

О. П. Остапенко, к. т. н., доц.

## КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПАРОКОМПРЕСІЙНИХ ТЕПЛОНАСОСНИХ СТАНЦІЙ З ЕЛЕКТРИЧНИМ ПРИВОДОМ

*Запропоновано підхід із комплексного оцінювання енергетичної ефективності парокompресійних теплонасосних станцій (ТНС) з електричним приводом з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи ТНС, пікових джерел теплоти ТНС, джерел приводної енергії ТНС, а також з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.*

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

### Вступ

У світлі енергетичної кризи в Україні надзвичайно актуальним постає завдання ефективного споживання енергоресурсів і впровадження новітніх енергозберігальних технологій [1 – 2]. Однією з таких технологій є використання парокompресійних теплонасосних установок (ТНУ) з електричним приводом, це сприятиме економії паливно-енергетичних ресурсів і захисту навколишнього середовища. Упровадження теплонасосних станцій, де тепловий насос поєднано з піковим джерелом теплоти, забезпечить більший енерго-, ресурсоощадний та економічний ефекти. Цим зумовлена актуальність досліджень енергетичної ефективності теплонасосних станцій.

Питанням із дослідження енергетичної ефективності парокompресійних ТНС за останні роки присвячено низку публікацій [1 – 12]. У роботі [1] автором виконані дослідження з підвищення ефективності та вибору раціональних параметрів і режимів роботи теплонасосних станцій для систем опалення та теплопостачання за витратою умовного палива. У [2] проведено термодинамічний та ексергетичний аналіз ефективності парокompресійного циклу теплонасосної станції теплопостачання. Авторами в дослідженні [3] проаналізовано термодинамічну ефективність теплонасосних станцій теплопостачання. У дослідженні [4] запропоновано новий підхід до оцінки ефективності теплових насосів. Термодинамічний аналіз різних типів ТНУ проведено в дослідженні [5]. Проте в дослідженнях [1 – 5] не враховані втрати енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ від електростанцій різних типів. 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] визначені енергетичні та економічні передумови ефективної інтеграції ТНС у системи теплопостачання промислових підприємств і підприємств муніципальної енергетики в Україні. У роботі [10] оцінено енергетичну, екологічну та економічну ефективність ТНС з різними видами приводу компресора на природних і 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 та промислових джерелах низькотемпературної теплоти за умови змінних режимів роботи систем теплопостачання.

У роботах [1 – 12] авторами не здійснено комплексну оцінку енергетичної ефективності парокompресійних ТНС з електричним приводом з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи ТНС, пікових джерел теплоти ТНС, джерел приводної енергії парокompресійних ТНС, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

**Метою дослідження** є розроблення методичних основ та здійснення комплексної оцінки енергетичної ефективності парокompресійних теплонасосних станцій з електричним приводом з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи ТНС, пікових джерел теплоти ТНС, джерел приводної енергії парокompресійних ТНС, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

### Основна частина

У дослідженні здійснено комплексну оцінку енергетичної ефективності парокompресійних ТНС з ТНУ малої (до 1 МВт) та великої потужностей з електричним приводом. Дослідження проводили для випадків використання в електроприводних ТНУ електроенергії від електростанцій різних типів, а також для усереднених значень ККД електростанцій в Україні. Схеми зазначених ТНС наведені в роботі [8].

Енергетичну ефективність ТНС значною мірою визначають оптимальним розподілом навантаження 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  $\beta$ , яка визначається як відношення теплової потужності ТНУ до потужності ТНС  $\beta = Q_{\text{ТНУ}}/Q_{\text{ТНС}}$ .

На основі аналізу результатів проведених досліджень [10 – 12] визначені оптимальні значення показника  $\beta$  для ТНС з електроприводом 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  $\beta$ . Результати досліджень енергетичної ефективності ТНС з електричним 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 з електричним 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 з електричним приводом.

Запропоновано здійснювати комплексну оцінку енергетичної ефективності парокompресійних ТНС з електричним приводом за комплексним безрозмірним критерієм енергетичної ефективності ТНС:

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

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

Безрозмірний критерій енергетичної ефективності парокompресійних ТНУ з електричним приводом  $K_{\text{ТНУ}}$  запропоновано у дослідженні [6]. 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.

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

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

де  $Q_T$  – потужність, витрачена на електростанції для вироблення електричної енергії для привода ТНУ,  $\eta_{ЕЛ}$  – загальний ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії з [6],  $\varphi$  – коефіцієнт перетворення парокompресійних ТНУ,  $\eta_{ТП}$  – ККД теплового потоку, що враховує втрати енергії та робочого агента в трубопроводах та обладнанні ТНУ.

Значення загального ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ з електроприводом, згідно з [6], може бути визначене:

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

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],  $\eta_{ЕП}$  – ККД електричного двигуна з урахуванням втрат енергії в блоці управління двигуном з [6].

За умови  $K_{ТНУ} = 1$  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 електричним приводом за безрозмірним показником енергетичної ефективності ТНУ  $K_{ТНУ}$  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.

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

$$K_{ПДТ} = Q_{ЕК} / Q_T = \eta_{ЕЛ}^{\kappa} \cdot \eta_{ЕК}, \quad (4)$$

де  $Q_{ЕК}$  – теплова потужність водогрійного електрокотла, яка може бути визначена як:  $Q_{ЕК} = Q_{ТНС} - Q_{ТНУ}$ ;  $Q_T$  – потужність, витрачена на електростанції для вироблення електричної енергії,  $\eta_{ЕЛ}^{\kappa}$  – загальний ККД генерування та постачання електричної енергії до електрокотла, який визначають за формулою:  $\eta_{ЕЛ}^{\kappa} = \eta_{ЕС} \cdot \eta_{ЛЕП}$ ,  $\eta_{ЕК}$  – ККД електричного котла.

