

О. П. Остапенко, к. т. н., доц.

ОБЛАСТІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ РОБОТИ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З КОГЕНЕРАЦІЙНО-ТЕПЛОАСОСНИМИ УСТАНОВКАМИ ТА ПІКОВИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛОТИ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Запропоновано підхід із визначення областей енергоефективної роботи систем енергозабезпечення (СЕ) з когенераційно-теплоасосними 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 парокомпресійних теплоасосних 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-теплоасосна установка, пікове джерело теплоти, система теплопостачання, безрозмірний критерій енергетичної ефективності.*

Вступ

Дослідження режимів енергоефективної роботи систем енергозабезпечення з когенераційно-теплоасосними установками проведено в низці публікацій [1 – 13]. В дослідженнях [8 – 9] на основі розроблених наукових основ здійснено комплексну оцінку енергоефективності парокомпресійних теплоасосних станцій (ТНС) із 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. Енергоефективність СЕ на основі комбінованих КТНУ досліджено та оцінено в роботі [10], 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. Дослідження та оцінку енергоефективності СЕ на основі комбінованих КТНУ та ПДТ проведено в роботі [11], визначено 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] на основі розроблених методичних основ здійснено оцінку енергоефективності систем енергозабезпечення з комбінованими КТНУ та ПДТ за умов оптимальних режимів роботи КТНУ для систем теплопостачання, визначено 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. У дослідженні [13] розроблено методичні основи та визначено області енергоефективної роботи СЕ з КТНУ і ПДТ за умов оптимальних режимів роботи КТНУ; визначено 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 – 13], 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 характе-

ризується часткою навантаження КТНУ у складі СЕ β , яку визначають як відношення теплової потужності КТНУ до теплової потужності СЕ $\beta = Q_{КТНУ}/Q_{СЕ}$. Оптимальні значення показника β для СЕ з різними джерелами теплоти для КТНУ за змінних режимів роботи теплової мережі були визначені на основі аналізу результатів проведених досліджень [14 – 16].

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 парокompресійних 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 парокompресійних 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 привода ТНУ, $\eta_{ЕД}$ – 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 φ_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; η_{mn} – енергетичний ККД ТНУ, який враховує всі втрати енергії в теплового насосі з [5 – 6]; η_{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 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 φ_d 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 урахуванням впливу джерел енергії для пікового електрокотла та з урахуванням втрат енергії під час генерування та постачання електричної енергії до електрокотла. У дослідженні [11] здійснено оцінку енергоефективності пікового електрокотла в СЕ у разі використання електрое-

енергії від КТНУ та для випадків споживання електричної енергії з енергосистеми на основі традиційних або альтернативних джерел електричної енергії на основі 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 β . Для інших випадків значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ $K_{СЕ}$ зростатиме зі збільшенням частки навантаження КТНУ β . У роботах [11 – 12] зазначено, 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.

Детальніше методичні основи з оцінювання енергоефективності СЕ з КТНУ та ПДТ викладено в дослідженні [11].

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 роботі [13] 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 їх ефективність більш, ніж удвічі перевищує енергоефективність вискоефективних електричних і паливних котлів. Визначено, що запропоновані в дослідженні [13] СЕ з КТНУ та піковими електрокотлами 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 вдвічі перевищує енергоефективність вискоефективних електричних і паливних котлів.

У роботах [1 – 13] авторами не визначені області енергоефективної роботи систем енерго-

забезпечення з комбінованими КТНУ та ПДТ у системах теплопостачання за умов оптимальних режимів роботи КТНУ 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.

Метою дослідження є визначення областей енергоефективної роботи систем енергозабезпечення з комбінованими КТНУ та ПДТ у системах 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 парокompресійних 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 під час роботи в системах теплопостачання. Досліджували енергоефективність систем енергозабезпечення з парокompресійними ТНУ малої (до 1 МВт) та великої потужностей з 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, 17]. Методичні основи з оцінювання енергоефективності СЕ з КТНУ та ПДТ для систем теплопостачання викладено в дослідженні [11].

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 для систем теплопостачання. 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 для теплопостачання.

У дослідженні [11] визначено, що для СЕ з КТНУ та ПДТ для значень частки навантаження КТНУ $\beta < 0,7$ енергоефективність і конкурентоспроможність СЕ 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 СЕ значною мірою будуть визначати енергоефективність СЕ для систем теплопостачання.

У дослідженні [11] визначені значення безрозмірного показника енергоефективності ПДТ для СЕ, які становлять [11]: $K_{ПДТ}^{EC} = 0,302 \dots 0,318$ для електродкотла за умови використання електроенергії з енергосистеми; $K_{ПДТ}^{EK} = 0,223 \dots 0,319$ для електродкотла для СЕ малих потужностей за умови використання електроенергії від КТНУ; $K_{ПДТ}^{PK} = 0,8 \dots 0,9$ для пікового паливного котла у складі СЕ. На основі аналізу цих показників можна зробити висновок, що використання паливного котла як пікового джерела теплоти в СЕ для систем теплопостачання є значно ефективнішим, ніж використання пікового електродкотла з різними варіантами джерел електроенергії.

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 вискоефективні системи енергозабезпечення, які можуть скласти конку-

ренцію сучасним високоефективним електричним і паливним котлам у системах теплопостачання та енергозабезпечення.

Для режимів енергоефективної роботи КТНУ в СЕ та за умов $K_{КТНУ} > 1$ та $K_{СЕ} > \eta_{ПК}$ (або $K_{СЕ} > \eta_{ЕК}$) [11] у нашому дослідженні визначено області енергоефективної роботи та енергоефективні режими роботи СЕ з КТНУ та піковими електричними і паливними котлами в системах теплопостачання для різних рівнів потужності та енергоефективності елементів СЕ. Области енергоефективної роботи СЕ з комбінованими КТНУ та ПДТ для систем теплопостачання в нашому дослідженні визначені за умов оптимальних режимів роботи КТНУ на основі досліджень [10 – 13].

