

О. П. Остапенко, к. т. н., доц.

## ОБЛАСТІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ РОБОТИ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З КОГЕНЕРАЦІЙНО-ТЕПЛОНАСОСНИМИ УСТАНОВКАМИ ТА ПІКОВИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛОТИ

*Запропоновано підхід із визначення областей енергоефективної роботи систем енергозабезпечення (СЕ) з когенераційно-теплонасосними установками (КТНУ) та піковими джерелами теплоти (ПДТ) за умов оптимальних режимів роботи КТНУ 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:** *область енергоефективної роботи, енергоефективність, система енергозабезпечення, когенераційно-теплонасосна установка, пікове джерело теплоти, безрозмірний критерій енергетичної ефективності.*

### Вступ

Результати досліджень із визначення режимів енергоефективної роботи систем енергозабезпечення з когенераційно-теплонасосними установками висвітлені в низці публікацій [1 – 12]. 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 парокомпресійних 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 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] запропоновані наукові основи та здійснено комплексну оцінку енергоефективності 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] здійснена оцінка енергоефективності СЕ на основі комбінованих КТНУ, визначені 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. 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 парокомпресійних ТНУ різних рівнів потужності, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії. У дослідженні [12] розроблено методичні основи та здійснено оцінку енергоефективності систем енергозабезпечення з комбінованими КТНУ та ПДТ за умов оптимальних режимів роботи КТНУ для систем тепlopостачання, 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.

Згідно з [11 – 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, і воно становить  $Q_{КТНУ} = Q_{\kappa} + \Sigma Q_{ум}$ , де  $Q_{\kappa}$  – потужність конденсатора ТНУ,  $\Sigma Q_{ум}$  – потужність утилізаційного обладнання когенераційного приводу ТНУ.

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 (ПК), електрокотла (ЕК), сонячних колекторів тощо),  $K_{КТНУ}$  – безрозмірний критерій енергоефективності комбінованих КТНУ у складі СЕ.

У дослідженнях [5, 10 – 11] запропонований безрозмірний критерій енергоефективності пароконденсійних 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 пароконденсійних 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], має вид:

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

де  $Q_m$  – потужність, витрачена газопоршневим двигуном-генератором (ГПД) для вироблення електричної енергії для приводу 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], який визначають як:  $\varphi^{КТНУ} = (\varphi_m + K_{ГПД}^m) \cdot \eta_{mn}$ , де  $\varphi_m$  – теоретичне значення коефіцієнта перетворення ТНУ без урахування потужності утилізаційного обладнання ГПД;  $K_{ГПД}^m$  – тепловий коефіцієнт ГПД, який дорівнює відношенню теплової утилізаційної потужності ГПД до його електричної потужності;  $\eta_{mn}$  – енергетичний ККД ТНУ, який враховує всі втрати енергії в тепловому насосі з [5 – 6];  $\eta_{mn}$  – 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 приводу 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, одержані на основі дослідження [10] та визначені за безрозмірним критерієм енергоефективності КТНУ  $K_{КТНУ}$  залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення ТНУ  $\varphi_0$  та ефективного ККД ГПД  $\eta_{ЕД}$ . 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 ураху-

ванням 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 «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 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  $\eta_{АПДТ}^c$ .

Із дослідження [11] визначено, що для випадків  $K_{КТНУ} < K_{ПДТ}$  значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ  $K_{СЕ}$  зменшуватиметься зі збільшенням частки навантаження КТНУ  $\beta$ . Для інших випадків значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ  $K_{СЕ}$  зростатиме зі збільшенням частки навантаження ТНУ  $\beta$ . У роботах [11 – 12] зазначено, що комплексний безрозмірний критерій енергоефективності СЕ  $K_{ТНС}$  із формули (1) може бути використаний для вибору найефективнішого пікового джерела теплоти для певного виду СЕ та ефективних режимів роботи СЕ.

Запропоновані в дослідженні [12] СЕ з КТНУ та піковими електрокотлами будуть енергоефективними в системах теплопостачання, якщо частка навантаження КТНУ в СЕ становитиме  $\beta > 0,4$ . За цієї умови сучасні вискоефективні електричні та паливні котли поступатимуться за енергоефективністю зазначеним СЕ. У [12] 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.

У роботах [1 – 12] авторами не визначені області енергоефективної роботи систем енергозабезпечення з комбінованими КТНУ та ПДТ за умов оптимальних режимів роботи 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.

**Метою дослідження** є визначення областей енергоефективної роботи систем енергозабезпечення з комбінованими КТНУ та ПДТ 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

У дослідженні здійснено оцінку енергоефективних режимів роботи систем енергозабезпечення з комбінованими когенераційно-теплонасосними установками та піковими джерелами теплоти. Досліджена енергоефективність систем енергозабезпечення з парокompресійними ТНУ малої (до 1 МВт) та великої потужностей із когенераційним приводом від газопоршневого двигуна-генератора. Піковими джерелами теплоти в СЕ були передбачені електричні та паливні котли (паливні котельні для СЕ великих потужностей). 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, 13].

