УДК 621.577

О. П. Остапенко, к. т. н., доц.

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ КОМБІНОВАНИХ КОГЕНЕРАЦІЙНО-ТЕПЛОНАСОСНИХ УСТАНОВОК І ПІКОВИХ ДЖЕРЕЛ ТЕПЛОТИ

Запропоновано підхід з оцінювання енергетичної ефективності систем енергозабезпечення (СЕ) на основі комбінованих когенераційно-теплонасосних установок (КТНУ) і пікових джерел теплоти (ПДТ) з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи, джерел приводної енергії для парокомпресійних теплонасосних установок (ТНУ) різних рівнів потужності, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

Ключові слова: *енергетична ефективність, система енергозабезпечення, когенераційно-теплонасосна установка, пікове джерело теплоти, безрозмірний критерій енергетичної ефективності.*

Вступ

Зважаючи на актуальність порушеної проблеми, за останні роки проведено низку досліджень з ефективності застосування комбінованих КТНУ в теплових схемах джерел енергопостачання [1 – 10]. У роботі [1] авторами виконано дослідження з підвищення енергоефективності джерел теплопостачання шляхом використання ТНУ з когенераційним приводом. У роботі [2] виконано порівняльний аналіз перспективних напрямів підвищення ефективності систем енергопостачання на основі установок когенерації малої потужності, запропоновано теплові схеми інтегрованих систем комплексного енергопостачання. У дослідженні [3] авторами оцінено економічність когенераційних і комбінованих когенераційно-теплонасосних установок із газопоршневими та газотурбінними двигунами. У публікації [4] наведені результати дослідження схеми джерела теплоелектропостачання (міні-ТЕЦ) із регулюванням навантажень на основі використання теплових насосів.

У роботах [5 – 6] визначені енергетичні переваги та ефективні дійсні режими роботи ТНУ з електричним і когенераційним приводами з урахуванням впливу джерел приводної енергії парокомпресійних теплових насосів і втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ. У роботах [7 – 8] запропоновано методичні основи з комплексного оцінювання енергетичної ефективності парокомпресійних теплонасосних станцій (ТНС) з електричним та когенераційним приводами, з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи ТНС, пікових джерел теплоти ТНС, джерел приводної енергії ТНС та з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії. У дослідженнях [8 – 9] запропоновано наукові засади та здійснено комплексну оцінку енергетичної ефективності парокомпресійних ТНС з когенераційним приводом з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи ТНС, пікових джерел теплоти ТНС, джерел приводної енергії парокомпресійних ТНС різних рівнів потужності, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії. У дослідженні [10] здійснено оцінку енергетичної ефективності СЕ на основі комбінованих КТНУ, визначено ефективні режими роботи СЕ на основі комбінованих КТНУ з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи, джерел приводної енергії для парокомпресійних ТНУ різних рівнів потужності, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

У роботах [1 – 10] авторами не здійснено оцінку енергетичної ефективності СЕ на основі комбінованих КТНУ та ПДТ, не визначено ефективні режими роботи СЕ на основі комбіно-

ваних КТНУ та ПДТ з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи, джерел приводної енергії для парокомпресійних ТНУ різних рівнів потужності, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

Метою дослідження є оцінка енергетичної ефективності систем енергозабезпечення на основі комбінованих когенераційно-теплонасосних установок і пікових джерел теплоти, визначення ефективних режимів роботи систем енергозабезпечення на основі комбінованих КТНУ та ПДТ з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи, джерел приводної енергії для парокомпресійних ТНУ різних рівнів потужності, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

Основна частина

У дослідженні здійснено оцінку енергетичної ефективності систем енергозабезпечення на основі комбінованих когенераційно-теплонасосних установок і пікових джерел теплоти. Досліджували ефективність систем енергозабезпечення на основі парокомпресійних ТНУ малої (до 1 МВт) та великої потужностей із когенераційним приводом від газопоршневого двигуна-генератора (ГПД). Використання когенераційних установок для приводу теплових насосів дозволяє уникнути додаткових втрат електроенергії під час транспортування та передбачає утилізацію теплоти відхідних газів після газового двигуна, що забезпечує кращу енергетичну ефективність. Досліджувані СЕ на основі комбінованих КТНУ та ПДТ можуть повністю або частково забезпечувати власні потреби в електричній енергії та забезпечувати потреби опалення та гарячого водопостачання споживачів. Схеми систем енергозабезпечення на основі комбінованих КТНУ та ПДТ наведено в роботах [1, 11].

Енергетична ефективність зазначених СЕ значною мірою визначається оптимальним розподілом навантаження між КТНУ та ПДТ (наприклад, водогрійним паливним котлом, електрокотлом, сонячними колекторами тощо) у складі СЕ. Цей розподіл характеризується часткою навантаження КТНУ у складі СЕ β, яку визначають як відношення теплової потужності КТНУ до теплової потужності СЕ $\beta = Q_{КТНУ}/Q_{СЕ}$. Для КТНУ значення теплової потужності визначають із урахуванням потужності утилізаційного обладнання когенераційного приводу, і воно становить $Q_{КТНУ} = Q_к + \Sigma Q_{ут}$, де $Q_к$ – потужність конденсатора ТНУ, $\Sigma Q_{ут}$ – потужність утилізаційного обладнання когенераційного приводу ТНУ.

У нашому дослідженні проаналізовано енергетичну ефективність системи «Джерело приводної енергії КТНУ – СЕ на основі КТНУ та ПДТ – споживач теплоти від СЕ» на прикладі СЕ з парокомпресійними КТНУ та ПДТ. Перевагою такого підходу є врахування втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії в КТНУ та ПДТ з метою визначення ефективних режимів роботи СЕ.

Запропоновано здійснювати комплексну оцінку енергетичної ефективності СЕ на основі КТНУ та ПДТ за комплексним безрозмірним критерієм енергетичної ефективності:

$$K_{СЕ} = (1-\beta)\cdot K_{ПДТ} + \beta \cdot K_{КТНУ}, \quad (1)$$

де $K_{ПДТ}$ – безрозмірний критерій енергетичної ефективності пікового джерела теплоти у складі СЕ (водогрійного паливного котла, електрокотла, сонячних колекторів тощо), $K_{КТНУ}$ – безрозмірний критерій енергетичної ефективності комбінованих КТНУ у складі СЕ.

