

УДК 621.577

О. П. Остапенко, к. т. н., доц.; В. В. Лещенко; Р. О. Тіхоненко

ЕНЕРГЕТИЧНІ ПЕРЕВАГИ ЗАСТОСУВАННЯ ПАРОКОМПРЕСІЙНИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ З ЕЛЕКТРИЧНИМ ТА КОГЕНЕРАЦІЙНИМ ПРИВОДАМИ

Проаналізовано енергетичні переваги застосування парокompресійних теплових насосів (ТН) з електричним та когенераційним приводами. Представлені результати досліджень дозволяють оцінити економію умовного палива від застосування парокompресійних ТН з електричним та когенераційним приводами для різних режимів роботи ТН і здійснити вибір ефективних режимів роботи парокompресійних ТН з урахуванням впливу джерел приводної енергії парокompресійних ТН і врахуванням втрат енергії під час генерування, постачання і перетворення електричної енергії.

Ключові слова: енергетичні переваги, парокompресійний тепловий насос, коефіцієнт перетворення, електричний привод, когенераційний привод, економія умовного палива.

Вступ

В Україні сучасний розвиток енергетики характеризується значним збільшенням вартості енергоресурсів і погіршенням стану довкілля. Розв'язання проблем енерго- та ресурсозбереження й охорони довкілля є пріоритетними напрямками досліджень в галузі споживання паливно-енергетичних ресурсів [1]. Частка споживання природного газу в промисловому комплексі України дотепер залишається значною. Значну частину енергетичних проблем країни розв'язують за рахунок спалювання природного газу. У світлі енергетичної кризи актуальним стає питання ефективного споживання енергоресурсів і впровадження новітніх енергозберігальних технологій [2]. Використання парокompресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводами сприятиме економії природного газу та покращенню стану довкілля за рахунок зниження теплового забруднення та кількості шкідливих викидів продуктів згорання.

Питанням оцінки енергетичної ефективності теплових насосів за останні роки присвячено чимало публікацій [1 – 6]. 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. Проте в дослідженнях [1 – 4] не враховано втрати енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії від електростанцій різних типів. Автором [5] проведено термодинамічний аналіз різних типів ТН. У роботі [6] визначено ефективні дійсні режими роботи ТН 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 ТН.

У роботах [1 – 6] авторами не здійснено оцінку обсягів економії енергоресурсів від упрощення парокompресійних теплових насосів з електричним і когенераційним приводами з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

Метою дослідження є визначення енергетичних переваг застосування парокompресійних ТН та оцінка обсягів економії енергоресурсів від упровадження парокompресійних ТН з електричним і когенераційним приводами з урахуванням впливу джерел приводної енергії парокompресійних ТН та врахування втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії; визначення ефективних режимів роботи парокompресійних ТН з електричним і когенераційним приводами.

Основна частина

У парокompресійних ТН підвищення температурного рівня низькотемпературної теплоти відбувається за механічного стискання холодоагенту в компресорі. Теплові насоси можуть мати електричний та когенераційний приводи (від газопоршневого двигуна). Когенераційний привод теплових насосів дозволяє уникнути додаткових втрат електроенергії під час транспортування. Крім того застосування ТН з когенераційним приводом компресора від газових двигунів можна розглядати як один з важливих напрямів енерго- і ресурсозбереження, оскільки він передбачає утилізацію теплоти відхідних газів після газового двигуна, що забезпечує кращу енергетичну ефективність.

Найчастіше енергетичну ефективність перетворення енергії в тепловому насосі оцінюють коефіцієнтом перетворення енергії ϕ , який дорівнює відношенню енергії, що надійшла споживачу, до енергії, яку використали для реалізації циклу.

Теоретичне значення коефіцієнта перетворення ТН визначають за формулою:

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

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

$$\phi_d = \phi_r \cdot \eta_{\text{тн}}, \quad (2)$$

де $\eta_{\text{тн}}$ – енергетичний ККД ТН, який враховує всі втрати енергії в тепловому насосі. Величина енергетичного ККД сучасних ТН в межах 0,65 – 0,7 [4].

