

О. П. Остапенко, к. т. н., доц.

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПАРОКОМПРЕСІЙНИХ ТЕПЛОНАСОСНИХ СТАНЦІЙ ІЗ КОГЕНЕРАЦІЙНИМ ПРИВОДОМ

Запропоновано підхід із комплексного оцінювання енергетичної ефективності парокомпресійних теплонасосних станцій (ТНС) із когенераційним приводом з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи ТНС, пікових джерел теплоти ТНС, джерел приводної енергії ТНС різних рівнів потужності, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

Ключові слова: комплексна оцінка, енергетична ефективність, теплонасосна станція, безрозмірний критерій енергетичної ефективності, когенераційний привод.

Вступ

В умовах високої вартості паливно-енергетичних ресурсів, підвищеного попиту на електричну енергію в години пікового споживання (особливо в опалювальний період) за недостатності наявних електрогенерувальних потужностей в Україні та періодичної неузгодженості графіків вироблення і споживання електричної енергії з метою зменшення навантаження на енергосистему України надзвичайно актуальною в сучасних умовах постає технологія створення енергогенерувальних потужностей на основі комбінованих когенераційних і теплонасосних установок (ТНУ). Ця технологія передбачає застосування комбінованих когенераційно-теплонасосних установок, що дозволить знизити споживання природного або альтернативного газу на 30 – 45 % порівняно з котельними установками еквівалентної потужності [1], а також одержати дешевшу за собівартістю електроенергію порівняно з мережевою (на 30 – 40 %). Значно більший ефект може бути досягнутий за умови застосування комбінованих когенераційно-теплонасосних установок на основі наявних муніципальних і промислових котелень – створення теплонасосних станцій із когенераційним приводом компресорів теплових насосів. Когенераційний привод компресорів теплових насосів може бути забезпечений на основі газових двигунів-генераторів, які випускають українські підприємства: «Первомайськдизельмаш» та ДП «Завод ім. В. О. Малишева».

Зважаючи на актуальність поставленого завдання, за останні роки проведено низку досліджень з ефективності застосування теплонасосних установок в теплових схемах джерел енергопостачання [1 – 12]. У роботі [1] авторами виконані дослідження з підвищення енергоефективності джерел теплопостачання шляхом використання ТНУ з електричним і когенераційним приводами з урахуванням впливу схемних розв'язків і режимів роботи. У роботі [2] виконано порівняльний аналіз перспективних напрямів підвищення ефективності систем енергопостачання на основі установок когенерації малої потужності, запропоновано теплові схеми інтегрованих систем комплексного енергопостачання. Дослідження інтегрованих систем комплексного енергопостачання [2], що були реалізовані на основі геліоколекторів, геотермальних джерел теплоти, теплових насосів компресорного та абсорбційного типів, дозволили на основі чисельного аналізу визначити оптимальні умови їх роботи. У дослідженні [3] авторами оцінено економічність когенераційних і комбінованих когенераційно-теплонасосних установок із газопоршневіми та газотурбінними двигунами. Проте в дослідженні [3] запропоновано спрощений підхід до оцінювання енергетичної ефективності ТНУ (лише за коефіцієнтом перетворення), який не враховує всі втрати енергії, пов'язані з виробленням теплоти в ТНУ. У роботі [4] автором здійснено порівняльний аналіз техніко-економічної ефективності повітряних теплових насосів із приводом від газопоршневих коге-

нераційних установок і газових водогрійних котлів у системах гарячого водопостачання. У публікації [5] наведено результати дослідження схеми джерела теплоелектропостачання (міні-ТЕЦ) із регулюванням навантажень на основі використання теплових насосів. У дослідженні [5] проаналізовано три варіанти теплових схем: схема з когенераційною та теплонасосною установками з відпуском електроенергії в мережу, схема з когенераційною та теплонасосною установками та баком-акумулятором з відпуском електроенергії в мережу, схема з когенераційною та теплонасосною установками без відпуску електроенергії в мережу. Джерелом теплоти для ТНУ в цьому дослідженні передбачено використати неочищені каналізаційні стоки. Авторами в дослідженні [5] запропоновано спрощений підхід до оцінювання енергетичної ефективності ТНУ, який не враховує всі втрати енергії, пов'язані з виробленням теплоти в ТНУ. Теплові схеми, запропоновані в дослідженні [5], можуть бути використані лише для забезпечення потреб гарячого водопостачання, а потужність опалення ці схеми можуть забезпечувати лише частково.

У роботі [6] визначені ефективні дійсні режими роботи ТНУ з електричним і когенераційним приводами з урахуванням впливу джерел приводної енергії парокompресійних теплових насосів і втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ. Енергетичні переваги застосування парокompресійних теплових насосів з електричним і когенераційним приводами проаналізовано в дослідженні [7].

У публікаціях [8, 9] визначено енергетичні та економічні передумови ефективної інтеграції ТНС в системи теплопостачання промислових підприємств та підприємств муніципальної енергетики в Україні. У роботі [10] оцінено енергетичну, екологічну та економічну ефективність ТНС із різними видами приводу компресора на природних та промислових джерелах низькотемпературної теплоти з урахуванням змінних режимів роботи систем теплопостачання в широкому діапазоні зміни потужності ТНУ. Результати досліджень енергетичної ефективності ТНС з різними джерелами теплоти за умови змінних режимів роботи наведені в роботі [11]. У роботі [12] оцінено енергоекологічну ефективність ТНС з різними видами приводу компресора на природних і промислових джерелах низькотемпературної теплоти за умови змінних режимів роботи систем теплопостачання.

У роботах [1 – 12] авторами не здійснено комплексну оцінку енергетичної ефективності 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 утрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

Метою дослідження є розроблення методичних основ та здійснення комплексної оцінки енергетичної ефективності парокompресійних теплонасосних станцій 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.

Основна частина

В дослідженні здійснено комплексну оцінку енергетичної ефективності парокompресійних ТНС з ТНУ малої (до 1 МВт) та великої потужностей із когенераційним приводом від газопоршневого двигуна-генератора (ГПД). Когенераційний привод теплових насосів має переваги порівняно з електричним, оскільки дозволяє уникнути додаткових втрат електроенергії під час транспортування та передбачає утилізацію теплоти відхідних газів після газового двигуна, що забезпечує кращу енергетичну ефективність. ТНС із когенераційним приводом може повністю або частково забезпечувати власні потреби в електричній енергії. Схеми зазначених ТНС наведені в роботі [1].

