

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 β , 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 β 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 β . 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], φ – 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:

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

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, $\eta_{ЕЛ}^к$ – загальний ККД генерування та постачання електричної енергії до електрокотла, який визначають за формулою: $\eta_{ЕЛ}^к = \eta_{ЕС} \cdot \eta_{ЛЕП}$, $\eta_{ЕК}$ – 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 $\eta_{\text{ЕЛ}} = 0,268$.

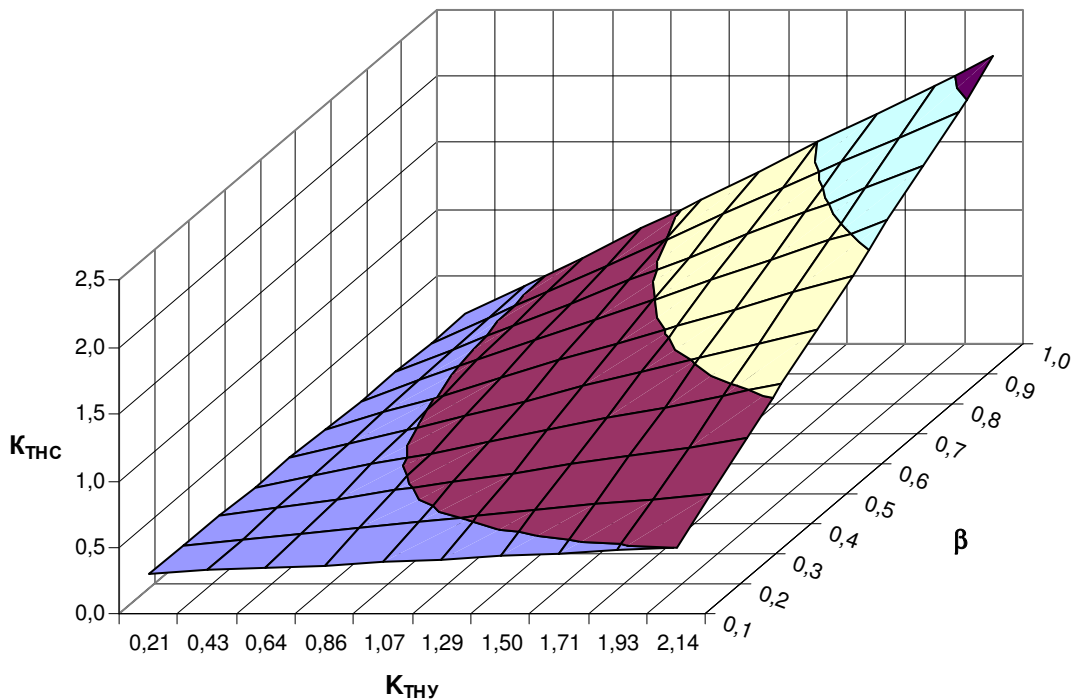


Рис. 1. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з електричним приводом для випадків змінного навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії з енергосистеми України

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 $\eta_{\text{ЕЛ}} = 0,231$.

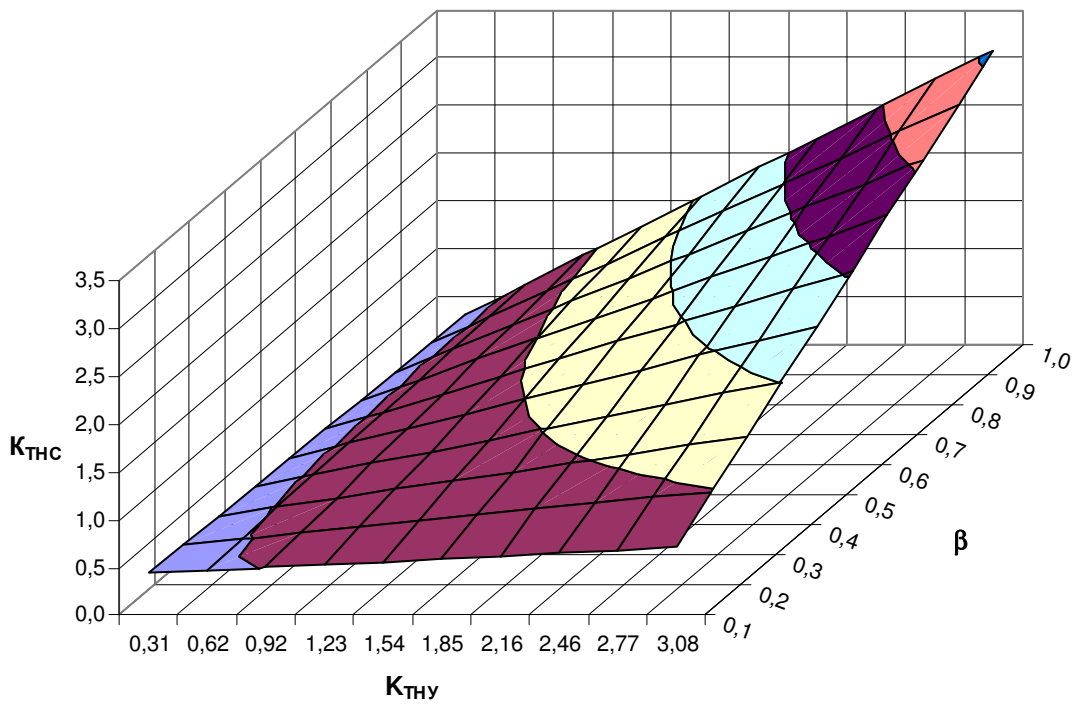


Рис. 2. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з електричним приводом для випадків змінного навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії від ПГУ

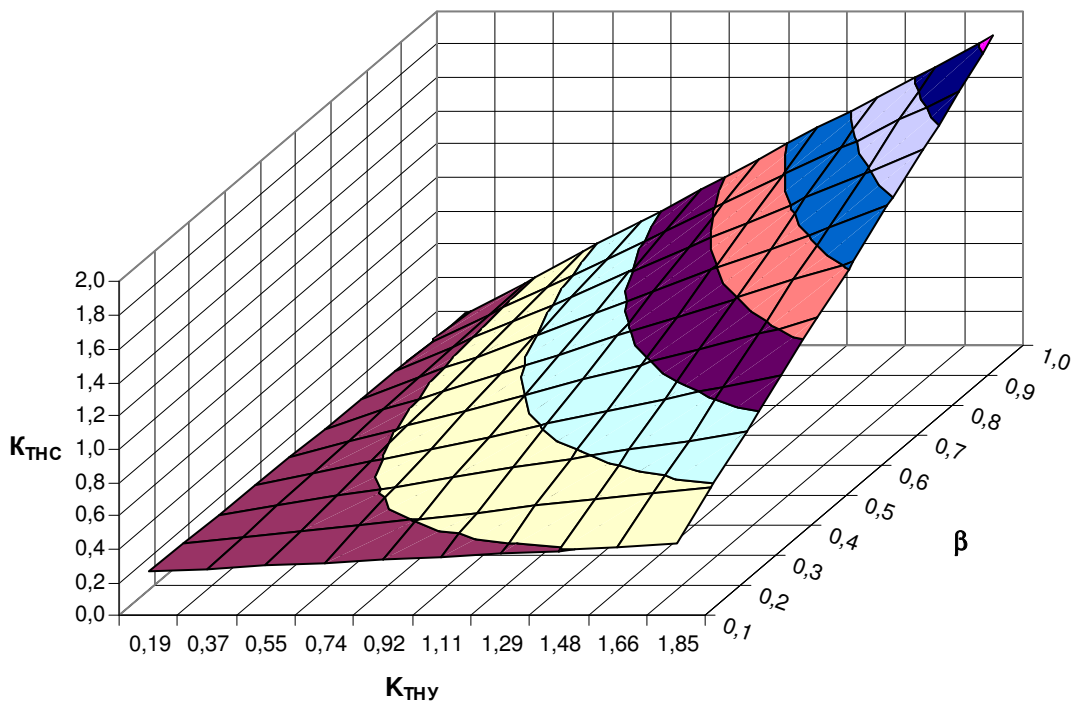


Рис. 3. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з електричним приводом для випадків змінного навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії від ГТУ

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 $\varphi_d = 0,68...6,75$. 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 $\eta_{ЕЛ} = 0,301$.

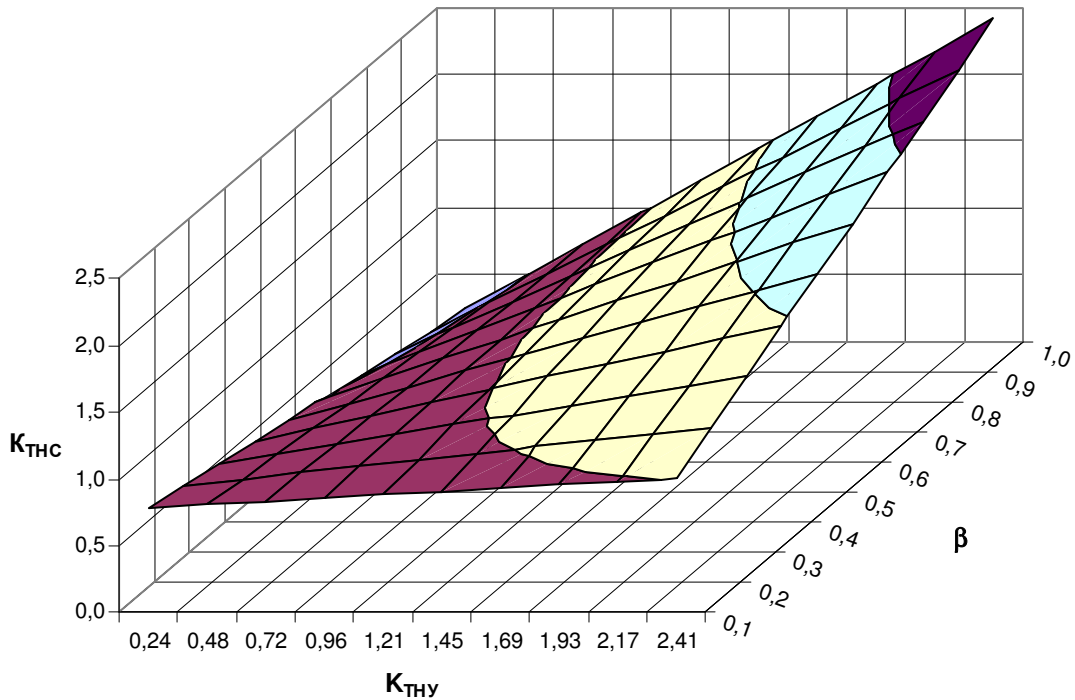


Рис. 4. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом для випадків змінного навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії з енергосистеми України

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 β 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

β . 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 $\eta_{ЛЕП} = 0,875$.