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

- враховує 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 визначення областей енергоефективної роботи СЕ на основі парокompресійних КТНУ з різними холодоагентами, джерелами низькотемпературної теплоти та схемними рішеннями в системах теплопостачання;

- дозволяє визначити області та режими енергоефективної роботи СЕ з КТНУ та ПДТ для теплопостачання, за яких енергоефективність досліджуваних СЕ майже вдвічі перевищує енергоефективність сучасних високоефективних електричних і паливних котлів;

- дозволяє комплексно оцінювати енергоефективність значної кількості варіантів СЕ з КТНУ та ПДТ для систем теплопостачання;

- дозволяє розробити рекомендації з енергоефективної експлуатації СЕ з КТНУ та ПДТ з різними схемними рішеннями для систем теплопостачання.

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

На рис. 1 – 8 показані результати досліджень із визначення областей енергоефективної роботи СЕ з КТНУ та ПДТ у системах теплопостачання для випадків змінного навантаження КТНУ у складі СЕ та оптимальних значень частки навантаження КТНУ β для режимів енергоефективної роботи КТНУ на основі результатів досліджень [10 – 13]. Досліджено значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ з КТНУ та ПДТ для випадків сезонного змінного навантаження КТНУ у складі СЕ, для оптимальних значень частки навантаження КТНУ в діапазоні $\beta = 0,16 \dots 0,63$ [14 – 16], що відповідає температурним режимам роботи системи теплопостачання. 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 коефіціє-

ента перетворення КТНУ в межах $\varphi_{\partial} = 3,0 \dots 5,4$ для КТНУ малих потужностей та $\varphi_{\partial} = 2,7 \dots 5,4$ для КТНУ великих потужностей, згідно з [11].

На рис. 1 показана область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності та ПДТ для теплопостачання 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 $K_{ПДТ}^{ЕС} = 0,302 \dots 0,318$. Для досліджених режимів роботи СЕ для систем теплопостачання значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять $K_{СЕ} = 0,87 \dots 1,441$ за умови $\beta = 0,47 \dots 0,63$ та можуть становити $K_{СЕ} = 2,1$ [11] за умови $\beta = 1$.

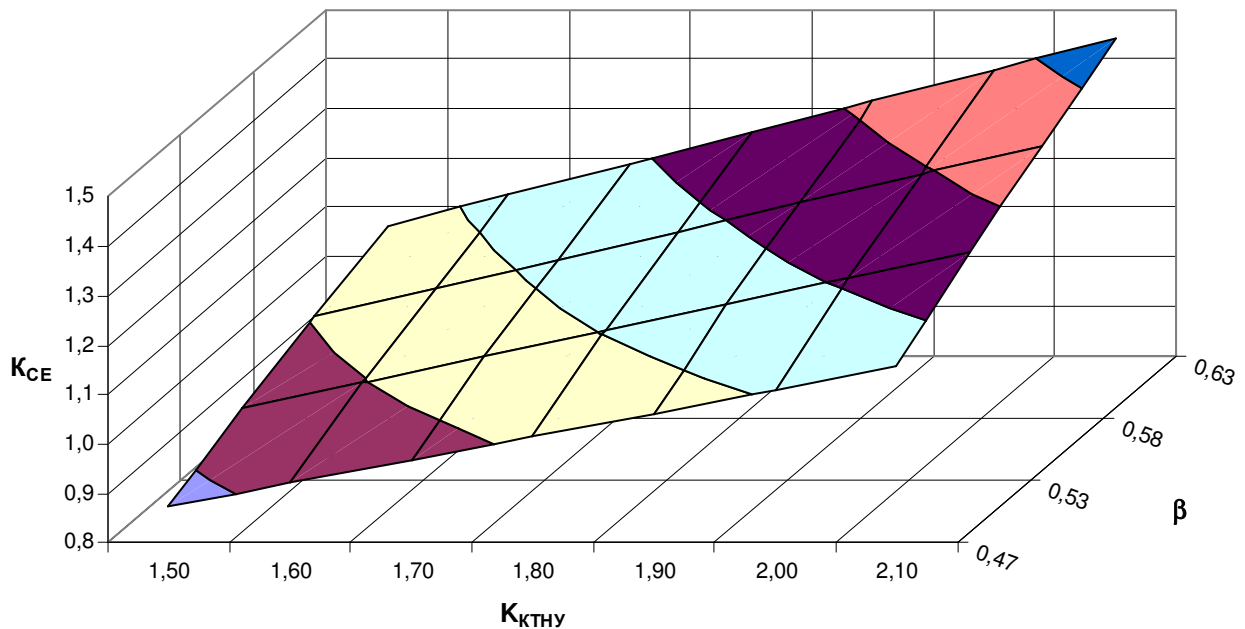


Рис. 1. Область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності для теплопостачання за умови споживання електроенергії піковим електричним котлом з енергосистеми України

Як видно з рис. 1, значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять $K_{СЕ} = 0,87 \dots 1,06$ за умови мінімального значення критерію енергоефективності КТНУ $K_{КТНУ} = 1,5$; для режимів роботи СЕ з $K_{КТНУ} > 1,5$ значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ змінюються в межах $K_{СЕ} = 0,92 \dots 1,441$. Енергоефективні режими роботи цих СЕ забезпечуються за умов енергоефективних режимів роботи КТНУ зі значеннями показника енергоефективності $K_{КТНУ} = 1,5 \dots 2,1$.

За умов $K_{КТНУ} > 1$ та $K_{СЕ} > 1$ запропоновані в цьому дослідженні залежності визначають області вискоелективної роботи досліджуваних СЕ для теплопостачання. На рис. 2 показана область вискоелективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності за умови споживання електроенергії піковим електричним котлом з енергосистеми України під час роботи в системах теплопостачання.