Енергетичну ефективність ТНС значною мірою визначають оптимальним розподілом на-

Наукові праці ВНТУ, 2015, № 3

вантаження між теплонасосною установкою та піковим джерелом теплоти (наприклад, водогрійним паливним котлом, електрокотлом, сонячними колекторами тощо) у складі ТНС. Цей розподіл характеризується часткою навантаження ТНУ у складі ТНС β , яку визначають як відношення теплової потужності ТНУ до потужності ТНС $\beta = Q_{ТНУ}/Q_{ТНС}$. Для ТНС із когенераційним приводом значення теплової потужності ТНУ визначають з урахуванням потужності утилізаційного обладнання когенераційного приводу $Q_{ТНУ} = Q_k + \Sigma Q_{ym}$, де Q_k – потужність конденсатора ТНУ, ΣQ_{ym} – потужність утилізаційного обладнання когенераційного приводу ТНУ.

На основі аналізу результатів проведених досліджень [10 – 12] визначено оптимальні значення показника β для ТНС із когенераційним приводом на різних джерелах теплоти за змінних режимів роботи теплової мережі. Кожному із цих режимів відповідає певне значення теплових потужностей ТНС, ТНУ та частки навантаження ТНУ β . Результати досліджень енергетичної ефективності ТНС із когенераційним приводом за умови змінних режимів роботи для різних джерел низькотемпературної теплоти наведені в роботі [11].

У нашому дослідженні проаналізовано енергетичну ефективність системи «Джерело приводної енергії ТНС – ТНС – споживач теплоти від ТНС» на прикладі парокompресійних теплових насосів із когенераційним приводом. Перевагою такого підходу є врахування втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ та пікового джерела теплоти з метою визначення ефективних режимів роботи ТНС із когенераційним приводом.

Запропоновано здійснювати комплексну оцінку енергетичної ефективності парокompресійних ТНС із когенераційним приводом за комплексним безрозмірним критерієм енергетичної ефективності ТНС:

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

де $K_{ПДТ}$ – безрозмірний критерій енергетичної ефективності пікового джерела теплоти у складі ТНС (водогрійного паливного котла, електрокотла, сонячних колекторів тощо), $K_{ТНУ}$ – безрозмірний критерій енергетичної ефективності парокompресійної ТНУ з когенераційним приводом у складі ТНС.

Безрозмірний критерій енергетичної ефективності парокompресійних ТНУ з когенераційним приводом $K_{ТНУ}$ запропоновано в дослідженні [6]. Його одержали 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.

Для парокompресійних ТНУ з когенераційним приводом безрозмірний критерій енергетичної ефективності матиме вигляд [6]:

$$K_{ТНУ} = Q_{ТНУ}/Q_m = \eta_{ЕЛ} \cdot \varphi \cdot \eta_{mn}, \quad (2)$$

де Q_m – потужність, витрачена газопоршневим двигуном-генератором для вироблення електричної енергії для приводу ТНУ, $\eta_{ЕЛ}$ – загальний ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії з [6], φ – коефіцієнт перетворення парокompресійних ТНУ, η_{mn} – ККД теплового потоку, що враховує втрати енергії та робочого агента в трубопроводах та обладнанні ТНУ.

Для ТНУ з когенераційним приводом загальний ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії згідно з [6] може бути визначений:

$$\eta_{ЕЛ} = \eta_{ЕД} \cdot \eta_{ЕП}, \quad (3)$$

де η_{ED} – ефективний ККД газопоршневого двигуна; η_{EP} – ККД електричного двигуна з урахуванням втрат енергії в блоці управління двигуном з [6].

Для парокompресійних ТНУ з когенераційним приводом безрозмірний критерій енергетичної ефективності матиме вигляд [6]:

$$K_{THV} = Q_{THV} / Q_m = \eta_{EL} \cdot \varphi \cdot \eta_{mn} = \eta_{ED} \cdot \eta_{EP} \cdot \varphi \cdot \eta_{mn} \quad (4)$$

За умови $K_{THV} = 1$ теплонасосна установка передає до споживача таку ж теплову потужність, яка була витрачена для вироблення електроенергії для привода ТНУ. Чим більше значення цього показника, тим ефективнішим і конкурентоздатнішим буде тепловий насос.

У дослідженні [6] запропоновано метод визначення галузей ефективного використання парокompресійних ТНУ з когенераційним приводом за безрозмірним показником енергетичної ефективності ТНУ K_{THV} з урахуванням впливу джерел приводної енергії парокompресійних ТНУ та врахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ.

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

Загалом для електрокотла як пікового джерела теплоти для ТНС безрозмірний критерій енергетичної ефективності матиме вигляд:

$$K_{ПДТ} = Q_{ЕК} / Q_m = \eta_{EL}^k \cdot \eta_{ЕК}, \quad (5)$$

де $Q_{ЕК}$ – теплова потужність водогрійного електрокотла, яка може бути визначена як: $Q_{ЕК} = Q_{ТНС} - Q_{THV}$; Q_m – потужність, витрачена електростанцією для вироблення електричної енергії, η_{EL}^k – загальний ККД генерування та постачання електричної енергії до електрокотла, визначають за формулою: $\eta_{EL}^k = \eta_{ЕС} \cdot \eta_{ЛЕП}$, де $\eta_{ЕС}$ – усереднене значення ККД електростанцій в Україні або альтернативних джерел електричної енергії для ТНУ (на основі парогазових установок (ПГУ), газотурбінних установок (ГТУ), сонячних електростанцій термодинамічного циклу (СЕС), вітроенергетичних електростанцій (ВЕС)) – з дослідження [6]; $\eta_{ЛЕП}$ – ККД розподільчих електричних мереж в Україні з [6], $\eta_{ЕК}$ – ККД електричного котла.

Для випадків застосування парокompресійних ТНС із когенераційним приводом та піковим електрокотлом загальний ККД генерування та постачання електричної енергії до електрокотла можна визначати як $\eta_{EL}^k = \eta_{ED} \cdot \eta_{EP}$ у разі використання електроенергії від когенераційного приводу ТНУ або за вказаною вище формулою для випадків споживання електричної енергії з енергосистеми на основі традиційних або альтернативних джерел електричної енергії.

Тоді безрозмірний критерій енергетичної ефективності електрокотла як пікового джерела теплоти для ТНС для випадків споживання електричної енергії з енергосистеми визначатимемо:

$$K_{ПДТ}^{ЕС} = \eta_{ЕС} \cdot \eta_{ЛЕП} \cdot \eta_{ЕК} \quad (6)$$

У випадку використання в електричному котлі електроенергії від когенераційного приводу ТНУ безрозмірний критерій енергетичної ефективності електрокотла як пікового джерела теплоти для ТНС визначатимемо:

$$K_{ПДТ}^{ЕК} = \eta_{ED} \cdot \eta_{EP} \cdot \eta_{ЕК} = \eta_{EL}^k \cdot \eta_{ЕК} \quad (7)$$

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

Для паливного котла як пікового джерела теплоти для ТНС безрозмірний критерій енергетичної ефективності матиме вигляд:

$$K_{ПДТ}^{ПК} = Q_{ПК} / Q_n = \eta_{ПК}, \quad (8)$$

де $Q_{ПК}$ – теплова потужність водогрійного паливного котла, яка може бути визначена як: $Q_{ПК} = Q_{ТНС} - Q_{ТНУ}$; Q_n – потужність, витрачена для вироблення теплової енергії від спалювання палива в котлі, $\eta_{ПК}$ – ККД водогрійного паливного котла або паливної котельної (для ТНС великих потужностей).