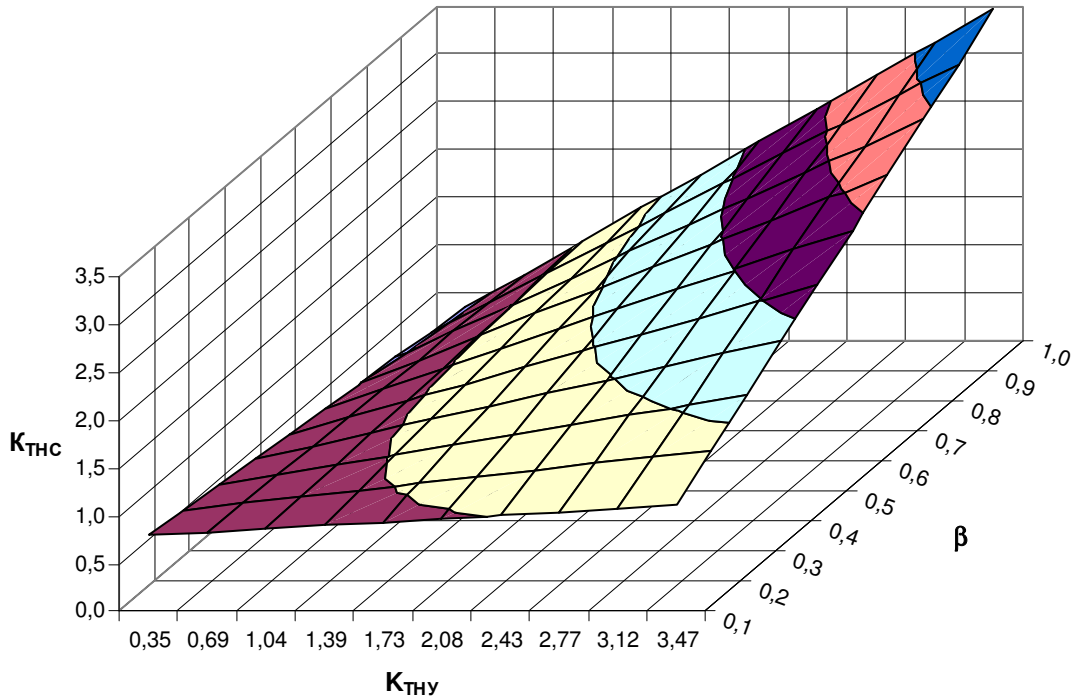


Рис. 5. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом для випадків змінного навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії від ПГУ

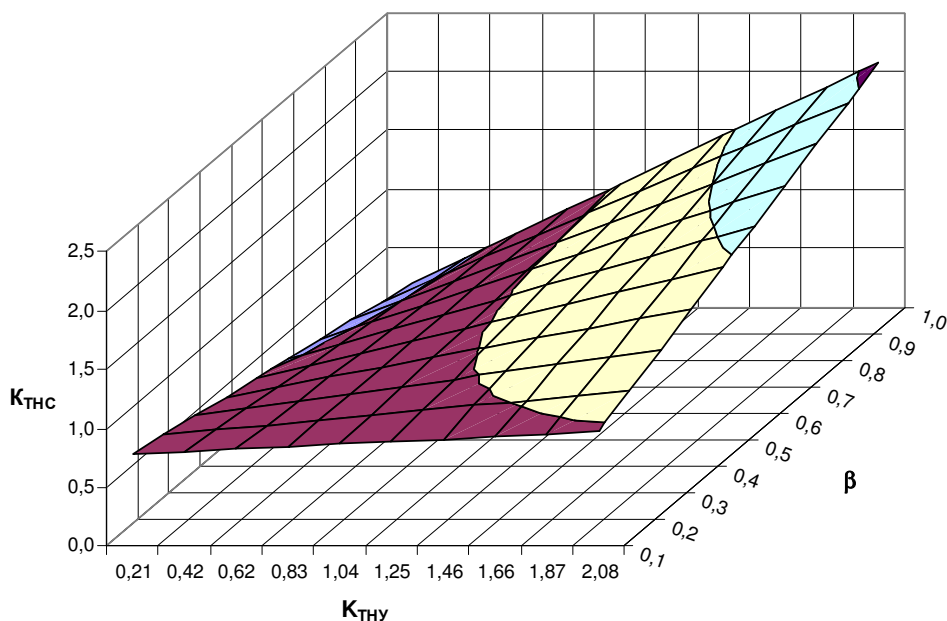


Рис. 6. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом для випадків змінного навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії від ГТУ

На рис. 7 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ β 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 $\eta_{EЛ} = 0,268$.

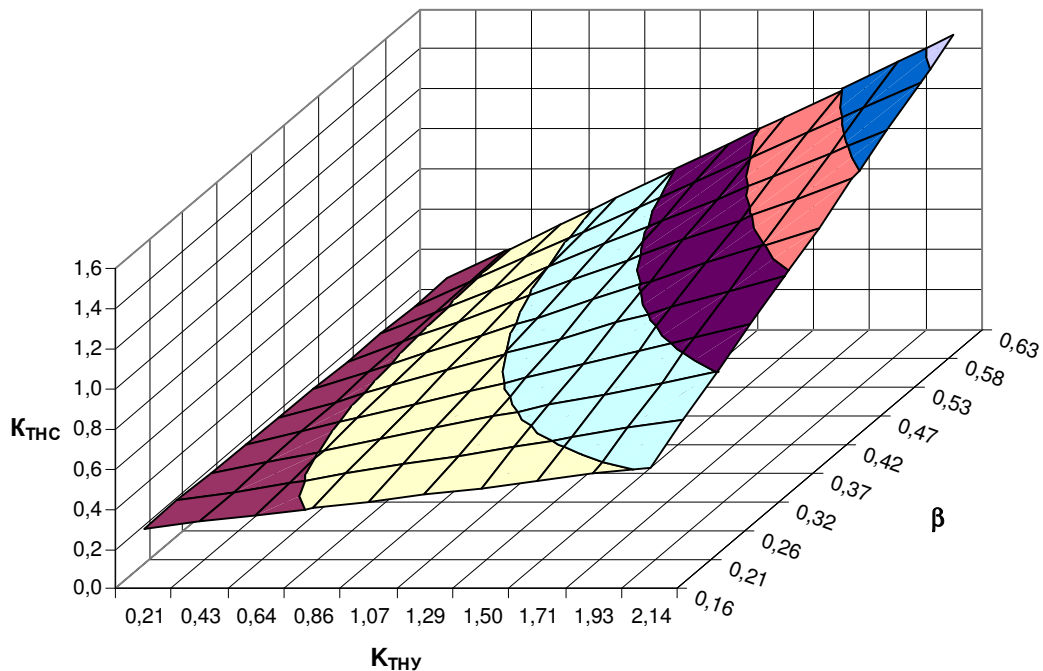


Рис. 7. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії з енергосистеми України

На рис. 8 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ β 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 β 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 β . 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 $\eta_{ЛЕП} = 0,875$.

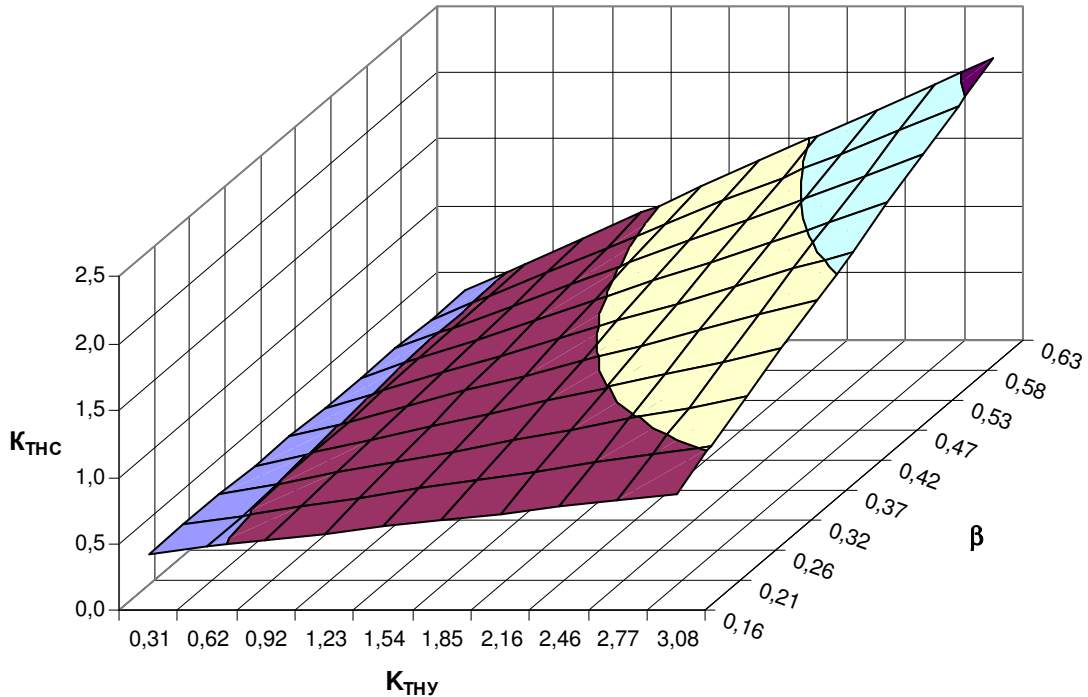


Рис. 8. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії від ПГУ

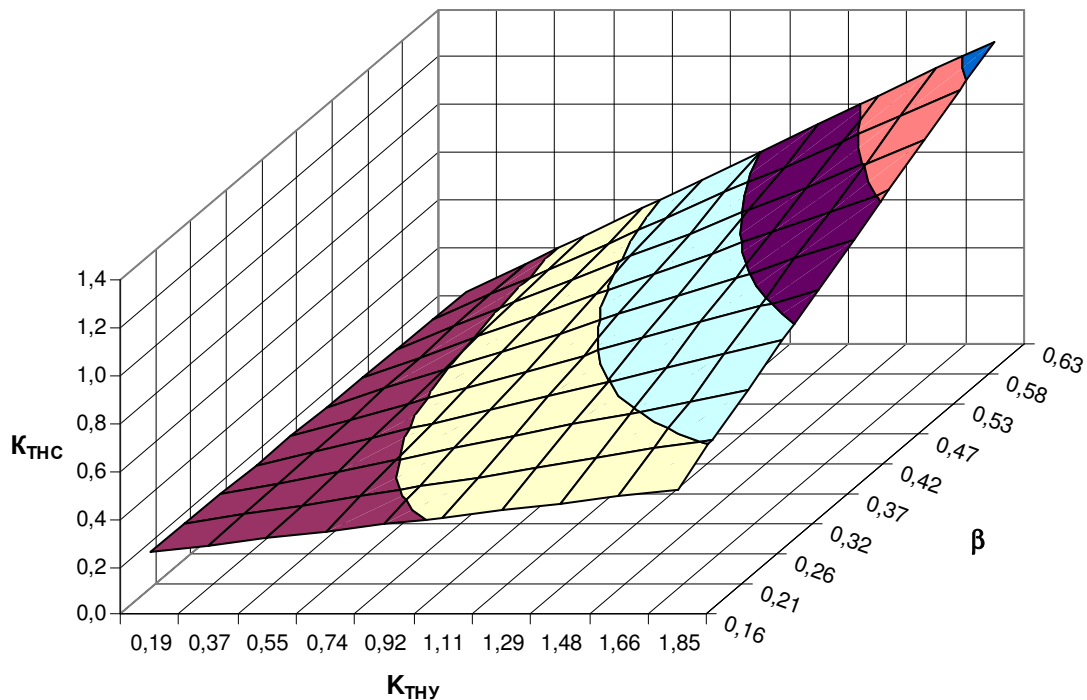


Рис. 9. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС малої потужності з електричним приводом. Наукові праці ВНТУ, 2015, № 2

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 β 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 $\eta_{ЕЛ} = 0,301$.

