будуть забезпечуватись за умови  $K_{\text{СЕ}}^{\text{ен.ек.}} > 1$ . Чим більшим буде значення показника  $K_{\text{СЕ}}^{\text{ен.ек.}}$ , тим більш енергоефективними, економічно ефективними та конкурентоздатними будуть СЕ з КТНУ та ПДТ.

Запропоновані методичні основи з оцінювання енергоекономічної ефективності СЕ з КТНУ та ПДТ мають низку переваг:

- враховують енергоефективність та рівні потужності елементів СЕ;
- враховують режими роботи парокompресійних ТНУ;
- враховують енергоефективність ПДТ в СЕ та вид споживаної ними енергії з урахуванням втрат енергії при генеруванні та постачанні енергії до ПДТ та СЕ;
- враховують енергоефективність змінних режимів роботи СЕ зі зміною розподілу навантаження між парокompресійними КТНУ та ПДТ в СЕ;
- дозволяють оцінювати комплексний вплив змінних режимів роботи СЕ, пікових джерел теплоти СЕ, джерел приводної енергії парокompресійних КТНУ з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії в КТНУ та СЕ;
- дозволяють комплексно оцінювати енергоекономічну ефективність значної кількості варіантів СЕ з КТНУ та ПДТ за умов змінних режимів роботи;
- можуть бути використані для вибору найбільш енергоефективного та економічно обґрунтованого ПДТ для певного виду СЕ;
- запропоновані методичні основи можуть бути використані для оцінювання енергоекономічної ефективності СЕ з ПДТ та КТНУ з різними холодоагентами, джерелами низькотемпературної теплоти та схемними рішеннями ТНУ.

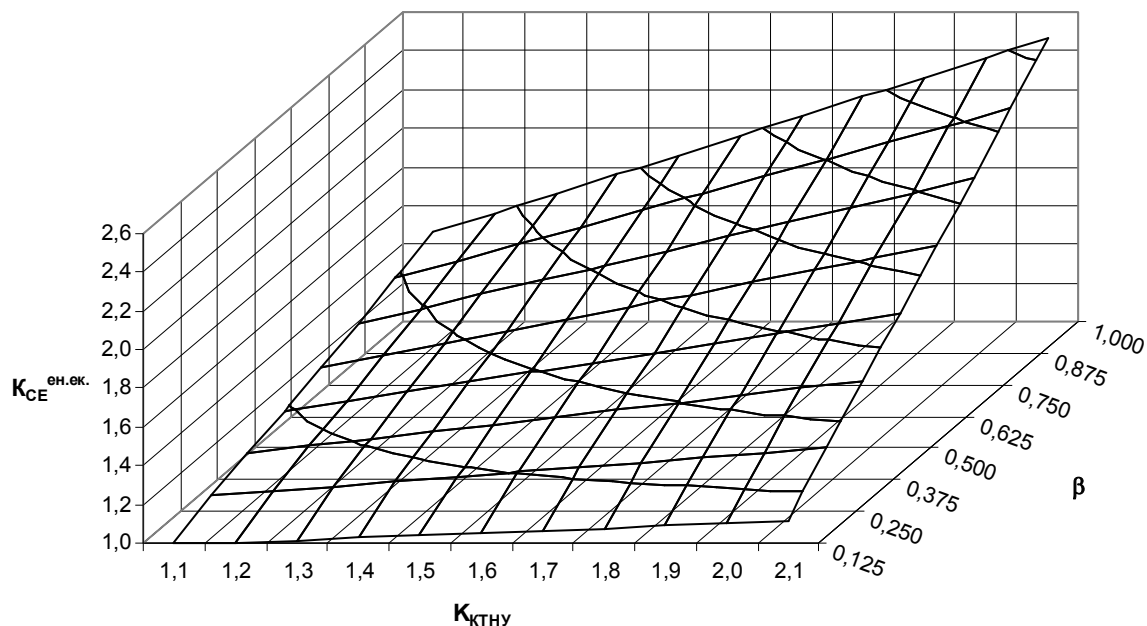
Застосування запропонованих методичних основ з оцінювання енергоекономічної ефективності СЕ з КТНУ та ПДТ продемонструємо на конкретних прикладах. На рис. 1 та 2 показані для прикладу результати оцінки енергоекономічної ефективності варіантів СЕ з КТНУ та ПДТ. В цьому дослідженні значення безрозмірного критерію енергоекономічної ефективності СЕ визначені за умов зміни частки навантаження КТНУ в діапазоні  $\beta = 0,1 \dots 1,0$ . Дослідження проведено для режимів енергоефективної роботи КТНУ з  $K_{\text{КТНУ}} = 1,1 \dots 2,1$  (за умов максимальної ефективності ГПД) та з  $K_{\text{КТНУ}} = 1,1 \dots 1,6$  (за умов мінімальної ефективності ГПД) на основі результатів досліджень [6, 8].