Тоді безрозмірний критерій енергетичної ефективності електрокотла як пікового джерела теплоти для ТНС визначатимемо:

$$K_{ПДТ} = \eta_{ЕС} \cdot \eta_{ЛЕП} \cdot \eta_{ЕК}. \quad (5)$$

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 «Джерело електричної енергії та палива – паливний котел – спо-

живач 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).

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

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

де  $Q_{\text{ПК}}$  – теплова потужність водогрійного паливного котла, яка може бути визначена як:  $Q_{\text{ПК}} = Q_{\text{ТНС}} - Q_{\text{ТНУ}}$ ;  $Q_{\text{П}}$  – потужність, витрачена для вироблення теплової енергії від спалювання палива в котлі,  $\eta_{\text{ПК}}$  – 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  $K_{\text{ПДТ}}$  дорівнюватиме ККД альтернативного пікового джерела теплоти  $\eta_{\text{АПДТ}}$  або ККД додаткової системи з альтернативним піковим джерелом теплоти  $\eta_{\text{АПДТ}}^c$ .

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

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

- дозволяє оцінювати комплексний вплив змінних режимів роботи ТНС, пікових джерел теплоти ТНС, джерел приводної енергії парокompресійних електроприводних ТНС 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 з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНС;
- урахує енергетичну ефективність парокompресійних ТНС різних рівнів потужностей з електричним 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 електроприводних ТНС 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 рішеннями ТНУ;
- дозволяє комплексно оцінювати енергетичну ефективність значної кількості варіантів парокompресійних ТНС з електричним приводом.

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

На рис. 1 – 3 показані результати комплексної оцінки енергетичної ефективності ТНС малої потужності з електричним приводом. Тут показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС з електричним приводом  $K_{\text{ТНС}}$  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 електричним приводом  $K_{\text{ТНУ}}$ , згідно з дослідженням [6], визначені для значень дійсного коефіцієнта перетворення ТНУ в діапазоні  $\varphi_d = 0,6 \dots 6,0$ . Піковим джерелом теплоти ТНС для цих умов передбачена електрична котельня з  $\eta_{\text{ЕК}} = 0,95$ . Згідно з [6], ураховано значення ККД розподільчих електричних мереж в Україні  $\eta_{\text{ЛЕП}} = 0,875$ .

На рис. 1 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з електричним приводом за умови споживання електроенергії з енергосистеми України. У цьому дослідженні, згідно з [6], ураховані: усереднене значення ККД електростанцій в Україні  $\eta_{\text{ЕС}} = 0,383$  та значення загального ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ малої потужності з електроприводом  $\eta_{\text{ЕЛ}} = 0,268$ .

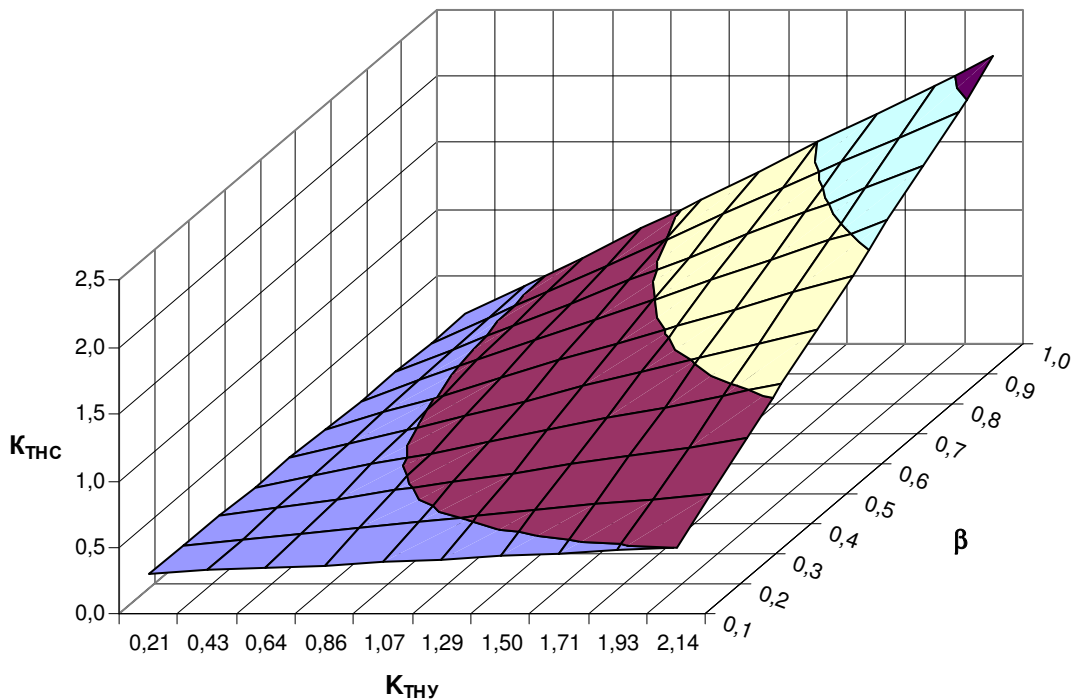


Рис. 1. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з електричним приводом для випадків змінного навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії з енергосистеми України

На рис. 2 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з електричним приводом за умови споживання електроенергії від ПГУ. Згідно з [6], у цьому дослідженні враховані: значення ККД ПГУ  $\eta_{\text{ЕС}} = \eta_{\text{ПГУ}} = 0,55$  та значення загального ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ малої потужності з електроприводом  $\eta_{\text{ЕЛ}} = 0,385$ .

На рис. 3 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з електричним приводом за умови споживання електроенергії від ГТУ. У цьому дослідженні, згідно з [6], ураховані: значення ККД ГТУ  $\eta_{\text{ЕС}} = \eta_{\text{ГТУ}} = 0,33$  та значення загального ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ малої потужності з електроприводом  $\eta_{\text{ЕЛ}} = 0,231$ .

