

© Г.С. Олішевський¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ОБГРУНТУВАННЯ НЕТРАДИЦІЙНИХ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ЗАХОДІВ НА СИЛОВОМУ ОБЛАДНАННІ ПІДСТАНЦІЙ

© Н. Olishevskiy¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

JUSTIFICATION OF NON-TRADITIONAL ENERGY-CONSERVING MEASURES IN POWER EQUIPMENT OF SUBSTATIONS

Мета. Аналіз та обґрунтування застосування теплонасосного способу утилізації теплових виділень в системі охолодження потужного силового трансформатора для різних схем енергоспоживання з подальшою рекомендацією найраціональніших варіантів.

Методика. При розробці методики розрахунку були використані методи аналізу і математичного моделювання термодинамічних процесів, що відбуваються при проходженні холодильного циклу теплового насоса, а також парових процесів в мікротурбіні.

Результати. Проведена оцінка розроблених раніше пропозицій щодо трансформації електричної енергії в теплову в різноманітних джерелах електричної генерації. Обґрунтована необхідність впровадження нетрадиційних енергозберігаючих технологій для утилізації теплових виділень потужних силових трансформаторів. За результатами досліджень визначено, що найраціональнішою схемою застосування теплового насоса в системі утилізації теплових виділень силового трансформатора ТДНМ - 160 МВА/330 кВ є опалювальна схема, що має явні переваги в справі економії енергоресурсів (економія умовного палива більш ніж у 4 рази у порівнянні з котлом) і вимагає в порівнянні з іншими схемами відчутно менших капітальних і експлуатаційних затрат. Обґрунтована можливість відчутної економії умовного палива (8%) при застосуванні теплового насоса для попереднього підігріву живильної води для мікротурбіни.

Наукова новизна. Отримані математичні залежності параметрів теплового насоса для дослідження нетрадиційних способів його застосування в системі охолодження потужних силових трансформаторів з метою утилізації теплових виділень на потреби різних енергетичних установок із визначенням раціональних режимів їх роботи.

Практична значимість. Розроблена комплексна методика розрахунку, що враховує конкретні параметри силового трансформатора, паросилових і опалювальних установок, характеристики холодоагенту, холодильного циклу та інших параметрів теплового насоса і дозволяє визначати раціональні режими роботи енергетичного обладнання й робити рекомендації про можливість застосування теплового насоса в тих чи інших схемах енергетичних установок.

Ключові слова: енергозбереження, коефіцієнт перетворення, парова мікротурбіна, силовий трансформатор, тепловий насос, утилізація теплоти.

Вступ. В сучасних непростих умовах енергетична система України має суттєві проблеми з дефіцитом усіх видів енергії, а саме: не тільки електричної але й теплової, особливо у холодну пору року. Звісно, для подолання цієї кризи необхідно відновлювати зруйновані генерації та мережі, але це потребує величезних капітальних витрат, яких у цей важкий час бракує.

Тому слід використовувати різноманітні технічні удосконалення та нетрадиційні заходи щодо існуючого енергетичного обладнання з метою підвищення варіативності використання існуючих генеруючих потужностей та можливостей ефективної трансформації теплової енергії в електричну й навпаки.

Зараз виробництво електроенергії та теплової енергії здійснюється переважно окремо, відповідно на теплових і атомних станціях та в котельнях.

Для здійснення відповідних процесів взаємної трансформації різних видів енергії зручно використовувати такий нетрадиційний метод, як застосування теплового насосу (ТН).

Принцип дії теплового насосу полягає у відборі теплоти від різних низькопотенційних джерел енергії з подальшою трансформацією у високотемпературну теплову енергію і передачу її споживачу. При цьому витрачається енергія на привод компресора теплового насоса.

Існує досить багато пропозицій та обґрунтувань щодо застосування ТН в процесах трансформації електричної енергії в теплову в різноманітних системах кондиціонування та опалення будівель [1–5], а також джерелах електричної генерації.

Так було проаналізовано технологію застосування ТН та теплового акумулятора (ТА) для переведення функціонування гідроакумуючої електростанції (ГАЕС) в теплофікаційний режим гарячого водопостачання (ГВП) житлових будівель [6]. Була розроблена автоматизована методика визначення раціональних параметрів ТН та ТА для реалізації технології теплофікації ГАЕС та визначено, що це дозволить на третину зекономити витрати умовного палива у порівнянні з котельним агрегатом.