У вітчизняній і закордонній літературі, а також на практиці ефективність використання ТН оцінюють переважно за дійсним коефіцієнтом перетворення. Для ефективної роботи ТН з електричним приводом вважають прийнятною величину $\phi_d \geq 2,5 \dots 3,0$; високу енергетичну ефективність ТН забезпечують за $\phi_d = 3,5 \dots 4,0$. Ці значення коефіцієнтів перетворення підтверджують статистичні дані щодо дійсних коефіцієнтів перетворення ТН, які випускають фірми LG, Mitsubishi, MHPUL, MHPUE, FUJITSU, McQUAY, HPVU, «Енергія», «Тритон-ЛТД» [4].

Високу енергетичну ефективність ТН з когенераційним приводом забезпечують за $\phi_d \geq 2,0$; що зумовлено врахуванням додаткової теплової потужності від утилізаційного обладнання когенераційного приводу ТН [7].

У нашому дослідженні проаналізовано енергетичну ефективність системи «Джерело приводної енергії ТН – ТН – споживач теплоти від ТН» на прикладі парокompресійних 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 режимів роботи ТН з електричним і когенераційним приводами та оцінки обсягів економії енергоресурсів від упровадження парокompресійних ТН.

Електроенергію в Україні виробляють теплові (ТЕС), атомні електростанції (АЕС) та гідроелектростанції (ГЕС). Знаючи значення ККД ТЕС, АЕС та ГЕС та частки електричної енергії, що вони генерують, можна визначити середній ККД генерування електроенергії в Україні.

Усереднене значення ККД електростанцій становитиме:

$$\eta_{EC} = \frac{\alpha_{ТЕС} + \alpha_{АЕС} + \alpha_{ГЕС}}{\frac{\alpha_{ТЕС}}{\eta_{ТЕС}} + \frac{\alpha_{АЕС}}{\eta_{АЕС}} + \frac{\alpha_{ГЕС}}{\eta_{ГЕС}}}, \quad (3)$$

де $\alpha_{ТЕС}$, $\alpha_{АЕС}$, $\alpha_{ГЕС}$ – частки електричної енергії, які генерують відповідні електростанції.

Ураховуючи, що $\alpha_{ТЕС} = 0,463$; $\alpha_{АЕС} = 0,47$ та $\alpha_{ГЕС} = 0,07$, із формули (3) можна одержати усереднене значення ККД електростанцій $\eta_{EC} = 0,383$ [6].

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

$$\eta_{EC} = \frac{\sum \alpha_i}{\sum (\alpha_i / \eta_i)}, \quad (4)$$

де α_i – частки електричної енергії, які генерують відповідні електростанції; η_i – ККД відповідної електростанції.

Від електростанцій електрична енергія через розподільчі мережі надходить до споживача. ККД функціонування розподільчих електричних мереж визначається рівнем втрат енергії під час 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 $\eta_{ЛЕП} = 0,875$ [6].

У кінці енергетичного ланцюга 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 $\eta_{ЕП} = 90 - 95\%$ [6].

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

$$\eta_{ЕЛ} = \eta_{EC} \cdot \eta_{ЛЕП} \cdot \eta_{ЕП}. \quad (5)$$

Для ТН з когенераційним приводом загальний ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії визначатимемо за формулою: $\eta_{ЕЛ} = \eta_{ЕД} \cdot \eta_{ЕП}$, де $\eta_{ЕД}$ – ефективний ККД газопоршневого двигуна.

Для ТН з когенераційним приводом теоретичне значення коефіцієнта перетворення визначаємо з урахуванням потужності утилізаційного обладнання когенераційного приводу $\varphi_T = \frac{Q_{ТН} + \sum Q_{УТ}}{N_{КМ}}$, де $N_{КМ}$ – теоретична потужність компресора ТН, $\sum Q_{УТ}$ – потужність утилізаційного обладнання когенераційного приводу ТН.

Ефективна інтеграція парокompресійних ТН з електричним і когенераційним приводами в промисловість та енергетику обґрунтована забезпеченням економії умовного палива від упродовження.

