

**О. П. Остапенко, к. т. н., доц.**

## **ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З КОГЕНЕРАЦІЙНО-ТЕПЛОНАСОСНИМИ УСТАНОВКАМИ ТА ПІКОВИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛОТИ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ**

*Запропоновано підхід із оцінювання енергоефективності систем енергозабезпечення (СЕ) з когенераційно-теплонасосними установками (КТНУ) та піковими джерелами теплоти (ПДТ) у системах теплопостачання за умов оптимальних режимів роботи КТНУ з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи, джерел приводної енергії для парокompресійних теплонасосних установок (ТНУ) різних рівнів потужності, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.*

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

### **Вступ**

Аналіз енергоефективності застосування комбінованих КТНУ в теплових схемах джерел енергопостачання проведено в низці публікацій [1 – 11]. У роботі [1] проведено дослідження з підвищення енергоефективності джерел теплопостачання з використанням ТНУ з когенераційним приводом. У роботі [2] здійснено порівняльний аналіз напрямів підвищення ефективності систем енергопостачання на базі установок когенерації малої потужності та запропоновано теплові схеми систем комплексного енергопостачання. У дослідженні [3] оцінено економічність когенераційних та комбінованих когенераційно-теплонасосних установок із газопоршневими та газотурбінними двигунами. У роботі [4] досліджено схеми джерел теплоелектропостачання (міні-ТЕЦ) із регулюванням навантажень на базі використання теплових насосів. У дослідженнях [5 – 6] оцінені енергетичні переваги та визначені ефективні дійсні режими роботи ТНУ з електричним та когенераційним приводами з урахуванням впливу джерел приводної енергії парокompресійних теплових насосів та втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ. У роботах [7 – 8] запропоновано методичні основи з комплексного оцінювання енергоефективності парокompресійних 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] запропоновані наукові основи та здійснено комплексну оцінку енергоефективності парокompресійних ТНС із когенераційним приводом з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи ТНС, пікових джерел теплоти ТНС, джерел приводної енергії парокompресійних ТНС різних рівнів потужності, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії. У дослідженні [10] здійснена оцінка енергоефективності СЕ на основі комбінованих КТНУ, визначені ефективні режими роботи СЕ з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи, джерел приводної енергії для парокompресійних ТНУ різних рівнів потужності, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії. У роботі [11] оцінена енергоефективність СЕ на основі комбінованих КТНУ та ПДТ, визначені ефективні режими роботи цих СЕ з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи, джерел приводної енергії для парокompресійних ТНУ різних рівнів потужності, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення елект-

ричної енергії.

У роботах [1 – 11] авторами не здійснено оцінку енергоефективності СЕ з КТНУ та ПДТ у системах теплопостачання за умов оптимальних режимів роботи КТНУ, не визначені енергоефективні режими роботи СЕ з 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 енергоефективності систем енергозабезпечення з комбінованими КТНУ та ПДТ для систем теплопостачання за умов оптимальних режимів роботи КТНУ, визначення енергоефективних режимів роботи СЕ з 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

В дослідженні здійснено оцінку енергоефективності систем енергозабезпечення з комбінованими когенераційно-теплонасосними установками та піковими джерелами теплоти для систем теплопостачання. Досліджували енергоефективність систем енергозабезпечення із парокомпресійними ТНУ малої (до 1 МВт) та великої потужностей з когенераційним приводом від газопоршневого двигуна-генератора (ГПД). Використання когенераційних установок для приводу теплових насосів забезпечує кращу енергетичну ефективність, оскільки дозволяє уникнути додаткових втрат електроенергії під час транспортування та передбачає утилізацію теплоти відхідних газів після газового двигуна. Досліджувані СЕ з комбінованими КТНУ та ПДТ можуть повністю або частково забезпечувати власні потреби в електричній енергії та забезпечувати потреби опалення та гарячого водопостачання споживачів. Схеми систем енергозабезпечення з комбінованими КТНУ та ПДТ наведені в роботах [1, 12].

Оптимальний розподіл навантаження між КТНУ та ПДТ (наприклад, водогрійним паливним котлом, електродкотлом, сонячними колекторами тощо) у складі СЕ значною мірою визначає енергетичну ефективність зазначених СЕ. Такий розподіл характеризується часткою навантаження КТНУ у складі СЕ  $\beta$ , яку визначають як відношення теплової потужності КТНУ до теплової потужності СЕ  $\beta = Q_{КТНУ}/Q_{СЕ}$ . Значення теплової потужності КТНУ визначають з урахуванням потужності утилізаційного обладнання когенераційного приводу, воно становить  $Q_{КТНУ} = Q_{\kappa} + \Sigma Q_{ум}$ , де  $Q_{\kappa}$  – потужність конденсатора ТНУ,  $\Sigma Q_{ум}$  – потужність утилізаційного обладнання когенераційного приводу ТНУ. Оптимальні значення показника  $\beta$  для СЕ з різними джерелами теплоти для КТНУ за змінних режимів роботи теплової мережі були визначені на основі аналізу результатів проведених досліджень [13 – 15].