Також розглядалася нетрадиційна технологія переведення гідроелектростанції за допомогою ТН у теплофікаційний режим опалення та ГВП [7], що також дозволяє на третину зекономити витрати умовного палива у порівнянні з котельним агрегатом, а також здійснювати широке ефективне маневрування у різних співвідношеннях часток електричної та теплової генерації на відміну від ТЕЦ та інших енергетичних установок.

Але подібні заходи та технології потребують проєктування та застосування високопотужного спеціалізованого й високотехнологічного обладнання, що потребує великих капітальних затрат. Тому слід звернути увагу в енергозберігаючих нетрадиційних технологіях не тільки на потужне енергогенеруюче обладнання, але й на інші складові потужного обладнання систем електропостачання, де буде більш просто розробити та впровадити енергозберігаючі заходи з відносно невеликими затратами. В даному випадку пропонується проаналізувати ефективність утилізації теплових виділень потужних силових трансформаторів.

Постановка завдання. Метою дослідження є аналіз та обґрунтування застосування теплонасосного способу утилізації теплових виділень в системі охолодження потужного силового трансформатора для різних схем енергоспоживання з подальшою рекомендацією найраціональніших варіантів.

Теплонасосне устаткування отримує все більш широке застосування в енергосистемах. Як правило, теплові насоси застосовуються для теплопостачання і

кондиціонування житлових і адміністративних будівель. Теплові насоси використовують низькопотенційні джерела теплоти і теплові потоки, що викидаються в навколишнє середовище на різних виробництвах і технологічних процесах.

В даному випадку, як перспективне джерело теплоти розглядається масло, що охолоджує силовий трансформатор. Теплота даного масла може бути використана за допомогою теплового насоса для задоволення різних енергетичних потреб споживачів. Тому проблема аналізу і обґрунтування застосування теплонасосного устаткування в тепловій схемі системи охолодження потужних трансформаторів, виходячи з умов раціональних значень показників ефективності використання енергії, є важливою і актуальною.

Основна частина. На даний момент на крупних вузлових підстанціях електропостачання міст, гірських збагачувальних комбінатах, електросталеплавильних підприємствах використовуються силові трансформатори великої потужності. Під час роботи даних трансформаторів частина трансформованої електромагнітної енергії втрачається і виділяється у вигляді теплової енергії, що досягає значень в сотні кіловат. При цьому обмотки трансформатора розігріваються до $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ і вище, що є небезпечним для цілісності ізоляції і вимагає застосування систем охолодження різних типів і схем. Для потужних трансформаторів зазвичай використовується масляна система охолодження, яка відводить теплоту, що виділяється, за допомогою спеціальних радіаторів в навколишнє середовище (рис. 1).

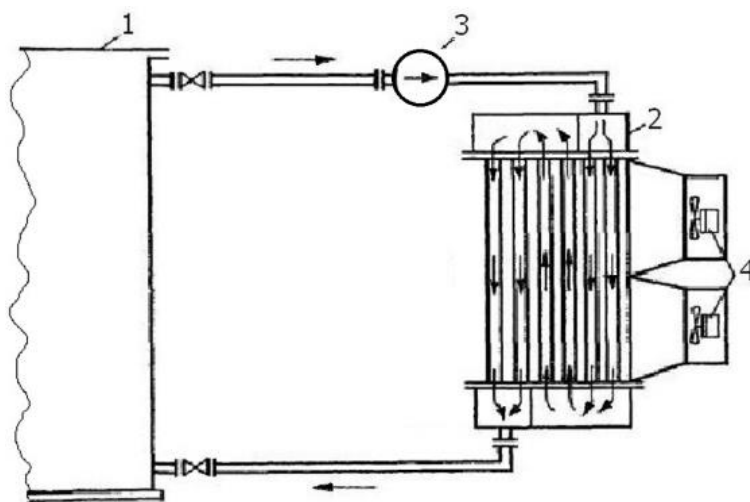


Рис. 1. Схема масляного охолодження потужного трансформатора:
1 – бак трансформатора; 2 – теплообмінник охолоджувача; 3 – масляний насос;
4 – вентилятори охолоджувача

Це є нераціональним з погляду прийнятої в країні стратегії енергозбереження. Раніше на окремих підстанціях середньої потужності мали місце випадки використання теплової енергії силових трансформаторів для потреб власного опалювання. Дані системи опалювання могли бути масляного, водяного або повітряного типу [8]. Проте, при цьому використовувався принцип безпосередньої передачі тепла від масла, що охолоджує трансформатор, до вживаного

теплоносія. При цьому температура теплоносія в теплообмінниках досягалася не більш 57°C , що для системи опалення часто недостатньо, а також необхідне розташування теплового споживача поблизу трансформатора, що також не завжди допустимо, особливе при високих потужностях і напругах.

