

УДК 621.577

О. П. Остапенко, к. т. н., доц.; В. В. Лещенко; Р. О. Тіхоненко**ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПАРОКОМПРЕСІЙНИХ
ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ З ЕЛЕКТРИЧНИМ І КОГЕНЕРАЦІЙНИМ
ПРИВОДАМИ**

Проаналізовано енергетичну ефективність парокompресійних теплових насосів (ТН) з електричним і когенераційним приводами. Визначено ефективні дійсні режими роботи теплових насосів з електричним і когенераційним приводами з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

Ключові слова: енергетична ефективність, тепловий насос, коефіцієнт перетворення, електричний привод, когенераційний привід.

Вступ

Сучасний розвиток енергетики характеризується значним збільшенням вартості енергоносіїв, а також погіршенням стану довкілля й ускладненням його охорони від дії теплогенерувальних установок. Енерго- та ресурсозбереження і охорона довкілля є пріоритетними напрямками розвитку фундаментальних досліджень у галузі споживання паливно-енергетичних ресурсів [1]. У промисловому комплексі України частка споживання природного газу все ще залишається значною. Більше половини енергетичних проблем країни розв'язується за рахунок спалювання природного газу. У світлі енергетичної кризи актуальною є проблема ефективного споживання енергоносіїв та впровадження новітніх енергозберігаючих технологій [2]. Використання парокompресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводами сприятиме економії природного газу та захисту навколишнього середовища за рахунок зниження теплового забруднення й кількості шкідливих викидів продуктів згорання.

За останні роки питанням енергетичної ефективності теплових насосів присвячено чимало публікацій [1 – 7]. У роботі [1] автором виконано 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 аналізи 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. Проте в дослідженнях [3 – 4] не враховані втрати енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії від електростанцій різних типів. Авторами [5] проведено аналіз ТН з електричним і когенераційним приводами для обмеженої кількості варіантів. У роботі [6] виконано оцінку ефективності різних варіантів теплових насосів за коефіцієнтом використання первинної енергії. Автором [7] проведено термодинамічний аналіз різних типів ТН.

У роботах [1 – 7] авторами не здійснено оцінку енергетичної ефективності парокompресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводами з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

Метою дослідження є визначення енергетичної ефективності парокompресійних теплових насосів з електричним і когенераційним приводами, визначення ефективних дійсних режимів роботи ТН з електричним і когенераційним приводами з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

Основна частина

У парокомпресійних ТН підвищення температурного рівня низькотемпературної теплоти відбувається за механічного стиску холодоагенту в компресорі. Теплові насоси можуть мати електричний і когенераційний приводи (від газопоршневого двигуна). Когенераційний привід теплових насосів має переваги порівняно з електричним, оскільки дозволяє уникнути додаткових втрат електроенергії під час транспортування. Крім того, застосування ТН із когенераційним приводом компресора від газових двигунів може розглядатися як один із важливих напрямів енерго- і ресурсозбереження, оскільки передбачає утилізацію теплоти відхідних газів після газового двигуна, що забезпечує кращу енергетичну ефективність.

Енергетичну ефективність теплових насосів можна оцінити декількома критеріями ефективності. Найчастіше енергетичну ефективність перетворення енергії в тепловому насосі оцінюють коефіцієнтом перетворення енергії φ , який дорівнює відношенню енергії, яка надійшла споживачу, до енергії, яку використали для реалізації циклу.

Енергетична ефективність ТН може бути оцінена коефіцієнтом перетворення, теоретичне значення якого визначають за формулою

$$\varphi_m = \frac{T_1}{T_1 - T_2}, \quad (1)$$

де T_1 та T_2 – відповідно температури високотемпературного теплоносія на виході та низькотемпературного теплоносія на вході в ТН, К.

Слід зазначити, що коефіцієнт перетворення не враховує всі втрати енергії, пов'язані з виробленням теплоти в ТН. У реальних умовах, крім дроселювання, відбуваються втрати енергії в трубопроводах та обладнанні ТН.

Дійсний коефіцієнт перетворення ТН становитиме

$$\varphi_o = \varphi_m \cdot \eta_{mn}, \quad (2)$$

де η_{mn} – енергетичний ККД ТН, який враховує всі втрати енергії в тепловому насосі. Величина енергетичного ККД сучасних ТН знаходиться у межах 0,65 – 0,7 [4].