Як видно з рис. 2, значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять $K_{CE} = 1,02 \dots 1,25$ за умови мінімального значення критерію енергоефективності КТНУ $K_{КТНУ} = 1,8$; для режимів роботи СЕ з $K_{КТНУ} > 1,8$ значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ змінюються в межах $K_{CE} = 1,06 \dots 1,44$. Високоєфективні режими роботи цих СЕ забезпечуються за умов енергоефективних режимів роботи КТНУ зі значеннями показника енергоефективності $K_{КТНУ} = 1,8 \dots 2,1$. Досліджувані СЕ з КТНУ та ПДТ можуть бути рекомендовані як високоєфективні системи енергозабезпечення, які можуть скласти конкуренцію сучасним високоєфективним електричним і паливним котлам у системах тепlopостачання та енергозабезпечення, оскільки їх енергоефективність майже вдвічі перевищує енергоефективність сучасних високоєфективних електричних та паливних котлів.

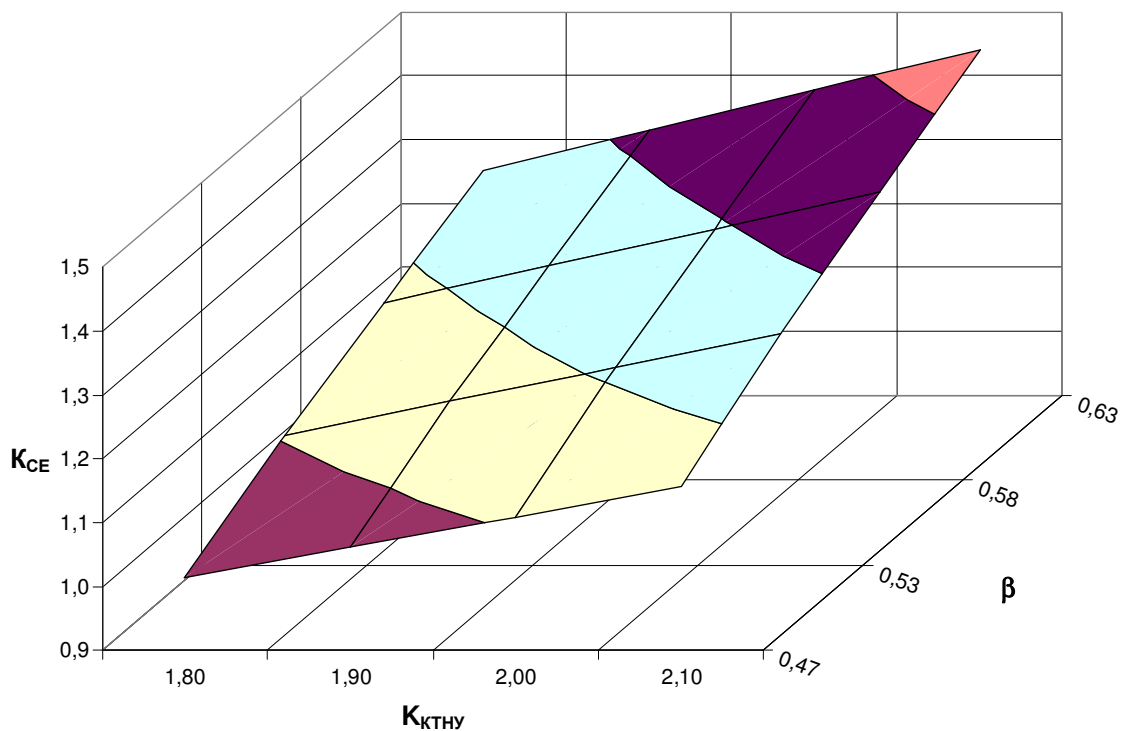


Рис. 2. Область високоєфективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності для тепlopостачання за умови споживання електроенергії піковим електричним котлом з енергосистеми України

На рис. 3 показана область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності для тепlopостачання 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 електричного котла для випадків споживання електричної енергії від КТНУ становитиме $K_{ПДТ}^{ЕК} = 0,223$. Для досліджених режимів роботи СЕ для систем тепlopостачання значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять $K_{CE} = 0,85 \dots 1,09$ за умови $\beta = 0,58 \dots 0,63$ та можуть становити $K_{CE} = 1,6$ [12 – 13] за умови $\beta = 1$.

Як видно з рис. 3, значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять $K_{CE} = 0,85 \dots 0,9$ за умови мінімального значення критерію енергоефективності

КТНУ $K_{КТНУ} = 1,3$; для режимів роботи СЕ з $K_{КТНУ} > 1,3$ значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ змінюються в межах $K_{СЕ} = 0,91 \dots 1,09$. Енергоефективні режими роботи цих СЕ забезпечуються за умов енергоефективних режимів роботи КТНУ зі значеннями показника енергоефективності $K_{КТНУ} = 1,3 \dots 1,6$.