Слід зазначити, що комплексний безрозмірний критерій енергетичної ефективності СЕ $K_{СЕ}$ може бути використаний також і для вибору найефективнішого пікового джерела теплоти для певного виду СЕ.

У дослідженнях [5, 10] був запропонований безрозмірний критерій енергетичної ефективності парокомпресійних ТНУ з когенераційним приводом. Його одержали на основі рівняння енергетичного балансу для системи «Джерело приводної енергії ТНУ – ТНУ – споживач теплоти від ТНУ» з урахуванням впливу джерел приводної енергії парокомпресійних ТНУ та з

урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ. З урахуванням такого підходу безрозмірний критерій енергетичної ефективності комбінованих КТНУ, згідно з [5, 10], матиме вид:

$$K_{КТНУ} = Q_{КТНУ} / Q_m = \eta_{ЕД} \cdot \eta_{ЕП} \cdot \varphi^{КТНУ} \cdot \eta_{тп}, . \quad (2)$$

де Q_m – потужність, витрачена газопоршневим двигуном-генератором для вироблення електричної енергії для привода ТНУ, де $\eta_{ЕД}$ – ефективний ККД газопоршневого двигуна; $\eta_{ЕП}$ – ККД електричного двигуна з урахуванням втрат енергії в блоці управління двигуном з [5], $\varphi^{КТНУ}$ – дійсний коефіцієнт перетворення КТНУ з дослідження [10], $\eta_{тп}$ – ККД теплового потоку, що враховує втрати енергії та робочого агента в трубопроводах та обладнанні ТНУ.

За умови $K_{КТНУ} = 1$ комбінована КТНУ передає до СЕ таку ж теплову потужність, яка була витрачена для вироблення електроенергії для привода ТНУ. Чим більше значення цього показника, тим ефективнішою та конкурентоздатнішою буде СЕ з КТНУ.

На рис. 1 показана область енергоефективної роботи КТНУ малих потужностей, що одержана на основі дослідження [10] та визначена за безрозмірним критерієм енергетичної ефективності КТНУ $K_{КТНУ}$ залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення ТНУ $\varphi_д$ та ефективного ККД ГПД $\eta_{ЕД}$. У дослідженні, згідно з [5, 10], враховано значення ККД електричного двигуна з урахуванням втрат енергії в блоці управління двигуном $\eta_{ЕП} = 0{,}8$.

Як вже зазначалось, ефективні режими роботи КТНУ відповідають умові $K_{КТНУ} > 1$. Одержані високі значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності для СЕ на основі КТНУ малих потужностей (див. рис. 1) свідчать про високу енергетичну ефективність таких комбінованих систем енергозабезпечення.

На рис. 2 показана область енергоефективної роботи КТНУ великих потужностей, одержана на основі дослідження [10] та визначена за безрозмірним критерієм енергетичної ефективності КТНУ $K_{КТНУ}$ залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення ТНУ $\varphi_д$ та ефективного ККД ГПД $\eta_{ЕД}$. У дослідженні, згідно з [5], враховано значення ККД електричного двигуна з урахуванням втрат енергії в блоці управління двигуном $\eta_{ЕП} = 0{,}9$.

Ефективні режими роботи КТНУ великих потужностей відповідають умові $K_{КТНУ} > 1$. Як і в попередньому випадку, одержані високі значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності для СЕ на основі КТНУ великих потужностей свідчать про високу енергетичну ефективність таких комбінованих систем енергозабезпечення.

Безрозмірний критерій енергетичної ефективності пікового джерела теплоти – електрокотла – у складі СЕ $K_{ПДТ}$ може бути одержаний на основі рівняння енергетичного балансу для систем «Джерело електричної енергії – електричний котел – споживач теплоти від СЕ» з урахуванням упливу джерел енергії для пікового джерела теплоти (електрокотла) та з урахуванням втрат енергії під час генерування й постачання електричної енергії до електрокотла.

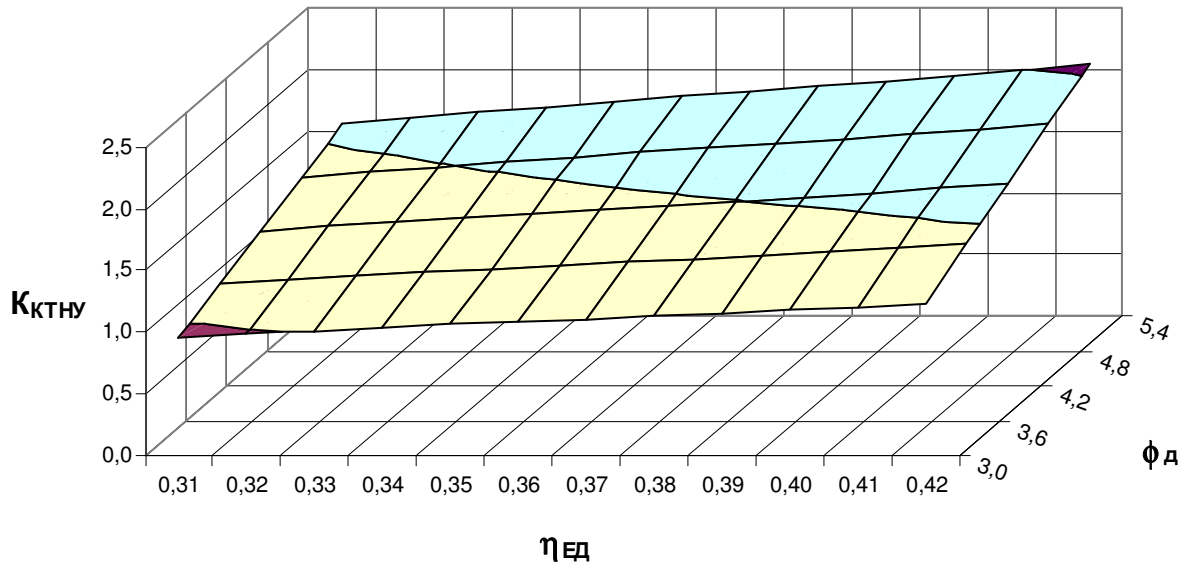

Рис. 1. Область енергоефективної роботи КТНУ малих потужностей за безрозмірним критерієм енергетичної ефективності КТНУ залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення ТНУ та ефективного ККД ГПД