Економія умовного палива (у відсотках) від застосування парокompресійних ТН з елект-

ричним і когенераційним приводами визначають так:

$$\Delta B_y = \left(1 - \frac{\eta_{д.т.}^н}{\varphi \cdot \eta_{ЕЛ}} \right) \cdot 100, \quad (6)$$

де $\eta_{д.т.}^н$ – ККД-нетто заміщеного джерела теплоти, $\eta_{ЕЛ}$ – загальний ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

Ефективне впровадження парокompресійних ТН з електричним і когенераційним приводами в промисловість та енергетику буде досягнуто за умови:

$$\varphi_d > \frac{\eta_{д.т.}^н}{\eta_{ЕЛ}}, \quad (7)$$

де φ_d – дійсний коефіцієнт перетворення парокompресійних ТН з формули (2).

Дослідження енергетичної ефективності ТН проводили методом математичного моделювання роботи ТН із використанням програми в Excel. Досліджували енергетичну ефективність ТН з електроприводом і когенераційним приводом компресора від газопоршневого двигуна (ГПД). Схеми зазначених ТН наведені в роботі [8].

У дослідженні здійснена оцінка економії умовного палива від упровадження парокompресійних ТН малої (до 1 МВт) та великої потужностей з електричним і когенераційним приводами (від ГПД). Дослідження проводили для випадків використання в електроприводних ТН електроенергії від електростанцій різних типів, а також для усереднених значень ККД електростанцій в Україні. У дослідженні враховано, що ККД-нетто заміщеного джерела теплоти $\eta_{д.т.}^н = 0,8$.

На рис. 1 та 2 показані значення економії умовного палива (у відсотках) від застосування парокompресійних ТН з електроприводом для теплових насосів малої та великої потужностей відповідно, 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. Залежності, показані на рис. 1 та 2, дозволяють визначити мінімальні теоретичні значення коефіцієнта перетворення електроприводних ТН, вище яких застосування певного виду ТН забезпечує економію умовного палива та є доцільним.

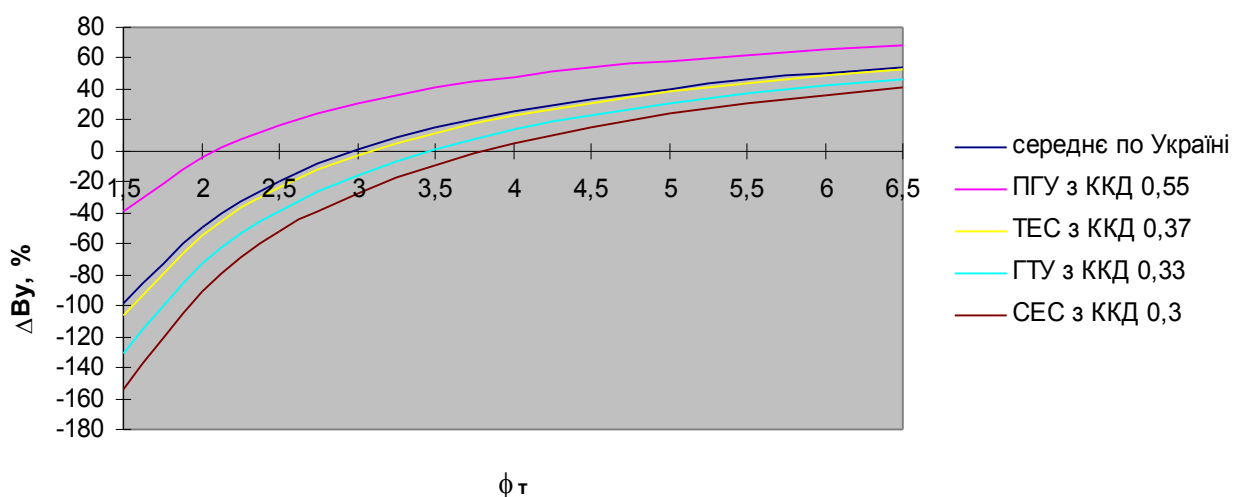


Рис. 1. Значення економії умовного палива (у відсотках) від застосування парокompресійних ТН з електроприводом для теплових насосів малої потужності залежно від теоретичних значень коефіцієнта перетворення