Для випадків використання альтернативних пікових джерел теплоти в ТНС (наприклад, сонячних колекторів для ТНС невеликої потужності) значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності пікового джерела теплоти для ТНС $K_{ПДТ}$ 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 енергетичної ефективності ТНС $K_{ТНС}$ може бути використаний також і для вибору найефективнішого пікового джерела теплоти для певного виду парокомпресійних ТНС.

Запропонований комплексний підхід з оцінювання енергетичної ефективності парокомпресійних ТНС із когенераційним приводом має низку переваг:

- дозволяє оцінювати комплексний вплив змінних режимів роботи ТНС, пікових джерел теплоти ТНС, джерел приводної енергії парокомпресійних ТНС із когенераційним приводом з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії;

- урахує режими роботи парокомпресійних ТНУ;

- урахує змінні режими роботи ТНС для теплопостачання протягом року зі зміною розподілу навантаження між парокомпресійними ТНУ та піковим джерелом теплоти ТНС;

- урахує вплив джерел приводної енергії парокомпресійних ТНС різних рівнів потужності з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНС;

- урахує енергетичну ефективність парокомпресійних ТНС різних рівнів потужностей із когенераційним приводом;

- урахує вплив пікових джерел теплоти парокомпресійних ТНС та виду споживаної ними енергії з урахуванням втрат енергії під час генерування та постачання енергії до пікових джерел теплоти;

- у результаті комплексного підходу до оцінювання енергетичної ефективності ТНС із когенераційним приводом можна здійснити вибір найефективнішого пікового джерела теплоти для певного виду парокомпресійних ТНС;

— запропоновані методичні основи можуть бути використані для оцінювання енергетичної ефективності парокompресійних ТНС із різними холодоагентами та схемними розв'язками ТНУ;

— дозволяє комплексно оцінювати енергетичну ефективність значної кількості варіантів парокompресійних ТНС із когенераційним приводом.

Застосування запропонованих методичних основ із комплексного оцінювання енергетичної ефективності ТНС із когенераційним приводом продемонструємо на конкретних прикладах.

На рис. 1 – 4 показані результати комплексної оцінки енергетичної ефективності ТНС малої потужності з когенераційним приводом. Тут показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС із когенераційним приводом $K_{ТНС}$ для випадків змінного навантаження ТНУ у складі ТНС зі значеннями частки навантаження ТНУ в діапазоні $\beta = 0,1 \dots 1,0$. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності парокompресійних ТНУ з когенераційним приводом $K_{ТНУ}$, згідно з дослідженням [6], визначені для значень дійсного коефіцієнта перетворення ТНУ в діапазоні $\varphi_{\partial} = 0,83 \dots 6,23$. Піковим джерелом теплоти ТНС для цих умов передбачені: електрична котельня з $\eta_{ЕК} = 0,95$ (рис. 1 – 3) та водогрійна паливна котельня з $\eta_{ПК} = 0,85$ (рис. 4). За формулою (3), згідно з [6], для ТНУ малих рівнів потужності з когенераційним приводом значення загального ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ становить $\eta_{ЕЛ} = 0,28$.

На рис. 1 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з когенераційним приводом за умови споживання електроенергії піковим джерелом теплоти (електричним котлом) з енергосистеми України. У цьому дослідженні, згідно з [6], ураховані: усереднене значення ККД електростанцій в Україні $\eta_{ЕС} = 0,383$ та значення ККД розподільчих електричних мереж в Україні $\eta_{ЛЕП} = 0,875$.

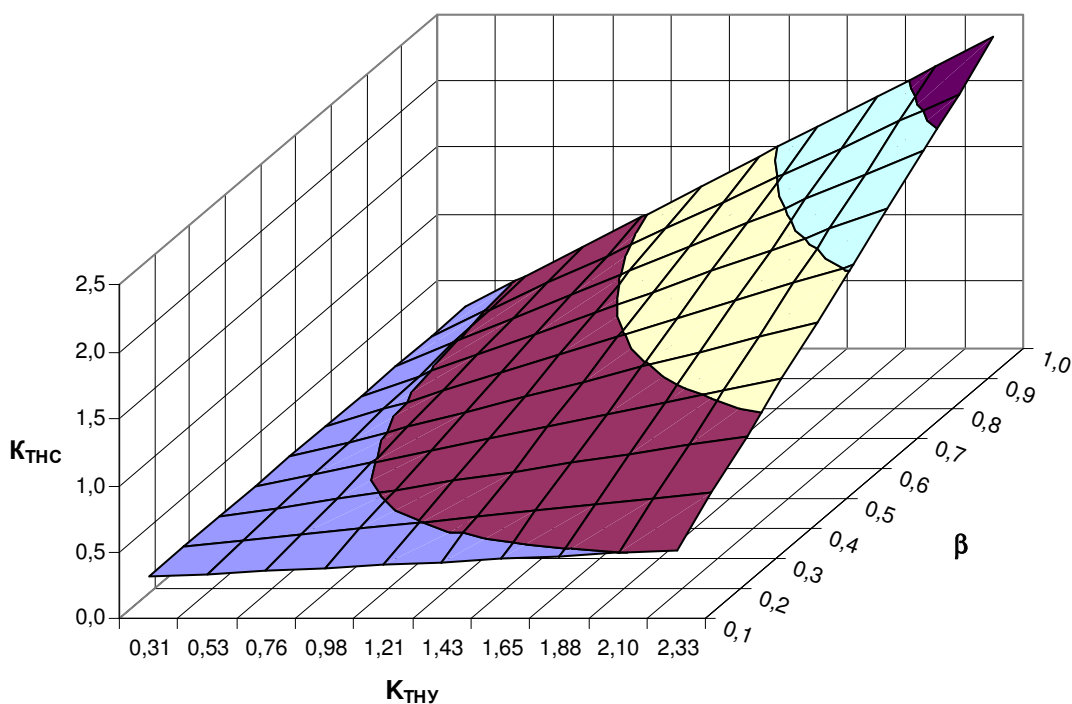


Рис. 1. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з когенераційним приводом за умови споживання електроенергії піковим джерелом теплоти (електричним котлом) з енергосистеми України

На рис. 2 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з когенераційним приводом за умови споживання електроенергії піковим джерелом теплоти (електричним котлом) від ПГУ. Згідно з [6], у цьому дослідженні враховані: значення ККД ПГУ $\eta_{ЕС} = \eta_{ПГУ} = 0,55$ та значення ККД розподільчих електричних мереж в Україні $\eta_{ЛЕП} = 0,875$.