У нашому дослідженні проаналізовано енергетичну ефективність системи «Джерело приводної енергії КТНУ – СЕ з КТНУ та ПДТ – споживач теплоти від СЕ» на прикладі СЕ з парокompресійними КТНУ та ПДТ. Перевагою цього підходу є врахування втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії в КТНУ та ПДТ з метою визначення енергоефективних режимів роботи СЕ. Методичні основи з оцінювання енергоефективності СЕ з КТНУ та ПДТ викладено в дослідженні [11].

За умов  $K_{КТНУ} > 1$  та  $K_{СЕ} > \eta_{ПК}$  (або  $K_{СЕ} > \eta_{ЕК}$ ) [11] із запропонованих у дослідженнях [11 – 12] залежностей можуть бути визначені області енергоефективної роботи СЕ з КТНУ та ПДТ. У разі виконання вищевказаних умов досліджувані СЕ з КТНУ та ПДТ можуть бути рекомендовані як високоефективні системи енергозабезпечення, які можуть скласти конкуренцію сучасним високоефективним електричним і паливним котлам у системах теплопостачання та енергозабезпечення.

У нашому дослідженні області енергоефективної роботи СЕ з комбінованими КТНУ та ПДТ визначені за умов оптимальних режимів роботи КТНУ на основі досліджень [10 – 11].

Запропонований підхід із визначення областей енергоефективної роботи СЕ з КТНУ та ПДТ має низку переваг:

- урахує змінні режими роботи СЕ 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;
- запропоновані в [11] методичні основи та приведені в цій статті результати досліджень можуть бути використані для визначення областей енергоефективної роботи СЕ на основі парокompресійних КТНУ з різними холодоагентами, джерелами низькотемпературної теплоти та схемними рішеннями;
- дозволяє визначити області та режими енергоефективної роботи СЕ з КТНУ та ПДТ, за яких енергоефективність досліджуваних СЕ майже у два рази перевищує енергоефективність сучасних високоефективних електричних і паливних котлів;
- дозволяє комплексно оцінювати енергоефективність значної кількості варіантів СЕ з КТНУ та ПДТ;

— дозволяє розробити рекомендації з енергоефективної експлуатації СЕ з КТНУ та ПДТ з різними схемними рішеннями.

Застосування запропонованих підходів із визначення областей енергоефективної роботи СЕ з КТНУ та ПДТ продемонструємо на конкретних прикладах.

На рис. 1 – 7 показані результати досліджень із визначення областей енергоефективної роботи СЕ з КТНУ та ПДТ для режимів енергоефективної роботи КТНУ на основі результатів досліджень [10 – 11]. Тут показані значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ з КТНУ та ПДТ для випадків змінного навантаження КТНУ у складі СЕ за умови зміни частки навантаження КТНУ в діапазоні  $\beta = 0,1 \dots 1,0$ . Дослідження проведено для режимів енергоефективної роботи КТНУ з  $K_{КТНУ} = 1,1 \dots 2,1$  (за умов максимальної ефективності ГПД) та з  $K_{КТНУ} = 1,1 \dots 1,6$  (за умов мінімальної ефективності ГПД) на основі результатів досліджень [10 – 11]. Указані значення критеріїв енергоефективності КТНУ  $K_{КТНУ}$  відповідають значенням дійсного коефіцієнта перетворення КТНУ в межах  $\varphi_d = 3,0 \dots 5,4$  для КТНУ малих потужностей та  $\varphi_d = 2,7 \dots 5,4$  для КТНУ великих потужностей, згідно з [11].

На рис. 1 показана область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності та ПДТ за умови споживання електроенергії піковим джерелом теплоти (електричним котлом) з енергосистеми України. У цьому дослідженні, згідно з [5], ураховані: 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 становить  $K_{ПДТ}^{ЕС} = 0,302 \dots 0,318$ .