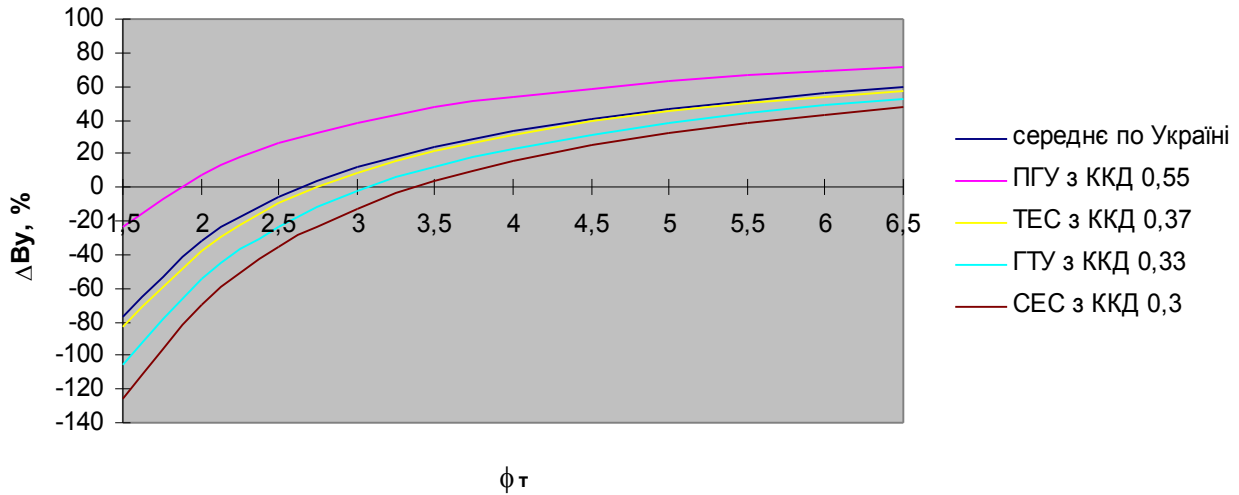


Рис. 2. Значення економії умовного палива (у відсотках) від застосування парокомпресійних ТН з електроприводом для теплових насосів великої потужності залежно від теоретичних значень коефіцієнта перетворення

На рис. 3 та 4 показані значення економії умовного палива (у відсотках) від застосування парокомпресійних ТН з електроприводом для теплових насосів малої та великої потужностей відповідно, залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення. Дослідження проводили для випадків використання в ТН електроенергії від електростанцій різних типів, а також для усереднених значень ККД електростанцій в Україні. Ці залежності дозволяють визначити мінімальні дійсні значення коефіцієнта перетворення електроприводних ТН, вище яких застосування певного виду ТН забезпечує економію умовного палива та є доцільним.