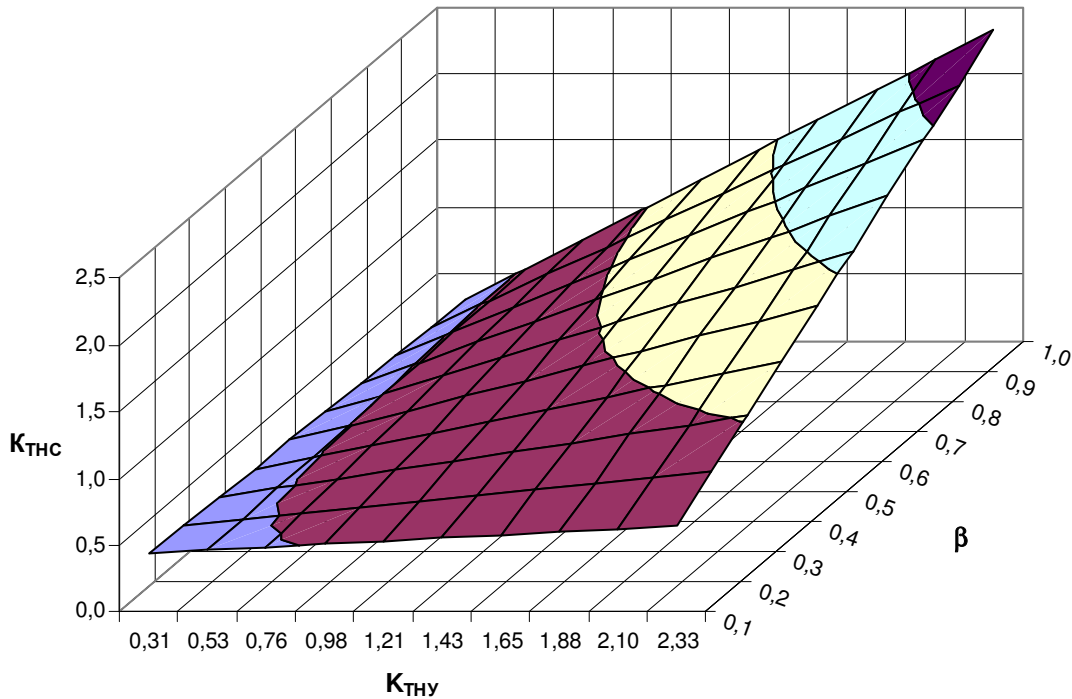


Рис. 2. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з когенераційним приводом за умови споживання електроенергії піковим джерелом теплоти (електричним котлом) від ПГУ

На рис. 3 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з когенераційним приводом за умови споживання електроенергії піковим джерелом теплоти (електричним котлом) від когенераційного приводу ТНУ. У цьому дослідженні, згідно з [6], враховані: значення ефективного ККД ГПД малої потужності $\eta_{ЕД} = 0,35$ та значення ККД електричного двигуна з урахуванням втрат енергії в блоці управління двигуном, згідно з [6], $\eta_{ЕП} = 0,8$.

На рис. 4 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з когенераційним приводом за умови використання водогрійного паливного котла як пікового джерела теплоти ТНС.

На рис. 5 показані результати комплексної оцінки енергетичної ефективності ТНС великої потужності з когенераційним приводом. Тут показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС із когенераційним приводом $K_{ТНС}$ для випадків змінного навантаження ТНУ у складі ТНС зі значеннями частки навантаження ТНУ в діапазоні $\beta = 0,1 \dots 1,0$. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності парокompресійних ТНУ з когенераційним приводом $K_{ТНУ}$, згідно з дослідженням [6], визначені для значень дійсного коефіцієнта перетворення ТНУ в діапазоні $\varphi_{\delta} = 0,93 \dots 7,01$.

Піковим джерелом теплоти ТНС для цих умов передбачена водогрійна паливна котельня з $\eta_{ПК} = 0,85$. За формулою (3), згідно з [6], для ТНУ великих рівнів потужності з когенераційним приводом значення загального ККД генерування, постачання і перетворення електрич-

ної енергії до ТНУ становить $\eta_{ЕЛ} = 0,378$.

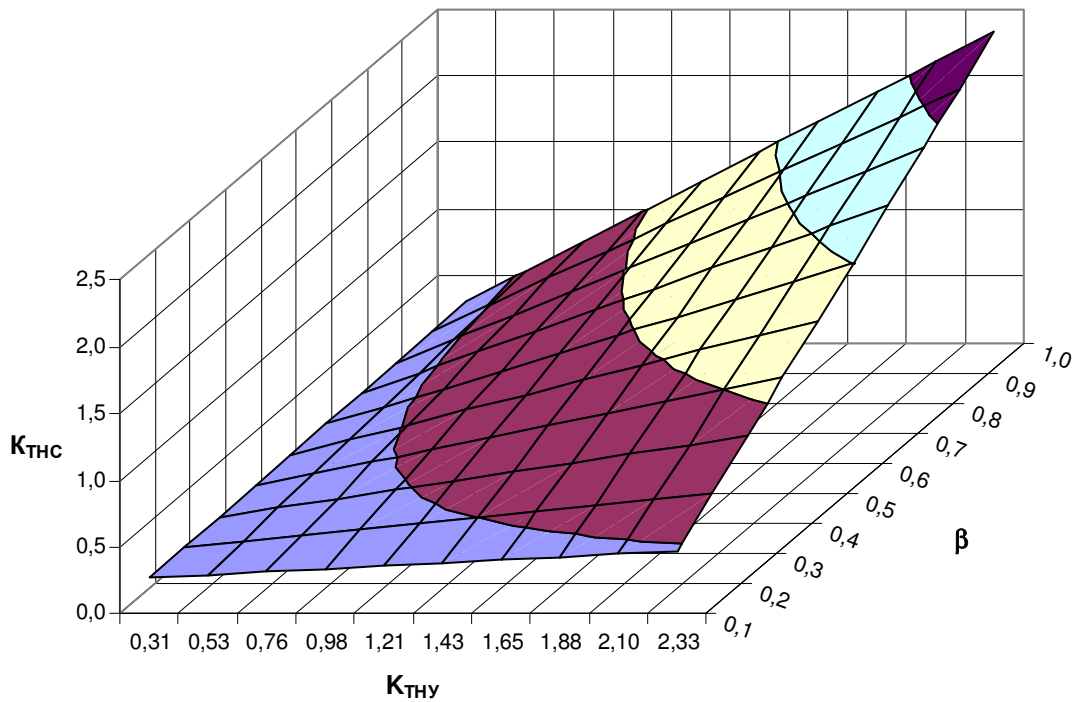


Рис. 3. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з когенераційним приводом за умови споживання електроенергії піковим джерелом теплоти (електричним котлом) від когенераційного приводу ТНУ