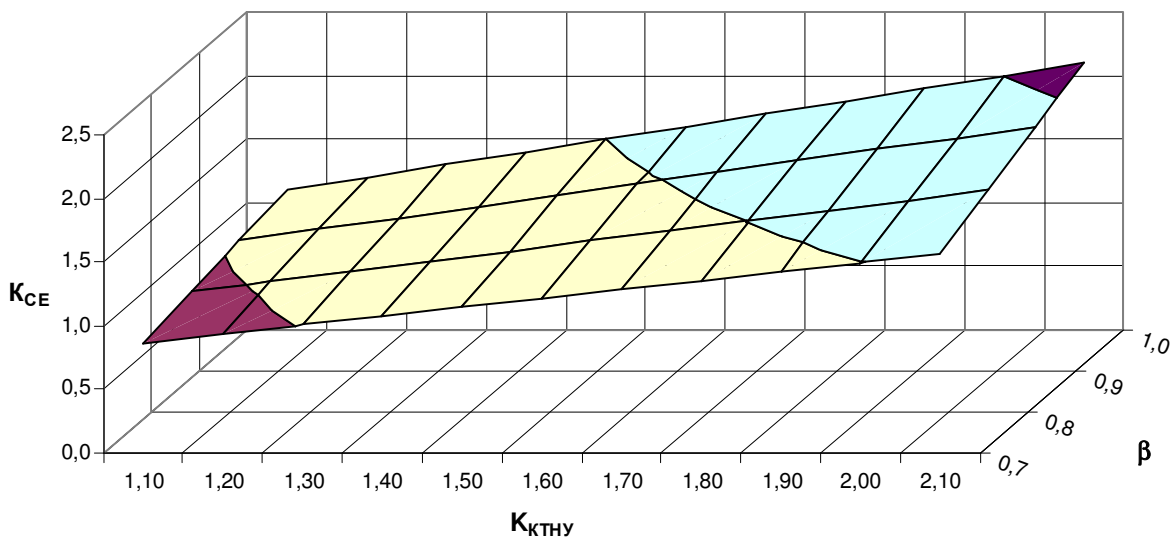


Рис. 1. Область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності за умови споживання електроенергії піковим електричним котлом з енергосистеми України

Як видно з рис. 1, значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять  $K_{СЕ} = 0,87 \dots 1,1$  за умови мінімального значення критерію енергоефективності КТНУ  $K_{КТНУ} = 1,1$ ; для режимів роботи СЕ з  $K_{КТНУ} > 1,1$  значення безрозмірного критерію

енергоефективності СЕ змінюються в межах  $K_{CE} = 1,1 \dots 2,1$ .

На рис. 2 показана область енергоефективної роботи 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  $\eta_{ED} = 0,31$  та значення ККД електричного двигуна з урахуванням втрат енергії в блоці управління двигуном  $\eta_{EP} = 0,8$ . Піковим джерелом теплоти в СЕ для цих умов передбачена електрична котельня з  $\eta_{EK} = 0,9$ . Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності електрокотла для випадків споживання електричної енергії від КТНУ становитиме  $K_{ПДТ}^{EK} = 0,223$ .

Як видно з рис. 2, значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять  $K_{CE} = 0,84 \dots 1,1$  за умови мінімального значення критерію енергоефективності КТНУ  $K_{КТНУ} = 1,1$ ; для режимів роботи СЕ з  $K_{КТНУ} > 1,1$  значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ змінюються в межах  $K_{CE} = 0,91 \dots 2,1$ .

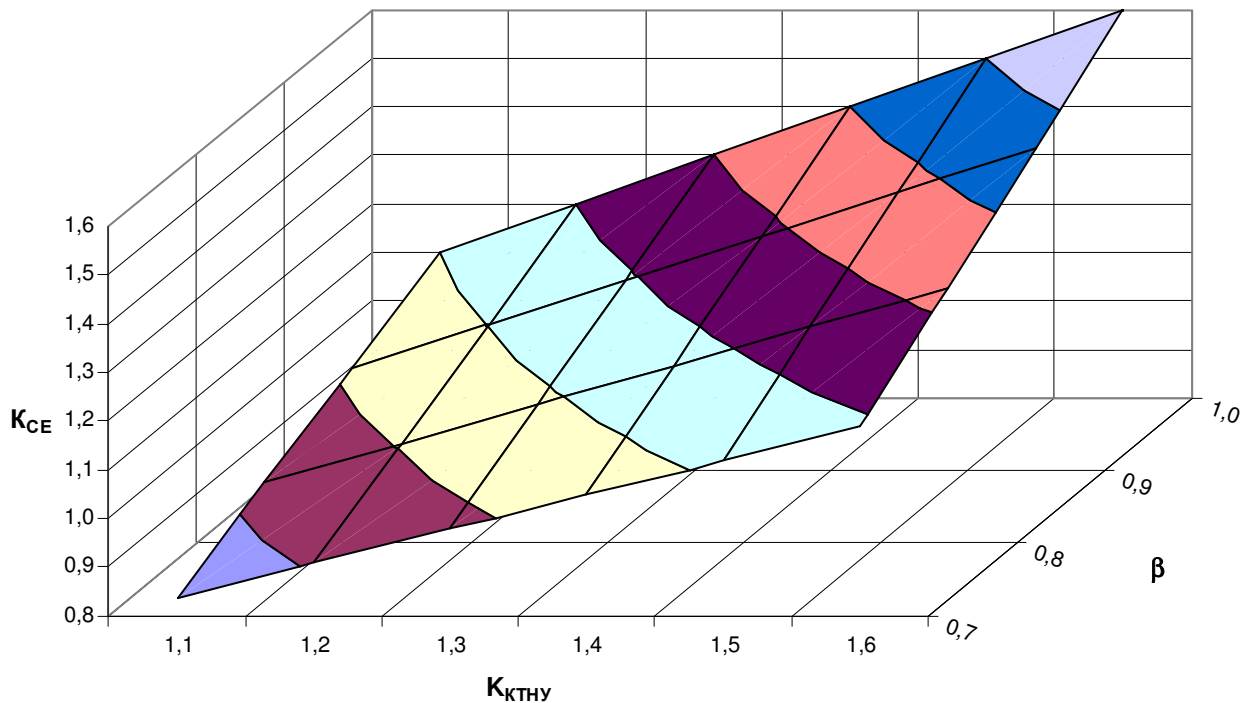


Рис. 2. Область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності за умов мінімальної ефективності ГПД та пікового електрокотла зі споживанням електроенергії котлом від КТНУ