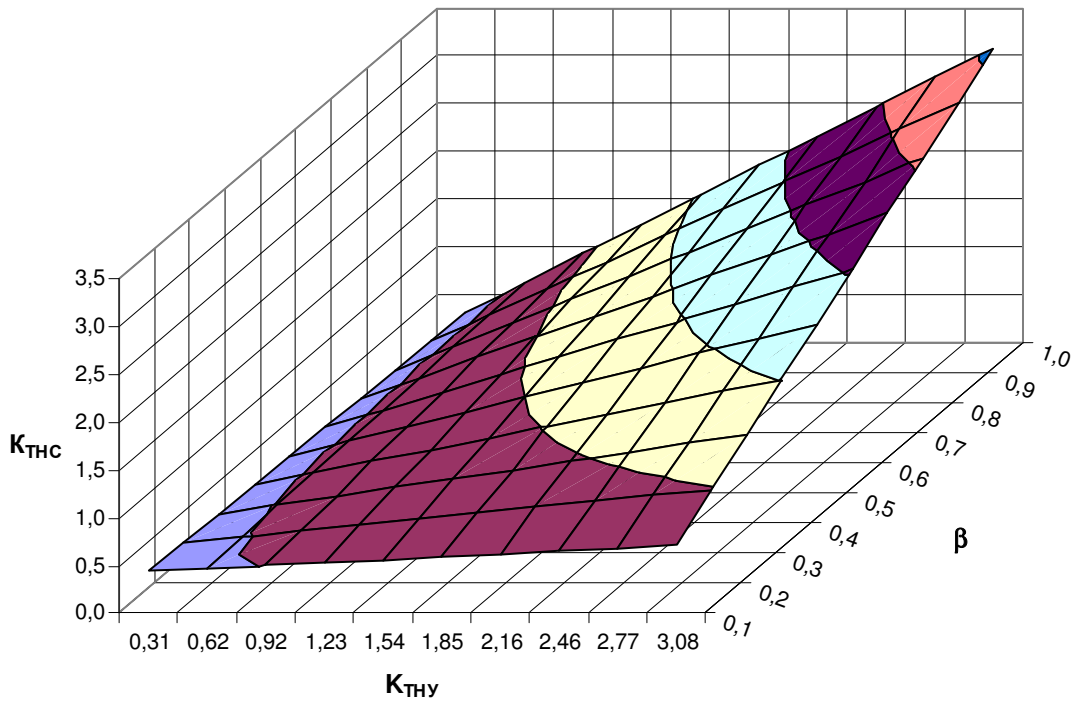


Рис. 2. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з електричним приводом для випадків змінного навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії від ПГУ

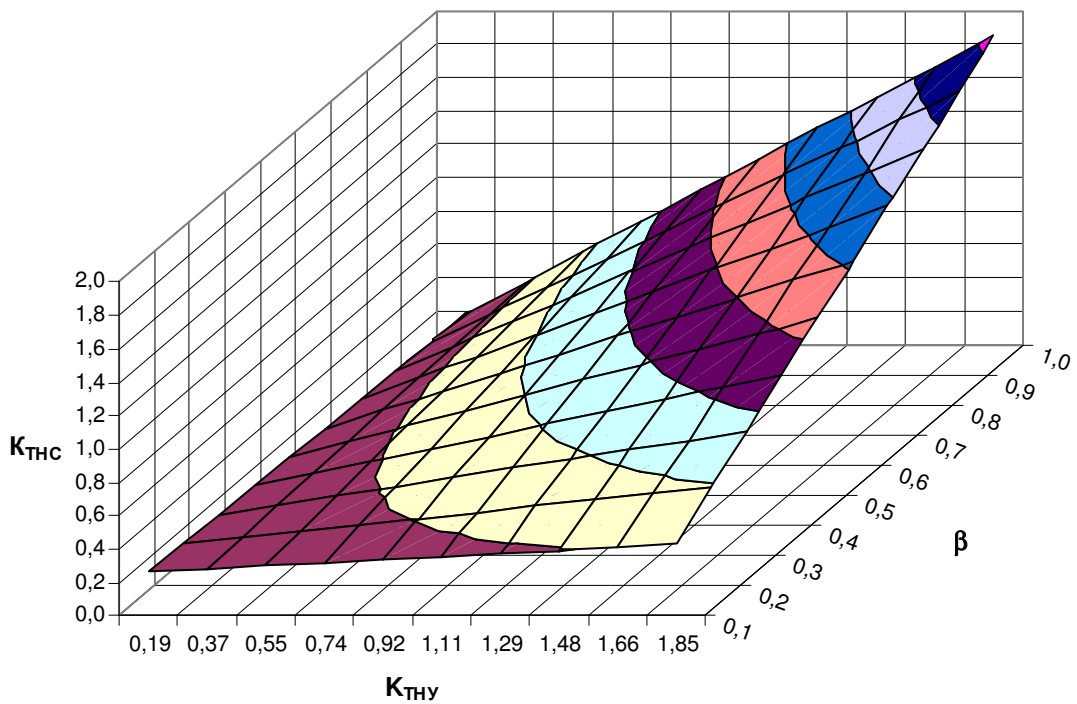


Рис. 3. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з електричним приводом для випадків змінного навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії від ГТУ

На рис. 4 – 6 показані результати комплексної оцінки енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом. Тут показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС з електричним приводом  $K_{THC}$  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 елек-

тричним приводом  $K_{THV}$ , згідно з дослідженням [6], визначені для значень дійсного коефіцієнта перетворення ТНУ в діапазоні  $\varphi_d = 0,68 \dots 6,75$ . Піковим джерелом теплоти ТНС для цих умов передбачена водогрійна паливна котельня з  $\eta_{ПК} = 0,85$ . Згідно з [6], ураховано значення ККД розподільчих електричних мереж в Україні  $\eta_{ЛЕП} = 0,875$ .