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

У роботі [11] запропоновано здійснювати комплексну оцінку енергоефективності СЕ з КТНУ та ПДТ за комплексним безрозмірним критерієм енергоефективності:

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

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

У дослідженнях [5, 10 – 11] запропоновано безрозмірний критерій енергоефективності па-

рокомпресійних ТНУ з когенераційним приводом  $K_{КТНУ}$ . Він одержаний на основі рівняння енергетичного балансу для системи «Джерело приводної енергії ТНУ – ТНУ – споживач теплоти від ТНУ» з урахуванням впливу джерел приводної енергії пароконденсаторних ТНУ та з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії до 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.

У дослідженні [11] визначені області енергоефективної роботи КТНУ різних рівнів потужностей, що були одержані на основі дослідження [10] та визначені за безрозмірним критерієм енергоефективності КТНУ  $K_{КТНУ}$  залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення ТНУ  $\varphi_d$  та ефективного ККД ГПД  $\eta_{ЕД}$ . Як вже зазначалось, енергоефективні режими роботи КТНУ відповідають умові  $K_{КТНУ} > 1$ . Одержані в [11] високі значення безрозмірного критерію енергоефективності для СЕ з КТНУ свідчать про високу енергетичну ефективність таких комбінованих систем енергозабезпечення.

Безрозмірний критерій енергоефективності пікового джерела теплоти – електрокотла – у складі СЕ  $K_{ПДТ}$ , згідно з [11], 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 під час генерування та постачання електричної енергії до електрокотла. У дослідженні [11] здійснена оцінка енергоефективності пікового електрокотла в СЕ у разі використання електроенергії від КТНУ та для випадків споживання електричної енергії з енергосистеми на основі традиційних або альтернативних джерел електричної енергії на базі парогазових установок, газотурбінних установок, сонячних електростанцій термодинамічного циклу, вітроенергетичних електростанцій.

Безрозмірний критерій енергоефективності пікового джерела теплоти – водогрійного паливного котла – у складі СЕ  $K_{ПДТ}$ , згідно з [11], одержаний на основі рівняння енергетичного балансу для систем «Джерело електричної енергії та палива – паливний котел – споживач теплоти від СЕ» з урахуванням впливу джерел енергії для пікового 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  $K_{ПДТ}$ .

У дослідженні [11] зазначено, що 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  $\eta_{АПДТ}^c$ .

Варто зазначити, що комплексний безрозмірний критерій енергоефективності СЕ  $K_{ТНС}$  з формули (1) може бути використаний для вибору найефективнішого пікового джерела теплоти для певного виду СЕ та ефективних режимів роботи СЕ.

Із дослідження [11] визначено, що для випадків  $K_{КТНУ} < K_{ПДТ}$  значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ  $K_{СЕ}$  буде зменшуватись зі збільшенням частки навантаження КТНУ  $\beta$ . Для інших випадків значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ  $K_{СЕ}$  зростатиме зі збільшенням частки навантаження ТНУ  $\beta$ .

Детальніше методичні основи з оцінювання енергоефективності СЕ з КТНУ та ПДТ ви-

кладено в дослідженні [11].

Запропонований підхід з оцінювання енергоефективності СЕ з КТНУ та ПДТ для систем теплопостачання має низку переваг:

- урахуває змінні режими роботи СЕ для теплопостачання протягом року зі зміною розподілу навантаження між парокompресійними КТНУ та піковим джерелом теплоти в СЕ;
- дозволяє оцінювати комплексний вплив змінних режимів роботи СЕ, пікових джерел теплоти СЕ, джерел приводної енергії парокompресійних КТНУ з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії;
- урахуває вплив джерел приводної енергії парокompресійних КТНУ різних рівнів потужності з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії в КТНУ та СЕ;
- урахуває 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 енергоефективності СЕ можна здійснити вибір найефективнішого ПДТ для певного виду СЕ під час роботи в системах теплопостачання;
- запропоновані в [11] методичні основи та наведені в цій статті результати досліджень можуть бути використані для оцінювання енергоефективності СЕ на основі парокompресійних КТНУ з різними холодоагентами, джерелами низькотемпературної теплоти та схемними рішеннями;
- дозволяє комплексно оцінювати енергоефективність значної кількості варіантів СЕ з КТНУ та ПДТ для систем теплопостачання.

Застосування запропонованих підходів із оцінювання енергоефективності СЕ з КТНУ та ПДТ продемонструємо на конкретних прикладах.