На рис. 3 показана область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності та піковим паливним котлом за умов мінімальної ефективності ГПД та ПДТ. У цьому дослідженні, згідно з [5, 10], враховані: значення ефективного ККД ГПД  $\eta_{ED} = 0,31$  та значення ККД електричного двигуна з урахуванням втрат енергії в блоці управління двигуном  $\eta_{EP} = 0,8$ . Піковим джерелом теплоти в СЕ для цих умов передбачена паливна котельня з  $\eta_{PK} = 0,8$ . Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності паливного котла становитиме  $K_{ПДТ}^{PK} = 0,8$ . Як видно з рис. 3, значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять  $K_{CE} = 0,92 \dots 1,1$  за умови мінімального значення критерію енергоефективності КТНУ  $K_{КТНУ} = 1,1$ ; для режимів роботи СЕ з  $K_{КТНУ} > 1,1$  значення безрозмірного

критерію енергоефективності СЕ змінюються в межах  $K_{CE} = 0,96 \dots 1,6$ .

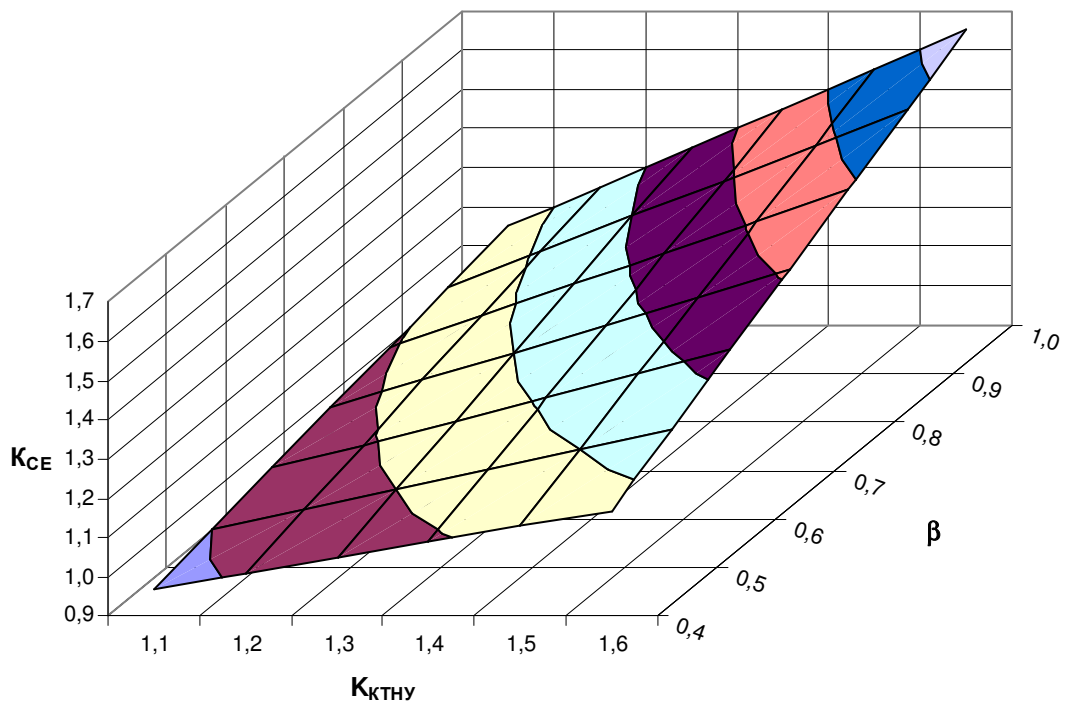


Рис. 3. Область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності за умов мінімальної ефективності ГПД та пікового паливного котла

На рис. 4 показана область енергоефективної роботи 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], враховані: 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 джерелом теплоти в СЕ для цих умов передбачена електрична котельня з  $\eta_{EK} = 0,95$ . Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності електродвигуна для випадків споживання електричної енергії від КТНУ становитиме  $K_{ПДТ}^{EK} = 0,319$ . Як видно з рис. 4, значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять  $K_{CE} = 0,87 \dots 1,1$  за умови мінімального значення критерію енергоефективності КТНУ  $K_{КТНУ} = 1,1$ ; для режимів роботи СЕ з  $K_{КТНУ} > 1,1$  значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ змінюються в межах  $K_{CE} = 0,94 \dots 2,1$ .

На рис. 5 показана область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності та піковим паливним котлом за умов максимальної ефективності ГПД та ПДТ. У цьому дослідженні, згідно з [5, 10], враховані: 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 джерелом теплоти в СЕ для цих умов передбачена паливна котельня з  $\eta_{ПК} = 0,9$ . Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності паливного котла становитиме  $K_{ПДТ}^{ПК} = 0,9$ . Як видно з рис. 5, значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять  $K_{CE} = 0,96 \dots 1,1$  за умови мінімального значення критерію енергоефективності КТНУ  $K_{КТНУ} = 1,1$ ; для режимів роботи СЕ з  $K_{КТНУ} > 1,1$  значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ змінюються в межах  $K_{CE} = 0,99 \dots 2,1$ .