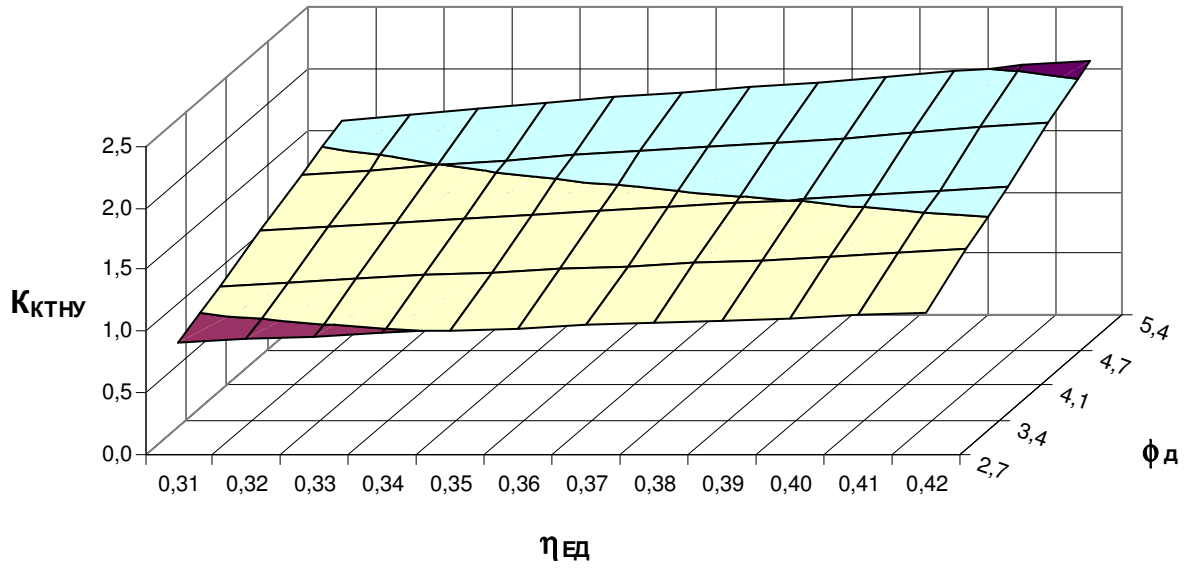

Рис. 2. Область енергоефективної роботи КТНУ великих потужностей за безрозмірним критерієм енергетичної ефективності КТНУ залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення ТНУ та ефективного ККД ГПД

Загалом для електрокотла як пікового джерела теплоти для СЕ безрозмірний критерій енергетичної ефективності матиме вид:

$$K_{ПДТ} = Q_{ЕК} / Q_m = \eta_{ЕЛ}^{к} \cdot \eta_{ЕК}, \quad (3)$$

де $Q_{ЕК}$ – теплова потужність водогрійного електрокотла, яка може бути визначена як: $Q_{ЕК} = Q_{СЕ} - Q_{КТНУ}$; Q_m – потужність, витрачена електростанцією для вироблення електричної енергії; $\eta_{ел}^{к}$ – загальний ККД генерування та постачання електричної енергії до електрокотла, який визначають за формулою: $\eta_{ЕЛ}^{к} = \eta_{ЕС} \cdot \eta_{ЛЕП}$, де $\eta_{ЕС}$ – усереднене значення ККД електростанцій в Україні або альтернативних джерел електричної енергії для ТНУ (на основі парогазових установок (ПГУ), газотурбінних установок (ГТУ), сонячних електростанцій термодинамічного циклу (СЕС), вітроенергетичних електростанцій (ВЕС)), із дослідження [5]; $\eta_{ЛЕП}$ – ККД розподільчих електричних мереж в Україні з [5]; $\eta_{ЕК}$ – ККД електричного котла.

Для випадків застосування СЕ з піковим електрокотлом загальний ККД генерування та постачанні електричної енергії до електрокотла можна визначати як $\eta_{ЕЛ}^{к} = \eta_{ЕД} \cdot \eta_{ЕП}$ у разі використання електроенергії від КТНУ або за вказаною вище формулою для випадків споживання електричної енергії з енергосистеми на основі традиційних або альтернативних джерел електричної енергії. Тоді безрозмірний критерій енергетичної ефективності електрокотла як пікового джерела теплоти для СЕ для випадків споживання електричної енергії з енергосистеми визначатимемо:

$$K_{ПДТ}^{ЕС} = \eta_{ЕС} \cdot \eta_{ЛЕП} \cdot \eta_{ЕК}. \quad (4)$$

У випадку використання в електричному котлі електроенергії від КТНУ безрозмірний критерій енергетичної ефективності електрокотла як пікового джерела теплоти для СЕ визначатимемо:

$$K_{ПДТ}^{ЕК} = \eta_{ЕД} \cdot \eta_{ЕП} \cdot \eta_{ЕК} = \eta_{ЕЛ}^{к} \cdot \eta_{ЕК}. \quad (5)$$

Безрозмірний критерій енергетичної ефективності пікового джерела теплоти – водогрійного паливного котла – у складі СЕ $К_{ПДТ}$ може бути одержаний на основі рівняння енергетичного балансу для систем «Джерела електричної енергії та палива – паливний котел – споживач теплоти від СЕ» з урахуванням упливу джерел енергії для пікового джерела теплоти (паливного котла) та з урахуванням втрат енергії під час генерування та постачання електричної енергії до котла (котельної). У цьому випадку споживання електричної енергії піковим джерелом теплоти в СЕ – паливним котлом – безпосередньо не пов'язано з процесом генерування теплоти в котлі, а частка споживання електричної енергії на власні потреби є незначною, тому суттєво не впливає на значення показника $K_{ПДТ}$.