На рис. 4 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом за умови споживання електроенергії з енергосистеми України. У цьому дослідженні, згідно з [6], ураховані: усереднене значення ККД електростанцій в Україні  $\eta_{ЕС} = 0,383$  та значення загального ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ великої потужності з електроприводом  $\eta_{ЕЛ} = 0,301$ .

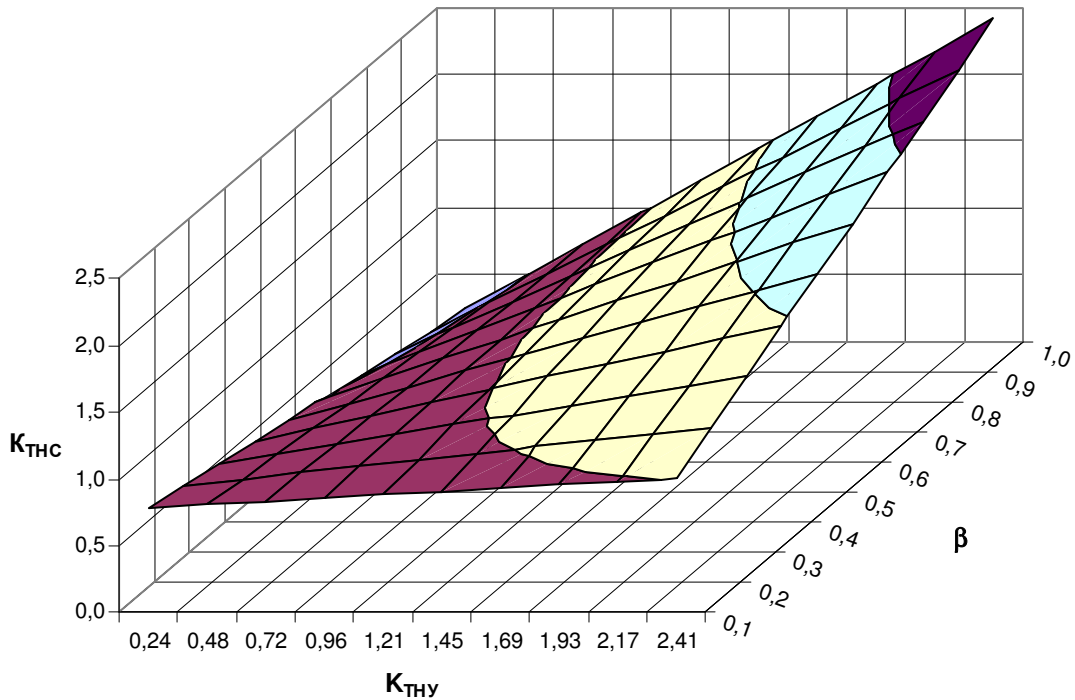


Рис. 4. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом для випадків змінного навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії з енергосистеми України

На рис. 5 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом за умови споживання електроенергії від ПГУ. Згідно з [6], у цьому дослідженні враховані: значення ККД ПГУ  $\eta_{ЕС} = \eta_{ПГУ} = 0,55$  та значення загального ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ великої потужності з електроприводом  $\eta_{ЕЛ} = 0,433$ .

На рис. 6 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом за умови споживання електроенергії від ГТУ. У цьому дослідженні, згідно з [6], ураховані: значення ККД ГТУ  $\eta_{ЕС} = \eta_{ГТУ} = 0,33$  та значення загального ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ великої потужності з електроприводом  $\eta_{ЕЛ} = 0,26$ .

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

На рис. 7 – 9 показані результати комплексної оцінки енергетичної ефективності ТНС малої потужності з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ Наукові праці ВНТУ, 2015, № 2

$\beta$ . Тут показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС з електричним 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 електроприводом  $K_{ТНУ}$  відповідають значенням дійсного коефіцієнта перетворення ТНУ в межах  $\varphi_d = 0,6 \dots 6,0$ . Піковим джерелом теплоти ТНС для цих умов передбачена електрична котельня з  $\eta_{ЕК} = 0,95$ . Згідно з [6], ураховано значення ККД розподільчих електричних мереж в Україні  $\eta_{ЛЕП} = 0,875$ .