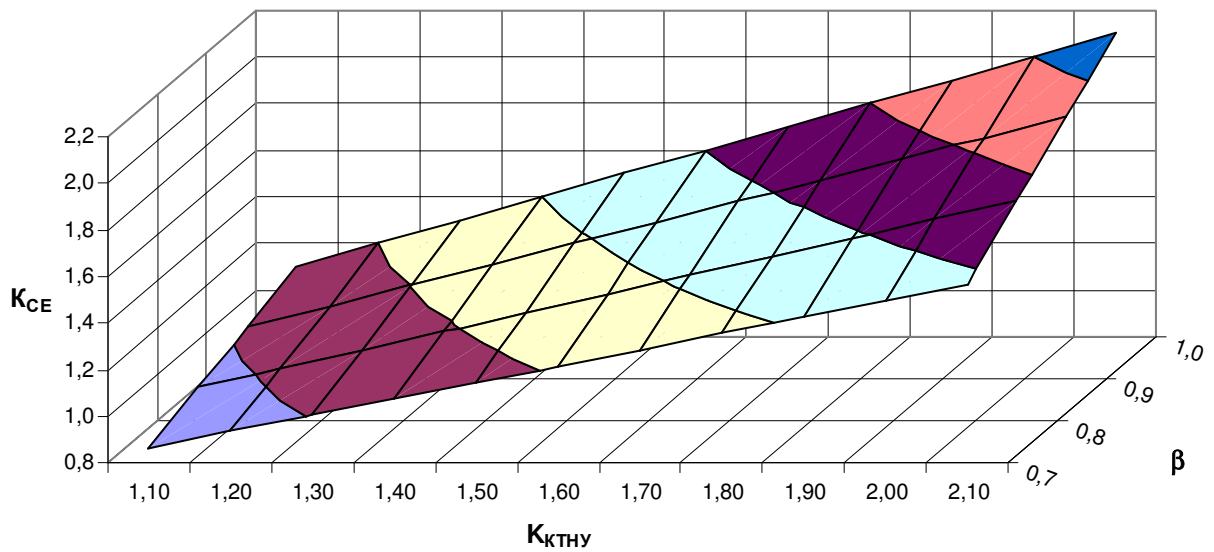


Рис. 4. Область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності за умов максимальної ефективності ГПД і ПДТ та споживанням електроенергії електродкотлом від КТНУ

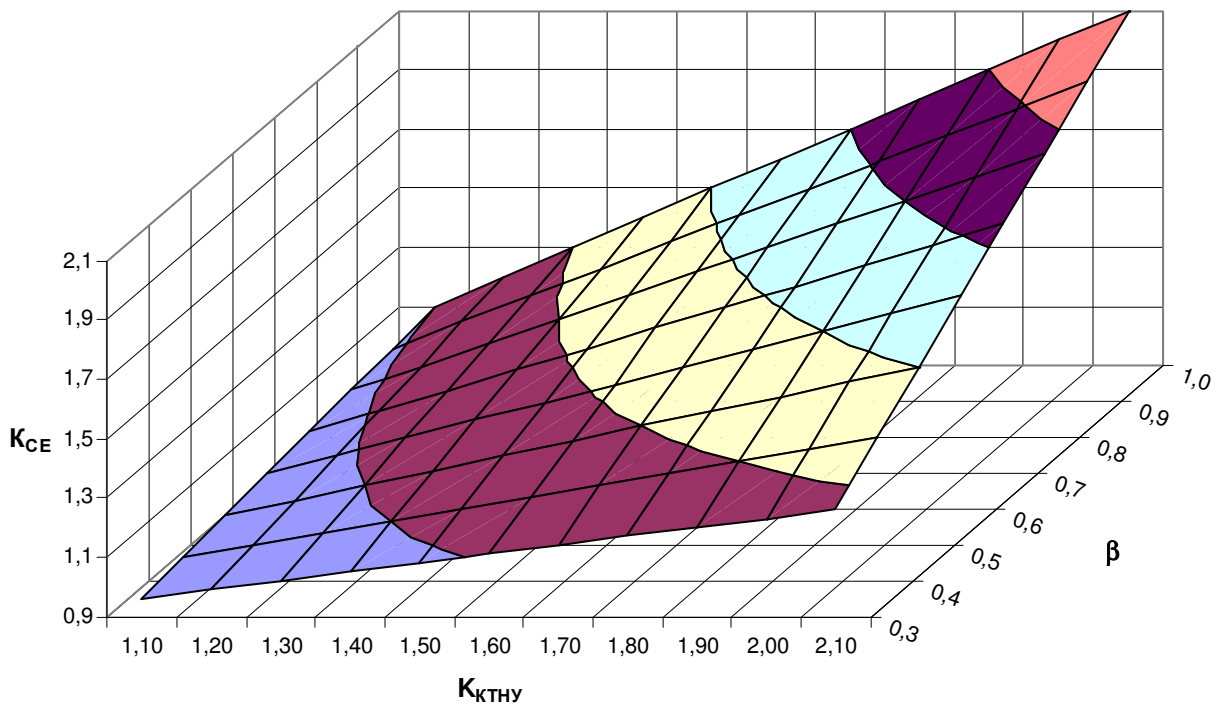


Рис. 5. Область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності за умов максимальної ефективності ГПД та пікового паливного котла