У вітчизняній і закордонній літературі та на практиці ефективність використання ТН оцінюють переважно за дійсним коефіцієнтом перетворення. Для ефективної роботи ТН з електричним приводом вважається прийнятною величина $\varphi_d \geq 2,5 \dots 3,0$; висока енергетична ефективність ТН забезпечується за $\varphi_d = 3,5 \dots 4,0$. Ці значення коефіцієнтів перетворення підтверджені статистичними даними щодо дійсних коефіцієнтів перетворення ТН, які випускають фірми LG, Mitsubishi, MHPUL, MHPUE, FUJITSU, McQUAY, HPVU, «Енергія», «Тритон-ЛТД» [4].

Висока енергетична ефективність ТН з когенераційним приводом забезпечується за $\varphi_d \geq 2,0$, що зумовлено врахуванням додаткової теплової потужності від утилізаційного обладнання когенераційного приводу ТН [6].

Проаналізуємо енергетичну ефективність системи «Джерело приводної енергії ТН – ТН – споживач теплоти від ТН» на прикладі парокомпресійних теплових насосів з електричним і когенераційним приводами. Перевагою такого підходу є врахування втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТН з метою визначення ефективних дійсних режимів роботи ТН з електричним і когенераційним приводами.

Електроенергію в Україні виробляють теплові (ТЕС), атомні електростанції (АЕС) та гідроелектростанції (ГЕС). До складу української енергетики входить 44 теплових, 8 гідравлічних та 4 атомних електростанції. На теплові електростанції припадає до 46,3% всього обсягу виробництва електроенергії, на атомні – 47%, на гідравлічні – близько 7% [8, 9].

Проведемо розрахунок енергетичного ланцюга від ТЕС, АЕС та ГЕС до споживача електричної енергії.

Коефіцієнт корисної дії ТЕС з виробництва електроенергії залежить від ККД основних елементів – парового котла, турбоустановки, а також з'єднуючих їх трубопроводів пари й води [9, 10].

Під час генерування електричної енергії частина виробленої енергії (4 – 6%) витрачається на підготовку палива, подачу котельного повітря, відведення димових газів із котлів, подачу охолоджувальної води, відведення конденсату та інше. Якщо прийняти витрати електроенергії на власні потреби ТЕС у розмірі 5%, то остаточний ККД ТЕС (енергоблоку) з виробництва електроенергії можна визначити

$$\eta_{ТЕС} = \eta_{нк} \cdot \eta_{мп} \cdot \eta_{мы} (1 - 0,05), \quad (3)$$

де $\eta_{нк}$ – ККД парового котла, $\eta_{мп}$ – ККД трубопроводів, $\eta_{мы}$ – ККД турбоустановки.

Найбільший вплив на ККД електростанції має ККД турбоустановки, який враховує значну втрату теплової енергії в конденсаторі турбіни (45 – 50% від виробленої кількості теплової енергії). Решта втрат енергії на електростанції є значно меншими. Приймаючи $\eta_{нк} = 0,9$; $\eta_{мп} = 0,99$; $\eta_{мы} = 0,5$, отримаємо з формули (3) значення $\eta_{ТЕС} = 0,423$, яке відповідає номінальній потужності електростанції. У випадку неповного навантаження ТЕС значення ККД зменшується.

Якщо на АЕС як первинне джерелом енергії розглядати ядерний реактор, то значення ККД АЕС залежатиме від ККД турбогенераторної установки. До складу турбогенераторної установки входить парова турбіна, ККД якої η_{nm} (з урахуванням усіх втрат теплової енергії в ядерному реакторі, у теплообміннику, у конденсаторі, у трубопроводах) становитиме близько 33 – 34%. ККД генератора приблизно дорівнює 98,5%. Тоді значення ККД АЕС можна визначити так:

$$\eta_{АЕС} = \eta_{nm} \cdot \eta_2 = 0,33 \cdot 0,985 = 0,325. \quad (4)$$

На ГЕС для вироблення електричної енергії використовують енергію водних потоків. Первинними двигунами для ГЕС є гідротурбіни, які приводять в обертання синхронні гідрогенератори. ККД ГЕС становить $\eta_{ГЕС} = 90 - 93\%$, і за цим показником вони є найекономічнішими електростанціями [9, 10].

Знаючи значення ККД ТЕС, АЕС та ГЕС і частки електричної енергії, що вони генерують, можна визначити середній ККД генерування електроенергії в Україні.