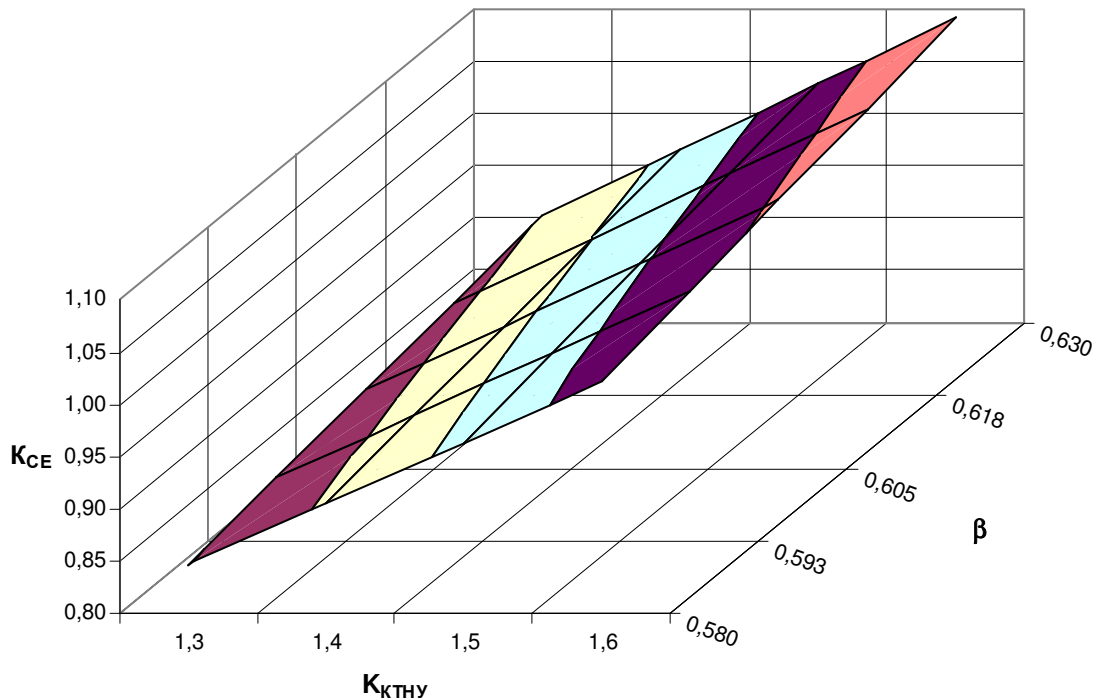


Рис. 3. Область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності для теплопостачання за умов мінімальної ефективності ГПД та пікового електрокотла зі споживанням електроенергії котлом від КТНУ

На рис. 4 показана область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності та піковим паливним котлом для теплопостачання за умов мінімальної ефективності ГПД та ПДТ. 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 паливна котельня з $\eta_{ПК} = 0,8$. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності паливного котла становитиме $K_{ПДТ}^{ПК} = 0,8$. Для досліджених режимів роботи СЕ для систем теплопостачання значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять $K_{СЕ} = 0,91 \dots 1,304$ за умови $\beta = 0,37 \dots 0,63$ та можуть становити $K_{СЕ} = 1,6$ [12 – 13] за умови $\beta = 1$.

Як видно з рис. 4, значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять $K_{СЕ} = 0,91 \dots 0,99$ 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 $K_{СЕ} = 0,95 \dots 1,304$. Енергоефективні режими роботи цих СЕ забезпечуються за умов енергоефективних режимів роботи КТНУ зі значеннями показника енергоефективності $K_{КТНУ} = 1,1 \dots 1,6$.

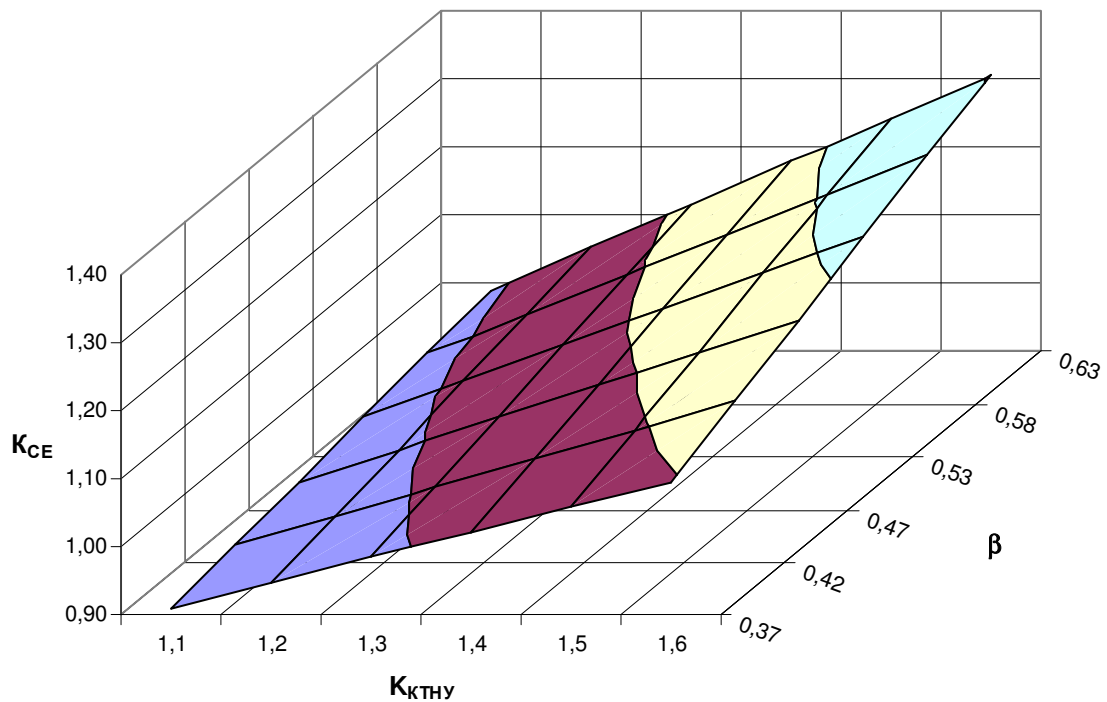


Рис. 4. Область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності для теплопостачання за умов мінімальної ефективності ГПД та пікового паливного котла

На рис. 5 показана область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності для теплопостачання 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 для систем теплопостачання значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять $K_{СЕ} = 0,83 \dots 1,44$ за умови $\beta = 0,47 \dots 0,63$ та можуть становити $K_{СЕ} = 2,1$ [11] за умови $\beta = 1$.