На рис. 6 показана область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ великої потужності та піковою паливною котельнею за умов мінімальної ефективності ГПД та ПДТ. У цьому дослідженні, згідно з [5, 10], враховані: значення ефективного ККД ГПД  $\eta_{ED} = 0,31$  та значення ККД електричного двигуна з урахуванням втрат енергії в блоці управління двигуном  $\eta_{EP} = 0,9$ . Піковим джерелом теплоти в СЕ для цих умов передбачена паливна котельня з  $\eta_{ПК} = 0,8$ .



Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності паливного котла становитиме  $K_{ПДТ}^{ПК} = \eta_{ПК} = 0,8$ . Як видно з рис. 6, значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять  $K_{СЕ} = 0,92 \dots 1,1$  за умов мінімального значення критерію енергоефективності КТНУ  $K_{КТНУ} = 1,1$ ; для режимів роботи СЕ з  $K_{КТНУ} > 1,1$  значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ змінюються в межах  $K_{СЕ} = 0,96 \dots 1,6$ .

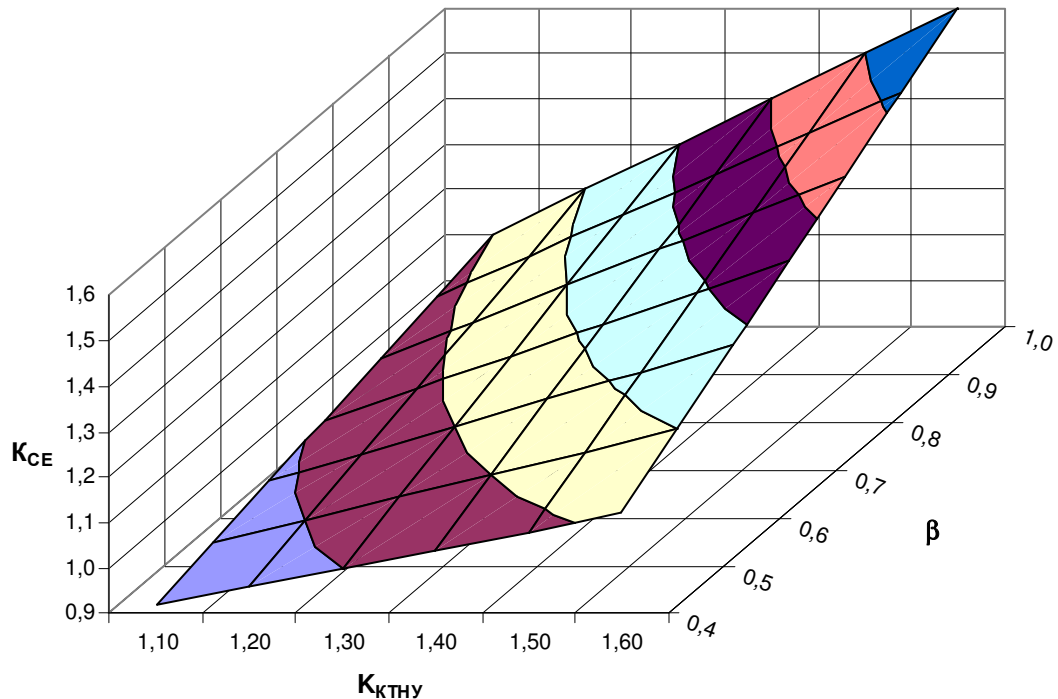


Рис. 6. Область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ великої потужності за умов мінімальної ефективності ГПД та пікового паливного котла

На рис. 7 показана область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ великої потужності та піковим паливним котлом за умов максимальної ефективності ГПД та ПДТ. У цьому дослідженні, згідно з [5, 10], враховані: значення ефективного ККД ГПД  $\eta_{ЕД} = 0,42$  та значення ККД електричного двигуна з урахуванням втрат енергії в блоці управління двигуном  $\eta_{ЕП} = 0,9$ . Піковим джерелом теплоти в СЕ для цих умов передбачена паливна котельня з  $\eta_{ПК} = 0,9$ . Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності паливного котла становитиме  $K_{ПДТ}^{ПК} = 0,9$ . Як видно з рис. 7, значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять  $K_{СЕ} = 0,98 \dots 1,1$  за умов мінімального значення критерію енергоефективності КТНУ  $K_{КТНУ} = 1,1$ ; для режимів роботи СЕ з  $K_{КТНУ} > 1,1$  значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ змінюються в межах  $K_{СЕ} = 1,02 \dots 2,1$ .

Слід зазначити, що залежності, показані на рис. 1 – 7, одержані для режимів енергоефективної роботи КТНУ на основі результатів досліджень [10 – 11].