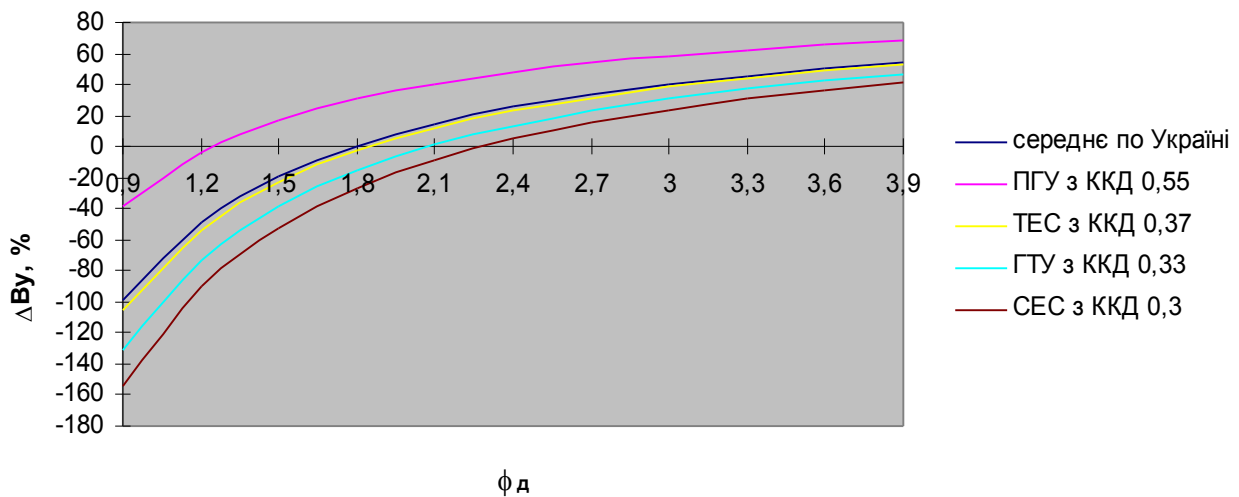


Рис. 3. Значення економії умовного палива (у відсотках) від застосування парокомпресійних ТН з електроприводом для теплових насосів малої потужності залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення

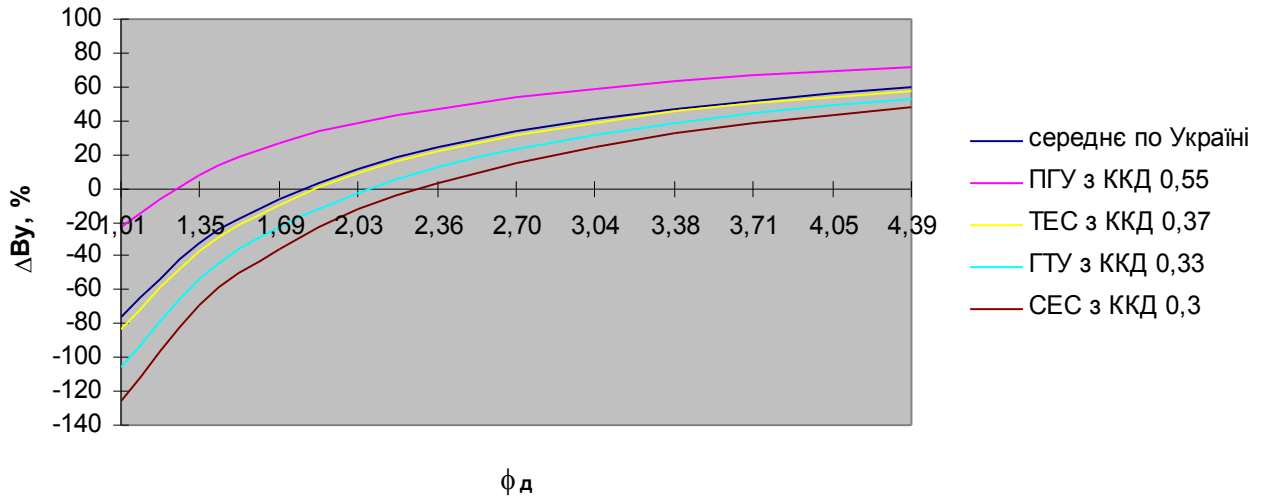


Рис. 4. Значення економії умовного палива (у відсотках) від застосування парокомпресійних ТН з електроприводом для теплових насосів великої потужності залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення

Запропоновані на рис. 1 – 4 залежності визначають енергетичні переваги застосування парокомпресійних ТН з електроприводом і дозволяють оцінити економію умовного палива від застосування парокомпресійних ТН з електроприводом у разі різних режимів роботи ТН та використання електроенергії від електростанцій різних типів, а також для усереднених значень ККД електростанцій в Україні.

На рис. 5 показані значення економії умовного палива (у відсотках) від застосування парокомпресійних ТН з когенераційним приводом для теплових насосів малої та великої потужності залежно від теоретичних значень коефіцієнта перетворення. Запропоновані на рис. 5 залежності дозволяють визначити мінімальні теоретичні значення коефіцієнта перетворення ТН, вище яких застосування певного виду когенераційних ТН забезпечує економію умовного палива та є доцільним.