Як видно з рис. 5, значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять $K_{СЕ} = 0,83 \dots 1,0$ за умови мінімального значення критерію енергоефективності КТНУ $K_{КТНУ} = 1,4$; для режимів роботи СЕ з $K_{КТНУ} > 1,4$ значення безрозмірного критерію енергоефективності СЕ змінюються в межах $K_{СЕ} = 0,87 \dots 1,44$. Енергоефективні режими роботи цих СЕ забезпечуються за умов енергоефективних режимів роботи КТНУ зі значеннями показника енергоефективності $K_{КТНУ} = 1,4 \dots 2,1$.

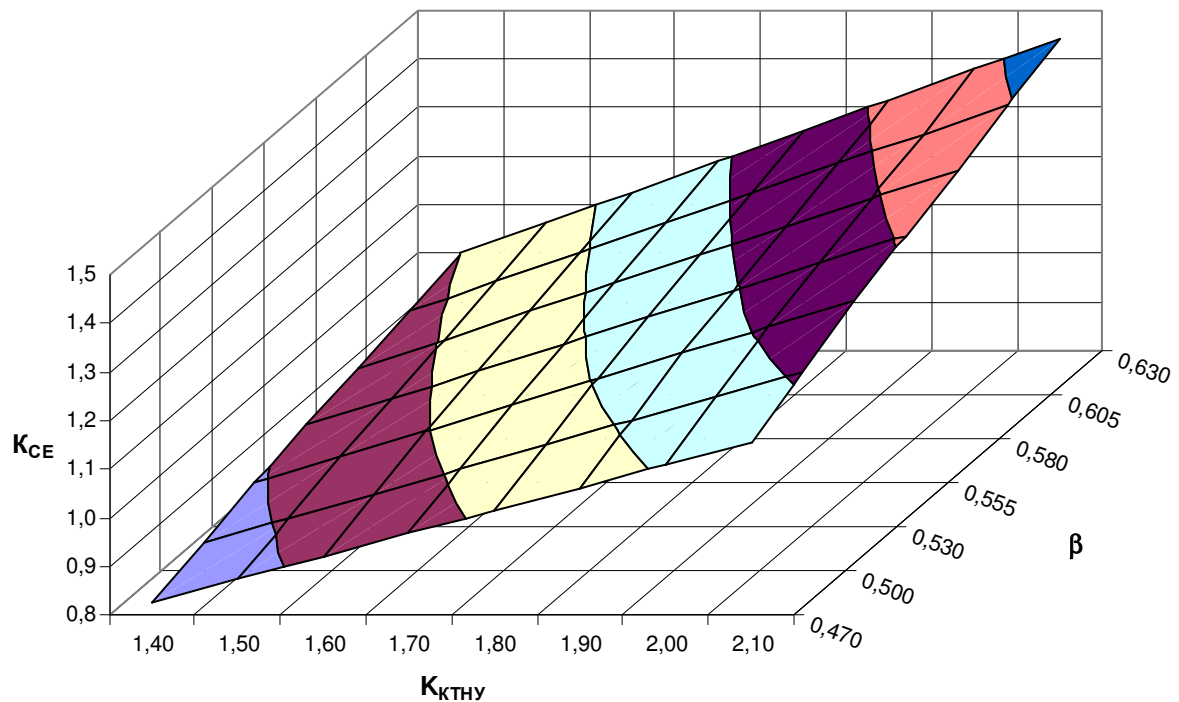


Рис. 5. Область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності для теплопостачання за умов максимальної ефективності ГПД і ПДТ та споживанням електроенергії електротяглом від КТНУ

На рис. 6 показана область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності та піковим паливним котлом для теплопостачання за умов максимальної ефективності ГПД та ПДТ. У цьому дослідженні, згідно з [5, 10], урахувані: 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 паливна котельня з $\eta_{ПК} = 0,9$. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності паливного котла становитиме $K_{ПДТ}^{ПК} = 0,9$. Для досліджених режимів роботи СЕ для систем теплопостачання значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять $K_{СЕ} = 0,95 \dots 1,656$ за умови $\beta = 0,26 \dots 0,63$ та можуть становити $K_{СЕ} = 2,1$ [11] за умови $\beta = 1$.

Як видно з рис. 6, значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять $K_{СЕ} = 0,95 \dots 1,03$ 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 $K_{СЕ} = 0,98 \dots 1,656$. Енергоефективні режими роботи цих СЕ забезпечуються за умов енергоефективних режимів роботи КТНУ зі значеннями показника енергоефективності $K_{КТНУ} = 1,1 \dots 2,1$.