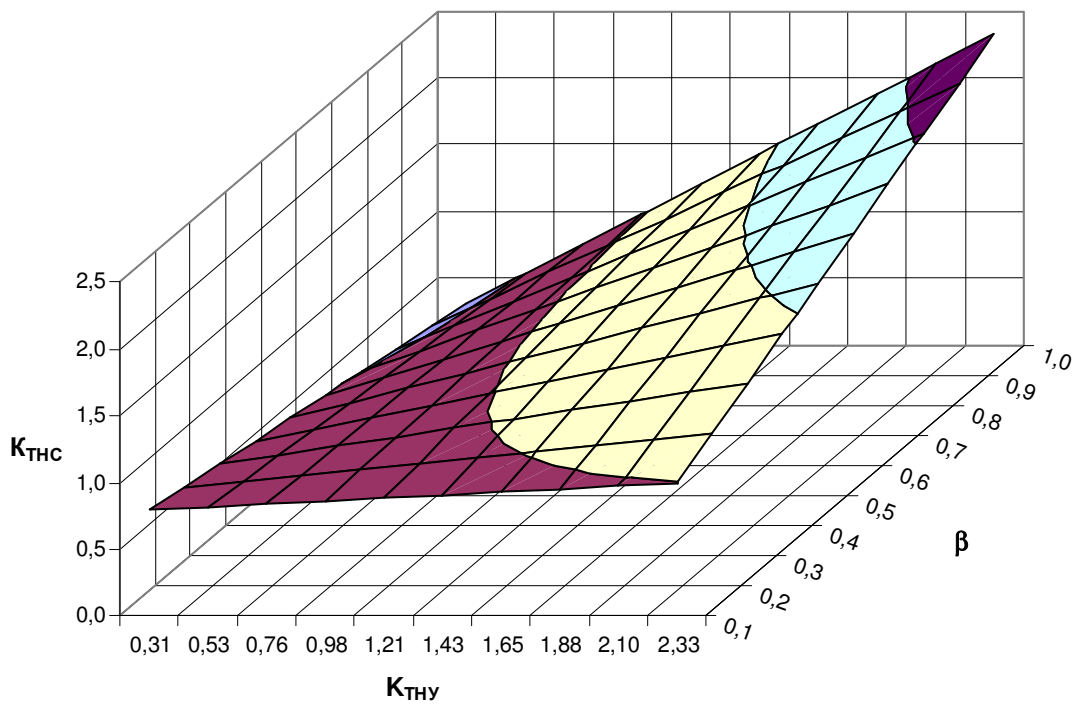


Рис. 4. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з когенераційним приводом за умови використання водогрійного паливного котла як пікового джерела теплоти ТНС

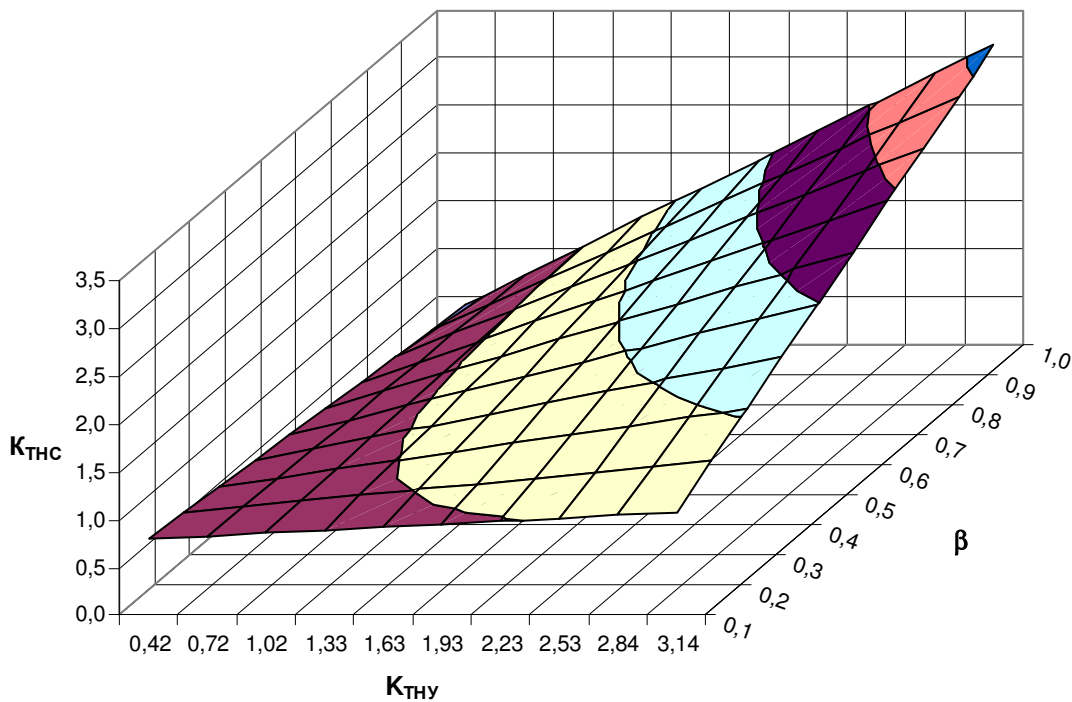


Рис. 5. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС великої потужності з когенераційним приводом за умови використання водогрійного паливного котла як пікового джерела теплоти ТНС

Порівнюючи результати досліджень, показані на рис. 1 – 3 та рис. 4 – 5, можна зробити висновок, що використання паливного котла як пікового джерела теплоти в когенераційних ТНС має переваги порівняно з використанням пікового електрокотла з різними варіантами джерел електроенергії, що підтверджено більшими значеннями безрозмірного критерію енергетичної ефективності пікового джерела теплоти у складі ТНС $K_{ПДТ}$ та безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС із когенераційним приводом $K_{ТНС}$ для різних режимів роботи ТНС. На основі аналізу результатів досліджень (рис. 1 – 5) визначено, що для ТНС великої потужності з когенераційним приводом та з піковим паливним котлом зафіксовано більші значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС $K_{ТНС}$ для всіх досліджених режимів роботи (порівняно з іншими варіантами ТНС).

Із рисунків 1 – 5 наочно видно, що для випадків $K_{ТНУ} < K_{ПДТ}$ значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС з когенераційним приводом $K_{ТНС}$ буде зменшуватися зі збільшенням частки навантаження ТНУ β . Для інших випадків значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС із когенераційним приводом $K_{ТНС}$ буде зростати зі збільшенням частки навантаження ТНУ β .