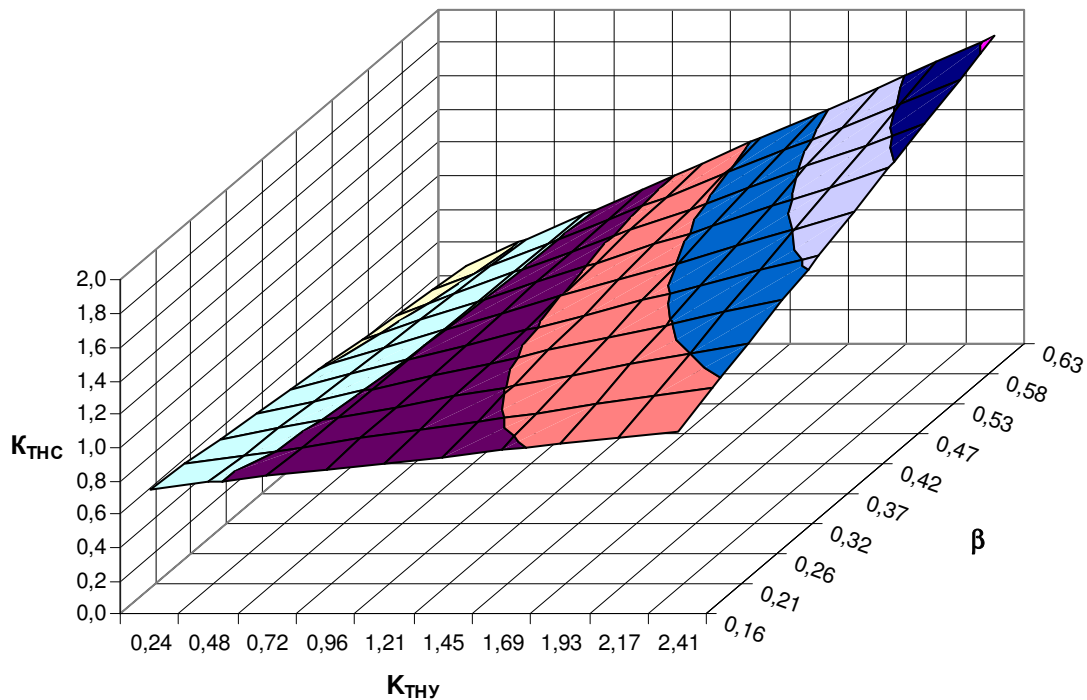


Рис. 10. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії з енергосистеми України

На рис. 11 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ β 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. 12 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ β 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 $\eta_{ЕЛ} = 0,26$.

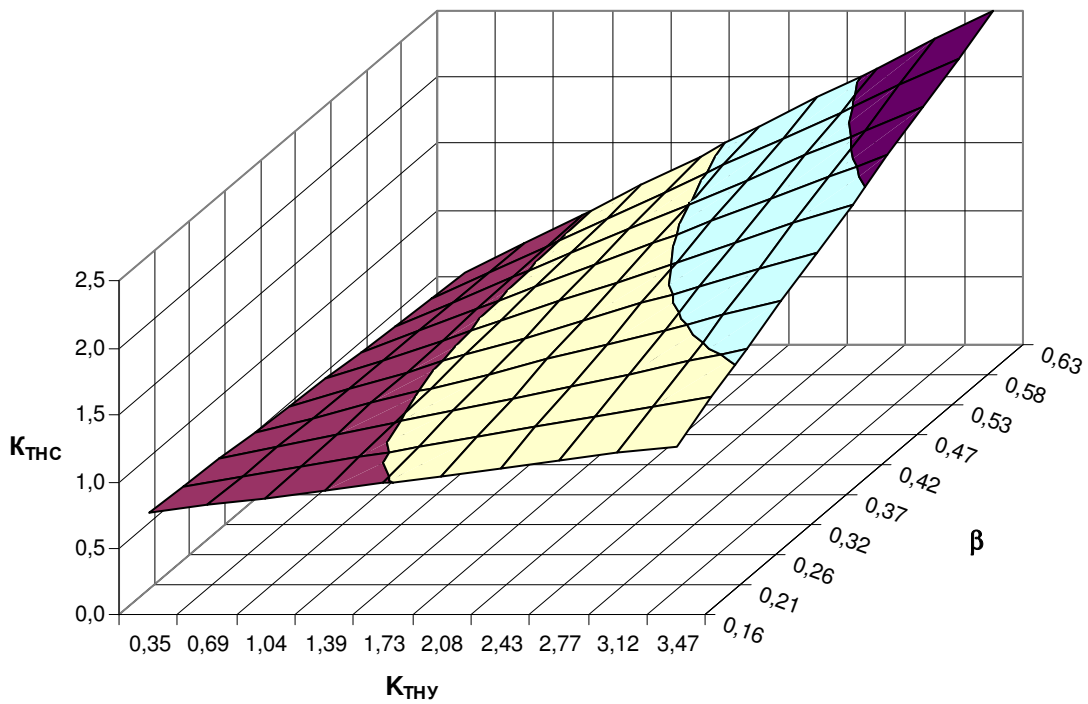


Рис. 11. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії від ПГУ

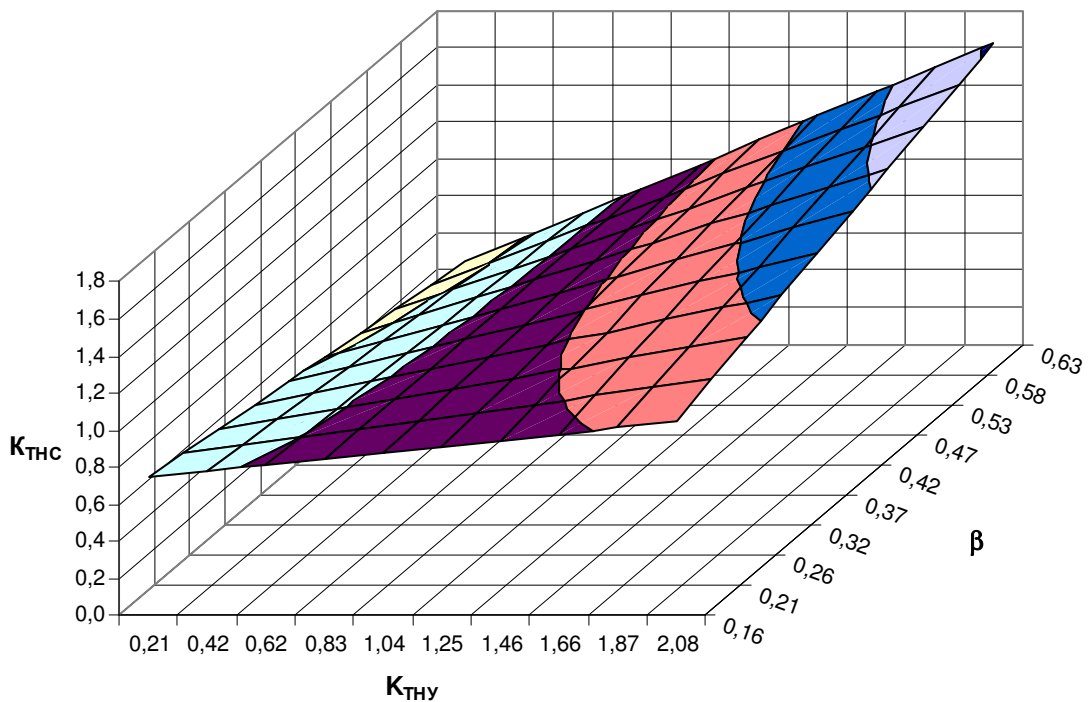


Рис. 12. Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ за умови споживання електроенергії від ГТУ

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 парокомпресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводами [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, В. В. Лещенко, Р. О. Тіхоненко // Наукові праці ВНТУ. – 2015. – № 1. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3976/5776>.

8. Ткаченко С. Й. Парокомпресійні 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.

Вінницький національний технічний університет.

O. Ostapenko, Cand. Sc. (Eng.), Assis. Professor

COMPLEX EVALUATION OF ENERGY EFFICIENCY OF STEAM COMPRESSOR HEAT PUMP PLANTS WITH ELECTRIC DRIVE

The paper considers the suggested approach, dealing with complex evaluation of energy efficiency of steam compressor heat pump plants (HPP) with electric drive, taking into account complex impact of variable operation modes of HPP, peak sources of HPP heat, sources of HPP drive energy, taking into consideration energy losses in the process of generation, supply and conversion of electric energy.

Kew words: complex evaluation, energy efficiency, heat pump plant, dimensionless criterion of energy efficiency, electric drive.

Introduction

As a result of energy crisis, occurring in Ukraine, the problem of efficient consumption of energy resources and introduction of up-to-date energy saving technologies becomes very urgent [1-2]. One of such technologies is the usage of steam compressor heat pump installations (HPI) with electric drive, that will promote the economy of fuel-energy resources and protection of the environment. Introduction of heat pump plants, where heat pump is combined with peak source of heat, will produce greater energy, resource saving and economic effect. That is why, the studies of energy efficiency of heat pump installations are very actual.

A number of publications, studying the problems of energy efficiency of steam compressor HPP have appeared in recent years [1 – 12]. In [1] the author performed the research, aimed at efficiency improvement and selection of rational parameters and operation modes of heat pump plants for heating and heat supply systems for equivalent fuel consumption. In [2] thermodynamic and exergy analysis of the efficiency of steam compressor cycle of heat pump plant of heat supply was carried out. Authors in the research [3] analyze thermodynamic efficiency of heat pump plants of heat supply. In the research [4] new approach of heat pumps efficiency evaluation is suggested. Thermodynamic analysis of various types of HPI is performed in [5]. However, in research [1 – 5] energy losses in the process of generation, supply and conversion of electric energy to HPP from different types of electric power stations are not taken into account. In the study [6] efficient real operation modes of HPI with electric and cogeneration drives, taking into consideration the impact of drive energy sources of steam compressor heat pumps and losses of energy during generation, supply and conversion of electric energy to HPI are determined. Energy advantages of steam compressor heat pumps with electric and cogeneration drives usage are analyzed in the research [7].