Для паливного котла як пікового джерела теплоти для СЕ безрозмірний критерій енергетичної ефективності матиме вид:

$$K_{ПДТ}^{ПК} = Q_{ПК} / Q_n = \eta_{ПК}, \quad (6)$$

де $Q_{ПК}$ – теплова потужність водогрійного паливного котла, яку можна визначити як: $Q_{ПК} = Q_{СЕ} - Q_{КТНУ}$; Q_n – потужність, витрачена для вироблення теплової енергії від спалювання палива в котлі; $\eta_{ПК}$ – ККД водогрійного паливного котла або паливної котельної (для СЕ великих потужностей).

Для випадків використання альтернативних пікових джерел теплоти в СЕ (наприклад, сонячних колекторів для СЕ невеликої потужності) значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності пікового джерела теплоти для СЕ $K_{ПДТ}$ дорівнюватиме ККД альтернативного пікового джерела теплоти $\eta_{АПДТ}$ або ККД додаткової системи з альтернативним піковим джерелом теплоти $\eta_{АПДТ}^{с}$.

Слід зазначити, що комплексний безрозмірний критерій енергетичної ефективності СЕ

$K_{ТНС}$ з формули (1) може бути використаний також і для вибору найефективнішого пікового джерела теплоти для певного виду СЕ та ефективних режимів роботи СЕ

Запропонований підхід з оцінювання енергетичної ефективності СЕ на основі КТНУ та ПДТ має низку переваг:

— дозволяє оцінювати комплексний вплив змінних режимів роботи СЕ, пікових джерел теплоти СЕ, джерел приводної енергії парокомпресійних КТНУ з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії;

— дозволяє оцінювати вплив змінних режимів роботи КТНУ з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії;

— ураховує вплив джерел приводної енергії парокомпресійних КТНУ різних рівнів потужності з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії в КТНУ та СЕ;

— ураховує енергетичну ефективність СЕ на основі КТНУ різних рівнів потужностей;

— ураховує змінні режими роботи СЕ для теплопостачання протягом року зі зміною розподілу навантаження між парокомпресійними КТНУ та піковим джерелом теплоти в СЕ;

— ураховує режими роботи та енергетичну ефективність парокомпресійних КТНУ різних рівнів потужностей;

— ураховує вплив пікових джерел теплоти для СЕ та виду споживаної ними енергії з урахуванням втрат енергії під час генерування та постачання енергії до пікових джерел теплоти;

— у результаті комплексного підходу до оцінювання енергетичної ефективності СЕ можна здійснити вибір найефективнішого пікового джерела теплоти для певного виду СЕ;

— запропоновані методичні основи можуть бути використані для оцінювання енергетичної ефективності СЕ на основі парокомпресійних КТНУ з різними холодоагентами, джерелами низькотемпературної теплоти та схемними рішеннями;

— дозволяє комплексно оцінювати енергетичну ефективність значної кількості варіантів СЕ на основі КТНУ та ПДТ.

Застосування запропонованих підходів із оцінювання енергетичної ефективності систем енергозабезпечення на основі КТНУ та ПДТ продемонструємо на конкретних прикладах.

На рис. 3 – 7 показані результати комплексної оцінки енергетичної ефективності СЕ на основі КТНУ та ПДТ. Тут показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності СЕ $K_{СЕ}$ за умови зміни частки навантаження КТНУ в діапазоні β = 0,1…1,0. Дослідження проведено для режимів енергоефективної роботи КТНУ з $K_{КТНУ}$=1,1…2,1.

На рис. 3 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності СЕ на основі КТНУ малої потужності за умови споживання електроенергії піковим джерелом теплоти (електричним котлом) з енергосистеми України. У цьому дослідженні, згідно з [5], враховані: усереднене значення ККД електростанцій в Україні $\eta_{ЕС}$ = 0,383 та значення ККД розподільчих електричних мереж в Україні $\eta_{ЛЕП}$ = 0,875. Піковим джерелом теплоти в СЕ для цих умов передбачена електрична котельня з $\eta_{ЕК}$ = 0,95. Слід зазначити, що в разі зміни ККД електричної котельні в діапазоні $\eta_{ЕК}$ = 0,9…0,95 значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності електрокотла для випадків споживання електричної енергії з енергосистеми становитиме $K_{ПДТ}^{ЕС}$ = 0,302…0,318. Для досліджених режимів роботи СЕ значення комплексного безрозмірного критерію енергетичної ефективності СЕ становлять $K_{СЕ}$ = 0,396…1,92 за умови β = 0,1…0,9 та $K_{СЕ}$ = 2,1 за умови β = 1.