На рис. 1 – 6 показані результати оцінки енергоефективності СЕ з КТНУ та ПДТ для оптимальних значень частки навантаження КТНУ  $\beta$ . Тут продемонстровані значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ з КТНУ та ПДТ для випадків змінного навантаження КТНУ у складі СЕ. Дослідження проведено для випадків сезонного змінного навантаження КТНУ у складі СЕ для оптимальних значень частки навантаження КТНУ в діапазоні  $\beta = 0,16 \dots 0,63$  [12 – 15], що відповідає температурним режимам роботи системи теплопостачання. Дослідження проведено для режимів енергоефективної роботи КТНУ з  $K_{КТНУ} = 1,1 \dots 2,1$ . Значення критерію енергоефективності КТНУ  $K_{КТНУ}$  відповідають значенням дійсного коефіцієнта перетворення КТНУ в межах  $\varphi_0 = 3,0 \dots 5,4$  для КТНУ малих потужностей та  $\varphi_0 = 2,7 \dots 5,4$  для КТНУ великих потужностей, згідно з [11].

На рис. 1 показані значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ з КТНУ малої потужності за умови споживання електроенергії піковим джерелом теплоти (електричним котлом) з енергосистеми України. У цьому дослідженні, згідно з [5], урахувані: 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  $\eta_{ЕК} = 0,9 \dots 0,95$  значення безрозмірного критерію енергоефективності електрокотла для випадків споживання електричної енергії з енергосистеми становитиме  $K_{ПДТ}^{ЕС} = 0,302 \dots 0,318$ . Для досліджених режимів роботи СЕ для систем теплопостачання значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять  $K_{СЕ} = 0,44 \dots 1,44$  за умови  $\beta = 0,16 \dots 0,63$  та можуть становити  $K_{СЕ} = 2,1$  [11] за умови  $\beta = 1$ .

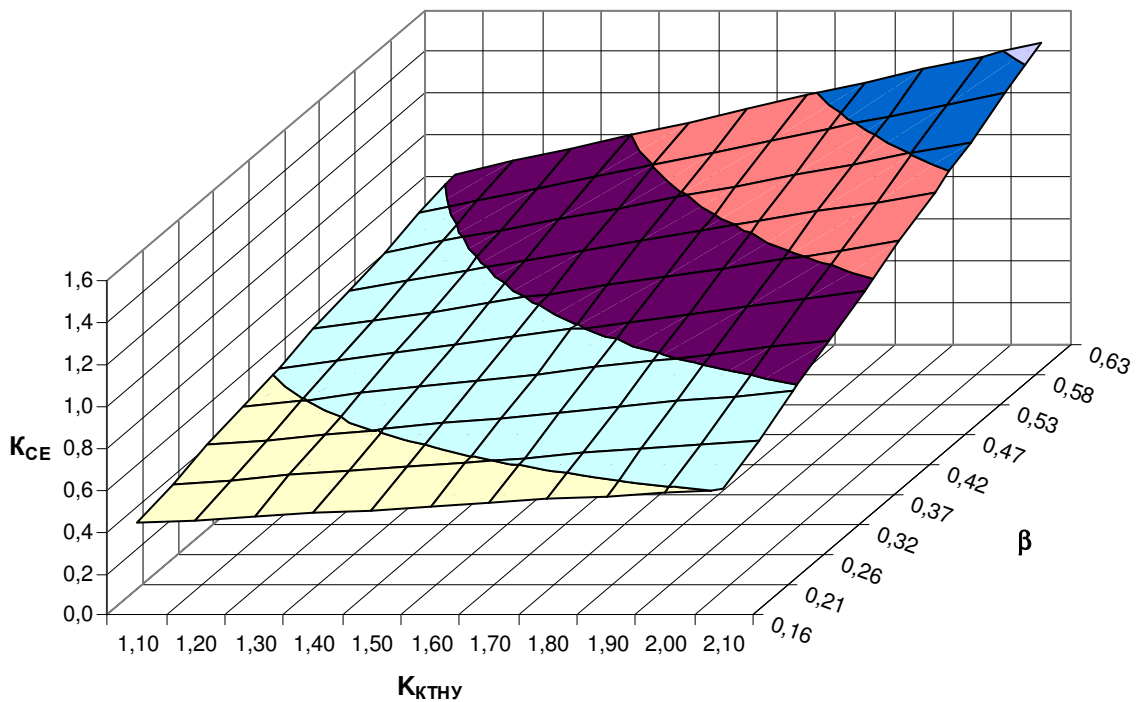


Рис. 1. Значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ з КТНУ малої потужності за умови споживання електроенергії піковим електрокотлом з енергосистеми України

За умов  $K_{КТНУ} > 1$  та  $K_{СЕ} > \eta_{ПК}$  (або  $K_{СЕ} > \eta_{ЕК}$ ) [11] із запропонованих у цьому дослідженні залежностей можуть бути визначені області енергоефективної роботи досліджуваних СЕ. У разі виконання вищевказаних умов досліджувані СЕ з КТНУ та ПДТ можуть бути рекомендовані як вискоефективні системи енергозабезпечення, які можуть скласти конкуренцію сучасним вискоефективним електричним і паливним котлам у системах теплопостачання та енергозабезпечення. На рис. 2 показана область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності за умови споживання електроенергії піковим електричним котлом з енергосистеми України під час роботи в системах теплопостачання.