На основі аналізу результатів проведених досліджень [10 – 12] визначені оптимальні значення показника β для ТНС на різних джерелах теплоти з різними видами приводу компресора ТНУ за змінних режимів роботи теплової мережі.

На рис. 6 – 9 показані результати комплексної оцінки енергетичної ефективності ТНС малої потужності з когенераційним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ β . Тут показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС із когенераційним приводом $K_{ТНС}$ для випадків змінного навантаження ТНУ у складі ТНС. Дослідження проведено для випадків сезонного змінного навантаження ТНУ у складі ТНС для оптимальних значень частки навантаження ТНУ в діапазоні $\beta = 0,16 \dots 0,63$ [10 – 12], що відповідає температурним режимам роботи системи тепlopостачання. Значення критерію енергетичної ефективності ТНУ з когенераційним приводом $K_{ТНУ}$ відповідають значенням

дійсного коефіцієнта перетворення ТНУ в межах $\varphi_\partial = 0,83 \dots 6,23$. Піковим джерелом теплоти ТНС для цих умов передбачені: електрична котельня з $\eta_{ЕК} = 0,95$ (рис. 6 – 8) та водогрійна паливна котельня з $\eta_{ПК} = 0,85$ (рис. 9). За формулою (3), згідно з [6], для ТНУ малих рівнів потужності з когенераційним приводом значення загального ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ становить $\eta_{ЕЛ} = 0,28$.

На рис. 6 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з когенераційним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ β за умови споживання електроенергії піковим джерелом теплоти (електричним котлом) з енергосистеми України. У цьому дослідженні, згідно з [6], ураховані: усереднене значення ККД електростанцій в Україні $\eta_{ЕС} = 0,383$ та значення ККД розподільчих електричних мереж в Україні $\eta_{ЛЕП} = 0,875$.

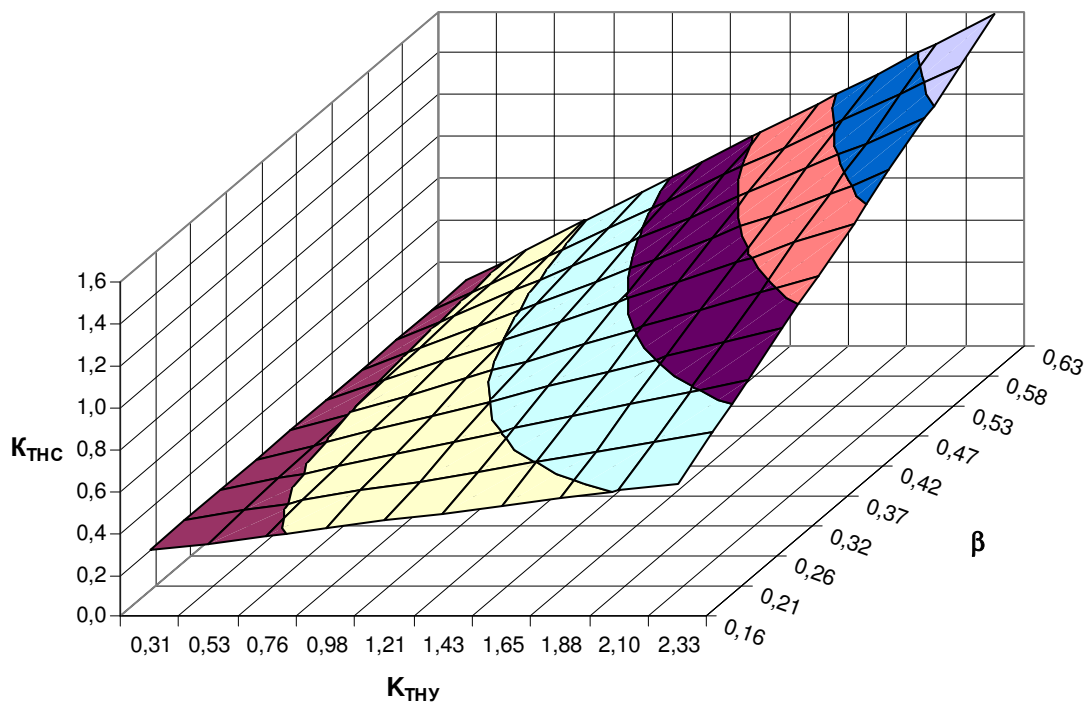


Рис. 6. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з когенераційним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії піковим електрокотлом з енергосистеми України

На рис. 7 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з когенераційним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ β за умови споживання електроенергії піковим джерелом теплоти (електричним котлом) від ПГУ. Згідно з [6], у цьому дослідженні враховані: значення ККД ПГУ $\eta_{ЕС} = \eta_{ПГУ} = 0,55$ та значення ККД розподільчих електричних мереж в Україні $\eta_{ЛЕП} = 0,875$.

На рис. 8 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з когенераційним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ β за умови споживання електроенергії піковим джерелом теплоти (електричним котлом) від когенераційного приводу ТНУ. У цьому дослідженні, згідно з [6], ураховані: значення ефективного ККД ГПД малої потужності $\eta_{ЕД} = 0,35$ та значення ККД електричного двигуна з урахуванням втрат енергії в блоці управління двигуном, згідно з [6], $\eta_{ЕП} = 0,8$.

На рис. 9 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з когенераційним приводом для оптимальних значень частки навантаження

ТНУ β за умови використання водогрійного паливного котла як пікового джерела теплоти.