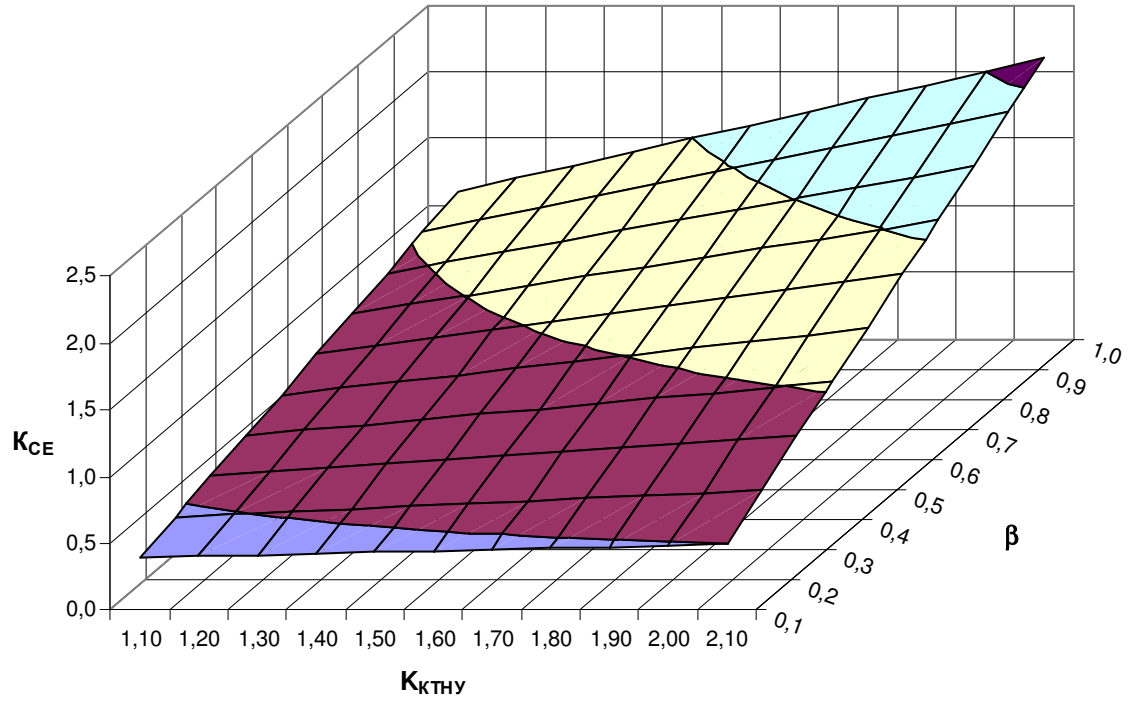

Рис. 3. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності СЕ на основі КТНУ малої потужності за умови споживання електроенергії піковим електрокотлом з енергосистеми України

На рис. 4 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності СЕ малої потужності за умов мінімальної ефективності ГПД та ПДТ зі споживанням електроенергії піковим джерелом теплоти (електричним котлом) від КТНУ. У цьому дослідженні, згідно з [5, 10], ураховані: значення ефективного ККД ГПД $\eta_{ЕД} = 0{,}31$ та значення ККД електричного двигуна з урахуванням втрат енергії в блоці управління двигуном $\eta_{ЕП} = 0{,}8$. Піковим джерелом теплоти в СЕ для цих умов передбачена електрична котельня з $\eta_{ЕК} = 0{,}9$. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності електрокотла для випадків споживання електричної енергії від КТНУ становитиме $K_{ПДТ}^{ЕК} = 0{,}223$. Для досліджених режимів роботи СЕ значення комплексного безрозмірного критерію енергетичної ефективності СЕ становлять $K_{СЕ} = 0{,}31\ldots1{,}46$ за умови $\beta = 0{,}1\ldots0{,}9$ та $K_{СЕ} = 1{,}6$ за умови $\beta = 1$.

На рис. 5 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності СЕ малої потужності за умов максимальної ефективності ГПД та ПДТ зі споживанням електроенергії піковим джерелом теплоти (електричним котлом) від КТНУ. У цьому дослідженні, згідно з [5, 10], ураховані: значення ефективного ККД ГПД $\eta_{ЕД} = 0{,}42$ та значення ККД електричного двигуна з урахуванням втрат енергії в блоці управління двигуном $\eta_{ЕП} = 0{,}8$. Піковим джерелом теплоти в СЕ для цих умов передбачена електрична котельня з $\eta_{ЕК} = 0{,}95$. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності електрокотла для випадків споживання електричної енергії від КТНУ становитиме $K_{ПДТ}^{ЕК} = 0{,}319$. Для досліджених режимів роботи СЕ значення комплексного безрозмірного критерію енергетичної ефективності СЕ становлять $K_{СЕ} = 0{,}39\ldots1{,}92$ за умови $\beta = 0{,}1\ldots0{,}9$ та $K_{СЕ} = 2{,}1$ за умови $\beta = 1$.

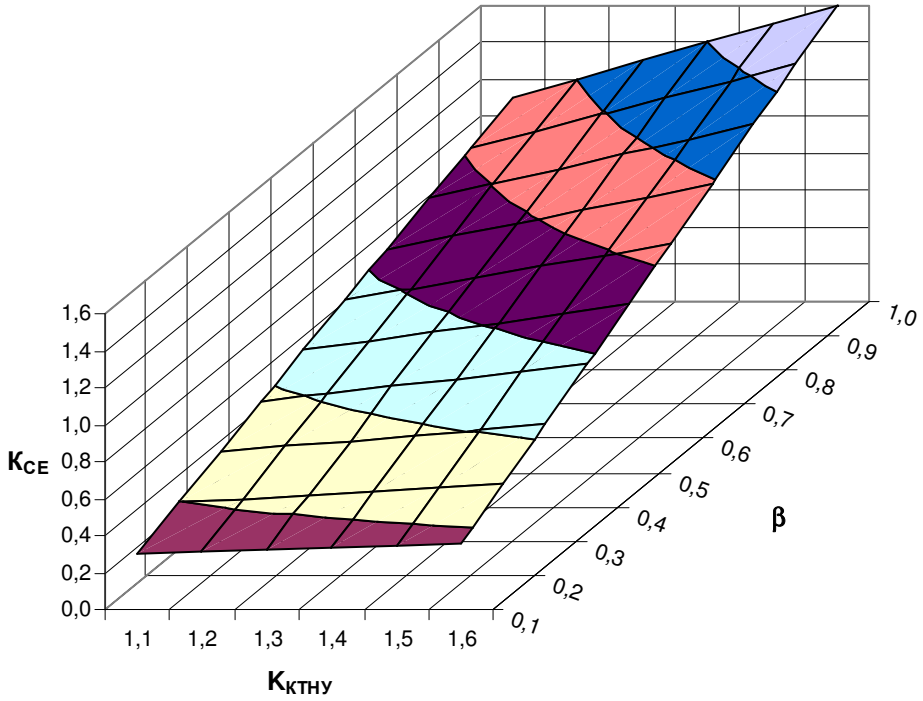

Рис. 4. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності СЕ на основі КТНУ малої потужності за умов мінімальної ефективності ГПД і ПДТ та споживанням електроенергії піковим електрокотлом від КТНУ