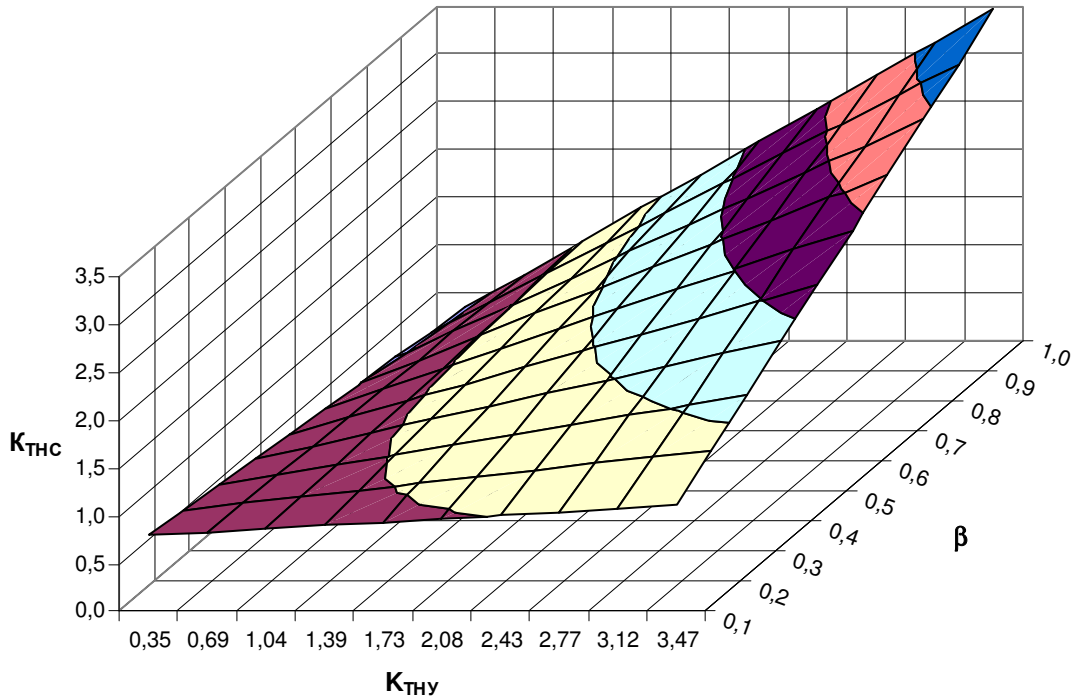


Рис. 5. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом для випадків змінного навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії від ПГУ

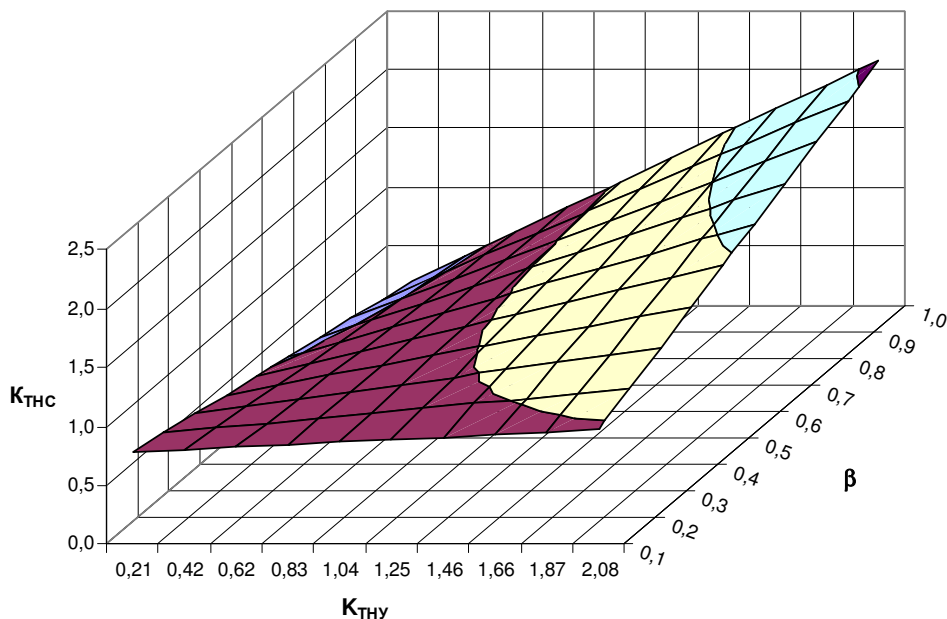




Рис. 6. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом для випадків змінного навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії від ГТУ

На рис. 7 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ  $\beta$  за умови споживання електроенергії з енергосистеми України. У цьому дослідженні, згідно з [6], ураховані: усереднене значення ККД електростанцій в Україні  $\eta_{EC} = 0,383$  та значення загального ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ малої потужності з електроприводом  $\eta_{EЛ} = 0,268$ .

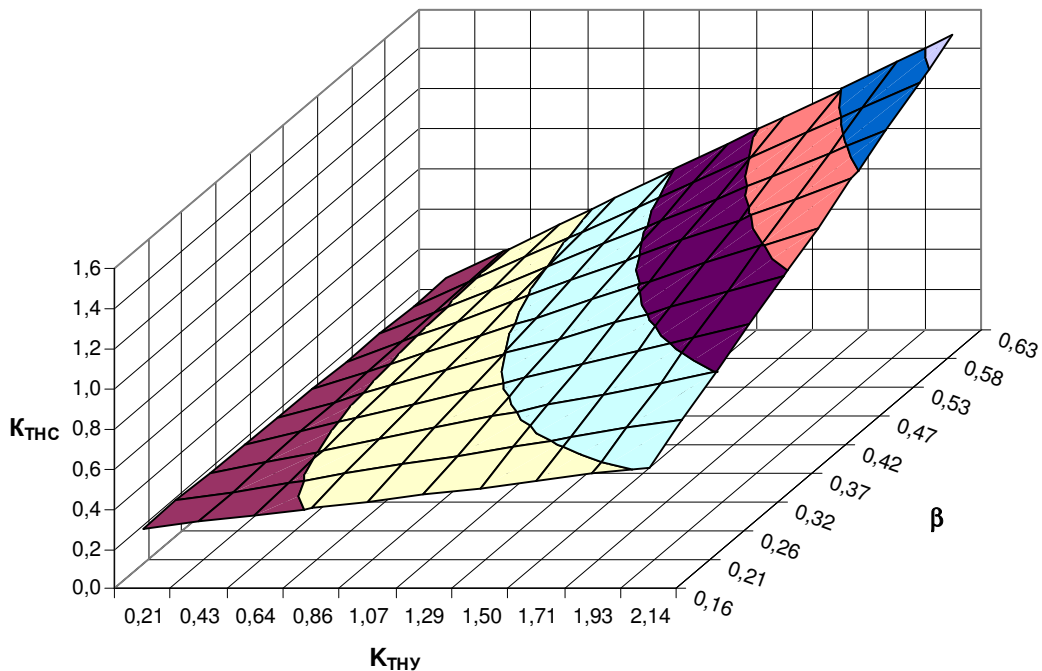


Рис. 7. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії з енергосистеми України

На рис. 8 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ  $\beta$  за умови споживання електроенергії від ПГУ. Згідно з [6], у цьому дослідженні враховані: значення ККД ПГУ  $\eta_{EC} = \eta_{ПГУ} = 0,55$  та значення загального ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ малої потужності з електроприводом  $\eta_{EЛ} = 0,385$ .