На рис. 1 показана область енергоекономічної роботи СЕ з використанням теплоти ґрунту, з КТНУ малої потужності та піковим електричним котлом, зі споживанням електричної енергії від КТНУ. Ця область визначена за показником енергоекономічної ефективності СЕ з КТНУ з [7], за умов мінімальної ефективності ГПД та пікового електричного котла. В дослідженні, згідно з [6, 8], враховані: значення ефективного ККД ГПД  $\eta_{\text{ЕД}} = 0,31$ , значення ККД електричного двигуна з урахуванням втрат енергії в блоці управління двигуном  $\eta_{\text{ЕП}} = 0,8$ . Піковим джерелом теплоти в СЕ передбачена електрична котельня з  $\eta_{\text{ЕК}} = 0,9$ . Значення безрозмірного критерію енергоефективності електричного котла у разі споживання електроенергії від КТНУ, згідно з [6], становить  $K_{\text{ПДГ}}^{\text{ЕК}} = 0,223$ .



**Рис. 1 – Область енергоекономічної роботи СЕ з використанням теплоти ґрунту, з КТНУ малої потужності та піковим електричним котлом, за умов мінімальної ефективності ГПД та пікового електричного котла та споживанням електричної енергії від КТНУ**

На рис. 2 показана область енергоекономічної роботи СЕ з використанням теплоти стічних вод, з КТНУ великої потужності та піковим паливним котлом, визначена за показником енергоекономічної ефективності СЕ з КТНУ з [7], за умов максимальної ефективності ГПД та пікового паливного котла. В дослідженні, згідно з [6, 8], враховані: значення ефективного ККД ГПД  $\eta_{\text{ЕД}} = 0,42$  та значення ККД електричного двигуна з урахуванням втрат енергії в блоці управління двигуном  $\eta_{\text{ЕП}} = 0,9$ . Піковим джерелом теплоти в СЕ передбачена паливна котельня з  $\eta_{\text{ПК}} = 0,9$ . Значення безрозмірного критерію енергоефективності паливного котла, згідно з [6], становить  $K_{\text{ПДГ}}^{\text{ПК}} = 0,9$ .



**Рис. 2 – Область енергоекономічної роботи СЕ з використанням теплоти стічних вод, з КТНУ великої потужності та піковим паливним котлом, за умов максимальної ефективності ПДТ та пікового паливного котла**

Запропоновані методичні основи дозволяють визначити області високої енергоекономічної ефективності зазначених СЕ та розробити рекомендації з високоєфективної експлуатації СЕ з КТНУ та ПДТ.

Для практичного застосування запропонованих методичних основ з оцінювання енергоекономічної ефективності різних варіантів СЕ з КТНУ та ПДТ ми пропонуємо використовувати результати з досліджень [6 – 8].

**Висновки.** В статті запропоновані методичні основи з оцінювання енергоекономічної ефективності систем енергозабезпечення з когенераційно-теплонасосними установками різних рівнів потужності та піковими джерелами теплоти, з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи СЕ, пікових джерел теплоти в СЕ, джерел приводної енергії КТНУ, та з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії.

Запропоновані методичні основи з оцінювання енергоекономічної ефективності СЕ з КТНУ та ПДТ мають низку переваг:

- враховують енергоефективність та рівні потужності елементів СЕ;
- враховують режими роботи парокompресійних ТНУ;
- враховують енергоефективність ПДТ в СЕ та вид споживаної ними енергії з урахуванням втрат енергії при генеруванні та постачанні енергії до ПДТ та СЕ;
- враховують енергоефективність змінних режимів роботи СЕ зі зміною розподілу навантаження між парокompресійними КТНУ та ПДТ в СЕ;
- дозволяють оцінювати комплексний вплив змінних режимів роботи СЕ, пікових джерел теплоти СЕ, джерел приводної енергії парокompресійних КТНУ з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії в КТНУ та СЕ;
- дозволяють комплексно оцінювати енергоекономічну ефективність значної кількості варіантів СЕ з КТНУ та ПДТ за умов змінних режимів роботи;
- можуть бути використані для вибору найбільш енергоефективного та економічно обгрунтованого ПДТ для певного виду СЕ;
- запропоновані методичні основи можуть бути використані для оцінювання енергоекономічної ефективності СЕ з ПДТ та КТНУ з різними холодоагентами, джерелами низькотемпературної теплоти та схемними рішеннями ТНУ.

Запропоновані в статті методичні основи дозволяють визначити області високої енергоекономічної ефективності зазначених СЕ та розробити рекомендації з високоефективної експлуатації СЕ з КТНУ та ПДТ.