Усереднене значення ККД електростанцій становитиме:

$$\eta_{ЕС} = \frac{\alpha_{ТЕС} + \alpha_{АЕС} + \alpha_{ГЕС}}{\frac{\alpha_{ТЕС}}{\eta_{ТЕС}} + \frac{\alpha_{АЕС}}{\eta_{АЕС}} + \frac{\alpha_{ГЕС}}{\eta_{ГЕС}}}, \quad (5)$$

де $\alpha_{ТЕС}$, $\alpha_{АЕС}$, $\alpha_{ГЕС}$ – частки електричної енергії, що генеруються відповідними електростанціями.

Ураховуючи, що $\alpha_{ТЕС} = 0,463$; $\alpha_{АЕС} = 0,47$ та $\alpha_{ГЕС} = 0,07$, з формули (5) можна одержати усереднене значення ККД електростанцій $\eta_{ЕС} = 0,383$.

У випадку залучення в енергетичний баланс України альтернативних видів електростанцій (на базі парогазових установок (ПГУ) та газотурбінних установок (ГТУ), сонячних електростанцій термодинамічного циклу (СЕС), вітроенергетичних електростанцій (ВЕС)) усереднене значення ККД електростанцій визначають так:

$$\eta_{ЕС} = \frac{\sum \alpha_i}{\sum (\alpha_i / \eta_i)}, \quad (6)$$

де α_i – частки електричної енергії, що генеруються відповідними електростанціями; η_i –

ККД відповідної електростанції.

Від електростанцій електрична енергія через розподільчі мережі надходить до споживача. ККД функціонування розподільчих електричних мереж визначають рівнем втрат енергії під час її транспортування.

За даними річного звіту НКРЕ за 2010 рік, величина загальних технологічних втрат електроенергії в Україні склала 12,5% від обсягу електроенергії, що надійшла в мережу. Отже, ККД розподільчих мереж в Україні становитиме

$$\eta_{ЛЕП} = 1 - \beta_{втр} = 1 - 0,125 = 0,875. \quad (7)$$

У кінці енергетичного ланцюга знаходиться споживач електричної енергії – електричний двигун ТН. ККД електричного двигуна потужністю 55 – 100 кВт з урахуванням втрат енергії в блоці управління двигуном становитиме $\eta_{ЕП} = 80 - 85\%$. ККД електричного двигуна великої потужності становитиме $\eta_{ЕП} = 90 - 95\%$.

Отже, проаналізувавши ланцюг генерування, постачання і перетворення електричної енергії, отримаємо значення загального ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТН

$$\eta_{ЕЛ} = \eta_{ЕС} \cdot \eta_{ЛЕП} \cdot \eta_{ЕП}, \quad (8)$$

значення якого становитиме:

– для теплових насосів малої потужності (до 1 МВт)

$$\eta_{ЕЛ} = 0,383 \cdot 0,875 \cdot 0,8 = 0,268;$$

– для теплових насосів великої потужності (понад 1 МВт)

$$\eta_{ЕЛ} = 0,383 \cdot 0,875 \cdot 0,9 = 0,302.$$

Рівняння енергетичного балансу для системи «Джерело приводної енергії ТН – ТН – споживач теплоти від ТН» на прикладі парокompресійних теплових насосів з електричним приводом:

$$Q_{mn} = Q_m \cdot \eta_{ЕЛ} \cdot \varphi_m \cdot \eta_{mn} = Q_m \cdot \eta_{mn}, \quad (9)$$

де Q_{mn} – теплова потужність ТН, Q_m – потужність, витрачена на електростанції для вироблення електричної енергії для привода ТН, $\eta_{ЕЛ}$ – загальний ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії за формулою (8), η_{mn} – ККД теплового потоку, що враховує втрати енергії та робочого агента в трубопроводах та обладнанні ТН.

Для оцінювання енергетичної ефективності ТН з електроприводом використаємо безрозмірний показник

$$Q_{mn}/Q_m = \eta_{ЕЛ} \cdot \varphi_m \cdot \eta_{mn}. \quad (10)$$

За умови $Q_{mn}/Q_m = 1$ тепловий насос передає до споживача таку ж теплову потужність, яка була витрачена для вироблення електроенергії для привода ТН. Чим більше значення цього показника, тим більш ефективним та конкурентоздатним буде тепловий насос.

Для ТН з когенераційним приводом рівняння енергетичного балансу для системи «Джерело приводної енергії ТН – ТН – споживач теплоти від ТН» матиме вид (9). Проте в цьому випадку загальний ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії визначатимуть за формулою: $\eta_{ЕЛ} = \eta_{ЕД} \cdot \eta_{ЕП}$, де $\eta_{ЕД}$ – ефективний ККД газопоршневого двигуна.