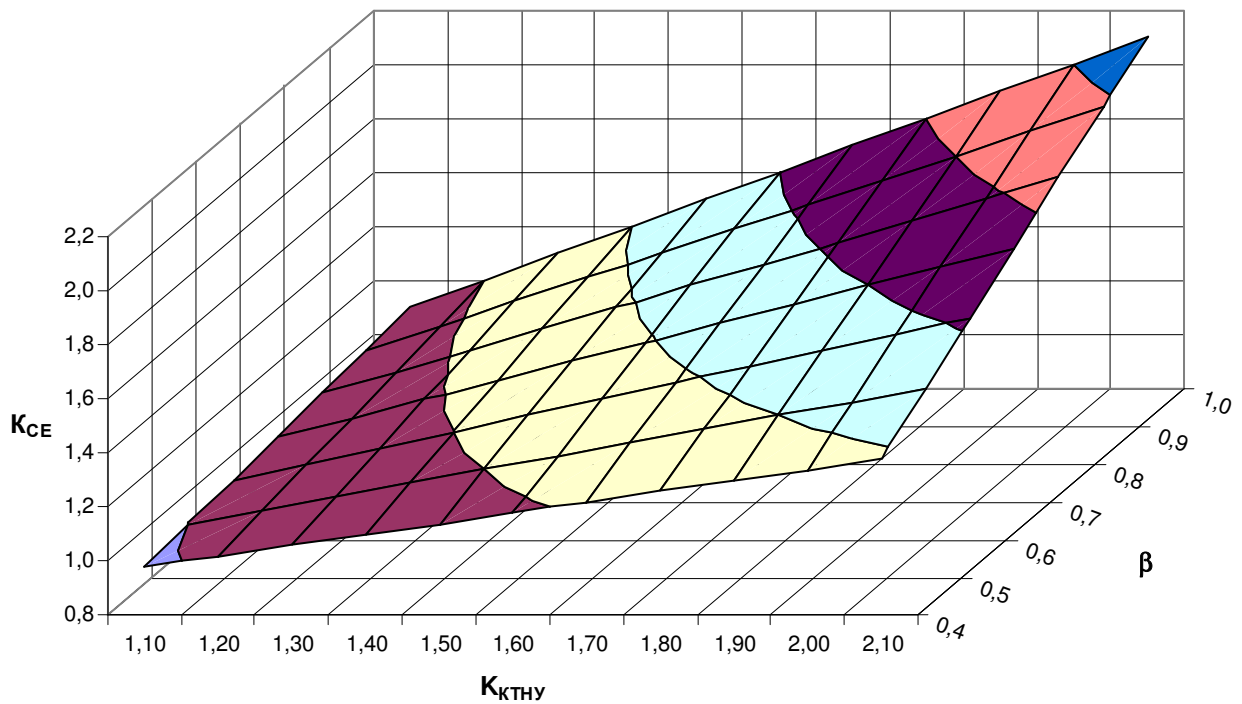


Рис. 7. Область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ великої потужності за умов максимальної ефективності ГПД та пікового паливного котла

Як видно з рис. 3 та 6, за умов  $K_{КТНУ} > 1$  та  $K_{СЕ} > \eta_{ПК}$  [11] залежності, показані на рис. 3 та 6, визначають області енергоефективної роботи СЕ з КТНУ різних рівнів потужності та піковим паливним котлом (котельнею) за умов мінімальної ефективності ГПД та паливного котла (котельні). За цих умов зазначені СЕ можуть бути рекомендовані як вискоефективні системи енергозабезпечення, оскільки їхня ефективність майже у два рази перевищує енергоефективність вискоефективних електричних і паливних котлів. Такі СЕ можуть скласти конкуренцію сучасним вискоефективним електричним і паливним котлам у системах тепlopостачання та енергозабезпечення.

Як видно з рис. 5 та 7, за умов  $K_{КТНУ} > 1$  та  $K_{СЕ} > \eta_{ПК}$  [11] залежності, показані на рис. 5 та 7, визначають області енергоефективної роботи СЕ з КТНУ різних рівнів потужності та піковим паливним котлом (котельнею) за умов максимальної ефективності ГПД та паливного котла (котельні). За цих умов вказані СЕ можуть бути рекомендовані як вискоефективні системи енергозабезпечення, оскільки їхня ефективність більш, ніж у два рази перевищує енергоефективність вискоефективних електричних і паливних котлів. Досліджені СЕ можуть скласти конкуренцію сучасним вискоефективним електричним і паливним котлам у системах тепlopостачання та енергозабезпечення.

Визначено, що запропоновані в дослідженні СЕ з КТНУ та піковими паливними котлами будуть енергоефективними, якщо частка навантаження КТНУ в СЕ становитиме  $\beta > 0,4$ ; що відповідає результатам досліджень, показаним на рис. 3, 5 – 7. Саме за цієї умови визначені області енергоефективної роботи зазначених СЕ. У разі виконання цієї умови сучасні вискоефективні електричні та паливні котли поступатимуться за енергоефективністю вказаним СЕ.