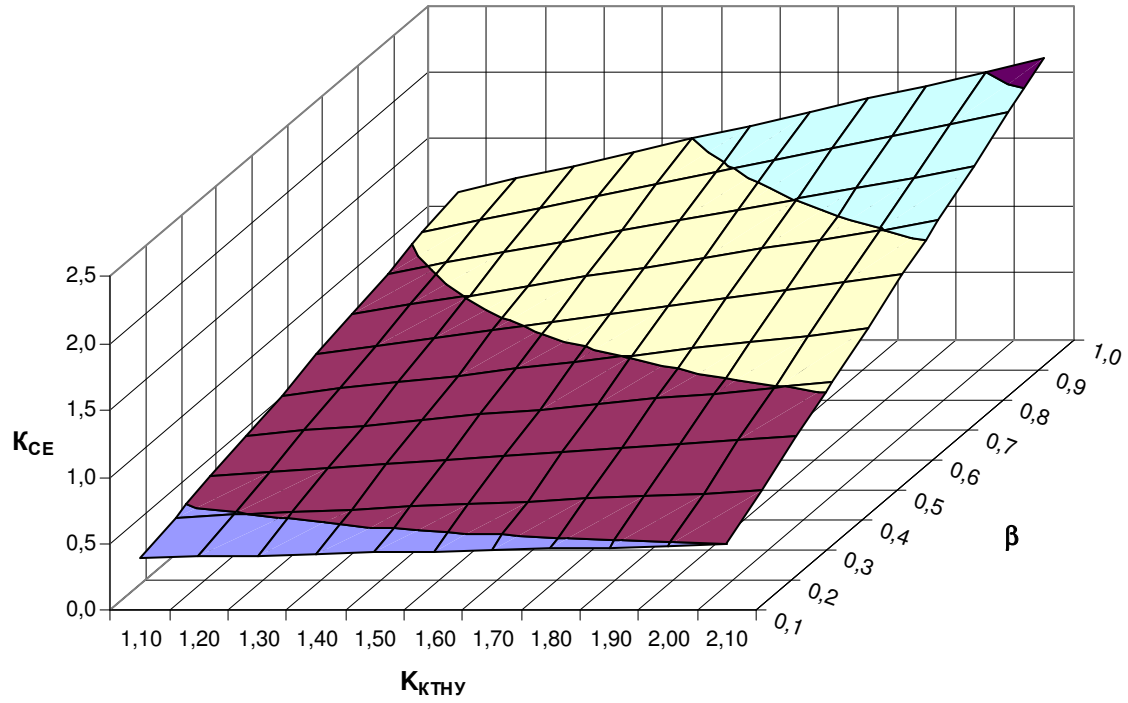

Рис. 5. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності СЕ на основі КТНУ малої потужності за умов максимальної ефективності ГПД і ПДТ та споживанням електроенергії електрокотлом від КТНУ

На рис. 6 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності СЕ для режимів енергоефективної роботи КТНУ за умов мінімальної ефективності пікового водогрійного паливного котла. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності водогрійного паливного котла становитиме $K_{ПДТ}^{ПК} = \eta_{ПК}$ =0,8. Для досліджених режимів роботи СЕ значення комплексного безрозмірного критерію енергетичної ефективності СЕ становлять $K_{CE} = 0{,}83\ldots1{,}97$ за умови $\beta = 0{,}1\ldots0{,}9$ та $K_{CE} = 2{,}1$ за умови $\beta = 1$.

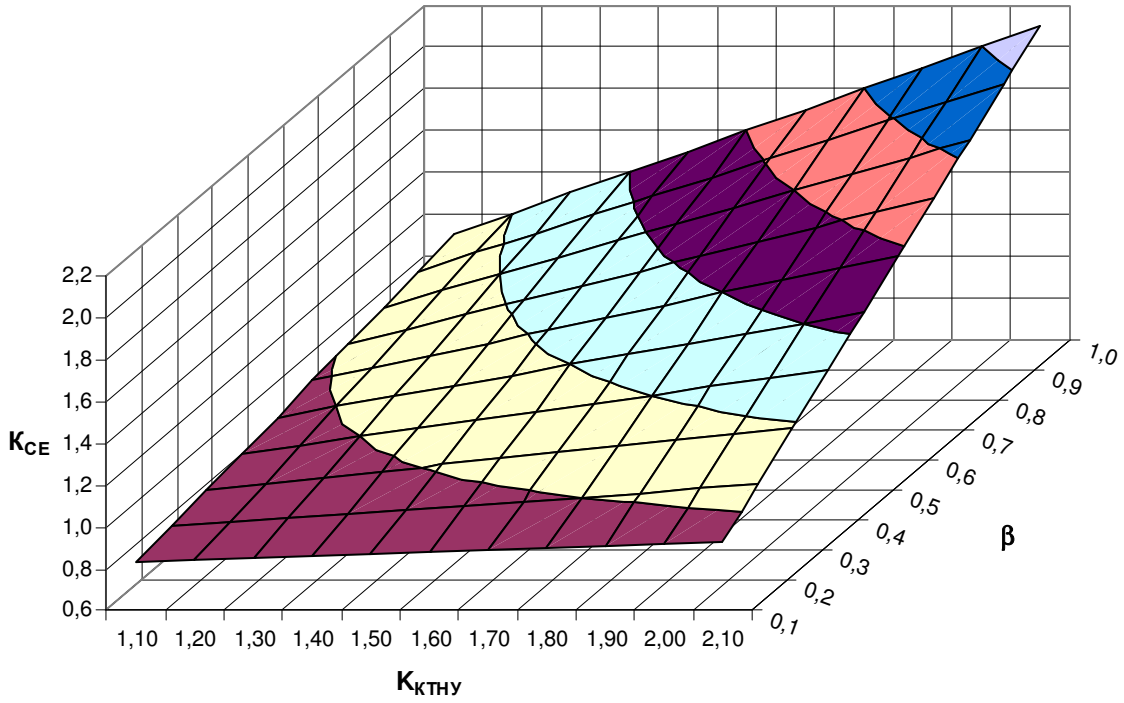

Рис. 6. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності СЕ для режимів енергоефективної роботи КТНУ за умов мінімальної ефективності пікового паливного котла

На рис. 7 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності СЕ для режимів енергоефективної роботи КТНУ за умов максимальної ефективності пікового водогрійного паливного котла. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності водогрійного паливного котла становитиме $K_{ПДТ}^{ПК} = \eta_{ПК}$ =0,9. Для досліджених режимів роботи СЕ значення комплексного безрозмірного критерію енергетичної ефективності СЕ становлять $K_{CE} = 0{,}92\ldots1{,}98$ за умови $\beta = 0{,}1\ldots0{,}9$ та $K_{CE} = 2{,}1$ за умови $\beta = 1$.