Для ТН з когенераційним приводом значення φ_m в рівнянні (9) визначатимуть з урахуванням

потужності утилізаційного обладнання когенераційного приводу $\varphi_m = \frac{Q_{mn} + \Sigma Q_{ут}}{N_{км}}$, де $N_{км}$ – теоретична потужність компресора ТН, $\Sigma Q_{ут}$ – потужність утилізаційного обладнання коге-

нераційного приводу ТН.

Енергетичну ефективність ТН із когенераційним приводом будемо оцінювати таким безрозмірним показником

$$Q_{mn}/Q_m = \eta_{ED} \cdot \eta_{EP} \cdot \varphi_m \cdot \eta_{mn} \quad (11)$$

Дослідження енергетичної ефективності ТН проводили методом математичного моделювання роботи ТН з використанням програми в Excel. Досліджували енергетичну ефективність ТН з електроприводом і когенераційним приводом компресора від газопоршневого двигуна (ГПД). Схеми зазначених ТН наведені в роботі [11].

На рис. 1 показані значення безрозмірного показника енергетичної ефективності ТН з електроприводом для теплових насосів малої потужності залежно від теоретичних значень коефіцієнта перетворення. Дослідження проводили для випадків використання в ТН електроенергії від електростанцій різних типів, а також для усереднених значень ККД електростанцій в Україні. Пунктирною лінією на рис. 1 показане граничне значення показника енергетичної ефективності ТН. Як зазначалось раніше, для випадків $Q_{mn}/Q_m > 1$ використання ТН є доцільним.

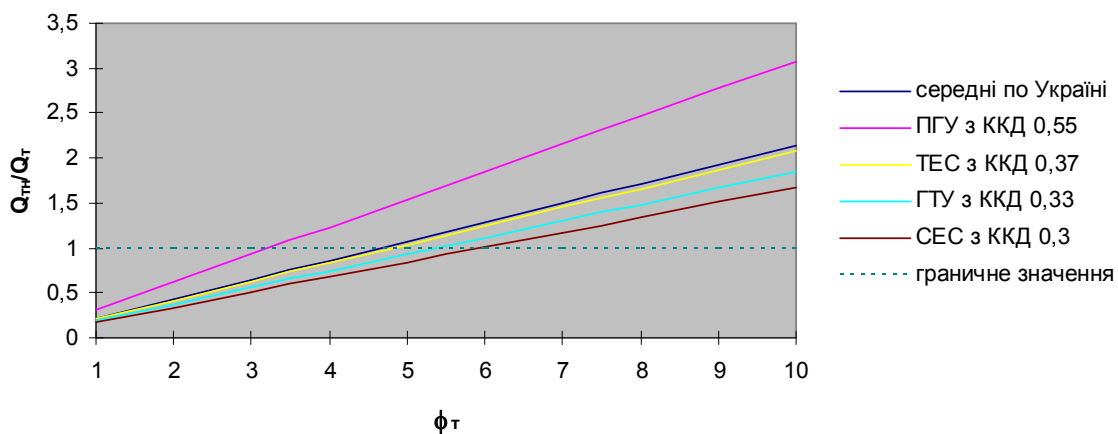


Рис. 1. Значення безрозмірного показника енергетичної ефективності ТН з електроприводом для теплових насосів малої потужності залежно від теоретичних значень коефіцієнта перетворення

На рис. 2 показано значення безрозмірного показника енергетичної ефективності ТН з електроприводом для теплових насосів великої потужності залежно від теоретичних значень коефіцієнта перетворення. Як і в попередньому випадку, дослідження проводили для випадків використання в ТН електроенергії від електростанцій різних типів, а також для усереднених значень ККД електростанцій в Україні. Вище пунктирної лінії визначена область ефективного використання таких ТН.