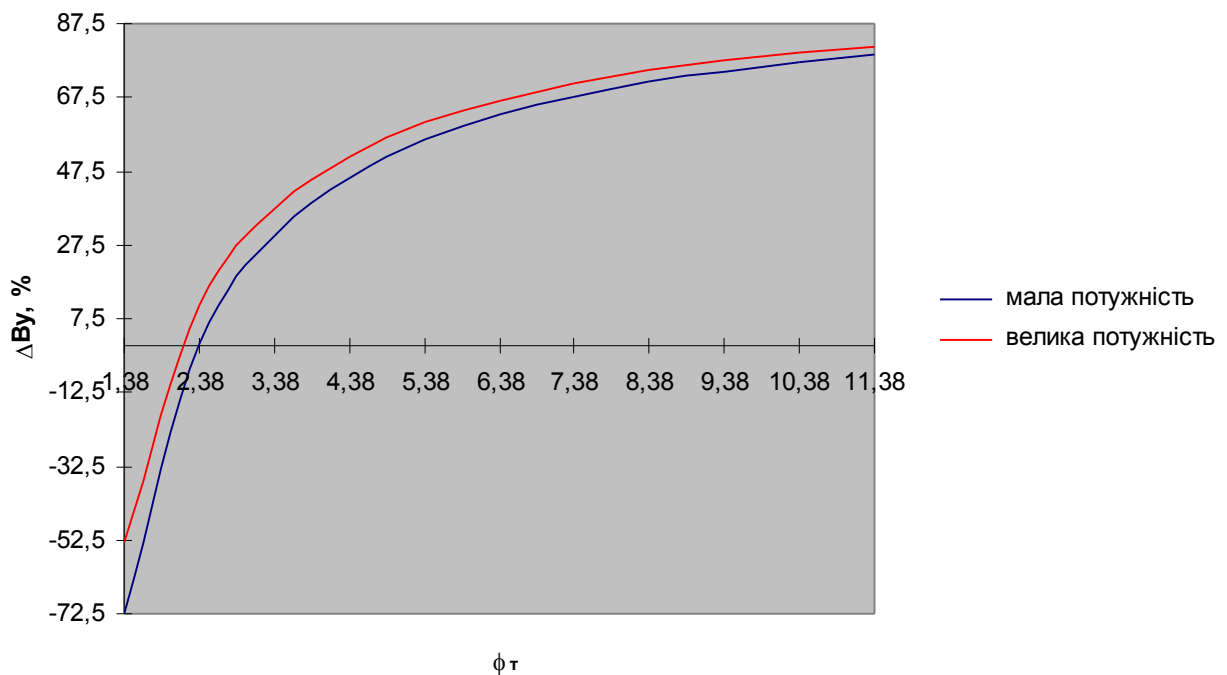


Рис. 5. Значення економії умовного палива (у відсотках) від застосування парокомпресійних ТН з когенераційним приводом для теплових насосів малої та великої потужності залежно від теоретичних значень

коефіцієнта перетворення

На рис. 6 та 7 показані значення економії умовного палива (у відсотках) від застосування парокомпресійних ТН із когенераційним приводом для теплових насосів малої та великої потужностей відповідно, залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення. Ці залежності дозволяють визначити мінімальні дійсні значення коефіцієнта перетворення ТН, вище яких застосування певного виду когенераційних ТН забезпечує економію умовного палива та є доцільним.