На рис. 9 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ  $\beta$  за умови споживання електроенергії від ГТУ. У цьому дослідженні, згідно з [6], ураховані: значення ККД ГТУ  $\eta_{EC} = \eta_{ГТУ} = 0,33$  та значення загального ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ малої потужності з електроприводом  $\eta_{EЛ} = 0,231$ .

На рис. 10 – 12 показані результати комплексної оцінки енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ  $\beta$ . Тут показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС з електричним приводом  $K_{TNS}$  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 теплопостачання. Значення критерію енергетичної ефективності ТНУ з електроприводом  $K_{ТНУ}$  відповідають значенням дійсного коефіцієнта перетворення ТНУ в межах  $\varphi_d = 0,68 \dots 6,75$ . Піковим джерелом теплоти ТНС для цих умов передбачена водогрійна паливна котельня з  $\eta_{ПК} = 0,85$ . Згідно з [6], ураховано значення ККД розподільчих електричних мереж в Україні  $\eta_{ЛЕП} = 0,875$ .

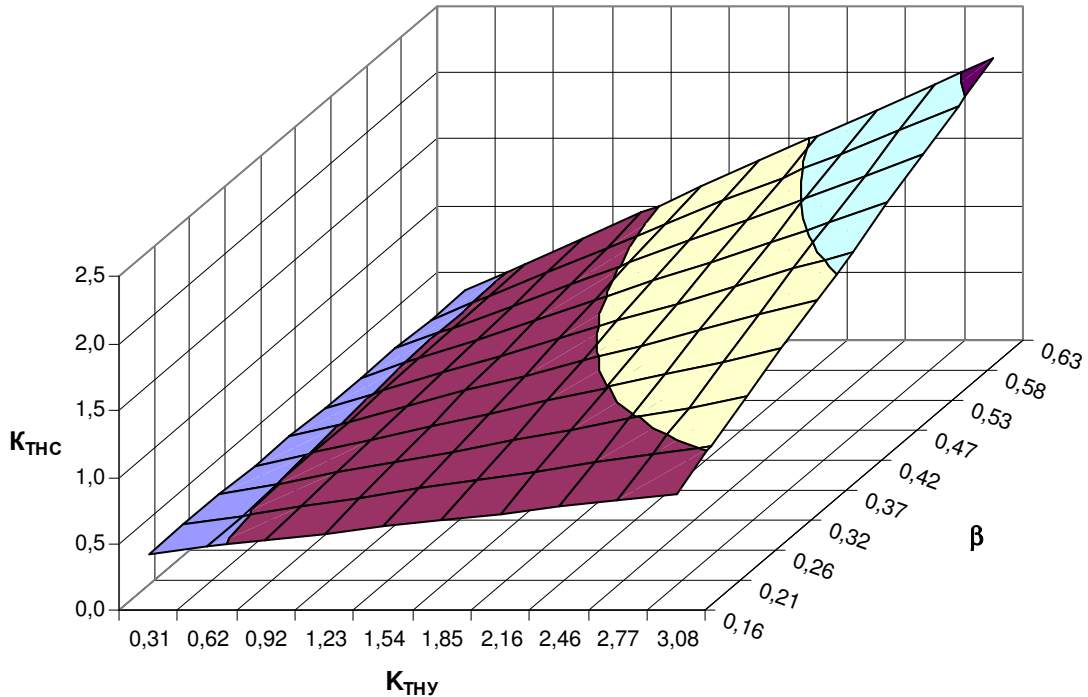


Рис. 8. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії від ПГУ

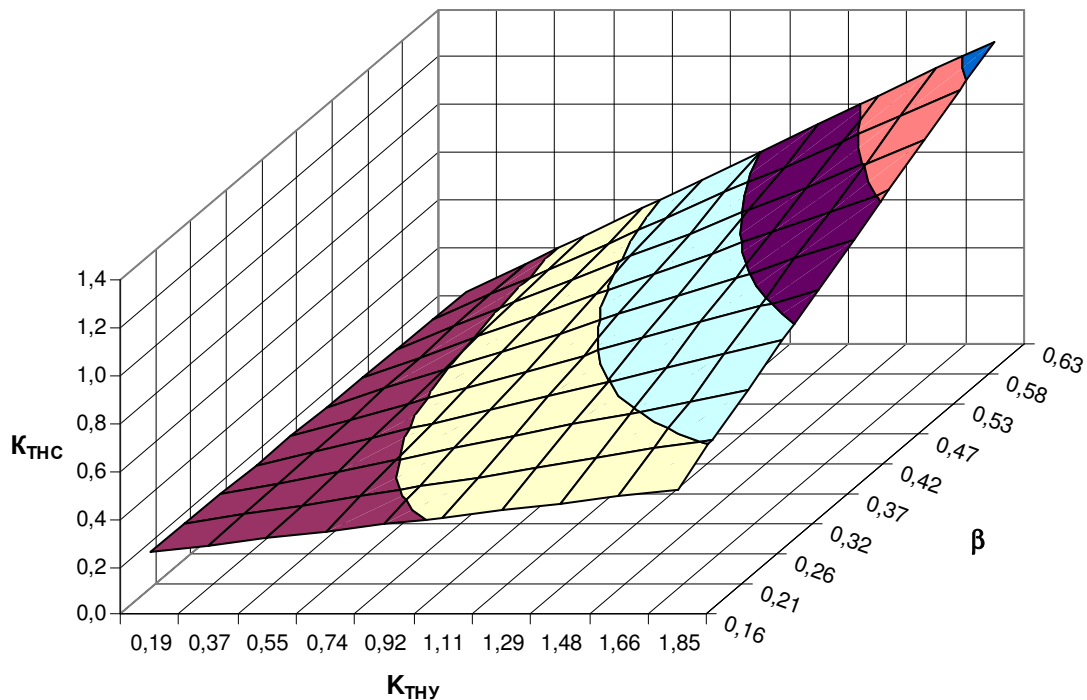


Рис. 9. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з електричним приводом. Наукові праці ВНТУ, 2015, № 2

водом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії від ГТУ

На рис. 10 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ  $\beta$  за умови споживання електроенергії з енергосистеми України. У цьому дослідженні, згідно з [6], ураховані: усереднене значення ККД електростанцій в Україні  $\eta_{EC} = 0,383$  та значення загального ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ великої потужності з електроприводом  $\eta_{EL} = 0,301$ .