In publications [8, 9] energy and economic preconditions of efficient integration of HPP into the systems of heat supply of industrial enterprises and of utilities of municipal power engineering of Ukraine are defined. In [10] energy, ecological and economic efficiency of HPP with various kinds of compressor drive, on natural and industrial sources of low-temperature heat taking into consideration variable operation modes of heat supply systems in wide range of HPI capacity change is evaluated. The results of the study of energy efficiency of HPP with different sources of heat, on condition of variable operation modes, are given in [11]. In the research [12] energy ecological efficiency of HPP with various kinds of compressor drive, on natural and industrial sources of low-temperature heat on condition of variable operation modes of heat supply system is evaluated.

In [1–12] authors did not perform complex evaluation of energy efficiency of steam compressor HPP with electric drive, taking into account complex impact of HPP variable operation modes, peak sources of HPP heat, sources of drive energy of steam compressor HPP, taking into consideration losses of energy in the process of generation, supply and conversion of electric energy.

The aim of the research is the development of methodical fundamentals and carrying out of

complex evaluation of energy efficiency of steam compressor heat pump plants with electric drive, taking into account complex impact of HPP variable operation modes, peak sources of HPP heat, sources of drive energy of steam compressor HPP with the account of energy losses in the process of generation, supply and conversion of electric energy.

Main part

The research contains complex evaluation of energy efficiency of steam compressor HPP with HPI of small (up to 1MW) and large capacities with electric drive. The research was carried out for the cases of usage in electrically-driven HPI of electric energy from various types of electric power stations and also for averaged efficiency values of electric power stations in Ukraine. The schemes of these HPP are given in [8].

Energy efficiency of HPP is largely determined by optimal distribution of the load between heat pump installation and peak source of heat (for instance, hot-water fuel-fired boiler, electric boiler, solar collectors, etc.) in HPP. This distribution is characterized by the share of HPI load within HPP β that is determined as a relation of thermal capacity of HPI to the capacity of HPP $\beta = Q_{HPI}/Q_{HPP}$.

Proceeding from the analysis of the results of the researches, carried out [10-12], optimal values of β index for HPP with electric drive, operating at various sources of heat at variable operation modes of heating system are determined. Each of these modes corresponds to certain value of thermal capacities of HPP, HPI and shares of HPI β load. The results of the study of energy efficiency of HPP with electric drive for conditions of variable operation modes, for various sources of low-temperature heat are shown in [11].

In our research energy efficiency of «Source of drive energy of HPP – HPP – heat consumer from HPP» system on the example of steam compressor heat pumps with electric drive is analyzed. The advantage of such approach is that energy losses in the process of generation, supply and conversion of electric energy to HPI and peak source of heat in order to determine the efficient operation modes of HPP with electric drive is taken into account.

It is suggested to perform complex evaluation of energy efficiency of steam compressor HPP with electric drive applying complex dimensionless criterion of HPP energy efficiency:

$$K_{HPP} = (1 - \beta) \cdot K_{PSH} + \beta \cdot K_{HPI}, \quad (1)$$

where K_{PSH} – dimensionless criterion of energy efficiency of peak source of heat within HPP (hot-water fuel-fired boiler, electric boiler, solar collectors, etc.), K_{HPI} – dimensionless criterion of energy efficiency of steam compressor HPI with electric drive within HPP.

Dimensionless criterion of energy efficiency of steam compressor HPI with electric drive K_{HPI} is suggested in the research [6]. It is obtained on the basis of energy balance equation for the system «Source of drive energy of HPI – HPI – heat consumer from HPI», taking into account the impact of drive energy sources of steam compressor HPI and taking into consideration energy losses in the process of generation, supply and conversion of electric energy to HPI.

For steam compressor HPI with electric drive dimensionless criterion of energy efficiency will have the form [6]:

$$K_{HPI} = Q_{HPI}/Q_h = \eta_{EP} \cdot \varphi \cdot \eta_{hf}, \quad (2)$$

where Q_h – power, spent at electric power station for generation of electric energy for HPI drive, η_{EP} – total efficiency of generation, supply and conversion of electric energy from [6], φ – coefficient of performance of steam compressor HPI, η_{hf} – efficiency factor of the heat flow, that takes into account energy losses and working substance in pipe lines and equipment of HPI.

The value of total efficiency of generation, supply and conversion of electric energy to HPI with electric drive, according to [6], may be defined:

$$\eta_{EP} = \eta_{EPP} \cdot \eta_{DG} \cdot \eta_{ED}, \quad (3)$$

where η_{EPP} – averaged value of electric power plants efficiency in Ukraine or alternative sources of electric energy for HPI (on the base of steam-gas installations (SGI), gas-turbine installations (GTI), solar power plants of thermodynamic cycle (SPP), wind energy plants (WEP)), from the research [6]; η_{DG} – efficiency of distributive electric grids in Ukraine from [6], η_{ED} – efficiency of electric motor, taking into account energy losses in motor control unit from [6].

On condition $K_{HPI} = 1$ heat pump installation supplies to the consumer the same thermal power that was spent for generation of electric energy for HPI drive. The greater the value of this index is more efficient and competitive the heat pump will be.

In [6] the method of determination of the areas of efficient usage of steam compressor HPI with electric drive by dimensionless index of HPI K_{HPI} energy efficiency, taking into account the impact of the sources of steam compressor HPI drive energy and account of energy losses in the process of generation, supply and conversion of electric energy for HPI.

Dimensionless criterion of energy efficiency of peak source of heat – electric boiler – within HPP K_{PSH} can be obtained on the base of energy balance equation for the systems «Source of electric energy – electric boiler – heat consumer from HPP», taking into account the impact of the energy sources for peak source of heat (electric boiler) and with the account of energy losses in the process of generation and supply of electric energy to electric boiler.

For electric boiler as peak source of heat for HPP dimensionless criterion of energy efficiency will have the form:

$$K_{PSH} = Q_{EB} / Q_h = \eta_{EP}^b \cdot \eta_{EB}, \quad (4)$$

where Q_{EB} – heat power of hot-water electric boiler, that can be determined as: $Q_{EB} = Q_{HPP} - Q_{HPI}$; Q_h – power, spent at electric power station for generation of electric energy, η_{EP}^b – total efficiency of generation and supply of electric energy to electric boiler is determined, applying the formula: $\eta_{EP}^b = \eta_{EPP} \cdot \eta_{DG}$, η_{EB} – efficiency of the electric boiler.

Then dimensionless criterion of energy efficiency of electric boiler as peak source of heat for HPP will be determined:

$$K_{PSH} = \eta_{EPP} \cdot \eta_{DG} \cdot \eta_{EB}. \quad (5)$$

Dimensionless criterion of energy efficiency of peak source of heat – hot-water fuel-fired boiler – within HPP K_{PSH} may be obtained on the base of energy balance equation for the systems «Sources of electric energy and fuel – fuel-fired boiler – heat consumer from HPP», taking into consideration the impact of the energy sources for peak source of heat (fuel-fired boiler) and with the account of energy losses in the process of generation and supply of electric energy to boiler (boiler house).

For fuel-fired boiler as peak source of heat for HPP dimensionless criterion of energy efficiency will have the form:

$$K_{PSH} = Q_{FB} / Q_f = \eta_{FB}, \quad (6)$$

where Q_{FB} – heat power of hot-water fuel-fired boiler, that can be determined as: $Q_{FB} = Q_{HPP} - Q_{HPI}$; Q_f – power, spent for generation of heat energy from burning fuel in the boiler, η_{FB} – efficiency of hot-water fuel-fired boiler or fuel-fired boiler house (for HPP of large capacities).

For the cases of usage the alternative peak sources of heat in HPP (for instance, solar collectors for HPP of small capacity) the value of dimensionless criterion of energy efficiency of peak source of heat for HPP K_{PSH} will be equal to the efficiency of the alternative peak source of heat η_{APSH} or efficiency of additional system with alternative peak source of heat η_{APSH}^s .

It should be noted, that complex dimensionless criterion of HPP K_{HPP} energy efficiency may be

used also for the selection of the most efficient peak source of heat for certain kind of steam compressor HPP.

The suggested complex approach to evaluation of energy efficiency of steam compressor HPP with electric drive has some advantages:

- it enables to evaluate complex impact of HPP variable operation modes, peak sources of HPP heat, sources of drive energy of steam compressor electrically-driven HPP, with the account of energy losses in the process of generation, supply and conversion of electric energy;
- it takes into account the operation modes of steam compressor HPI;
- it takes into account variable operation modes of HPP for heat supply during the year with the change of load distribution among steam compressor HPI and peak source of HPP heat;
- it takes into account the impact of drive energy sources of steam compressor HPP, with the account of energy losses in the process of generation, supply and conversion of electric energy to HPP;
- it takes into account energy efficiency of steam compressor HPP of various capacity levels with electric drive;
- it takes into account the impact of peak sources of heat of steam compressor HPP and kind of the consumed energy, with the account of energy losses in the process of generation and supply of energy to peak sources of heat;
- as a result of complex approach to evaluation of energy efficiency of electrically-driven HPP, the choice of the most efficient peak source of heat for certain kind of steam compressor HPP can be performed;
- the suggested methodical fundamentals can be applied for evaluation of energy efficiency of steam compressor HPP with different refrigerants and scheme solutions of HPI;
- it allows to evaluate in a complex manner energy efficiency of considerable number of variants of steam compressor HPP with electric drive.

The application of the suggested methodical fundamentals, regarding complex evaluation of energy efficiency of HPP with electric drive we will demonstrate on specific examples.

Figs. 1-3 show the results of complex evaluation of energy efficiency of small capacity HPP with electric drive. The figure shows the values of dimensionless criterion of energy efficiency of HPP with electric drive K_{HPP} for the cases of variable load of HPI within HPP with the values of HPI load share in range of $\beta = 0,1 \dots 1,0$. Values of dimensionless criterion of energy efficiency of steam compressor HPI with electric drive K_{HPI} , in accordance with the research [6], are determined for the values of real coefficient of performance of HPI in the range $\varphi_r = 0,6 \dots 6,0$. Peak source of HPP heat for these conditions is provided electric boiler house with $\eta_{EB} = 0,95$. According to [6], the value of distributive electric grids efficiency in Ukraine $\eta_{DG} = 0,875$ is taken into account.