На рис. 3 показані значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ з КТНУ 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], урахovanі: 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 для систем теплопостачання значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять  $K_{СЕ} = 0,36 \dots 1,09$  за умови  $\beta = 0,16 \dots 0,63$  та можуть становити  $K_{СЕ} = 2,1$  [11] за умови  $\beta = 1$ .

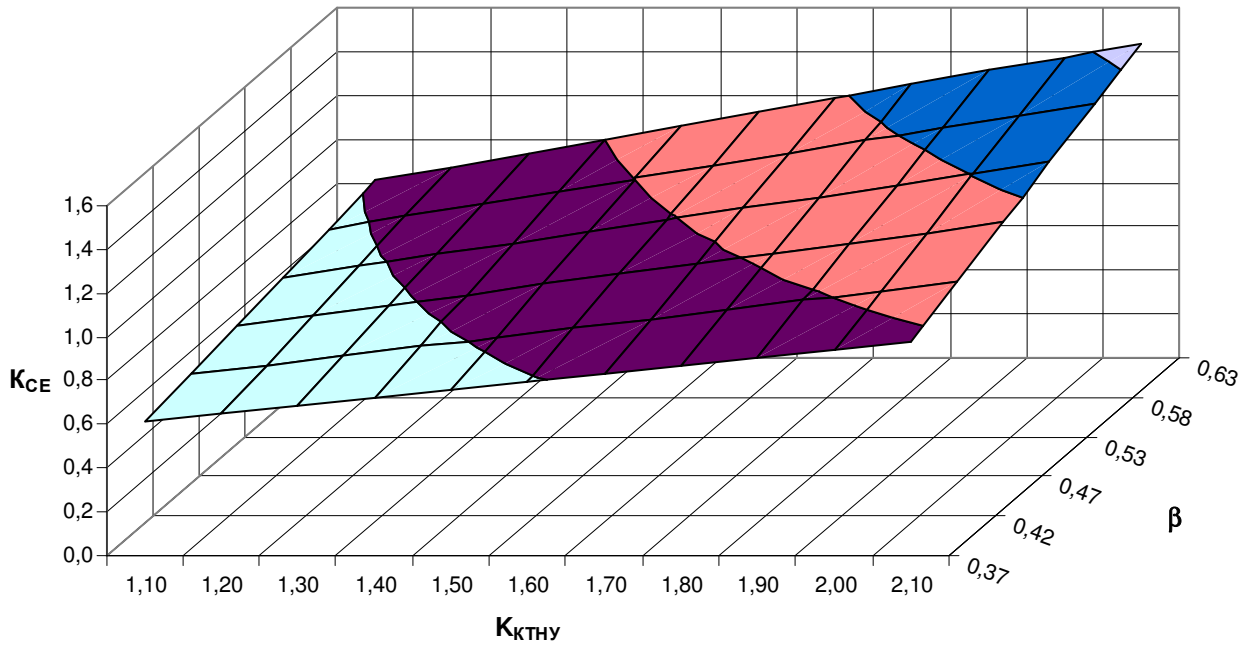


Рис. 2. Область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності за умови споживання електроенергії піковим електричним котлом з енергосистеми України

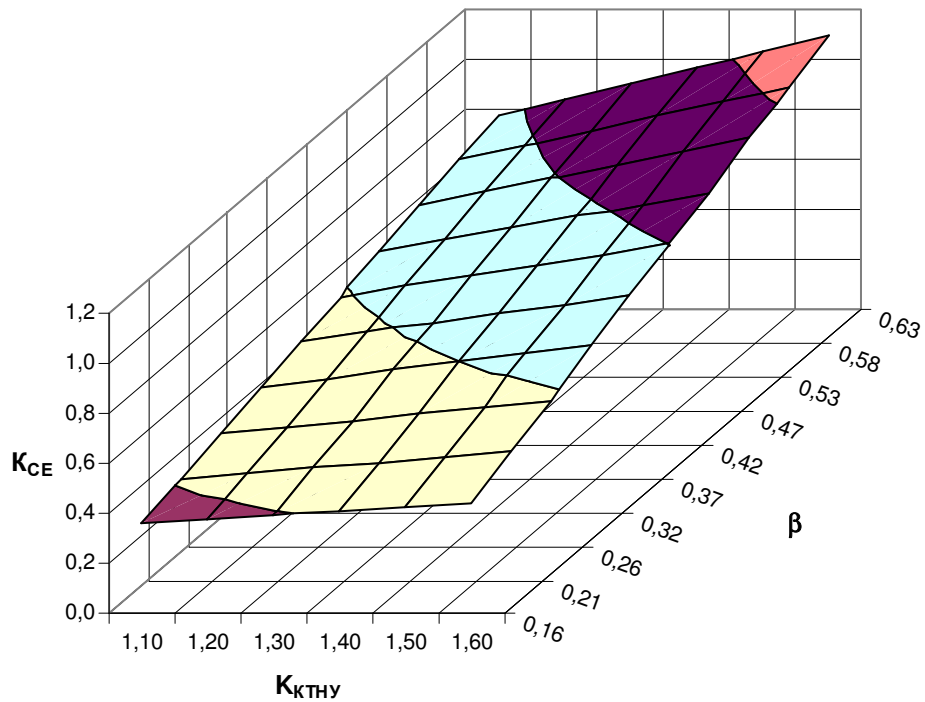


Рис. 3. Значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ з КТНУ малої потужності за умов мінімальної ефективності ГПД і ПДТ та споживанням електроенергії піковим електричним котлом від КТНУ