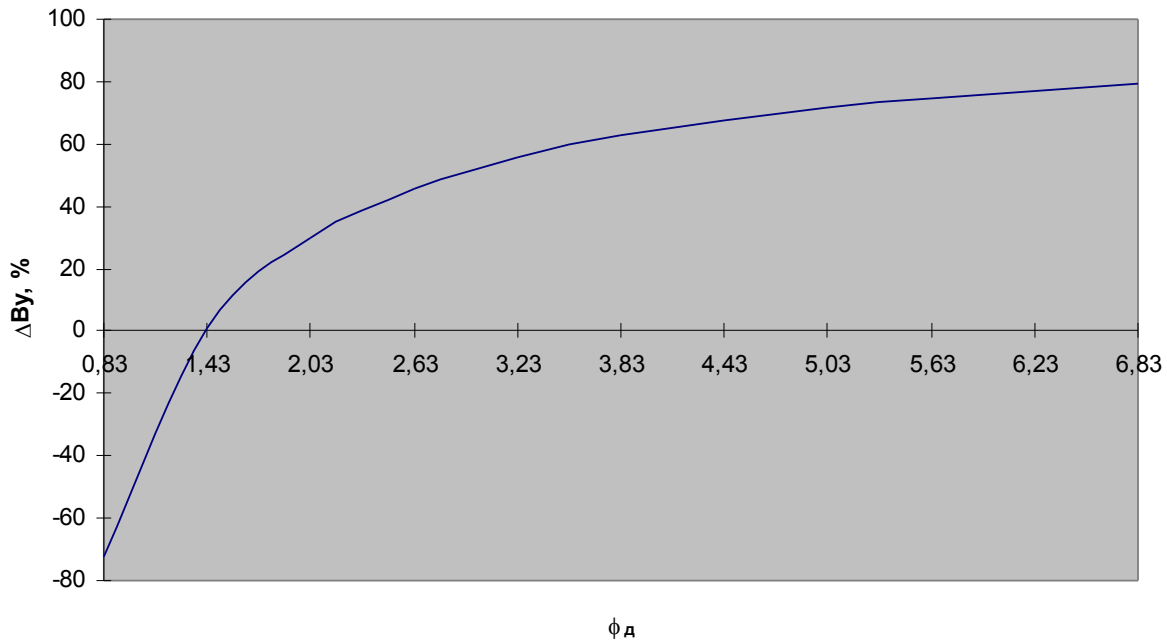


Рис. 6. Значення економії умовного палива (у відсотках) від застосування парокомпресійних ТН із когенераційним приводом для теплових насосів малої потужності залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення

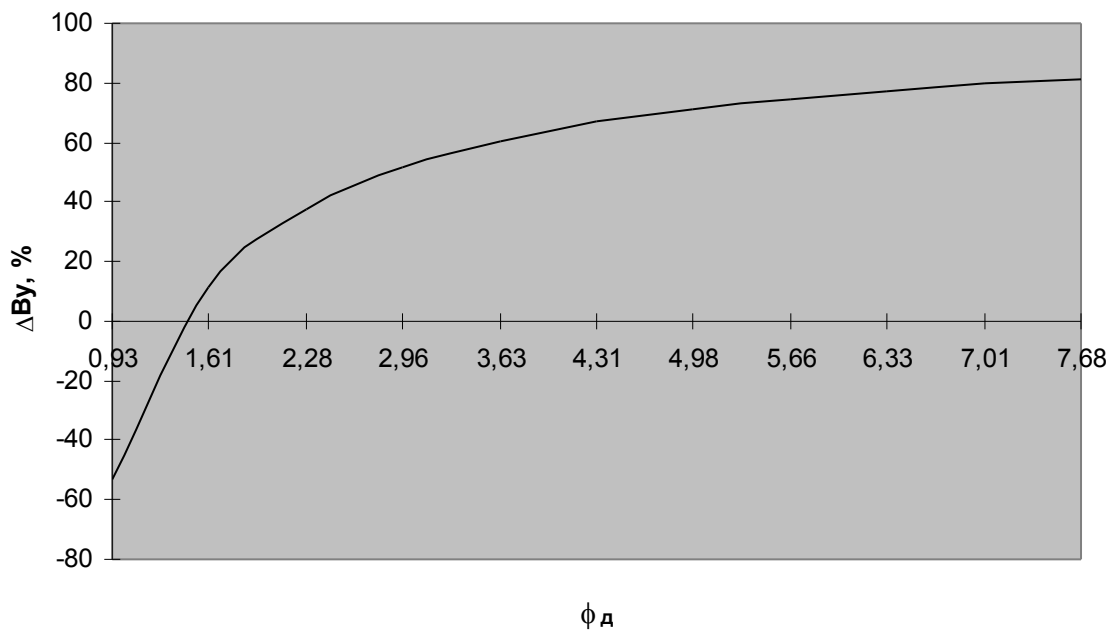


Рис. 7. Значення економії умовного палива (у відсотках) від застосування парокомпресійних ТН із когенераційним приводом для теплових насосів великої потужності залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення

Запропоновані на рис. 5 – 7 залежності визначають енергетичні переваги застосування парокompресійних ТН із когенераційним приводом та дозволяють оцінити економію умовного палива від застосування парокompресійних ТН із когенераційним приводом у разі різних режимів роботи ТН.