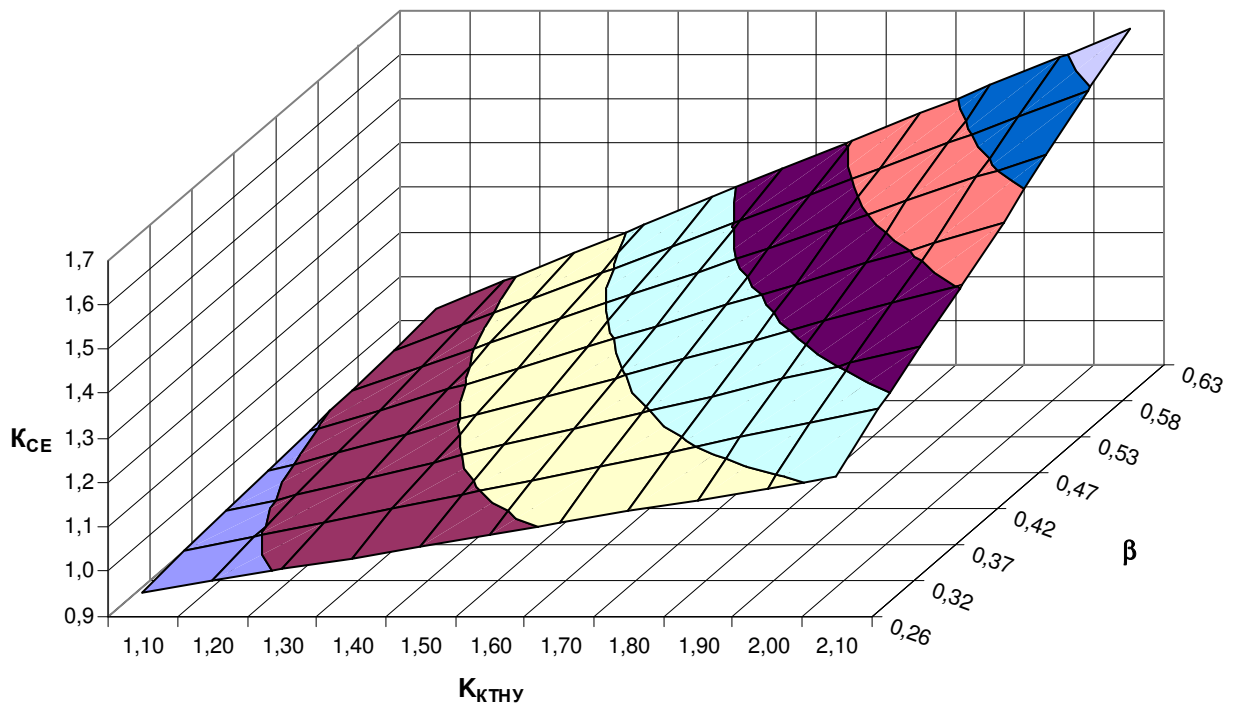


Рис. 6. Область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ малої потужності для теплопостачання за умов максимальної ефективності ГПД та пікового паливного котла

На рис. 7 показана область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ великої потужності та піковою паливною котельнею для теплопостачання за умов мінімальної ефективності ГПД та ПДТ. 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 $\eta_{ЕП} = 0,9$. Піковим джерелом теплоти в СЕ для цих умов передбачена паливна котельня з $\eta_{ПК} = 0,8$. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності паливного котла становитиме $K_{ПК}^{ПК} = \eta_{ПК} = 0,8$. Для досліджених режимів роботи СЕ для систем теплопостачання значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять $K_{СЕ} = 0,9 \dots 1,304$ за умови $\beta = 0,32 \dots 0,63$ та можуть становити $K_{СЕ} = 1,6$ [12 – 13] за умови $\beta = 1$.

Як видно з рис. 7, значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять $K_{СЕ} = 0,9 \dots 0,99$ 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 $K_{СЕ} = 0,93 \dots 1,304$. Енергоефективні режими роботи цих СЕ забезпечуються за умов енергоефективних режимів роботи КТНУ зі значеннями показника енергоефективності $K_{КТНУ} = 1,1 \dots 1,6$.

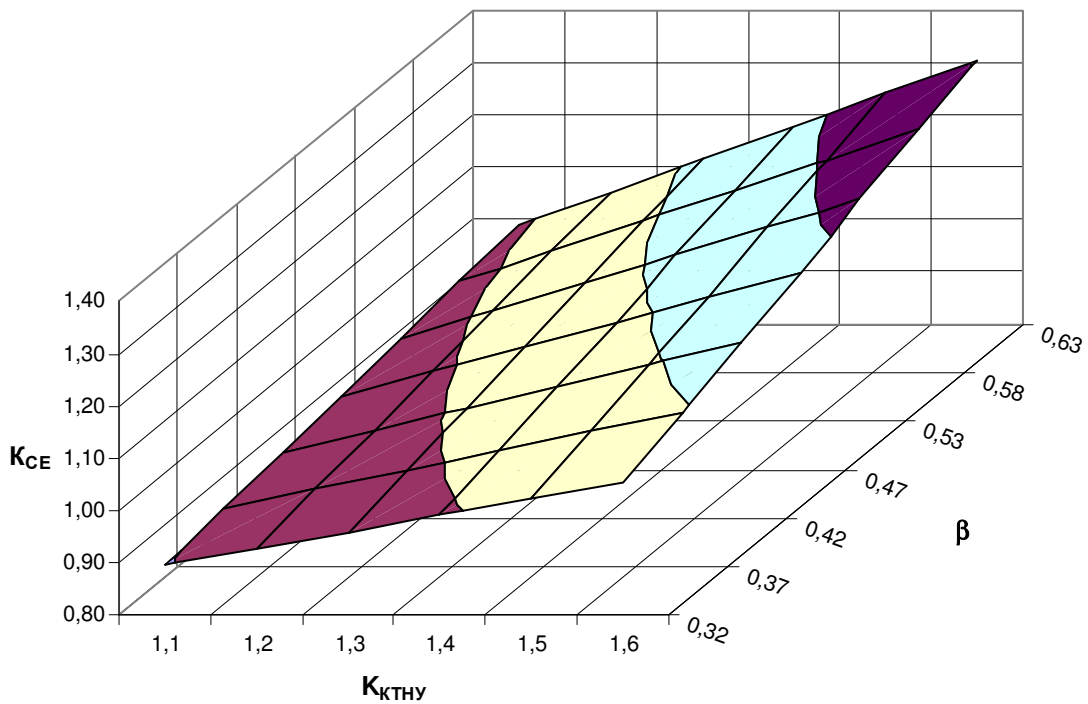


Рис. 7. Область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ великої потужності для теплопостачання за умов мінімальної ефективності ГПД та пікового паливного котла

На рис. 8 показана область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ великої потужності та піковим паливним котлом для теплопостачання за умов максимальної ефективності ГПД та ПДТ. 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 $\eta_{ЕП} = 0,9$. Піковим джерелом теплоти в СЕ для цих умов передбачена паливна котельня з $\eta_{ПК} = 0,9$. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності паливного котла становитиме $K_{ПДТ}^{ПК} = 0,9$. Для досліджених режимів роботи СЕ для систем теплопостачання значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять $K_{СЕ} = 0,93 \dots 1,656$ за умови $\beta = 0,16 \dots 0,63$ та можуть становити $K_{СЕ} = 2,1$ [11] за умови $\beta = 1$.