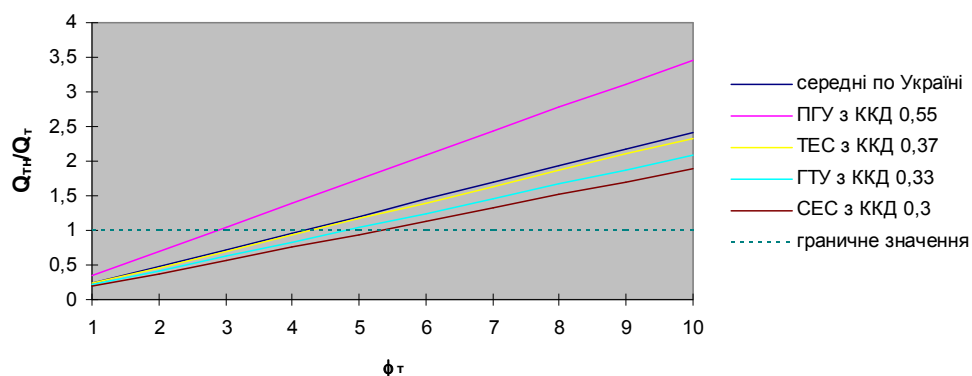


Рис. 2. Значення безрозмірного показника енергетичної ефективності ТН з електроприводом для теплових насосів великої потужності залежно від теоретичних значень коефіцієнта перетворення

На рис. 3 показані значення безрозмірного показника енергетичної ефективності ТН з електроприводом для теплових насосів малої потужності залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення. Як і в попередніх випадках, на рис. 3 вище пунктирної лінії визначена область ефективного використання таких ТН.

Залежності, показані на рис. 1 та 2, дозволяють визначити мінімальні теоретичні значення коефіцієнта перетворення ТН, вище яких застосування певного виду ТН є доцільним.

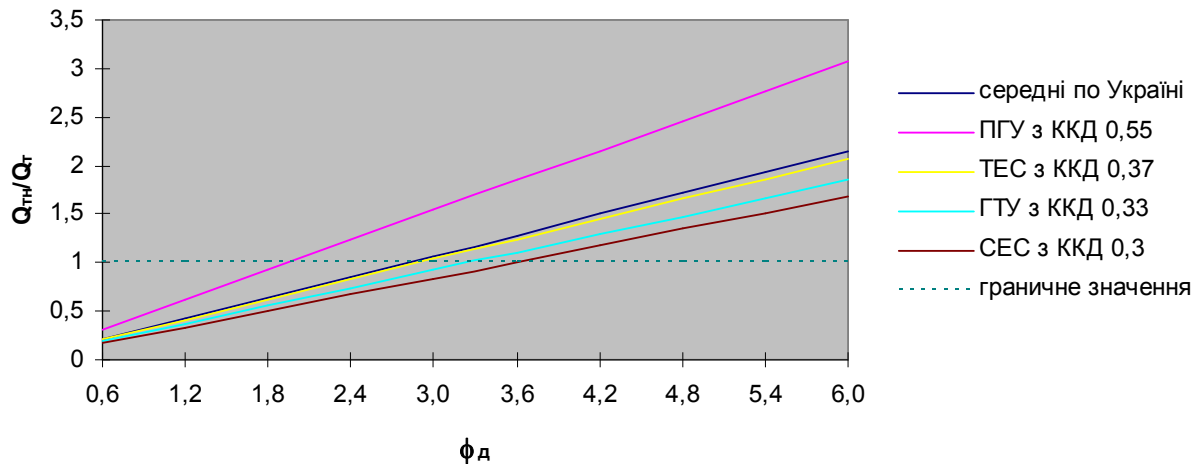


Рис. 3. Значення безрозмірного показника енергетичної ефективності ТН з електроприводом для теплових насосів малої потужності залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення

На рис. 4 показані значення безрозмірного показника енергетичної ефективності ТН з електроприводом для теплових насосів великої потужності залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення. Вище пунктирної лінії визначена область ефективного використання таких ТН.

Залежності на рис. 3 та 4 дозволяють визначити мінімальні дійсні значення коефіцієнта перетворення ТН, вище яких застосування певного виду ТН є доцільним.