На рис. 4 показані значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ з КТНУ 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  $\eta_{ED} = 0,42$  та значення ККД електричного двигуна з урахуванням втрат енергії в блоці управління двигуном  $\eta_{EP} = 0,8$ . Піковим дже-

релом 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 для систем теплопостачання значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять  $K_{СЕ} = 0,444 \dots 1,441$  за умови  $\beta = 0,16 \dots 0,63$  та можуть становити  $K_{СЕ} = 2,1$  [11] за умови  $\beta = 1$ . Варто зазначити, що одержані значення показника енергоефективності СЕ на рис. 4 мало відрізняються від значень показника енергоефективності для СЕ з КТНУ малої потужності та споживанням електроенергії піковим електричним котлом з енергосистеми України, що наведено на рис. 1.

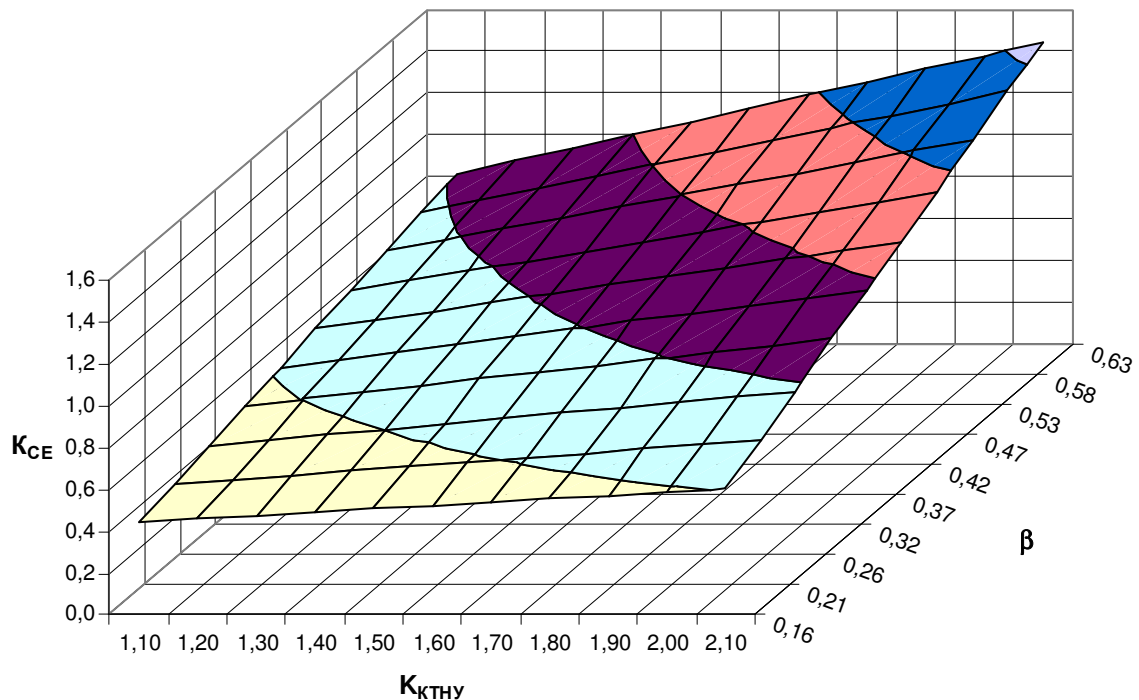


Рис. 4. Значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ з КТНУ малої потужності за умов максимальної ефективності ГПД і ПДТ та споживанням електроенергії електрокотлом від КТНУ

На рис. 5 показані значення безрозмірного критерію енергоефективності 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 для систем теплопостачання значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять  $K_{СЕ} = 0,848 \dots 1,619$  за умови  $\beta = 0,16 \dots 0,63$  та можуть становити  $K_{СЕ} = 2,1$  [11] за умови  $\beta = 1$ .

Як видно з рис. 5, за умов  $K_{КТНУ} > 1$  та  $K_{СЕ} > \eta_{ПК}$  [11] залежність, показана на рис. 5, визначає область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ та піковим паливним котлом за умов його мінімальної ефективності. Ця СЕ може бути рекомендована як вискоефективна система енергозабезпечення, оскільки її ефективність у два рази перевищує енергоефективність паливного котла. Такі СЕ можуть скласти конкуренцію сучасним вискоефективним електричним та паливним котлам у системах теплопостачання й енергозабезпечення.