Тому для підвищення температури теплового потоку, що відводиться від трансформатора, було вирішено проаналізувати наступну схему корисного використання теплоти, що виділяється, із застосуванням теплового насоса (рис. 2).

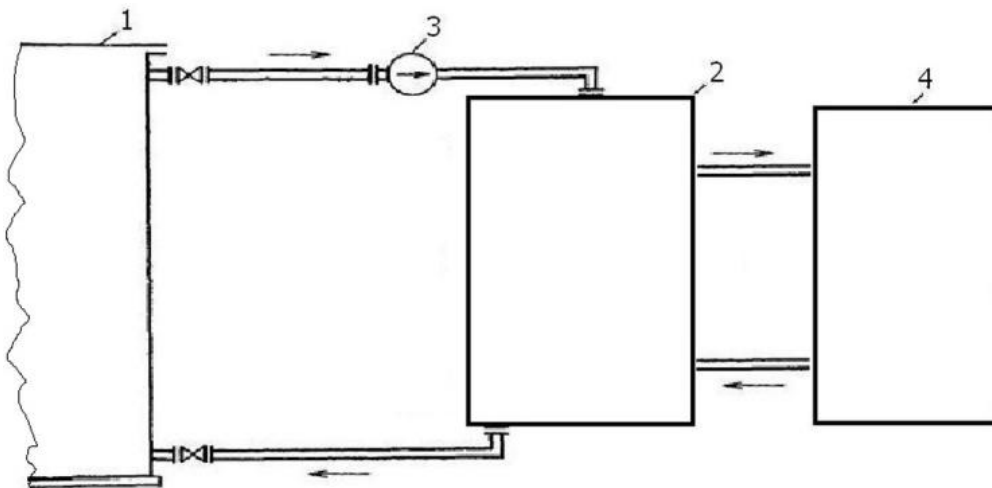


Рис. 2. Схема утилізації теплових виділень силового трансформатора із застосуванням теплового насоса: 1 – бак трансформатора; 2 – тепловий насос; 3 – масляний насос; 4 – споживач теплової енергії

Було вирішено проаналізувати можливості застосування теплового насоса, що використовує теплову енергію потужного трансформатора для різних видів споживачів теплової енергії. У якості приклада був узятий силовий трансформатор ТДНМ – 160 МВА/330 кВ. Такі трансформатори (рис. 3) використовуються на підприємстві Дніпросталь.



Рис. 3. Силовий трансформатор підприємства Дніпросталь

У даному трансформаторі потужність відбору теплоти в середньому може скласти 375 кВт досягши температури масла в баку до 90 °С.

Були проаналізовані наступні можливості використання теплової енергії:

- в парових мікротурбінах для електрифікаційного і теплофікаційного циклів;
- в установках опалювання і гарячого водопостачання.

Для дослідження різноманітних режимів роботи теплонасосного обладнання була розроблена комплексна автоматизована методика щодо визначення усіх його необхідних параметрів для різних випадків утилізації теплової енергії системи охолодження трансформаторів.

Автоматизована методика розрахунку параметрів теплонасосного обладнання, що працює в системі охолодження потужного трансформатора має наступний алгоритм дій:

1. Вибір холодоагенту, завдання потужності теплових виділень системи охолодження трансформатора, початкових та кінцевих температур масла, що віддає тепло до ТН та води в системі опалення та ГВС, фізичних параметрів води, масла та холодоагенту, технічних параметрів теплового насосу.

2. Формування і введення функцій значень ентальпій холодоагенту від температури конденсації по чотирьом базовим точкам холодильного циклу для заданих температур випаровування. (на підставі даних p , i – діаграми вибраного холодоагенту).

3. Формування функцій питомих характеристик холодильного циклу (холодопродуктивність, навантаження конденсатора, теоретична робота компресора) від температури конденсації для заданих температур випаровування.