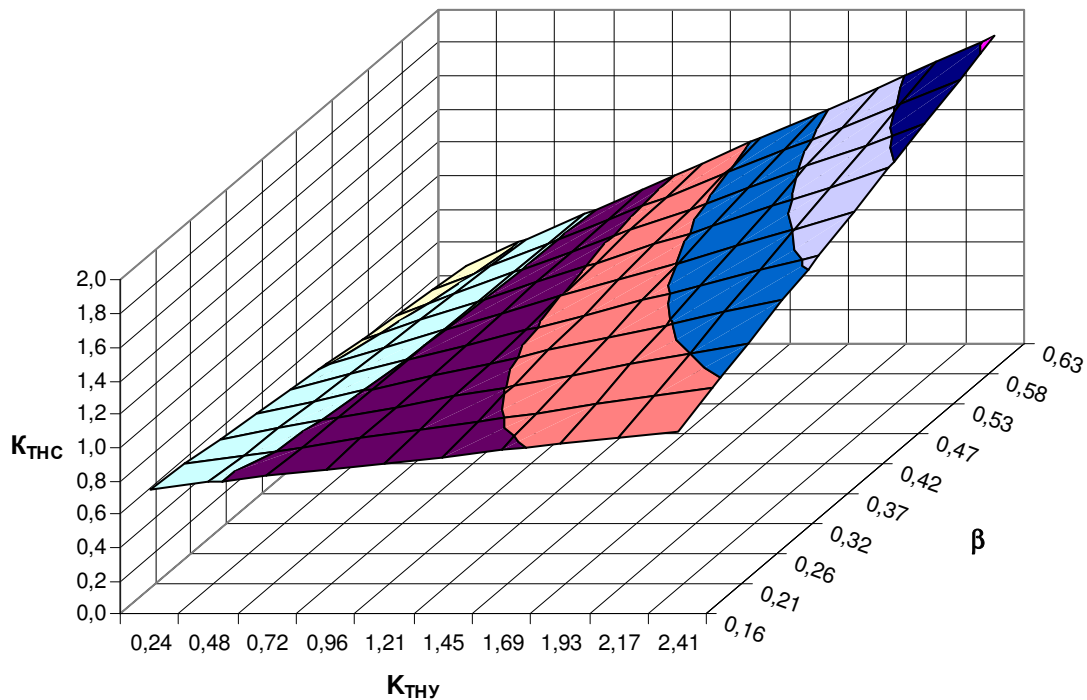


Рис. 10. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії з енергосистеми України

На рис. 11 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ  $\beta$  за умови споживання електроенергії від ПГУ. Згідно з [6], у цьому дослідженні враховані: значення ККД ПГУ  $\eta_{EC} = \eta_{ПГУ} = 0,55$  та значення загального ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ великої потужності з електроприводом  $\eta_{EL} = 0,433$ .

На рис. 12 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ  $\beta$  за умови споживання електроенергії від ГТУ. У цьому дослідженні, згідно з [6], ураховані: значення ККД ГТУ  $\eta_{EC} = \eta_{ГТУ} = 0,33$  та значення загального ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНУ великої потужності з електроприводом  $\eta_{EL} = 0,26$ .