Запропоновані в дослідженні залежності (рис. 1 – 7) дозволяють визначити мінімальні теоретичні та дійсні значення коефіцієнта перетворення ТН, вище яких застосування певного виду ТН забезпечує економію умовного палива та є доцільним.

За результатами дослідження, визначено, що достатню енергетичну ефективність ТН з електричним приводом для різних джерел приводної енергії парокompресійних ТН та з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії забезпечують за $\varphi_d \geq 2,5$. Високу енергетичну ефективність ТН з електричним приводом для різних джерел приводної енергії парокompресійних ТН та з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії забезпечують за $\varphi_d \geq 3,5$. Ці значення коефіцієнтів перетворення добре узгоджуються зі статистичними даними з дослідження [4] щодо дійсних коефіцієнтів перетворення ТН, які випускають фірми LG, Mitsubishi, MHPUL, MHPUE, FUJITSU, McQUAY, HPVU, «Енергія», «Тритон-ЛТД».

Визначено, що високу енергетичну ефективність ТН із когенераційним приводом з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТН забезпечують за $\varphi_d \geq 2,0$, що добре узгоджується із даними з дослідження [7].

Представлені результати досліджень дозволяють оцінити економію умовного палива від застосування парокompресійних ТН з електричним і когенераційним приводами для різних режимів роботи ТН і здійснити вибір ефективних режимів роботи парокompресійних ТН з урахуванням впливу джерел приводної енергії парокompресійних теплових насосів і врахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

Висновки

Проаналізовано енергетичну ефективність системи «Джерело приводної енергії ТН – ТН – споживач теплоти від ТН» на прикладі парокompресійних 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 режимів роботи ТН з електричним та когенераційним приводами та оцінки обсягів економії енергоресурсів від упровадження парокompресійних ТН.

Запропоновані в дослідженні залежності (рис. 1 – 7) визначають енергетичні переваги застосування парокompресійних ТН і дозволяють визначити мінімальні теоретичні та дійсні значення коефіцієнта перетворення ТН, вище яких застосування певного виду ТН забезпечує економію умовного палива та є доцільним.

За результатами досліджень визначено, що достатню енергетичну ефективність ТН з електричним приводом для різних джерел приводної енергії парокompресійних ТН та з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії забезпечують за $\varphi_d \geq 2,5$. Високу енергетичну ефективність ТН з електричним приводом для різних джерел приводної енергії парокompресійних ТН та з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії забезпечують за $\varphi_d \geq 3,5$. Визначено, що високу енергетичну ефективність ТН із когенераційним приводом з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТН забезпечують за $\varphi_d \geq 2,0$. Ці значення коефіцієнтів перетворення добре узгоджуються зі статистичними даними щодо дійсних коефіцієнтів перетворення ТН, які випускають фірми LG, Mitsubishi, MHPUL, MHPUE, FUJITSU, McQUAY, HPVU, «Енергія», «Тритон-ЛТД».

Представлені результати досліджень дозволяють оцінити економію умовного палива від Наукові праці ВНТУ, 2015, № 1

застосування парокompресійних ТН з електричним та когенераційним приводами для різних режимів роботи ТН і здійснити вибір ефективних режимів роботи парокompресійних ТН з урахуванням впливу джерел приводної енергії парокompресійних теплових насосів і втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

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 / Исанова Анна Владимировна. – 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. Пritула // 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 приводами [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. Калнинь И. М. Техника низких температур на службе энергетики / И. М. Калнинь // Холодильное дело. – 1996. – № 1. – С. 26 – 29.
8. Ткаченко С. Й. Парокompресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2009. – 176 с.

Остапенко Ольга Павлівна – кандидат технічних наук, 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.