Для практичного застосування запропонованих методичних основ з оцінювання енергоекономічної ефективності різних варіантів СЕ з КТНУ та ПДТ ми пропонуємо використовувати результати з досліджень [6 – 8].

#### Література

1. Ткаченко С. Й., Остапенко О. П. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання : монографія. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. 176 с.
2. Upscaling a district heating system based on biogas cogeneration and heat pumps / Richard P. et.al. // Energy, sustainability and society. 2015. N. 5 (16). URL: <https://doi.org/10.1186/s13705-015-0044-x>.
3. Balancing fluctuating renewable energy generation using cogeneration and heat pump systems [Text] / Mueller S. et.al. // Energy technology. 2014. N. 2 (1). P. 83-89.
4. Билека Б. Д., Гаркуша Л. К. Когенерационно-теплонасосные технологии в схемах горячего водоснабжения большой мощности // Промышленная теплотехника. 2012. Т. 34, №4. С. 52-57.
5. Сафьянц С. М., Колесниченко Н. В., Веретенникова Т. Е. Исследование схемы источника теплоэлектрооснабжения с регулированием нагрузок на базе использования тепловых насосов // Промышленная теплотехника. 2011. Т. 33, № 3. С. 79-85.
6. Остапенко О. П. Енергетична ефективність систем енергозабезпечення на основі комбінованих когенераційно-теплонасосних установок і пікових джерел теплоти // Наукові праці ВНТУ. – 2016. – № 1. URL: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/462/460>.
7. Остапенко О. П., Портнов В. М., Волошин А. Д. Показники енергоекономічної ефективності систем енергозабезпечення на основі когенераційно-теплонасосних установок та пікових джерел теплоти // Електронне наукове видання матеріалів XLVI науково-технічної конференції Вінницького національного технічного університету (22 – 24 березня 2017 р., Вінниця). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2017/paper/view/2875/2248>.
8. Остапенко О. П., Лещенко В. В., Тихоненко Р. О. Енергетична ефективність парокомпресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводами // Наукові праці ВНТУ. – 2014. – № 4. URL: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/421/419>.

#### References

1. Tkachenko, S. Y., Ostapenko, O. P. (2009). Parokompresiyini teplonasosni ustanovky v systemakh teplopostachannya, monographiya, Vinnytsia, UNIVERSUM-Vinnytsia, 176 p.
2. Leeuwen, Richard P., Fink, J., Wit, Jan B., Smit, Gerard J.M. (2015). Upscaling a district heating system based on biogas cogeneration and heat pumps, Energy, Sustainability and Society, 5 (16). Available at: <https://doi.org/10.1186/s13705-015-0044-x>.
3. Mueller, S.; Tuth, R.; Fischer, D.; Wille-Hausmann, B.; Wittwer, C. (2014). Balancing fluctuating renewable energy generation using cogeneration and heat pump systems, Energy technology, 2 (1), 83 – 89.
4. Bileka, B. D., Garkusha, L. K. (2012). Kogeneratsyonno-teplonasosnye tehnologii v sistemakh goryachego vodosnabzheniya bol' shoy moshchnosti, Promyshlennaya teplotekhnika, 34 (4), 52 – 57.
5. Saf'yants, S. M., Kolesnichenko, N. V., Veretennikova, T. YE. (2011) Issledovaniye skhemy istochnika teloelektrosnabzheniya s regulirovaniem nagruzok na baze ispol'zovaniya teplovykh nasosov, Promyshlennaya teplotekhnika, 33 (3), 79 – 85.
6. Ostapenko, O. P. (2016). Energy efficiency of energy supply systems, based on combined cogeneration heat pump installations and peak sources of heat, Scientific Works of Vinnytsia National Technical University, 1. Available at: <http://works.vntu.edu.ua/index.php/works/article/view/462/464>.
7. Ostapenko, O. P., Portnov, V. M., Voloshyn, A. D. (2017). Pokaznyky energoekonomichnoyi efektyvnosti system energozabezpechennya na osnovi kogeneratsiyono-teplonasosnykh ustanovok ta pikovykh dzherel teploty, Elektronne naukove vydannya materialiv XLVI naukovo-tekhnichnoyi konferentsii Vinnyts'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universytetu (22 – 24 bereznia 2017, Vinnytsia). Available at: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2017/paper/view/2875/2248>.
8. Ostapenko, O. P., Leshchenko, V. V., Tikhonenko, R. O. (2014). Energy efficiency of steam compressor heat pumps with electric and cogeneration drive, Scientific Works of Vinnytsia National Technical University, 4. Available at: <http://works.vntu.edu.ua/index.php/works/article/view/25/25>.