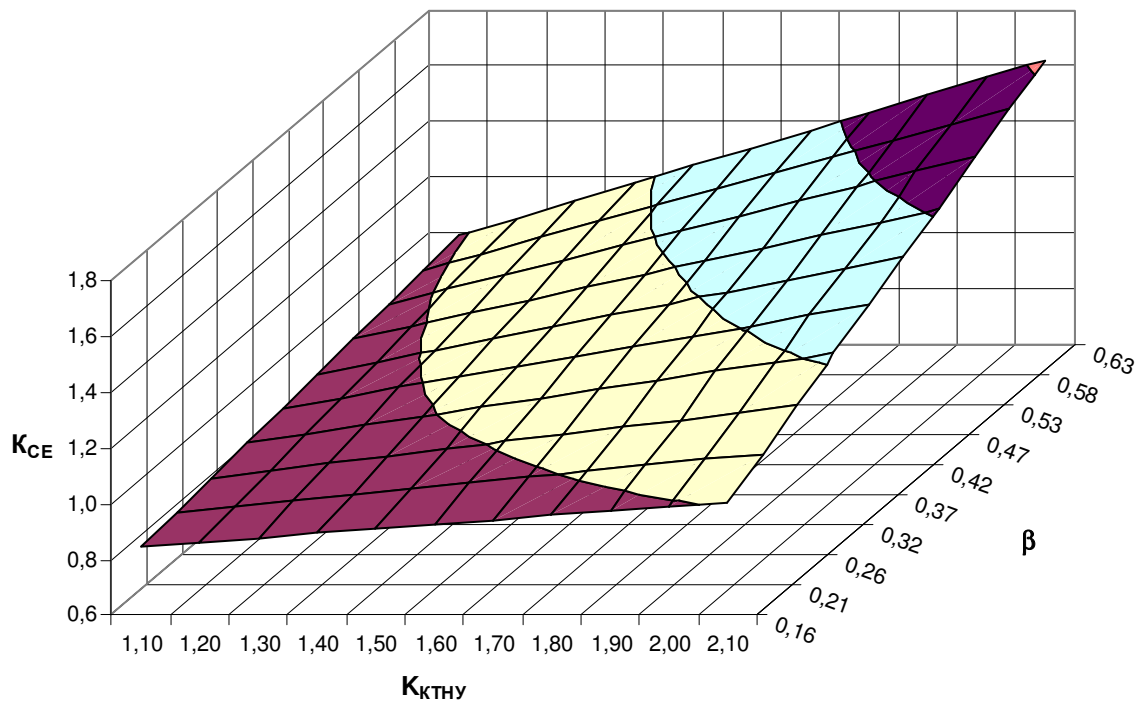


Рис. 5. Значення безрозмірного критерію енергоефективності SE для режимів енергоефективної роботи КТНУ за умов мінімальної ефективності пікового паливного котла

На рис. 6 показані значення безрозмірного критерію енергоефективності SE 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 SE для систем теплопостачання значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності SE становлять  $K_{СЕ} = 0,932 \dots 1,656$  за умови  $\beta = 0,16 \dots 0,63$  та можуть становити  $K_{СЕ} = 2,1$  [11] за умови  $\beta = 1$ .

Як і в попередньому випадку, за умов  $K_{КТНУ} > 1$  та  $K_{СЕ} > \eta_{ПК}$  [11] залежність, показана на рис. 6, визначає область енергоефективної роботи SE з КТНУ та піковим паливним котлом за умов його максимальної ефективності. Ця SE може бути рекомендована як вискоефективна система енергозабезпечення, оскільки її ефективність майже у два рази перевищує енергоефективність вискоефективного паливного котла. Такі SE можуть скласти конкуренцію сучасним вискоефективним електричним і паливним котлам у системах теплопостачання та енергозабезпечення.

У дослідженні [11] визначено, що для SE з КТНУ та ПДТ для значень частки навантаження КТНУ  $\beta < 0,7$  енергоефективність і конкурентоспроможність SE значною мірою визначають вид та ефективність ПДТ за умови енергоефективних режимів роботи КТНУ. Ця умова відповідає оптимальним значенням частки навантаження КТНУ в діапазоні  $\beta = 0,16 \dots 0,63$  для роботи систем теплопостачання, тому вид та ефективність ПДТ за умови енергоефективних режимів роботи КТНУ в SE значною мірою визначатимуть енергоефективність SE для систем теплопостачання.

У дослідженні [11] визначені значення безрозмірного показника енергоефективності ПДТ для SE, які становлять [11]:  $K_{ПДТ}^{ЕС} = 0,302 \dots 0,318$  для електрокотла за умови використання електроенергії з енергосистеми;  $K_{ПДТ}^{ЕК} = 0,223 \dots 0,319$  для електрокотла для SE малих потужностей за умови використання електроенергії від КТНУ;  $K_{ПДТ}^{ПК} = 0,8 \dots 0,9$  для пікового паливного котла у складі SE. На основі аналізу цих показників можна зробити висновок, що вико-



ристання паливного котла як пікового джерела теплоти в СЕ для систем тепlopостачання є значно ефективнішим, ніж використання пікового електрокотла з різними варіантами джерел електроенергії.