Як видно з рис. 8, значення комплексного безрозмірного критерію енергоефективності СЕ становлять $K_{СЕ} = 0,93 \dots 1,03$ 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 $K_{СЕ} = 0,95 \dots 1,656$. Енергоефективні режими роботи цих СЕ забезпечуються за умов енергоефективних режимів роботи КТНУ зі значеннями показника енергоефективності $K_{КТНУ} = 1,1 \dots 2,1$.

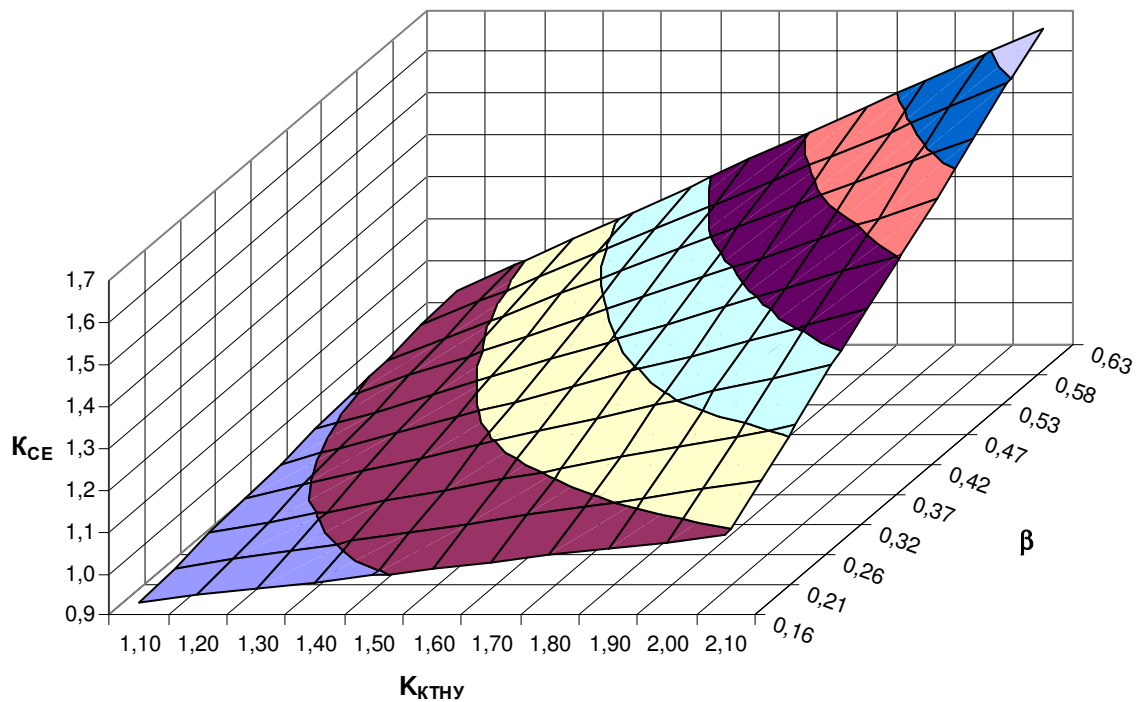


Рис. 8. Область енергоефективної роботи СЕ з КТНУ великої потужності для теплопостачання за умов максимальної ефективності ГПД та пікового паливного котла

Слід зазначити, що залежності, показані на рис. 1 – 8, одержані для режимів енергоефективної роботи КТНУ на основі результатів досліджень [10 – 13].

Залежності, показані на рис. 4 та 7, визначають області енергоефективної роботи СЕ з КТНУ різних рівнів потужності та піковим паливним котлом (котельнею) для теплопостачання за умов мінімальної ефективності ГПД та паливного котла (котельні). За умов $\beta = (0,32 \dots 0,37) \dots 0,63$ та $K_{КТНУ} = 1,1 \dots 1,6$ зазначені СЕ можуть бути рекомендовані як високоефективні системи енергозабезпечення, оскільки їхня ефективність майже вдвічі перевищує енергоефективність високоефективних електричних і паливних котлів.

Залежності, показані на рис. 6 та 8, визначають області енергоефективної роботи СЕ з КТНУ різних рівнів потужності та піковим паливним котлом (котельнею) для теплопостачання за умов максимальної ефективності ГПД та паливного котла (котельні). За умов $\beta = (0,16 \dots 0,26) \dots 0,63$ та $K_{КТНУ} = 1,1 \dots 2,1$ вказані СЕ можуть бути рекомендовані як високоефективні системи енергозабезпечення, оскільки їхня ефективність більш, ніж удвічі перевищує енергоефективність високоефективних електричних і паливних котлів. Досліджені СЕ можуть скласти конкуренцію сучасним високоефективним електричним і паливним котлам у системах теплопостачання та енергозабезпечення.

У роботі [12] визначено, що досліджені СЕ з КТНУ та піковими паливними котлами будуть високоефективними в системах теплопостачання, якщо частка навантаження КТНУ в СЕ становитиме $\beta > 0,4$, що відповідає результатам досліджень, показаним на рис. 4, 6 – 8. У нашому дослідженні визначено, що за умови максимальної ефективності ГПД та паливного котла досліджені СЕ з КТНУ та піковими паливними котлами будуть енергоефективними, якщо частка навантаження КТНУ в СЕ становитиме $\beta > 0,16 \dots 0,26$ залежно від рівня потужності КТНУ. За умови мінімальної ефективності ГПД та паливного котла досліджені СЕ з КТНУ та піковими паливними котлами будуть енергоефективними, якщо частка навантаження КТНУ в СЕ становитиме $\beta > 0,32 \dots 0,37$ залежно від рівня потужності КТНУ.