Fig. 1 shows the values of dimensionless criterion of energy efficiency of small capacity HPP with electric drive, on condition of electric energy consumption from energy system of Ukraine. In the given research, in accordance with [6] the following values are taken into consideration: averaged efficiency value of electric power plants in Ukraine $\eta_{EPP} = 0,383$ and the value of total efficiency of generation, supply and conversion of electric energy to small capacity HPI with electric drive $\eta_{EP} = 0,268$.

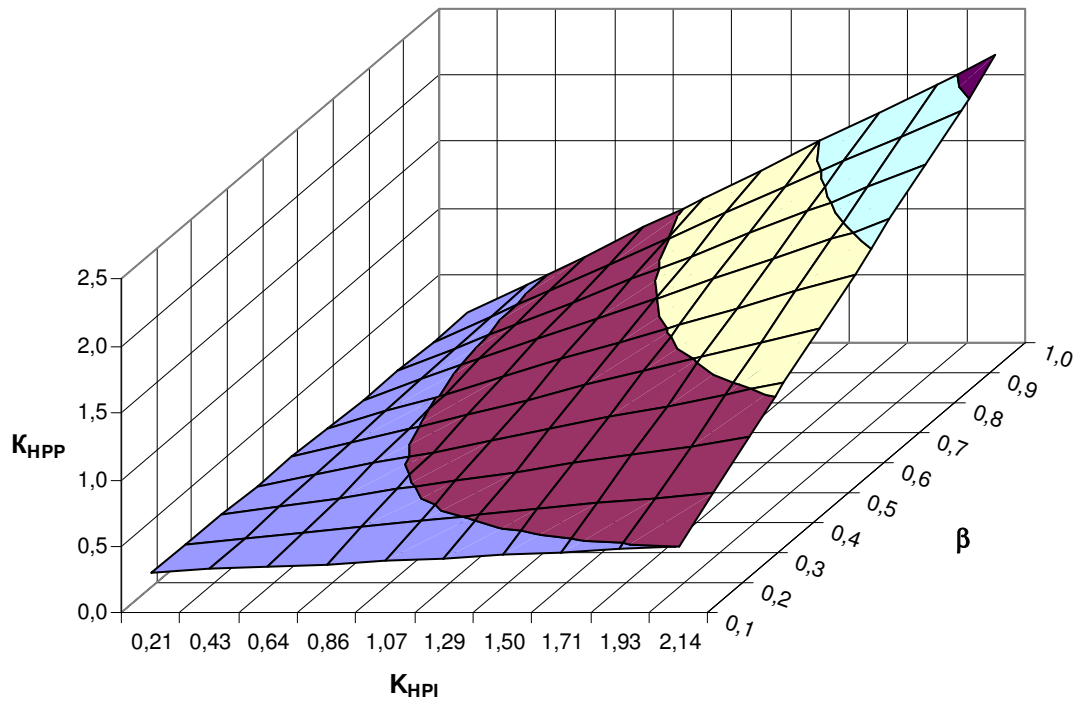


Fig. 1 – Values of dimensionless criterion of energy efficiency of small capacity HPP with electric drive for the cases of HPI variable load, on condition of electric energy consumption from energy system of Ukraine

Fig. 2 shows the values of dimensionless criterion of energy efficiency of small capacity HPP with electric drive, on condition of electric energy consumption from SGI. According to [6] in the given research the following values are taken into consideration: value of SGI efficiency $\eta_{EPP} = \eta_{SGI} = 0,55$ and the value of total efficiency of generation, supply and conversion of electric energy to small capacity HPI with electric drive $\eta_{EP} = 0,385$.

Fig. 3 shows the values of dimensionless criterion of energy efficiency of small capacity HPP with electric drive, on condition of electric energy consumption from GTI. In the given research, in accordance with [6], the following values are taken into consideration: value of GTI efficiency $\eta_{EPP} = \eta_{GTI} = 0,33$ and the value of total efficiency of generation, supply and conversion of electric energy to small capacity HPI with electric drive $\eta_{EP} = 0,231$.

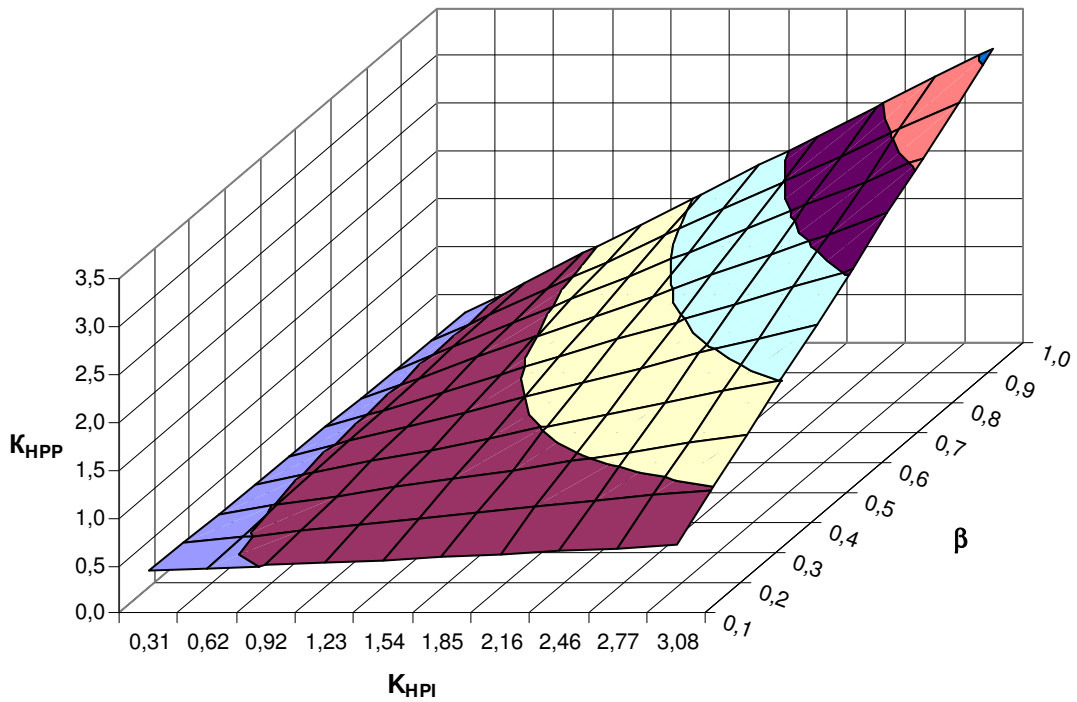


Fig. 2 – Values of dimensionless criterion of energy efficiency of small capacity HPP with electric drive for the cases of HPI variable load, on condition of electric energy consumption from SGI

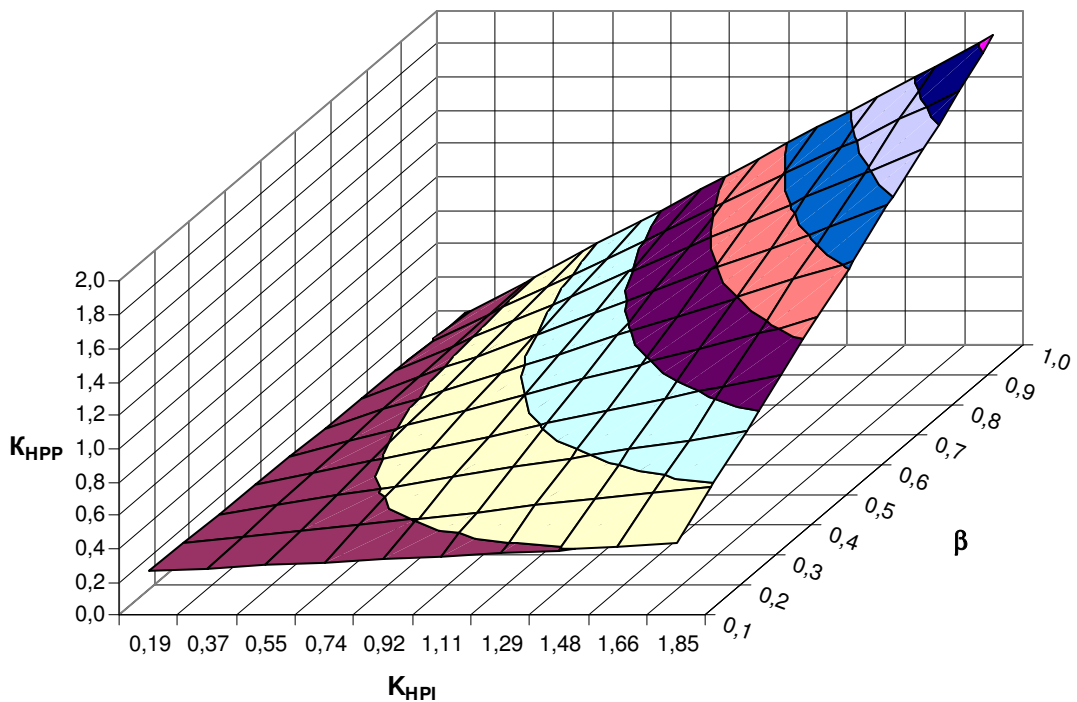


Fig. 3 – Values of dimensionless criterion of energy efficiency of small capacity HPP with electric drive for the cases of HPI variable load, on condition of electric energy consumption from GTI

Figs. 4-6 show the results of complex evaluation of energy efficiency of large capacity HPP with electric drive. The values of dimensionless criterion of energy efficiency of HPP with electric drive K_{HPP} for the cases of variable load of HPI within HPP with values of HPI load share in the range of

$\beta = 0,1 \dots 1,0$ are shown here. Values of dimensionless criterion of energy efficiency of steam compressor HPI with electric drive K_{HPI} , according to the research [6], are determined for the values of real coefficient of performance of HPI in the range $\varphi_r = 0,68 \dots 6,75$. Peak source of HPP heat for these conditions is provided to be hot-water fuel-fired boiler house with $\eta_{FB} = 0,85$. According to [6], the value of efficiency of distributive electric grids in Ukraine $\eta_{DG} = 0,875$ is taken into account.

In fig. 4 the values of dimensionless criterion of energy efficiency of large capacity HPP with electric drive, on condition of electric energy consumption from energy system of Ukraine are shown. In this research, according to [6], the following values are taken into account: averaged value of electric power plants efficiency in Ukraine $\eta_{EPP} = 0,383$ and the value of total efficiency of generation, supply and conversion of electric energy to HPI of large capacity with electric drive $\eta_{EP} = 0,301$.