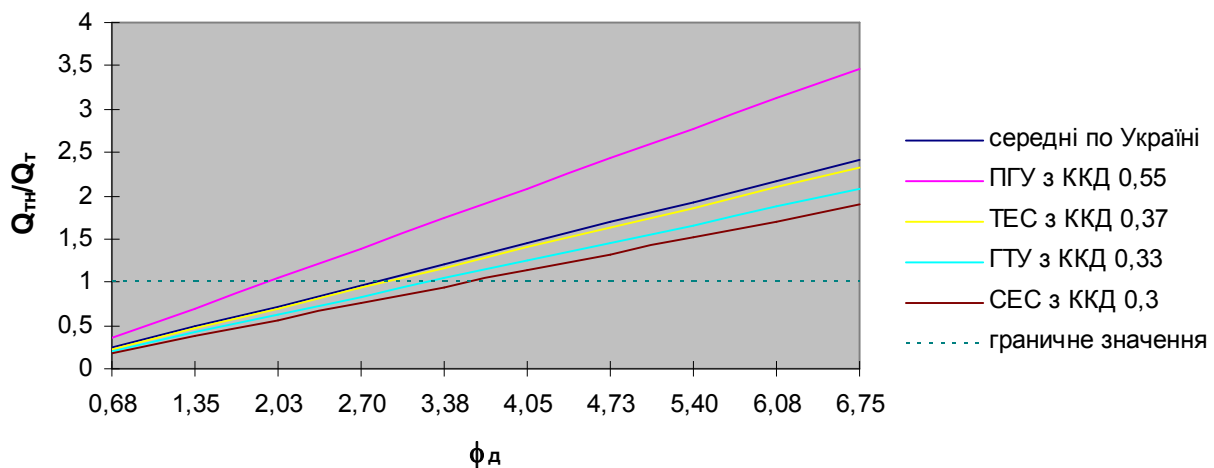


Рис. 4. Значення безрозмірного показника енергетичної ефективності ТН з електроприводом для теплових насосів великої потужності залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення

На рис. 5 показані значення безрозмірного показника енергетичної ефективності ТН з когенераційним приводом для теплових насосів малої та великої потужності залежно від теоретичних значень коефіцієнта перетворення. Як і в попередніх випадках, пунктирною лінією на рис. 5 показане граничне значення показника енергетичної ефективності ТН, вище якого

визначена область ефективного використання таких ТН.

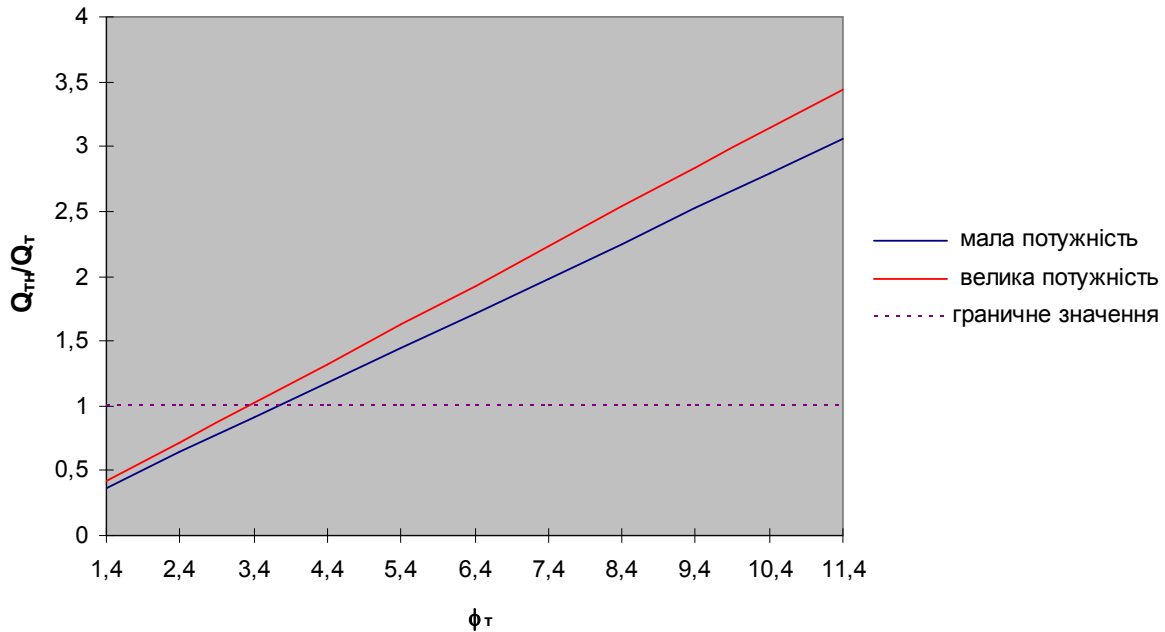


Рис. 5. Значення безрозмірного показника енергетичної ефективності ТН з когенераційним приводом для теплових насосів малої та великої потужності залежно від теоретичних значень коефіцієнта перетворення

Залежності, показані на рис. 5, дозволяють визначити мінімальні теоретичні значення коефіцієнта перетворення ТН, вище яких застосування певного виду ТН є доцільним.

На рис. 6 показані значення безрозмірного показника енергетичної ефективності ТН з когенераційним приводом для теплових насосів малої потужності залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення. Вище пунктирної лінії визначена область ефективного використання таких ТН.