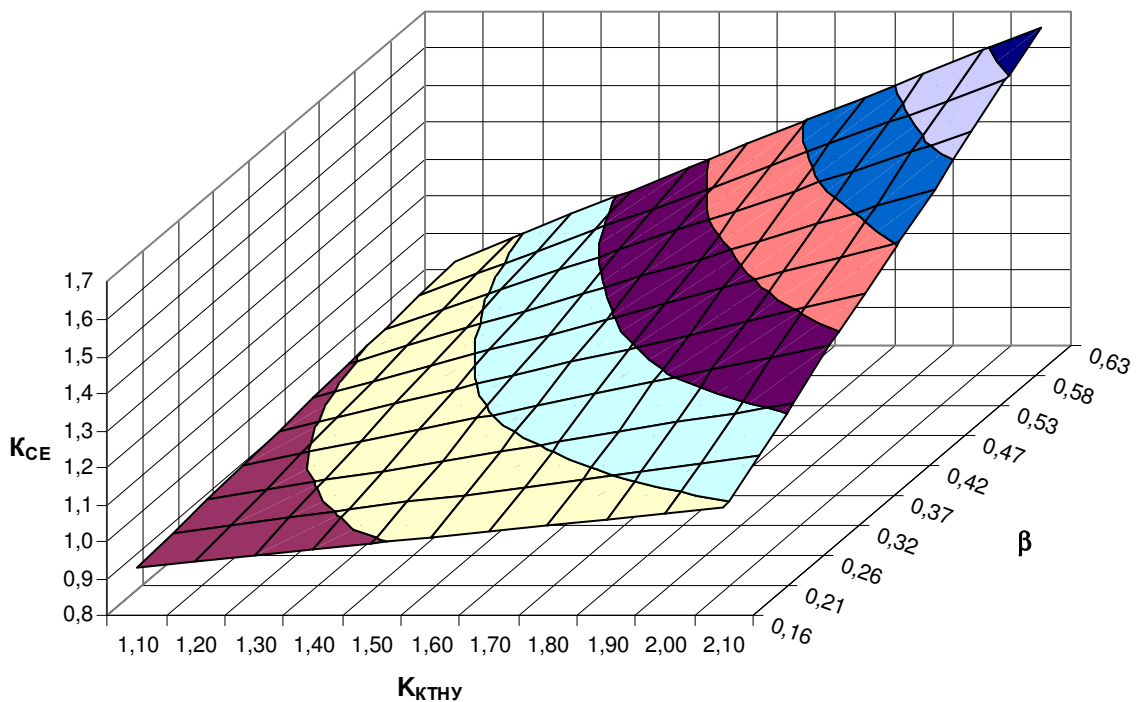


Рис. 6. Значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ для режимів енергоефективної роботи КТНУ за умов максимальної ефективності пікового паливного котла

Як видно з рис. 2, запропоновані в дослідженні СЕ з КТНУ та пікових електрокотлами будуть енергоефективними, якщо частка навантаження КТНУ в СЕ становитиме  $\beta > 0,4$ . У разі виконання цієї умови сучасні вискоефективні електричні та паливні котли будуть поступатися за енергоефективністю зазначеним СЕ.

На основі аналізу результатів досліджень (рис. 1 – 6) визначено, що енергоефективність СЕ з КТНУ та піковими паливними котлами майже у два рази перевищує енергоефективність сучасних вискоефективних електричних та паливних котлів для роботи в системах тепlopостачання.

Визначено, що за умов  $K_{КТНУ} > 1$  та  $K_{СЕ} > \eta_{ПК}$  (або  $K_{СЕ} > \eta_{ЕК}$ ) [11] із запропонованих у цьому дослідженні залежностей (див. рис. 1 – 6) можуть бути визначені області енергоефективної роботи досліджуваних СЕ для систем тепlopостачання. У разі виконання вищевказаних умов досліджувані СЕ з КТНУ та ПДТ можуть бути рекомендовані як вискоефективні системи енергозабезпечення, які можуть скласти конкуренцію сучасним вискоефективним електричним і паливним котлам у системах тепlopостачання та енергозабезпечення.

Запропоновані підходи з оцінювання енергоефективності СЕ з КТНУ і ПДТ дозволяють визначити енергоефективні режими роботи СЕ з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи, джерел приводної енергії для парокомпресійних КТНУ різних рівнів потужності, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

Із метою оцінки енергоефективності різних варіантів СЕ з КТНУ та ПДТ для систем тепlopостачання, окрім вищенаведених підходів, пропонуємо використовувати результати досліджень [1, 5 – 11, 13 – 15].