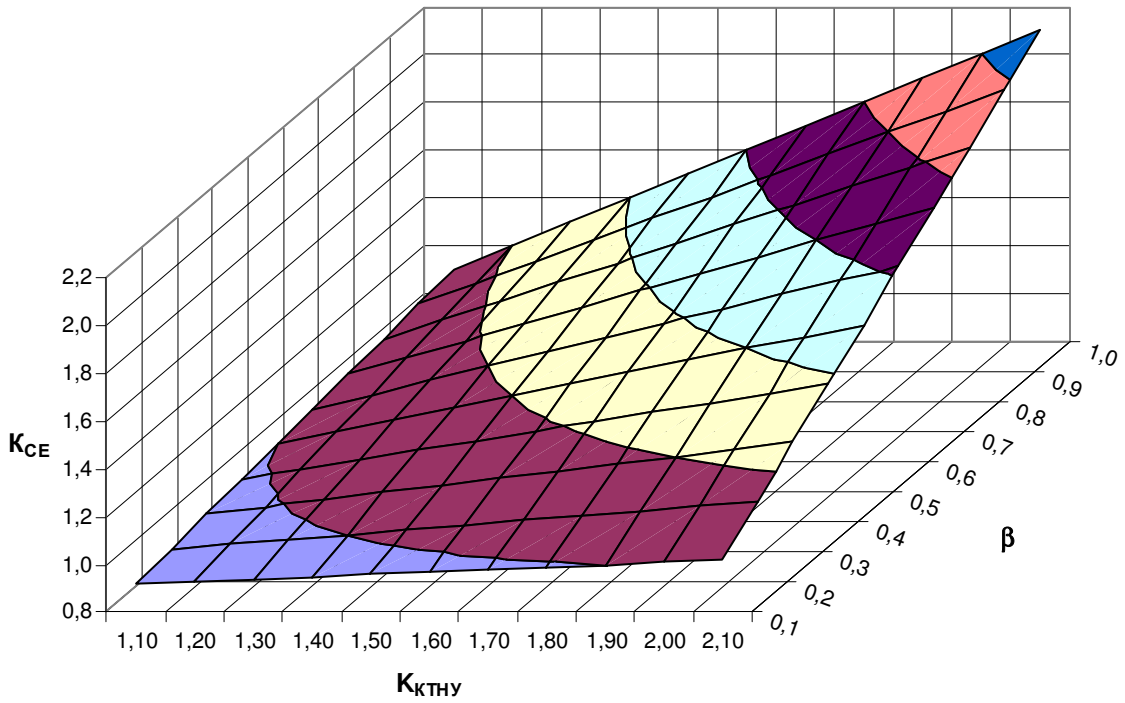

Рис. 7. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності СЕ для режимів енергоефективної роботи КТНУ за умов максимальної ефективності пікового паливного котла

Порівнюючи результати досліджень, показані на рис. 3 – 7, можна зробити висновок, що для СЕ на основі КТНУ та ПДТ для значень частки навантаження КТНУ $\beta > 0{,}7$ ефективність та вид пікового джерела теплоти незначно впливають на енергетичну ефективність СЕ за умови енергоефективних режимів роботи КТНУ. Для інших режимів роботи СЕ їхню енергетичну ефективність та конкурентоспроможність значною мірою будуть визначати вид та ефективність ПДТ за умови енергоефективних режимів роботи КТНУ.

Визначено, що значення безрозмірного показника енергетичної ефективності ПДТ у складі СЕ становлять: $K_{ПДТ}^{ЕС} = 0{,}302\ldots0{,}318$ для електрокотла за умови використання електроенергії з енергосистеми; $K_{ПДТ}^{ЕК} = 0{,}223\ldots0{,}319$ для електрокотла для СЕ малих потужностей за умови використання електроенергії від КТНУ; $K_{ПДТ}^{ПК} = 0{,}8\ldots0{,}9$ для пікового паливного котла у складі СЕ.

Порівнюючи результати досліджень, показані на рис. 3 – 7, можна зробити висновок, що використання паливного котла як пікового джерела теплоти в СЕ є значно ефективнішим, ніж використання пікового електрокотла з різними варіантами джерел електроенергії, що підтверджено більшими значеннями безрозмірного критерію енергетичної ефективності пікового джерела теплоти у складі СЕ $K_{ПДТ}$ та безрозмірного критерію енергетичної ефективності СЕ $К_{СЕ}$ для різних режимів роботи.

Запропоновані в дослідженні СЕ на основі КТНУ та пікових електрокотлів будуть ефективнішими, ніж сучасні високоефективні електричні та паливні котли, якщо частка навантаження КТНУ в СЕ становить $\beta > 0{,}4$.

На основі аналізу результатів досліджень (рис. 6 – 7) визначено, що для СЕ на основі КТНУ та пікових паливних котлів фіксують більші значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності СЕ $K_{СЕ}$ для всіх досліджених режимів роботи порівняно з іншими варіантами СЕ та сучасними високоефективними електричними та паливними котлами. Енергетична ефективність цих СЕ майже в два рази перевищує ефективність сучасних високоефективних електричних та паливних котлів (див. рис. 6 – 7).

Визначено, що для випадків $K_{КТНУ} > 1$ та $K_{СЕ} > \eta_{ПК}$ (або $K_{СЕ} > \eta_{ЕК}$) запропоновані в цій статті СЕ на основі КТНУ та ПДТ можуть бути рекомендовані як високоефективні системи енергозабезпечення, які можуть скласти конкуренцію сучасним високоефективним електричним та паливним котлам.

На основі запропонованих підходів із оцінювання енергетичної ефективності СЕ з КТНУ і ПДТ та зазначених вище умов визначено ефективні режими роботи СЕ з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи, джерел приводної енергії для парокомпресійних ТНУ різних рівнів потужності, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

Для здійснення оцінки енергетичної ефективності різних варіантів СЕ на основі КТНУ та ПДТ, крім вищенаведених підходів, пропонуємо використовувати результати досліджень [1, 5 – 10].