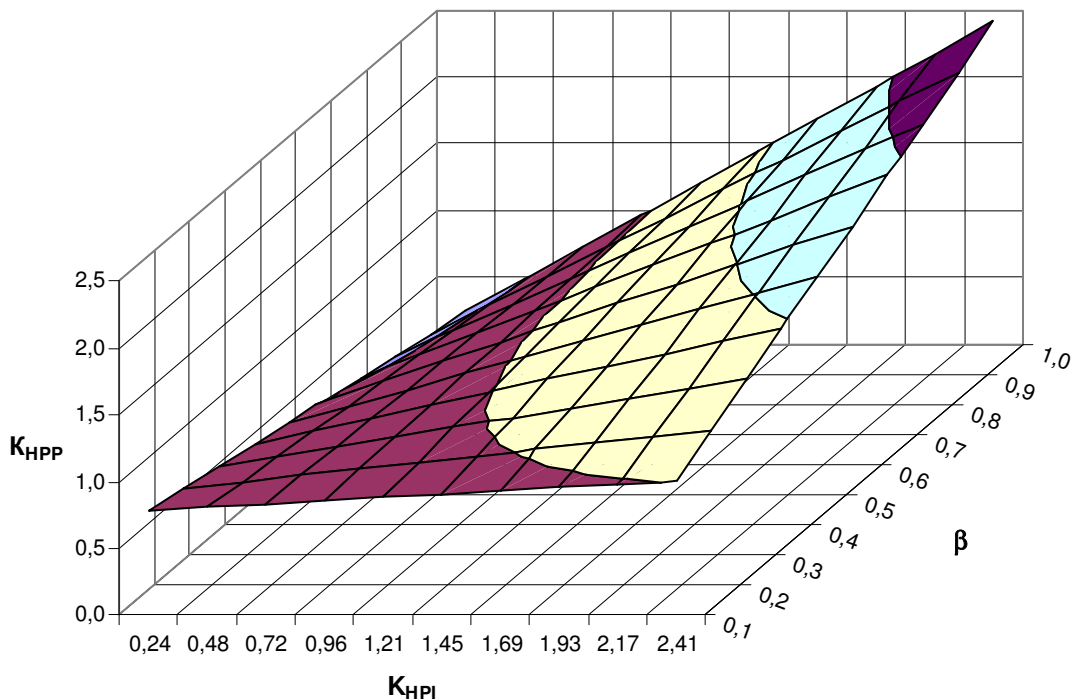


Fig. 4 – Values of dimensionless criterion of energy efficiency of large capacity HPP with electric drive for the cases of variable load of HPI, on condition of electric energy consumption from energy system of Ukraine

Fig. 5 shows the values of dimensionless criterion of energy efficiency of large capacity HPP with electric drive, on condition of electric energy consumption from SGI. In accordance with [6], the research takes into account: value of SGI efficiency $\eta_{EPP} = \eta_{SGI} = 0,55$ and the value of total efficiency of generation, supply and conversion of electric energy to large capacity HPI with electric drive $\eta_{EP} = 0,433$.

Fig. 6 shows the values of dimensionless criterion of energy efficiency of large capacity HPP with electric drive, on condition of electric energy consumption from GTI. The given research, in accordance with [6], takes into account: value of GTI efficiency $\eta_{EPP} = \eta_{GTI} = 0,33$ and the value of total efficiency of generation, supply and conversion of electric energy to large capacity HPI with electric drive $\eta_{EP} = 0,26$.

On the base of the analysis of the results of research, carried out [10-12], optimal values of β index for HPP at various sources of heat with different kinds of drive of HPI compressor at variable operation modes of heating system are determined.

In figs. 7-9 the results of complex evaluation of energy efficiency of small capacity HPP with electric drive for optimal values of load share of HPI β are shown. The values of dimensionless criterion of energy efficiency of HPP with electric drive K_{HPP} for the cases of variable load of HPI within HPP are shown here. The research is performed for the cases of season variable load of HPI within HPP for optimal values of HPI load share in the range of $\beta = 0,16 \dots 0,63$ [10-12], that corresponds to temperature operation modes of heat supply system. Values of energy efficiency criterion of HPI with electric drive K_{HPI} corresponds to the values of real coefficient of performance of HPI within the range $\varphi_r = 0,6 \dots 6,0$. Peak source of heat of HPP for these conditions is provided electric boiler house with $\eta_{EB} = 0,95$. In accordance with [6] the value of efficiency of distributive electric grids in Ukraine $\eta_{DG} = 0,875$ is taken into account.

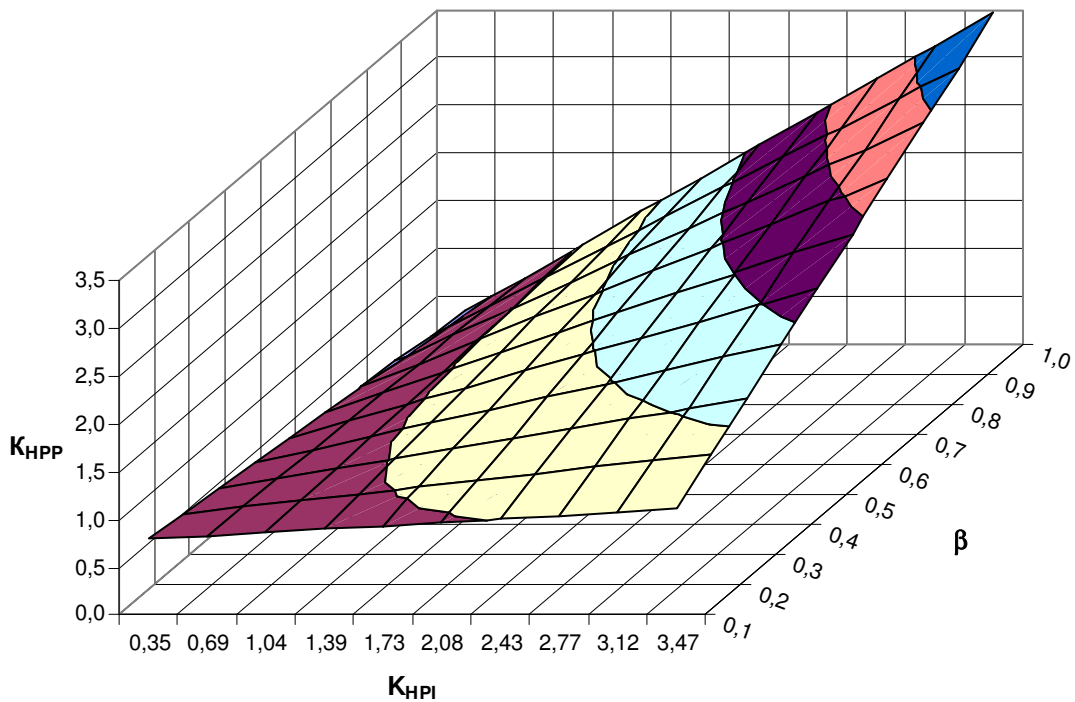


Fig. 5 – Values of dimensionless criterion of energy efficiency of large capacity HPP with electric drive for the cases of variable load of HPI, on condition of electric energy consumption from SGI

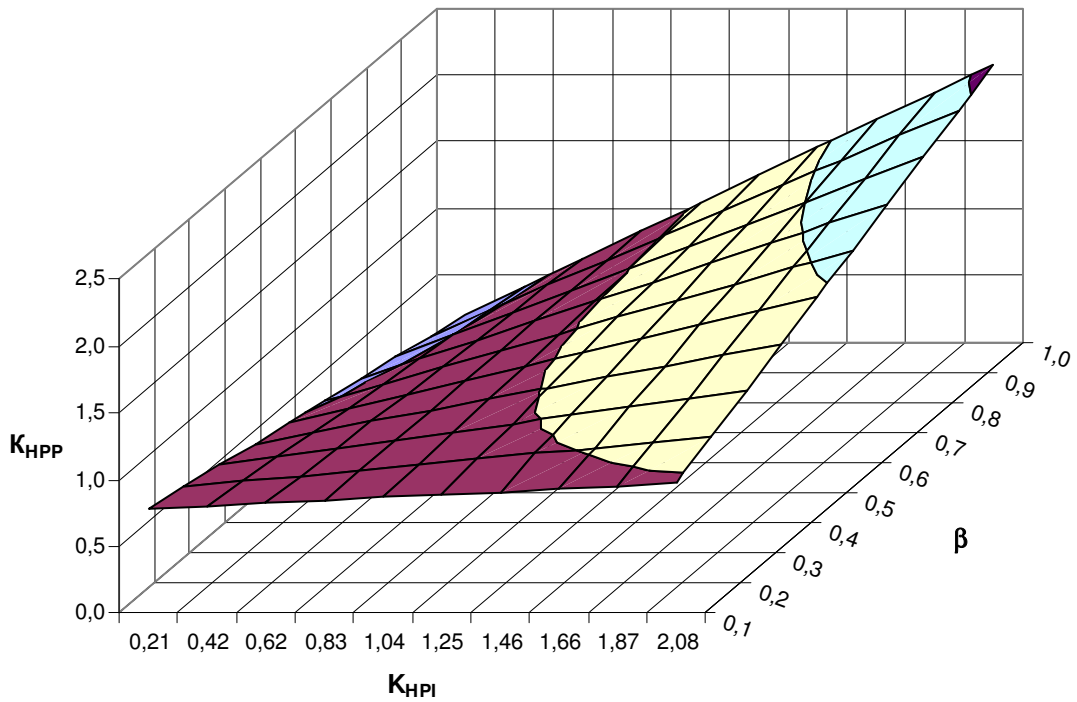


Fig. 6 – Values of dimensionless criterion of energy efficiency of large capacity HPP with electric drive for the cases of variable load of HPI, on condition of electric energy consumption from GTI

Fig. 7 shows the values of dimensionless criterion of energy efficiency of small capacity HPP with electric drive for optimal values of HPI β load share, on condition of electric energy consumption from energy system of Ukraine. The given research, in accordance with [6], takes into account: averaged value of electric power plants in Ukraine efficiency $\eta_{EPP} = 0,383$ and the value of total efficiency of generation, supply and conversion of electric energy to small capacity HPI with electric drive $\eta_{EP} = 0,268$.