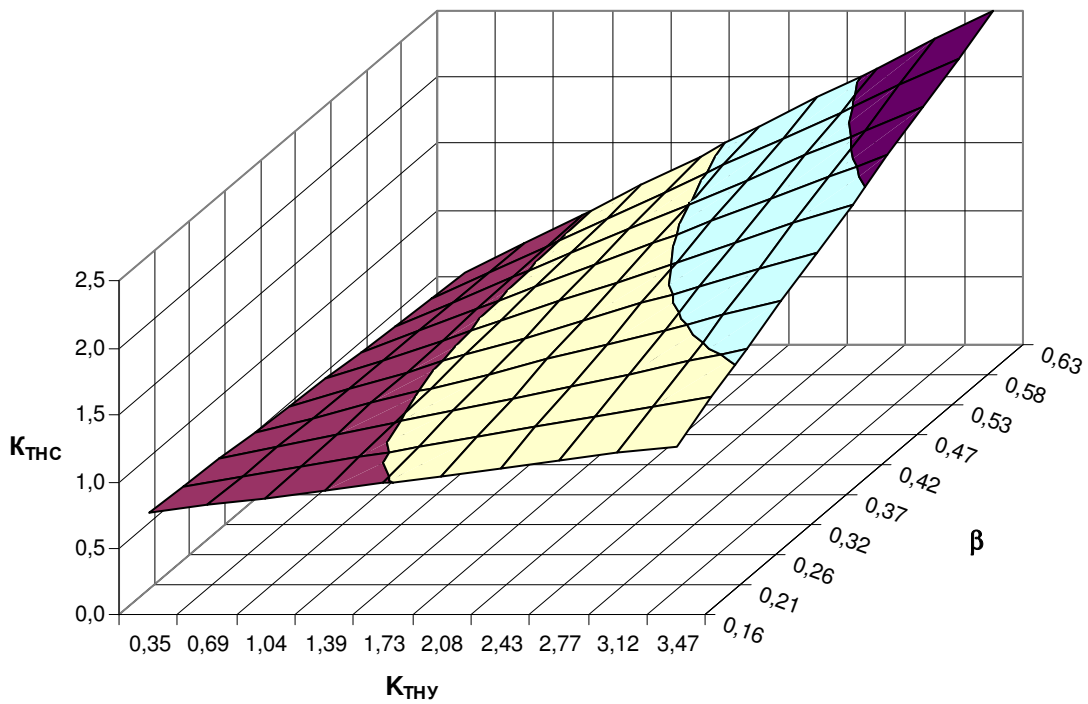


Рис. 11. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії від ПГУ

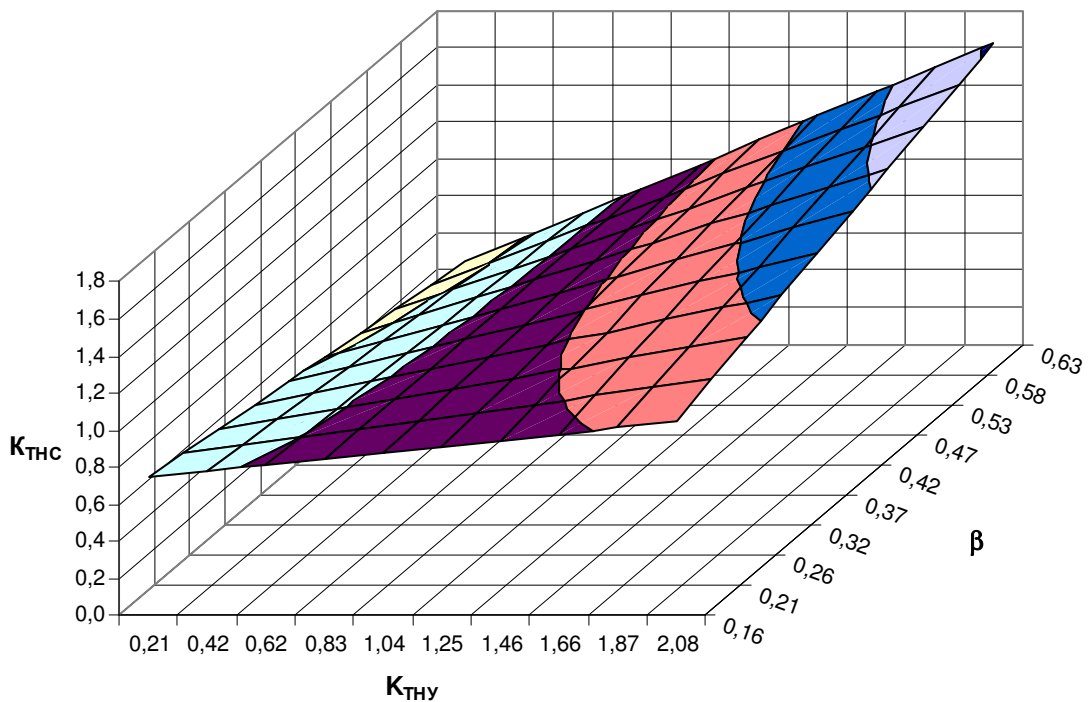


Рис. 12. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії від ГТУ

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

### Висновки

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

Розроблено методичні основи та здійснено комплексну оцінку енергетичної ефективності парокompресійних ТНС з електричним приводом з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи ТНС, пікових джерел теплоти ТНС, джерел приводної енергії парокompресійних ТНС, з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворенні електричної енергії.

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

- дозволяє оцінювати комплексний вплив змінних режимів роботи ТНС, пікових джерел теплоти ТНС, джерел приводної енергії парокompресійних електроприводних ТНС 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 з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТНС;
- урахує енергетичну ефективність парокompресійних ТНС різних рівнів потужностей з електричним 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 електроприводних ТНС 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 рішеннями ТНУ;
- дозволяє комплексно оцінювати енергетичну ефективність значної кількості варіантів парокompресійних ТНС з електричним приводом.

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

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Исанова А. В. Повышение эффективности и выбор рациональных параметров и режимов работы теплонасосных станций для систем отопления и горячего водоснабжения : автореферат дисс. ... канд. тех. наук : 05.23.03 спец. 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» / А. В. Исанова. – Воронеж, 2011. – 18 с.
2. Денисова А. Є. Аналіз парокompресійного циклу теплонасосних станцій теплопостачання / А. Є. Денисова., В. Ю. Бірюк // Тр. Одес. политехн. ун-та., 2012. – Вып.1 (38). – С. 125 – 128.
3. Безродний М. К. Термодинамічна ефективність теплонасосних схем теплопостачання / М. К. Безродний, Н. О. Притула // Вісник ВПІ. – 2013. – № 3. – С. 39 – 45.
4. Ильин Р. А. Новый подход к оценке эффективности тепловых насосов / Р. А. Ильин, А. К. Ильин // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. – 2010. – № 2. – С. 83 – 87.
5. Елистратов С. Л. Комплексное исследование эффективности тепловых насосов : дисс. ... докт. техн. наук : 01.04.14 / Елистратов Сергей Львович. – Новосибирск, 2010. – 383 с.
6. Енергетична ефективність парокompресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводом // Наукові праці ВНТУ, 2015, № 2

дами [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, В. В. Лещенко, Р. О. Тіхоненко // Наукові праці ВНТУ. – № 4. – 2014. – 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. Ткаченко С. Й. Парокompресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2009. – 176 с.

9. 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.

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 кафедри теплоенергетики, [olgaost@ Rambler.ru](mailto:olgaost@ Rambler.ru).

Вінницький національний технічний університет.