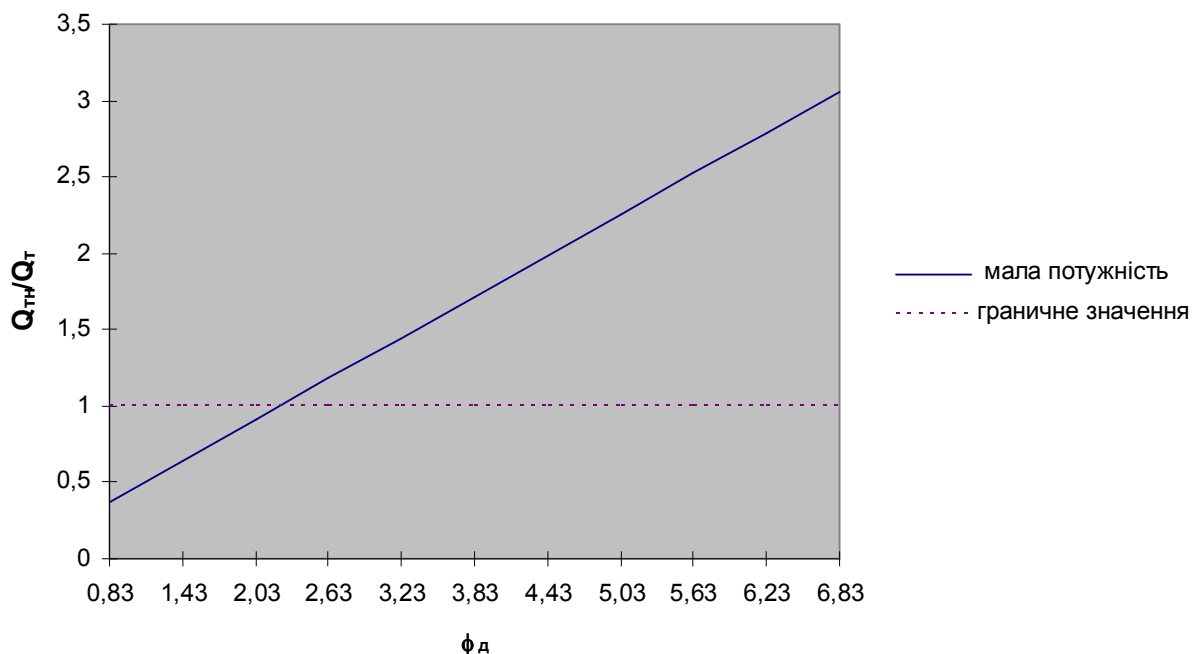


Рис. 6. Значення безрозмірного показника енергетичної ефективності ТН з когенераційним приводом для теплових насосів малої потужності залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення

Значення безрозмірного показника енергетичної ефективності ТН з когенераційним при-

водом для теплових насосів великої потужності залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення показані на рис. 7. Як і в попередніх випадках, пунктирною лінією на рис. 7 показане граничне значення показника енергетичної ефективності ТН, вище якого визначена область ефективного використання таких ТН.