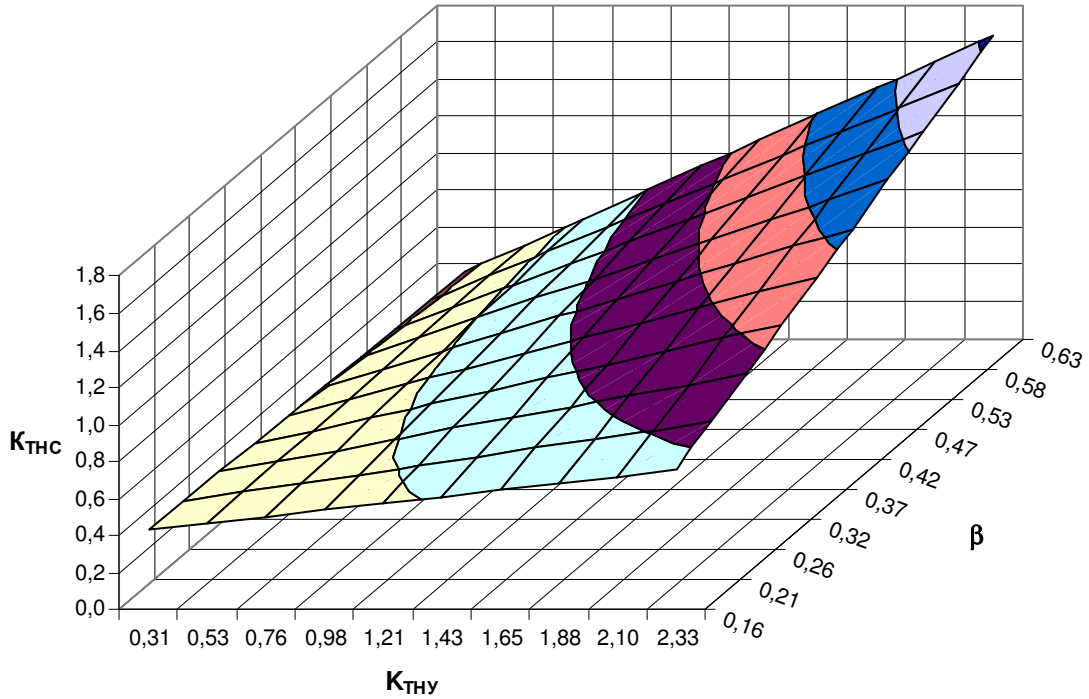


Рис. 7. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з когенераційним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії піковим електродкотлом від ПГУ

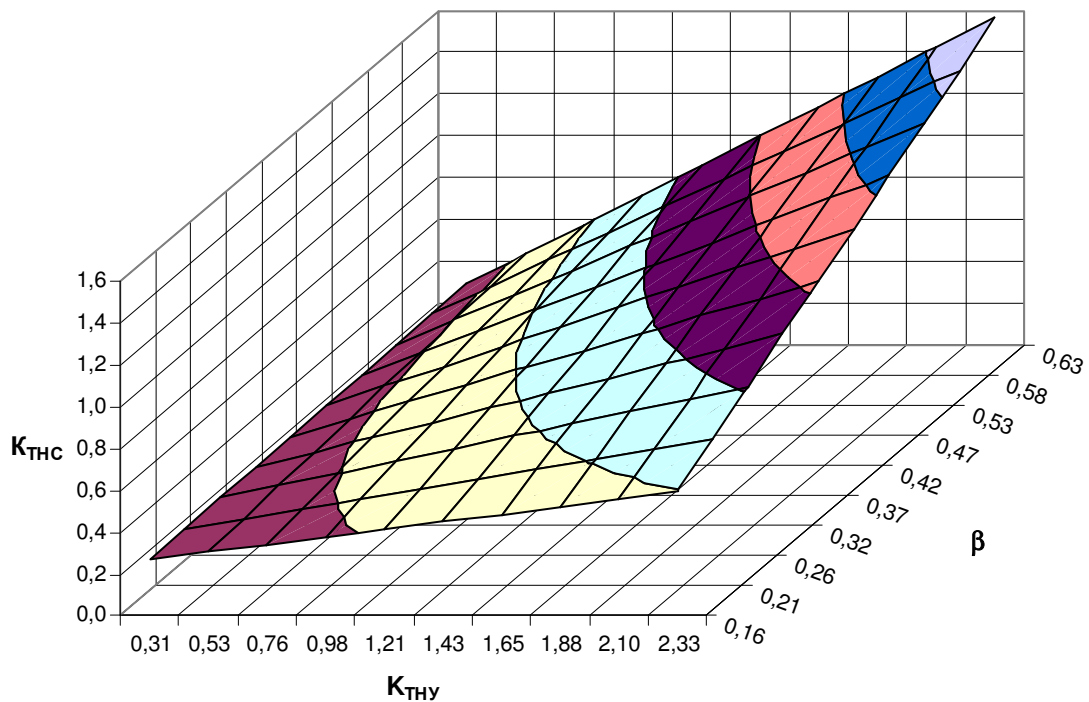


Рис. 8. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності когенераційним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії піковим електродкотлом від когенераційного приводу ТНУ

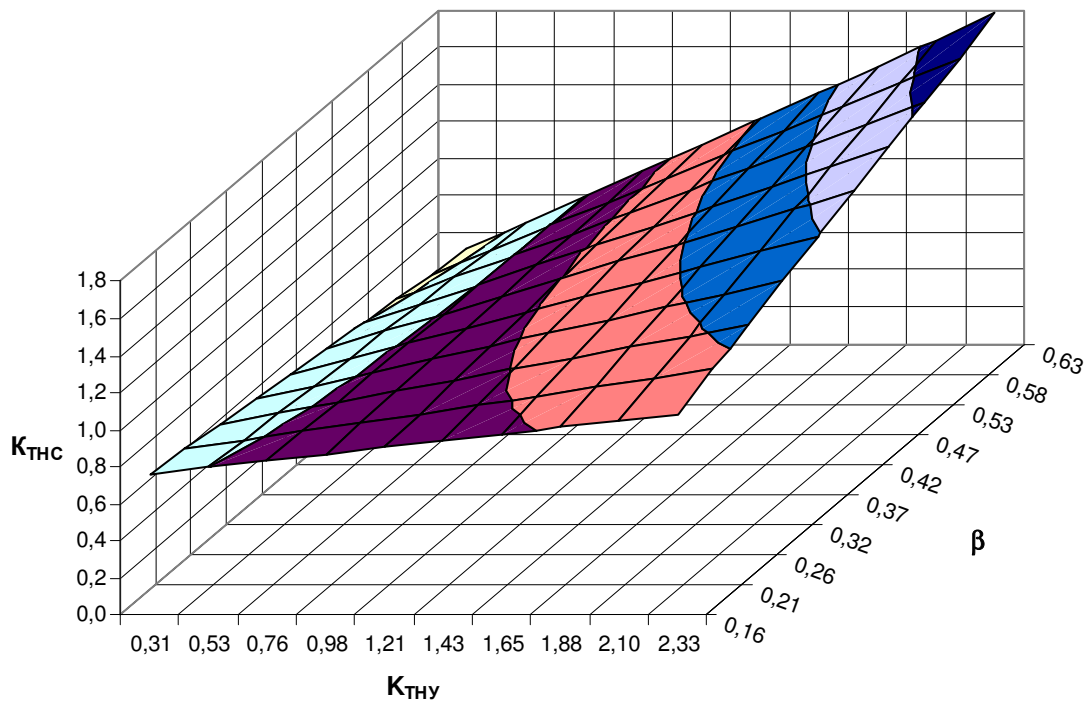


Рис. 9. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності когенераційним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ за умови використання водогрійного паливного котла як пікового джерела теплоти ТНС

На рис. 10 показані результати комплексної оцінки енергетичної ефективності ТНС великої потужності з когенераційним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ β . Тут показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС із когенераційним приводом K_{THC} для випадків сезонного змінного навантаження ТНУ у складі ТНС для оптимальних значень частки навантаження ТНУ в діапазоні $\beta = 0,16 \dots 0,63$ [10 – 12], що відповідає температурним режимам роботи системи теплопостачання.