Як видно з рис. 1 – 2 та 4, за умов  $K_{КТНУ} > 1$  та  $K_{СЕ} > \eta_{ЕК}$  [11] залежності, показані на рис. 1 – 2 та 4, визначають області енергоефективної роботи СЕ з КТНУ та піковим електричним котлом, з різними варіантами джерел електричної енергії для пікового електродкотла та за умов різної енергоефективності ГПД та електродкотла. Визначено, що запропоновані в дос-

лідженні СЕ з КТНУ та піковими електрокотлами будуть енергоефективними, якщо частка навантаження КТНУ в СЕ становитиме  $\beta > 0,7$ ; що відповідає результатам досліджень, показаним на рис. 1 – 2 та 4. За цих умов зазначені СЕ можуть бути рекомендовані як високоефективні системи енергозабезпечення, оскільки навіть за мінімальної ефективності ГПД і котла, енергоефективність системи енергозабезпечення майже у два рази перевищує енергоефективність високоефективних електричних та паливних котлів. За умови режимів роботи СЕ з  $\beta > 0,7$  сучасні високоефективні електричні та паливні котли поступатимуться за енергоефективністю вказаним СЕ. Зазначені СЕ можуть скласти конкуренцію сучасним високоефективним електричним і паливним котлам у системах теплопостачання та енергозабезпечення.

Запропоновані підходи із визначення областей енергоефективної роботи СЕ з КТНУ і ПДТ дозволяють визначити енергоефективні області та режими роботи вказаних СЕ з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи, джерел приводної енергії для парокompресійних КТНУ різних рівнів потужності, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

### Висновки

Розроблено методичні основи та визначено області енергоефективної роботи СЕ з КТНУ і ПДТ за умов оптимальних режимів роботи КТНУ; 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 із визначення областей енергоефективної роботи СЕ з КТНУ та ПДТ має низку переваг:

- урахує змінні режими роботи СЕ 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;
- запропоновані в [11] методичні основи та приведені в цій статті результати досліджень можуть бути використані для визначення областей енергоефективної роботи СЕ на основі парокompресійних КТНУ з різними холодоагентами, джерелами низькотемпературної теплоти та схемними рішеннями;
- дозволяє визначити області та режими енергоефективної роботи СЕ з КТНУ та ПДТ, за яких енергоефективність досліджуваних СЕ майже у два рази перевищує енергоефективність сучасних високоефективних електричних і паливних котлів;
- дозволяє комплексно оцінювати енергоефективність значної кількості варіантів СЕ з КТНУ та ПДТ;
- дозволяє розробити рекомендації з енергоефективної експлуатації СЕ з КТНУ та ПДТ з різними схемними рішеннями.

За умов  $K_{КТНУ} > 1$  та  $K_{СЕ} > \eta_{ПК}$  та режимів енергоефективної роботи КТНУ в дослідженні визначено області енергоефективної роботи та енергоефективні режими роботи СЕ з КТНУ та піковими паливними котлами для різних рівнів потужності та енергоефективності елементів.

тів СЕ. Визначено, що запропоновані в дослідженні СЕ з КТНУ та піковими паливними котлами будуть енергоефективними, якщо частка навантаження КТНУ в СЕ становитиме  $\beta > 0,4$ . У разі виконання цієї умови сучасні вискоефективні електричні та паливні котли поступатимуться за енергоефективністю вказаним СЕ. За цих умов зазначені СЕ можуть бути рекомендовані як вискоефективні системи енергозабезпечення, оскільки їхня ефективність більша, ніж у два рази перевищує енергоефективність вискоефективних електричних і паливних котлів.

За умов  $K_{КТНУ} > 1$  та  $K_{СЕ} > \eta_{ЕК}$  та режимів енергоефективної роботи КТНУ в дослідженні визначено області енергоефективної роботи та енергоефективні режими роботи СЕ з КТНУ та піковими електродкотлами, з різними варіантами джерел електричної енергії для пікового електродкотла, для різних рівнів енергоефективності елементів СЕ. Визначено, що запропоновані в дослідженні СЕ з КТНУ та піковими електродкотлами будуть енергоефективними, якщо частка навантаження КТНУ в СЕ становитиме  $\beta > 0,7$ . За цих умов зазначені СЕ можуть бути рекомендовані як вискоефективні системи енергозабезпечення, оскільки навіть за мінімальної ефективності ГПД і котла, енергоефективність системи енергозабезпечення майже у два рази перевищує енергоефективність вискоефективних електричних і паливних котлів.

Запропоновані підходи із визначення областей енергоефективної роботи СЕ з КТНУ і ПДТ дозволяють визначити енергоефективні режими роботи та розробити рекомендації з енергоефективної експлуатації СЕ з різними схемними рішеннями, 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.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткаченко С. Й. Парокompресійні теплонасосні установки в системах тепlopостачання. 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 парокompресійних 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 парокompресійних 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 парокompресійних 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 парокompресійних 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.: Наукові праці ВНТУ, 2016, № 3

<http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/454/452>.

11. Енергетична ефективність систем енергозабезпечення на основі комбінованих когенераційно-теплонасосних 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. Енергоефективність систем енергозабезпечення з когенераційно-теплонасосними установками та піковими джерелами теплоти в системах теплопостачання [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко // Наукові праці ВНТУ. – 2016. – № 2. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/472/470>.

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

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

Вінницький національний технічний університет.