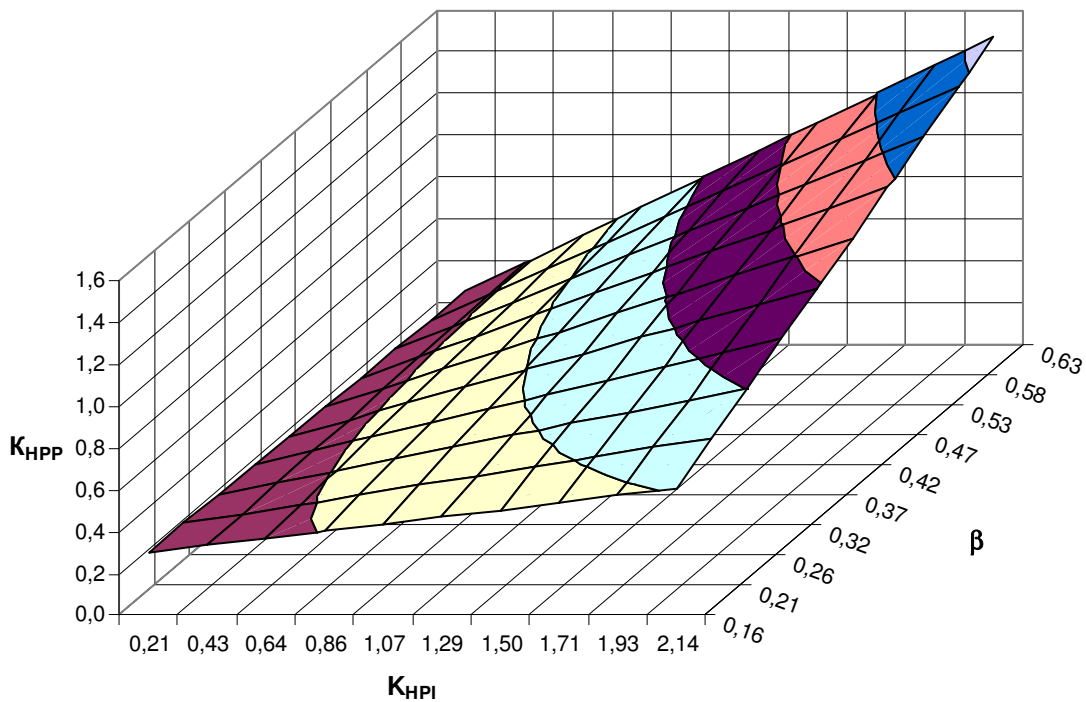


Fig. 7 – Values of dimensionless criterion of energy efficiency of small capacity HPP with electric drive for optimal values of HPI load share, on condition of electric energy consumption from energy system of Ukraine

Fig. 8 shows the values of dimensionless criterion of energy efficiency of small capacity HPP with electric drive for optimal values of HPI β load share, on condition of electric energy consumption from SGI. According to [6], this research takes into account: value of SGI efficiency $\eta_{EPP} = \eta_{SGI} = 0,55$ and the value of total efficiency of generation, supply and conversion of electric energy to small capacity HPI with electric drive $\eta_{EP} = 0,385$.

Fig. 9 shows the values of dimensionless criterion of energy efficiency of small capacity HPP with electric drive for optimal values of HPI β load share, on condition of electric energy consumption from GTI. The given research, according to [6], takes into account: value of GTI efficiency $\eta_{EPP} = \eta_{GTI} = 0,33$ and the value of total efficiency of generation, supply and conversion of electric energy to small capacity HPI with electric drive $\eta_{EP} = 0,231$.

Figs. 10-12 shows the results of complex evaluation of energy efficiency of large capacity HPP with electric drive for optimal values of HPI β load share. The values of dimensionless criterion of energy efficiency of HPP with electric drive K_{HPP} for the cases of variable load of HPI within HPP are shown here. The research was carried out for the cases of season variable load HPI within HPP for optimal values of HPI load share in the range of $\beta = 0,16 \dots 0,63$ [10-12], that corresponds to temperature operation modes of heat supply system. The values of energy efficiency criterion of HPI with electric drive K_{HPI} corresponds to the values of real coefficient of performance of HPI in the range of $\varphi_r = 0,68 \dots 6,75$. Peak source of heat of HPP for these conditions, hot-water fuel-fired boiler house with $\eta_{FB} = 0,85$ is provided. According to [6], the value of distributive electric grids efficiency in Ukraine $\eta_{DG} = 0,875$ is taken into account.

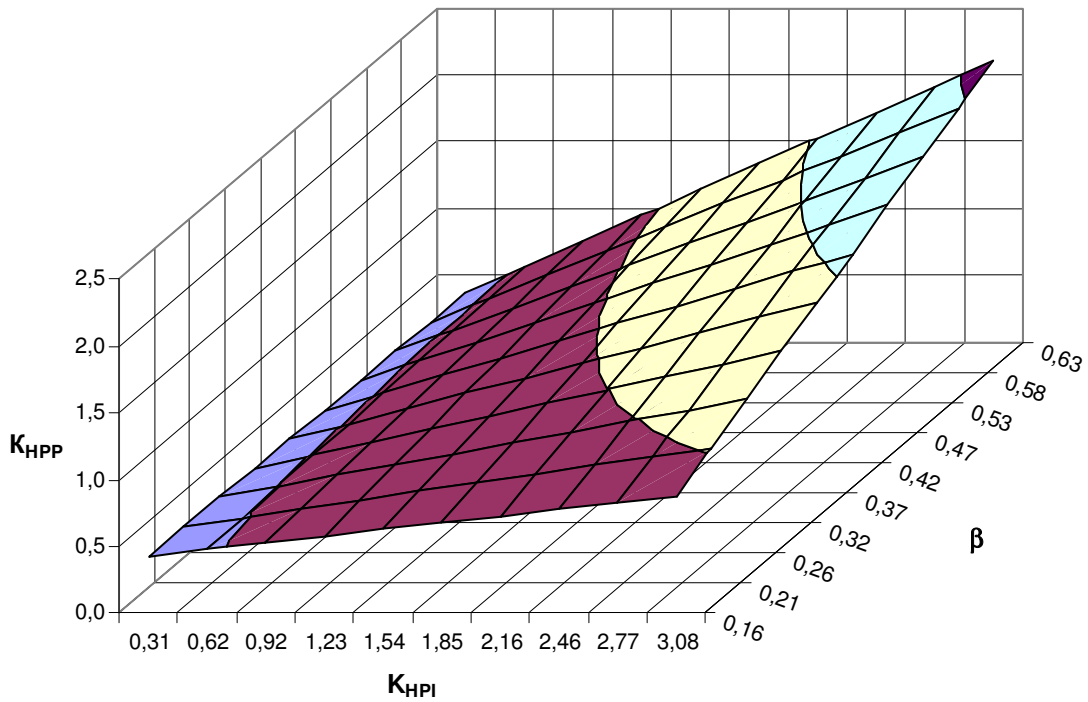


Fig. 8 – Values of dimensionless criterion of energy efficiency of small capacity HPP with electric drive for optimal values of HPI load share, on condition of electric energy consumption from SGI

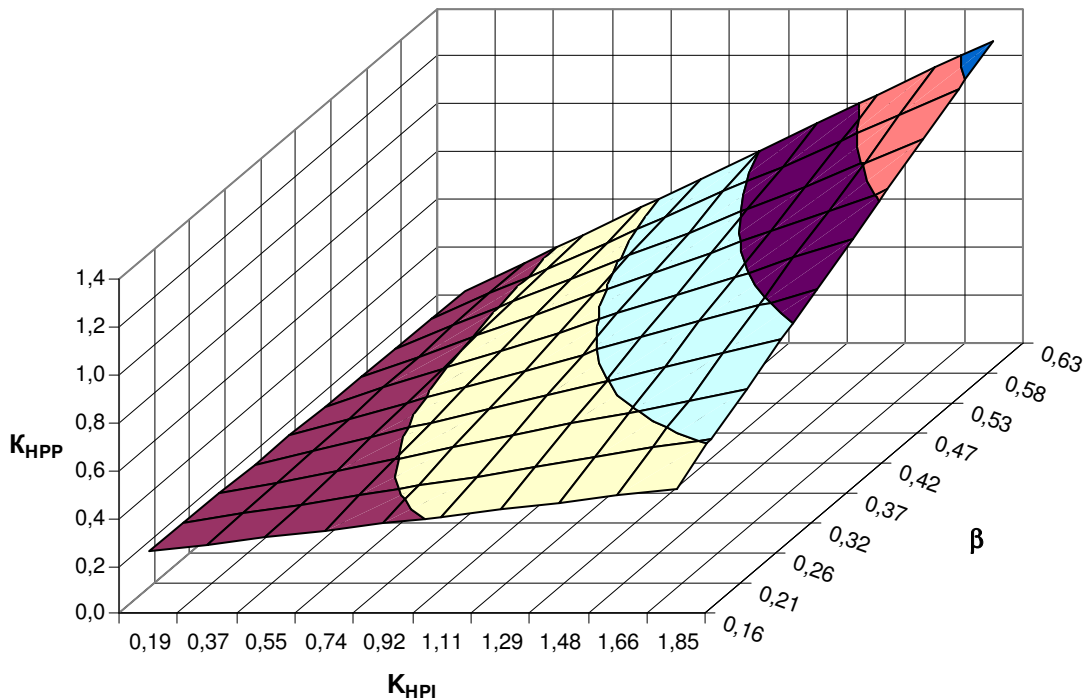


Fig. 9 – Values of dimensionless criterion of energy efficiency of small capacity HPP with electric drive for optimal values of HPI load share, on condition of electric energy consumption from GTI

Fig. 10 shows the values of dimensionless criterion of energy efficiency of large capacity HPP with electric drive for optimal values of HPI β load share, on condition of electric energy consumption from energy system of Ukraine. The given research, according to [6], takes into account: aver-

aged value of efficiency of electric power plants in Ukraine $\eta_{EPP} = 0,383$ and the value of total efficiency of generation, supply and conversion of electric energy to large capacity HPI with electric drive $\eta_{EP} = 0,301$.

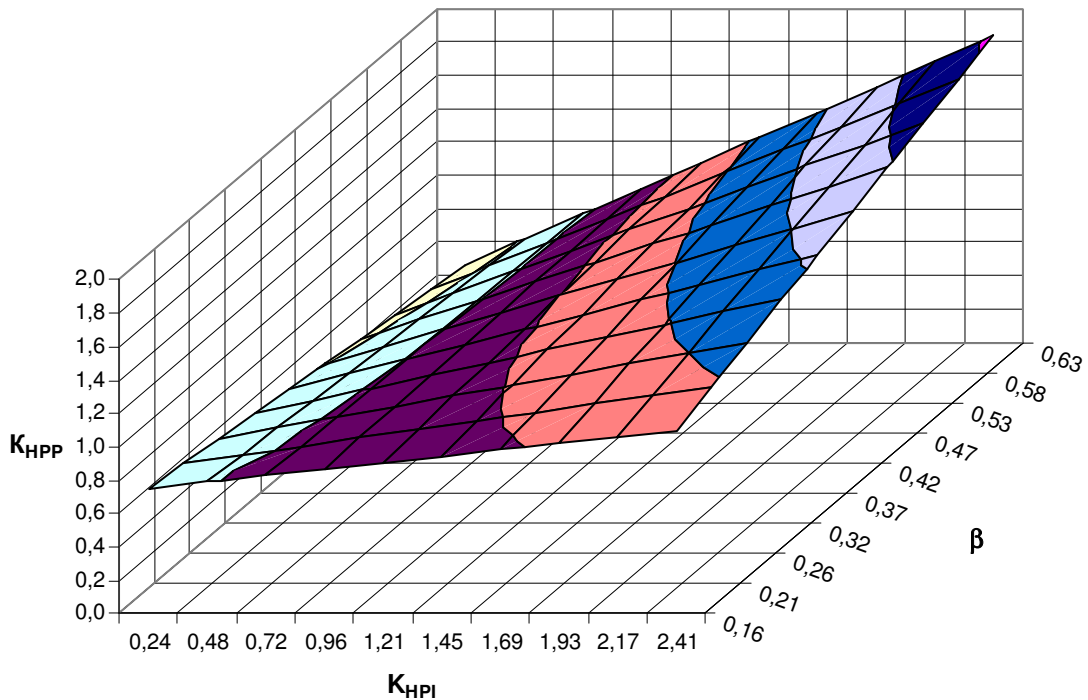


Fig. 10 – Values of dimensionless criterion of energy efficiency of large capacity HPP with electric drive for optimal values of HPI load share, on condition of electric energy consumption from energy system of Ukraine

Fig. 11 shows the values of dimensionless criterion of energy efficiency of large capacity HPP with electric drive for optimal values of HPI β load share, on condition of electric energy consumption from SGI. According to [6], this research takes into account: value of SGI efficiency $\eta_{EPP} = \eta_{SGI} = 0,55$ and the value of total efficiency of generation, supply and conversion of electric energy to large capacity HPI with electric drive $\eta_{EP} = 0,433$.