Залежності, показані на рис. 1 – 3 та 5, визначають області енергоефективної роботи СЕ з КТНУ та піковим електричним котлом у системах теплопостачання з різними варіантами

джерел електричної енергії для пікового електростатка та за умов різної енергоефективності ГПД та електростатка. У роботі [12] визначено, що досліджені СЕ з КТНУ та піковими електростатками будуть енергоефективними, якщо частка навантаження КТНУ в СЕ становитиме $\beta > 0,7$. У нашому дослідженні визначено, що СЕ з КТНУ та піковими електричними котлами будуть енергоефективними, якщо частка навантаження КТНУ в СЕ становитиме $\beta > 0,47 \dots 0,58$ залежно від рівня потужності КТНУ. Проте такі режими роботи СЕ забезпечуватимуться за умови викоефективної роботи КТНУ з показниками енергоефективності $K_{КТНУ} > 1,3 \dots 1,5$ залежно від рівня потужності КТНУ. Ці умови відповідають результатам досліджень, показаним на рис. 1 – 3 та 5.

Запропоновані підходи з визначення областей енергоефективної роботи СЕ з КТНУ і ПДТ у системах теплопостачання 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.

Одержані в статті наукові результати з визначення областей енергоефективної роботи СЕ дозволяють розробити рекомендації з енергоефективної експлуатації СЕ з КТНУ та ПДТ з різними схемними рішеннями під час роботи в системах теплопостачання. Із метою оцінки енергоефективності різних варіантів СЕ з КТНУ та ПДТ для систем теплопостачання, крім вищенаведених підходів, пропонуємо використовувати результати досліджень [1, 5 – 16].

Висновки

Розроблено методичні основи та визначено області енергоефективної роботи СЕ з КТНУ і 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 із визначення областей енергоефективної роботи 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 наведені 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 в системах теплопостачання;
- дозволяє визначити області та режими енергоефективної роботи СЕ з КТНУ та ПДТ для теплопостачання, за яких енергоефективність досліджуваних СЕ майже вдвічі перевищує енергоефективність сучасних високоефективних електричних і паливних котлів;

— дозволяє комплексно оцінювати енергоефективність значної кількості варіантів СЕ з КТНУ та ПДТ для систем теплопостачання;

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

Для режимів енергоефективної роботи КТНУ в СЕ та за умов $K_{КТНУ} > 1$ та $K_{СЕ} > \eta_{ПК}$ (або $K_{СЕ} > \eta_{ЕК}$) [11] у нашому дослідженні визначено області енергоефективної роботи та енергоефективні режими роботи СЕ з КТНУ та піковими електричними й паливними котлами в системах теплопостачання для різних рівнів потужності та енергоефективності елементів СЕ.

Для СЕ з КТНУ різних рівнів потужності та піковими паливними котлами визначені області енергоефективної роботи в системах теплопостачання, які відповідають енергоефективним режимам роботи СЕ та КТНУ з $\beta = (0,32...0,37)...0,63$ та $K_{КТНУ} = 1,1...1,6$ за умов мінімальної ефективності ГПД та паливного котла (котельні). За цих умов енергоефективність зазначених СЕ майже вдвічі перевищує енергоефективність вискоелективних електричних і паливних котлів.

За умов максимальної ефективності ГПД та паливного котла (котельні), для СЕ з КТНУ різних рівнів потужності та паливними котлами визначені області енергоефективної роботи в системах теплопостачання, які відповідають енергоефективним режимам роботи СЕ та КТНУ з $\beta = (0,16...0,26)...0,63$ та $K_{КТНУ} = 1,1...2,1$. Указані СЕ можуть бути рекомендовані як вискоелективні системи енергозабезпечення, оскільки їхня ефективність більш, ніж вдвічі перевищує енергоефективність вискоелективних електричних і паливних котлів. Досліджені СЕ можуть скласти конкуренцію сучасним вискоелективним електричним і паливним котлам у системах теплопостачання та енергозабезпечення.

Визначено, що за умови мінімальної ефективності ГПД та паливного котла досліджені СЕ з КТНУ та піковими паливними котлами будуть енергоефективними, якщо частка навантаження КТНУ в СЕ становитиме $\beta > 0,32...0,37$ залежно від рівня потужності КТНУ.

Визначено, що за умови максимальної ефективності ГПД та паливного котла досліджені СЕ з КТНУ та піковими паливними котлами будуть енергоефективними, якщо частка навантаження КТНУ в СЕ становитиме $\beta > 0,16...0,26$ залежно від рівня потужності КТНУ.

Визначено, що СЕ з КТНУ та піковими електричними котлами будуть енергоефективними, якщо частка навантаження КТНУ в СЕ становитиме $\beta > 0,47...0,58$ залежно від рівня потужності КТНУ. Проте такі режими роботи СЕ забезпечуватимуться за умови вискоелективної роботи КТНУ з показниками енергоефективності $K_{КТНУ} > 1,3...1,5$ залежно від рівня потужності КТНУ.

Запропоновані підходи з визначення областей енергоефективної роботи СЕ з КТНУ і ПДТ у системах теплопостачання дозволяють визначити енергоефективні області та режими роботи вказаних 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.

Одержані в статті наукові результати з визначення областей енергоефективної роботи СЕ дозволяють розробити рекомендації з енергоефективної експлуатації СЕ з КТНУ та ПДТ з різними схемними рішеннями під час роботи в системах теплопостачання. Із метою оцінки енергоефективності різних варіантів СЕ з КТНУ та ПДТ для систем теплопостачання, крім вищенаведених підходів, пропонуємо використовувати результати з досліджень [1, 5 – 16].

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 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.: <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. Области энергоефективной работы систем энергозабезпечення з когенераційно-теплонасосними установками та піковими джерелами теплоти [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко // *Наукові праці ВНТУ*. – 2016. – № 3. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/479/478>.

14. 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>.

15. 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>.

16. 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>.

17. 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., доцент, доцент кафедри теплоенергетики, e-mail: ostapenko1208@gmail.com.

Вінницький національний технічний університет.