Висновки

Розроблено методичні основи та здійснено оцінку енергетичної ефективності систем енергозабезпечення на основі комбінованих КТНУ та ПДТ, визначено ефективні режими роботи систем енергозабезпечення на основі комбінованих КТНУ та ПДТ з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи, джерел приводної енергії для парокомпресійних ТНУ різних рівнів потужності, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

Запропонований підхід з оцінювання енергетичної ефективності СЕ на основі КТНУ та ПДТ має низку переваг:

— дозволяє оцінювати комплексний вплив змінних режимів роботи СЕ, пікових джерел теплоти СЕ, джерел приводної енергії парокомпресійних КТНУ з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії;

— дозволяє оцінювати вплив змінних режимів роботи КТНУ з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії;

— ураховує вплив джерел приводної енергії парокомпресійних КТНУ різних рівнів потужності з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії в КТНУ та СЕ;

— ураховує енергетичну ефективність СЕ на основі КТНУ різних рівнів потужностей;

— ураховує змінні режими роботи СЕ для теплопостачання протягом року зі зміною розподілу навантаження між парокомпресійними КТНУ та піковим джерелом теплоти в СЕ;

— ураховує режими роботи та енергетичну ефективність парокомпресійних КТНУ різних рівнів потужностей;

— ураховує вплив пікових джерел теплоти для СЕ та виду споживаної ними енергії з урахуванням втрат енергії під час генерування та постачання енергії до пікових джерел теплоти;

— у результаті комплексного підходу до оцінювання енергетичної ефективності СЕ можна здійснити вибір найефективнішого пікового джерела теплоти для певного виду СЕ;

— запропоновані методичні основи можуть бути використані для оцінювання енергетичної ефективності СЕ на основі парокомпресійних КТНУ з різними холодоагентами, джерелами низькотемпературної теплоти та схемними рішеннями;

— дозволяє комплексно оцінювати енергетичну ефективність значної кількості варіантів СЕ на основі КТНУ та ПДТ.

На основі аналізу результатів досліджень визначено, що для СЕ на основі КТНУ та ПДТ для значень частки навантаження КТНУ $\beta > 0{,}7$ ефективність і вид пікового джерела теплоти незначно впливають на енергетичну ефективність СЕ за умови енергоефективних режимів роботи КТНУ. Для інших режимів роботи СЕ їхню енергетичну ефективність та конкурентоспроможність значною мірою будуть визначати вид та ефективність ПДТ за умови енергоефективних режимів роботи КТНУ. Запропоновані в дослідженні СЕ на основі КТНУ та піко-

вих електрокотлів будуть ефективнішими, ніж сучасні високоефективні електричні та паливні котли, якщо частка навантаження КТНУ в СЕ становить $\beta > 0{,}4$.

Визначено, що для СЕ на основі КТНУ та пікових паливних котлів фіксують більші значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності СЕ K_{CE} для всіх досліджених режимів роботи порівняно з іншими варіантами СЕ та сучасними високоефективними електричними та паливними котлами. Енергетична ефективність цих СЕ майже в два рази перевищує ефективність сучасних високоефективних електричних та паливних котлів.

Для випадків $K_{КТНУ} > 1$ та $K_{CE} > \eta_{ПК}$ (або $K_{CE} > \eta_{ЕК}$) запропоновані в цій статті СЕ на основі КТНУ та ПДТ можуть бути рекомендовані як високоефективні системи енергозабезпечення, які можуть скласти конкуренцію сучасним високоефективним електричним та паливним котлам.

На основі запропонованих підходів із оцінювання енергетичної ефективності СЕ з КТНУ і ПДТ та зазначених вище умов визначено ефективні режими роботи СЕ з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи, джерел приводної енергії для парокомпресійних ТНУ різних рівнів потужності, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

Для здійснення оцінки енергетичної ефективності різних варіантів СЕ на основі КТНУ та ПДТ, крім вищенаведених підходів, пропонуємо використовувати результати досліджень [1, 5 – 10].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткаченко С. Й. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2009. – 176 с.

2. Баласанян Г. А. Ефективність перспективних інтегрованих систем енергозабезпечення на базі установок когенерації малої потужності (теоретичні основи, аналіз, оптимізація) : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.14.06 «Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика» / Г. А. Баласанян. – Одеса, 2007. – 36 с.

3. Билека Б. Д. Экономичность когенерационных и комбинированных когенерационно-теплонасосных установок с газопоршневыми и газотурбинными двигателями / Б. Д. Билека, Р. В. Сергиенко, В. Я. Кабков // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – №7 (74). – С. 25 – 29.

4. Сафьянц С. М. Исследование схемы источника теплоэлектроснабжения с регулированием нагрузок на базе использования тепловых насосов / С. М. Сафьянц, Н. В. Колесниченко, Т. Е. Веретенникова // Промышленная теплотехника. – 2011. – Т. 33, № 3. – С. 79 – 85.

5. Енергетична ефективність парокомпресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводами [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, В. В. Лещенко, Р. О. Тіхоненко // Наукові праці ВНТУ. – 2014. – № 4. – Режим доступу до журн.: http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/421/419.

6. Енергетичні переваги застосування парокомпресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводами [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, В. В. Лещенко, Р. О. Тіхоненко // Наукові праці ВНТУ. – 2015. – № 1. – Режим доступу до журн.: http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/437/435.

7. Остапенко О. П. Методичні основи комплексного оцінювання енергетичної ефективності парокомпресійних теплонасосних станцій з електричним та когенераційним приводом / О. П. Остапенко // Наукові праці ОНАХТ. – 2015. – Вип. 47. – Т. 2. – С. 157 – 162.

8. Ostapenko O. P. Scientific basis of evaluation energy efficiency of heat pump plants: monograph / O. P. Ostapenko. – Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 62 p.

9. Комплексна оцінка енергетичної ефективності парокомпресійних теплонасосних станцій з когенераційним приводом [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко // Наукові праці ВНТУ. – 2015. – № 3. – Режим доступу до журн.: http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/2/2.

10. Енергетична ефективність систем енергозабезпечення на основі комбінованих когенераційно-теплонасосних установок [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, В. В. Лещенко, Р. О. Тіхоненко // Наукові праці ВНТУ. – 2015. – № 4. – Режим доступу до журн.: http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/454/452.

11. Остапенко О. П. Холодильна техніка та технологія. Теплові насоси : навчальний посібник / О. П. Остапенко. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 123 с.

Остапенко Ольга Павлівна – к. т. н., доц., доцент кафедри теплоенергетики, ostapenko1208@gmail.com.

Вінницький національний технічний університет.