Згідно з дослідженням [6], у цьому випадку значення критерію енергетичної ефективності ТНУ з когенераційним приводом K_{TNU} відповідають значенням дійсного коефіцієнта перетворення ТНУ в межах $\varphi_d = 0,93 \dots 7,01$. Піковим джерелом теплоти ТНС для цих умов передбачена водогрійна паливна котельня з $\eta_{ПК} = 0,85$. За формулою (3), згідно з [6], для ТНУ великих рівнів потужності з когенераційним приводом значення загального ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ становить $\eta_{ЕЛ} = 0,378$.

На основі аналізу результатів досліджень (рис. 6 – 10) визначено, що за оптимальних режимів роботи для ТНС великої потужності з когенераційним приводом та з піковим паливним котлом фіксують більші значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС K_{THC} (порівняно з іншими дослідженими варіантами ТНС).

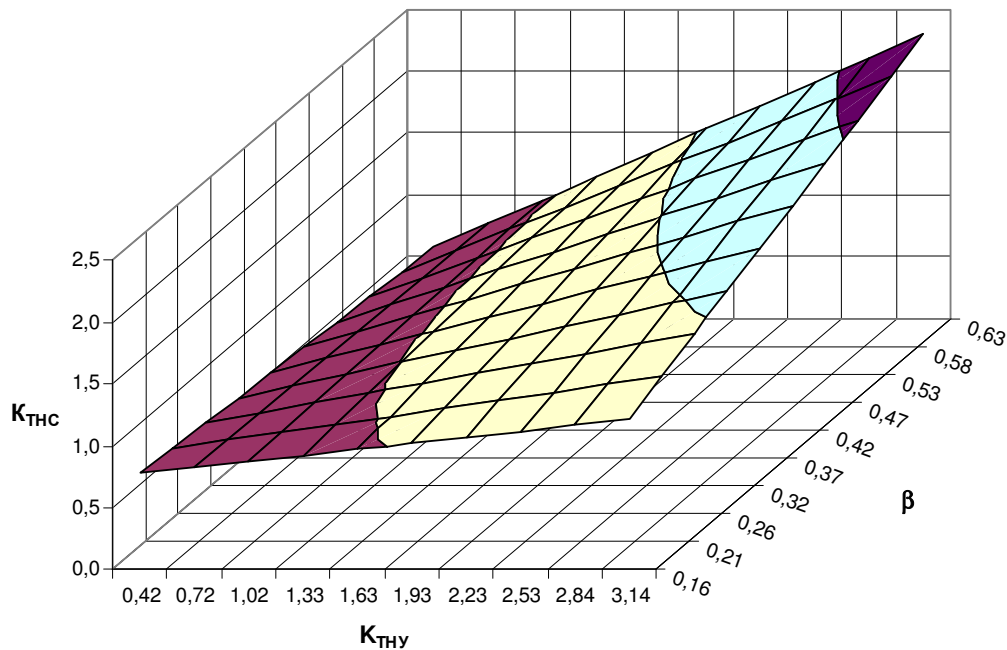


Рис. 10. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС великої потужності когенераційним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ за умови використання водогрійного паливного котла як пікового джерела теплоти ТНС

Для здійснення комплексної оцінки енергетичної ефективності різних варіантів ТНС з когенераційним приводом, крім вищенаведених підходів, пропонуємо використовувати результати досліджень [1, 6 – 12].

Висновки

Запропоновано підхід із комплексного оцінювання енергетичної ефективності парокompресійних теплонасосних станцій із когенераційним приводом з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи ТНС, пікових джерел теплоти ТНС, джерел приводної енергії ТНС різних рівнів потужності, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

Розроблено методичні основи та здійснено комплексну оцінку енергетичної ефективності 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.

Запропонований комплексний підхід з оцінювання енергетичної ефективності парокompресійних ТНС із когенераційним приводом має низку переваг:

- дозволяє оцінювати комплексний вплив змінних режимів роботи ТНС, пікових джерел теплоти ТНС, джерел приводної енергії парокompресійних ТНС із когенераційним приводом з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії;
- урахує режими роботи парокompресійних ТНУ;
- урахує змінні режими роботи ТНС для теплопостачання протягом року зі зміною розподілу навантаження між парокompресійними ТНУ та піковим джерелом теплоти ТНС;
- урахує вплив джерел приводної енергії парокompресійних ТНС різних рівнів потужності з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНС;

— урахує енергетичну ефективність парокompресійних ТНС різних рівнів потужностей із когенераційним приводом;

— урахує вплив пікових джерел теплоти парокompресійних ТНС та виду споживаної ними енергії з урахуванням втрат енергії під час генерування та постачання енергії до пікових джерел теплоти;

— у результаті комплексного підходу до оцінювання енергетичної ефективності ТНС із когенераційним приводом можна здійснити вибір найефективнішого пікового джерела теплоти для певного виду парокompресійних ТНС;

— запропоновані методичні основи можуть бути використані для оцінювання енергетичної ефективності парокompресійних ТНС з різними холодоагентами та схемними розв'язками ТНУ;

— дозволяє комплексно оцінювати енергетичну ефективність значної кількості варіантів парокompресійних ТНС із когенераційним приводом.

Для здійснення комплексної оцінки енергетичної ефективності різних варіантів ТНС із когенераційним приводом, крім вищенаведених підходів, пропонуємо використовувати результати досліджень [1, 6 – 12].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткаченко С. Й. Парокompресійні 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. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.14.06 «Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика» / Баласанян Геннадій Альбертович. – 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. Никитин Е. Е. Технико-экономическая эффективность воздушных тепловых насосов с приводом от газопоршневых когенерационных установок в системах горячего водоснабжения / Е. Е. Никитин // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2011. – № 4. – С. 19 – 24.
5. 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.
6. 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/article/view/3821/5562>.
7. 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/article/view/3976/5776>.
8. Остапенко О. П. Перспективи застосування теплонасосних станцій в Україні / О. П. Остапенко, О. В. Шевченко // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2011. – № 2. – С. 132 – 139.
9. Економічна ефективність теплонасосних станцій для систем теплопостачання [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, О. В. Шевченко // Наукові праці ВНТУ. – 2011. – № 4. – Режим доступу: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/1406/1004>.
10. 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/article/viewFile/3040/4626>.
11. 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/article/view/3448/5066>.
12. 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/article/view/3033/4605>.

Остапенко Ольга Павлівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики, olgaost@rambler.ru.

Вінницький національний технічний університет.