### Висновки

Розроблено методичні основи та здійснено оцінку енергоефективності систем енергозабезпечення з комбінованими КТНУ та ПДТ за умов оптимальних режимів роботи КТНУ для систем теплопостачання, визначені енергоефективні режими роботи СЕ з КТНУ та ПДТ з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи, джерел приводної енергії для парокompресійних ТНУ різних рівнів потужності, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

Запропонований підхід з оцінювання енергоефективності СЕ з КТНУ та ПДТ для систем теплопостачання має низку переваг:

- урахує змінні режими роботи СЕ для теплопостачання протягом року зі зміною розподілу навантаження між парокompресійними КТНУ та піковим джерелом теплоти в СЕ;
- дозволяє оцінювати комплексний вплив змінних режимів роботи СЕ, пікових джерел теплоти СЕ, джерел приводної енергії парокompресійних КТНУ з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії;
- урахує вплив джерел приводної енергії парокompресійних КТНУ різних рівнів потужності з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії в КТНУ та СЕ;
- урахує 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 енергоефективності СЕ можна здійснити вибір найефективнішого ПДТ для певного виду СЕ під час роботи в системах теплопостачання;
- запропоновані в [11] методичні основи та приведені в цій статті результати досліджень можуть бути використані для оцінювання енергоефективності СЕ на основі парокompресійних КТНУ з різними холодоагентами, джерелами низькотемпературної теплоти та схемними рішеннями;
- дозволяє комплексно оцінювати енергоефективність значної кількості варіантів СЕ з КТНУ та ПДТ для систем теплопостачання.

На основі аналізу результатів досліджень визначено, що за енергоефективних режимів роботи КТНУ та оптимальних значень частки навантаження КТНУ  $\beta = 0,16 \dots 0,63$  в СЕ вид та ефективність ПДТ значною мірою визначають енергоефективність СЕ для систем теплопостачання.

Запропоновані в дослідженні СЕ з КТНУ та піковими електродкотлами будуть енергоефективними, якщо частка навантаження КТНУ в СЕ становитиме  $\beta > 0,4$ . За цієї умови сучасні вискоефективні електричні та паливні котли поступатимуться за енергоефективністю зазначеним СЕ. Визначено, що енергоефективність СЕ з КТНУ та піковими паливними котлами майже у два рази перевищує енергоефективність сучасних вискоефективних електричних і паливних котлів для роботи в системах теплопостачання.

Визначено, що за умов  $K_{КТНУ} > 1$  та  $K_{СЕ} > \eta_{ПК}$  (або  $K_{СЕ} > \eta_{ЕК}$ ) із запропонованих у цьому дослідженні залежностей (див. рис. 1 – 6) можуть бути визначені області енергоефективної роботи досліджуваних СЕ для систем теплопостачання. За цих умов досліджувані СЕ з КТНУ та ПДТ можуть бути рекомендовані як вискоефективні системи енергозабезпечення, які можуть скласти конкуренцію сучасним вискоефективним електричним і паливним котлам у системах теплопостачання та енергозабезпечення.

Запропоновані підходи з оцінювання енергоефективності СЕ з КТНУ і ПДТ дозволяють визначити енергоефективні режими роботи СЕ з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи, джерел приводної енергії для парокompресійних ТНУ різних рівнів потужності, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

З метою оцінки енергоефективності різних варіантів СЕ з КТНУ та ПДТ для систем тепlopостачання, окрім вищенаведених підходів, пропонуємо використовувати результати досліджень [1, 5 – 11, 13 – 15].

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткаченко С. Й. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах тепlopостачання. Монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2009. – 176 с.
2. Баласанян Г. А. Эффективность перспективных интегрированных систем энергозабеспечения на базе установок когенерации малой мощности (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 энергозабеспечения на основе комбинированных когенерационно-теплонасосных 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. Енергетична ефективність систем энергозабеспечения на основе комбинированных когенерационно-теплонасосных установок та пікових джерел теплоти [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко // *Наукові праці ВНТУ*. – 2016. – № 1. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/462/460>.
12. Остапенко О. П. Холодильна техніка та технологія. Теплові насоси : навчальний посібник / О. П. Остапенко. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 123 с.
13. Енергетичний, екологічний та економічний аспекти ефективності теплонасосних станцій на природних та промислових джерелах теплоти [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, О. В. Бакум, А. В. Ющишина // *Наукові праці ВНТУ*. – 2013. – № 3. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/371/369>.
14. Енергетична ефективність теплонасосних станцій з різними джерелами теплоти за умови змінних режимів роботи [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, О. В. Шевченко, О. В. Бакум // *Наукові праці ВНТУ*. – 2013. – № 4. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/381/379>.
15. Енергоекологічна ефективність теплонасосних станцій на природних та промислових джерелах теплоти за умови змінних режимів роботи [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, І. О. Валігура, А. Д. Коваленко. // *Наукові праці ВНТУ*. – 2013. – № 2. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/363/361>.

**Остапенко Ольга Павлівна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики, [ostapenko1208@gmail.com](mailto:ostapenko1208@gmail.com).

Вінницький національний технічний університет.