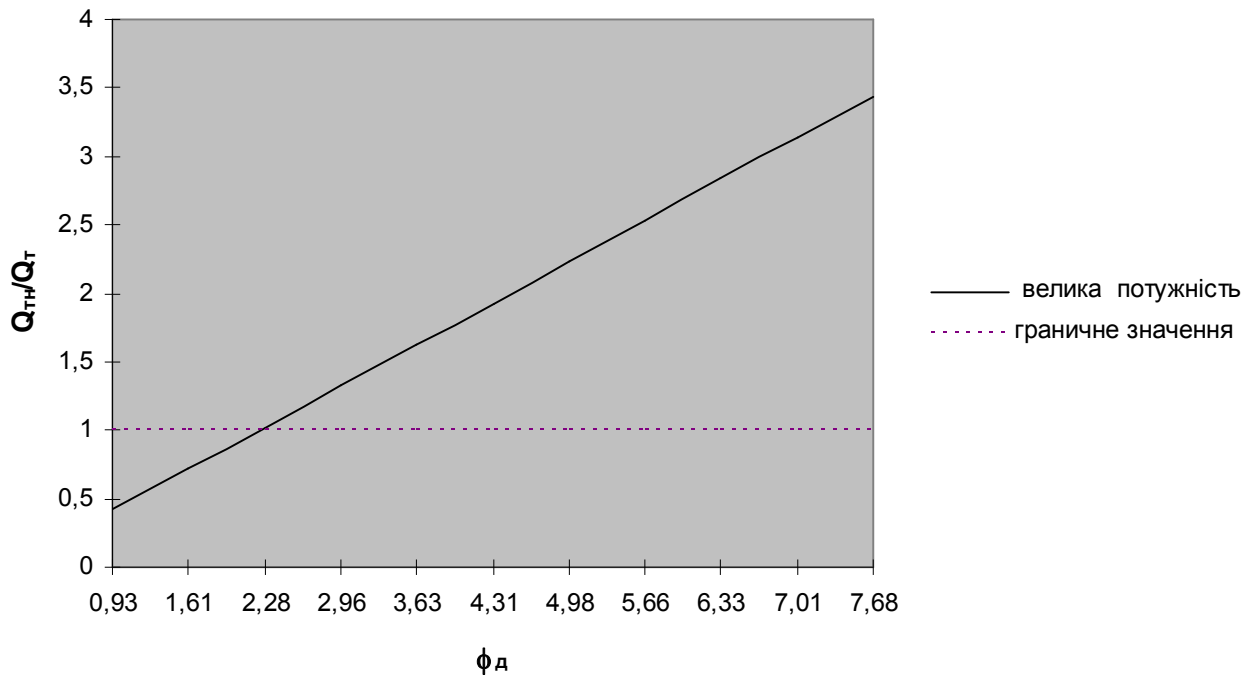


Рис. 7. Значення безрозмірного показника енергетичної ефективності ТН з когенераційним приводом для теплових насосів великої потужності залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення

Залежності, показані на рис. 6 та 7, дозволяють визначити мінімальні дійсні значення коефіцієнта перетворення ТН, вище яких застосування певного виду ТН є доцільним.

Висновки

Здійснено оцінку енергетичної ефективності парокомпресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводами, визначено ефективні дійсні режими роботи ТН з електричним та когенераційним приводами з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

Проаналізовано енергетичну ефективність системи «Джерело приводної енергії ТН – ТН – споживач теплоти від ТН» на прикладі парокомпресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводами. Перевагою такого підходу є врахування втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії від електростанцій різних типів до ТН з метою визначення ефективних дійсних режимів роботи ТН з електричним та когенераційним приводами.

Для парокомпресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводами визначено області їхнього ефективного використання за безрозмірним показником енергетичної ефективності. Аналіз проведено для парокомпресійних ТН малої та великої потужностей.

Запропоновані на рис. 1 – 7 залежності дозволяють визначити мінімальні теоретичні та дійсні значення коефіцієнта перетворення ТН, вище яких застосування певного виду ТН є доцільним.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Исанова А. В. Повышение эффективности и выбор рациональных параметров и режимов работы теплонасосных станций для систем отопления и горячего водоснабжения : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук : 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 тепlopостачання / 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 тепlopостачання / М. К. Безродний, Н. О. Притула // Вісник ВПШ. – 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. Петин Ю. М. Тепловые насосы / Ю. М. Петин, В. Е. Накоряков // Российский химический журнал. – 1999. – Т. 41, № 6. – С. 107 – 111.
6. Калнинь И. М. Техника низких температур на службе энергетики / И. М. Калнинь // Холодильное дело. – 1996. – № 1. – С. 26 – 29.
7. Елистратов С. Л. Комплексное исследование эффективности тепловых насосов : дисс. ... доктора техн. наук : 01.04.14 / Елистратов Сергей Львович. – Новосибирск, 2010. – 383 с.
8. Енергетична стратегія України на період до 2030 року (Схвалена розпорядженням Кабінету міністрів України від 15 березня 2006 р.). Офіційний сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України. – Режим доступу: <http://mpe.kmu.gov.ua/fuel/control/uk/doccatalog>.
9. Войтенко В. А. Порівняльний енергетичний аналіз впливу на навколишнє середовище транспортних засобів на електричній і бензиновій тязі / В. А. Войтенко // Електротехн. та комп'ютер. системи: наук.-техн. журн. – 2011. – №03 (79). – С. 116 – 118.
10. Тепловые и атомные электрические станции. Справочник / [Абрамов В. И., Бартоломей Г. Г., Бисярин А. Н. и др.] ; под. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
11. Ткаченко С. Й. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах тепlopостачання. Монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2009. – 176 с.

Остапенко Ольга Павлівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики.

Лещенко Вадим Володимирович – студент інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання.

Тіхоненко Роман Олегович – студент інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання. Вінницький національний технічний університет.