Fig. 12 shows the values of dimensionless criterion of energy efficiency of large capacity HPP with electric drive for optimal values of HPI β load share, on condition of electric energy consumption from GTI. The given research, according to [6], takes into account: value of GTI efficiency $\eta_{EPP} = \eta_{GTI} = 0,33$ and the value of total efficiency of generation, supply and conversion of electric energy to large capacity HPI with electric drive $\eta_{EP} = 0,26$.

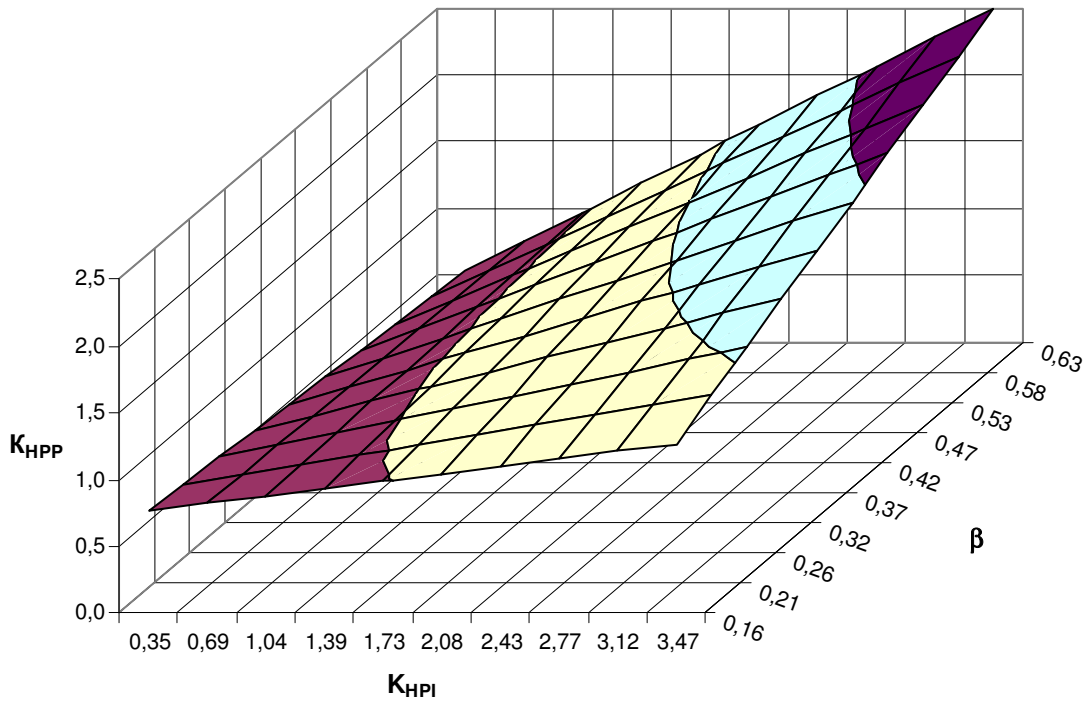


Fig. 11 – Values of dimensionless criterion of energy efficiency of large capacity HPP with electric drive for optimal values of HPI load share, on condition of electric energy consumption from SGI

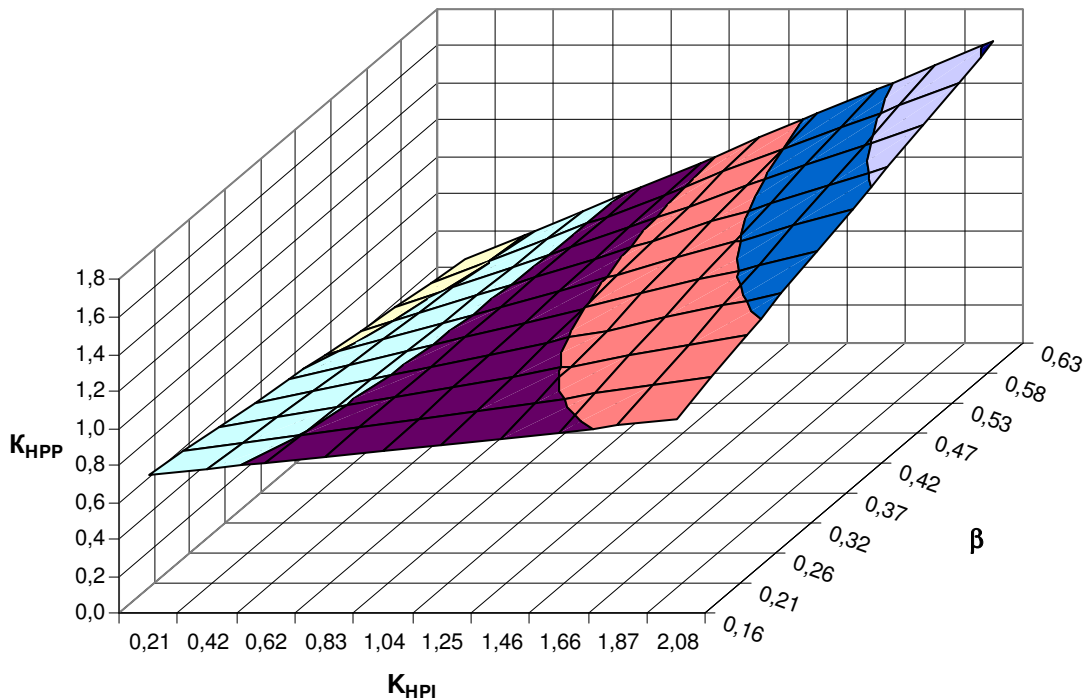


Fig. 12 – Values of dimensionless criterion of energy efficiency of large capacity HPP with electric drive for optimal values of HPI load share, on condition of electric energy consumption from GTI

To perform complex evaluation of energy efficiency of different variants of HPP with electric drive, besides the above-mentioned approaches, we suggest to use the results from the researches [6-12].

Conclusions

The approach, regarding complex evaluation of energy efficiency of steam compressor heat pump plants with electric drive, taking into account complex impact of variable operation modes of HPP, peak sources of HPP heat, sources of drive energy of HPP, with the account of energy losses in the process of generation, supply and conversion of electric energy is suggested.

Methodical fundamentals are developed, complex evaluation of energy efficiency of steam compressor HPP with electric drive, taking into account complex impact of HPP variable operation modes, peak sources of HPP heat, sources of drive energy of steam compressor HPP, with the account of energy losses in the process of generation, supply and conversion of electric energy, is carried out.

The suggested complex approach, aimed at evaluation of energy efficiency of steam compressor HPP with electric drive has several advantages:

- it enables to evaluate complex impact of HPP variable operation modes, peak sources of HPP heat, sources of drive energy of steam compressor electrically-driven HPP, with the account of energy losses in the process of generation, supply and conversion of electric energy;
- it takes into account the operation modes of steam compressor HPI;
- it takes into account variable operation modes of HPP for heat supply during the year with the change of load distribution among steam compressor HPI and peak source of HPP heat;
- it takes into account the impact of drive energy sources of steam compressor HPP, with the account of energy losses in the process of generation, supply and conversion of electric energy to HPP;
- it takes into account energy efficiency of steam compressor HPP of various capacity levels with electric drive;
- it takes into account the impact of peak sources of heat of steam compressor HPP and kind of the consumed energy, with the account of energy losses in the process of generation and supply of energy to peak sources of heat;
- as a result of complex approach to evaluation of energy efficiency of electrically-driven HPP, the choice of the most efficient peak source of heat for certain kind of steam compressor HPP can be performed;
- the suggested methodical fundamentals can be applied for evaluation of energy efficiency of steam compressor HPP with different refrigerants and scheme solutions of HPI;
- it allows to evaluate in a complex manner energy efficiency of considerable number of variants of steam compressor HPP with electric drive.

To perform complex evaluation of energy efficiency of different variants of HPP with electric drive, besides the above-mentioned approaches, we propose to use the results from the researches [6-12].

REFERENCES

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 парокомпресійного 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.
- Наукові праці ВНТУ, 2015, № 2

6. Energy efficiency of steam compressor heat pumps with electric and cogeneration drive [Електронний ресурс] / О. Р. Ostapenko, V. V. Leshchenko, R. O. Tikhonenko // Scientific Works of Vinnytsia National Technical University. – № 4. – 2014. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3821/5564>.
7. Energy advantages of application of steam compressor heat pumps with electric and cogeneration drives / О. Ostapenko, V. Leshchenko, R. Tikhonenko // Scientific Works of Vinnytsia National Technical University.. – 2015. – № 1. – Режим доступу: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3976/5778>.
8. Ткаченко С. Й. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах тепlopостачання. 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. Energy, ecology and economy aspects of the efficiency of heat power stations operating on natural and industrial heat sources [Електронний ресурс] / О. Р. Ostapenko, Y. V. Vakum, A. V. Yuschishina // Scientific Works of Vinnytsia National Technical University. – 2013. – № 3. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3040/4628>.
11. Energy efficiency of heat pumping stations with different heat sources on condition of variable operation modes [Електронний ресурс] / О. Р. Ostapenko, O. V. Shevchenko, O. V. Vakum // Scientific Works of Vinnytsia National Technical University. – 2013. – № 4. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3448/5068>.
12. Energy ecological efficiency of heat pumping stations, operating on natural and industrial sources of heat at variable operation modes [Електронний ресурс] / О. Р. Ostapenko, I. O. Valigura, A. D. Kovalenko. // Scientific Works of Vinnytsia National Technical University. – 2013. – № 2. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3033/4607>.

Ostapenko Olga – Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor with the Department of Heat Power Engineering, olgaost@rambler.ru.
Vinnytsia National Technical University.