4. Формування функціональних залежностей енергетичних параметрів ТН (масова витрата холодоагенту, потужність, споживана приводом компресора ТН, холодильна потужність випарника, коефіцієнт перетворення енергії) від потужності теплових виділень трансформатора і температури конденсації для заданих температур випаровування холодоагенту.

5. Для заданого холодоагенту, його температури конденсації і температури випаровування, потужності теплових виділень трансформатора за допомогою сформованих функцій визначаються енергетичні параметри ТН, використовувані в подальших розрахунках різних енергоустановок.

При розробці методики були використані методи аналізу і чисельного моделювання, реалізовані в середовищі Mathcad Professional.

За допомогою розробленої комплексної методики була оцінена ефективність застосування теплового насоса для ряду випадків.

Було досліджено застосування мікротурбіни (рис. 4) потужністю від 100 до 1000 кВт, що є характерним прикладом енергозберігаючих технологій, що дозволяють утилізувати надмірну теплову енергію. Дана технологія дозволяє одержати додаткову електричну і теплову енергію, яку можна пустити на покриття власних потреб підприємства.



Рис. 4. Парова мікротурбіна потужністю 100...1000 кВт

Аналіз різних режимів роботи паросилової установки показав, що застосування теплового насоса для отримання пари з тиском 0,5 МПа і температурою 150 °С при виробництві тільки електроенергії (рис. 5) не має сенсу. Оскільки витрати потужності на компресор більш ніж в 2 рази перевищують електричну потужність, що генерується.

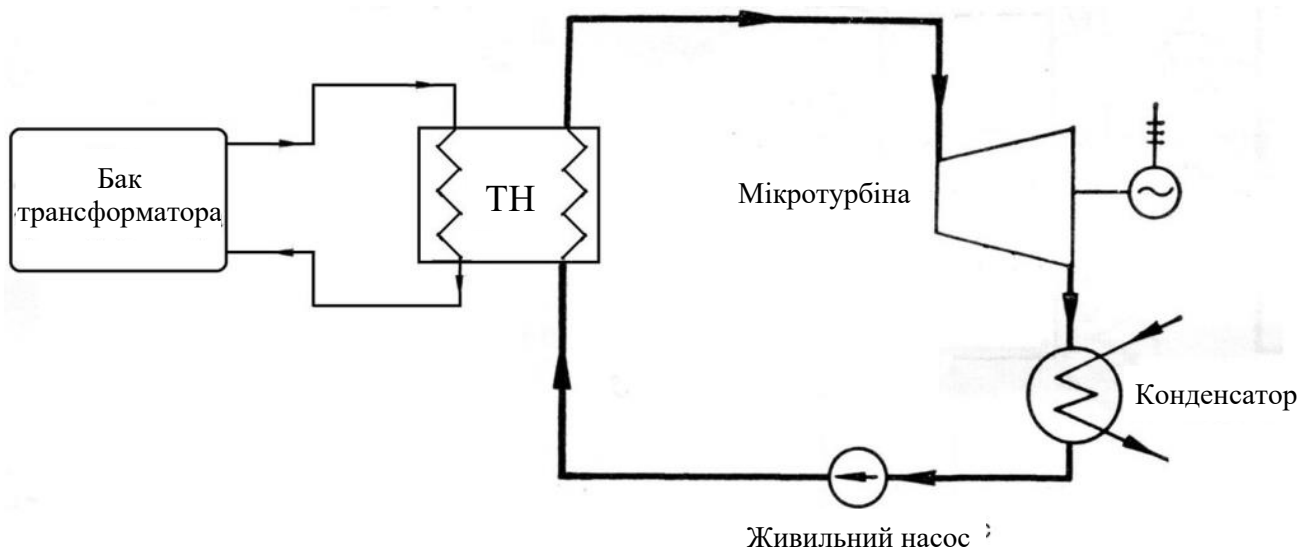


Рис. 5. Схема застосування ТН в електрофікаційному циклі

В свою чергу, застосування циклу (рис. 6) теплофікації також не є раціональним. Хоча коефіцієнт використання енергії при цьому і досягає значення 88 %. Проте на одержувану електричну енергію доводиться не більше 12 % (57,5 кВт), а витрати електричної потужності на компресор теплового насоса перевищують величину потужності, що генерується, більш ніж у 3 рази (210,7 кВт).

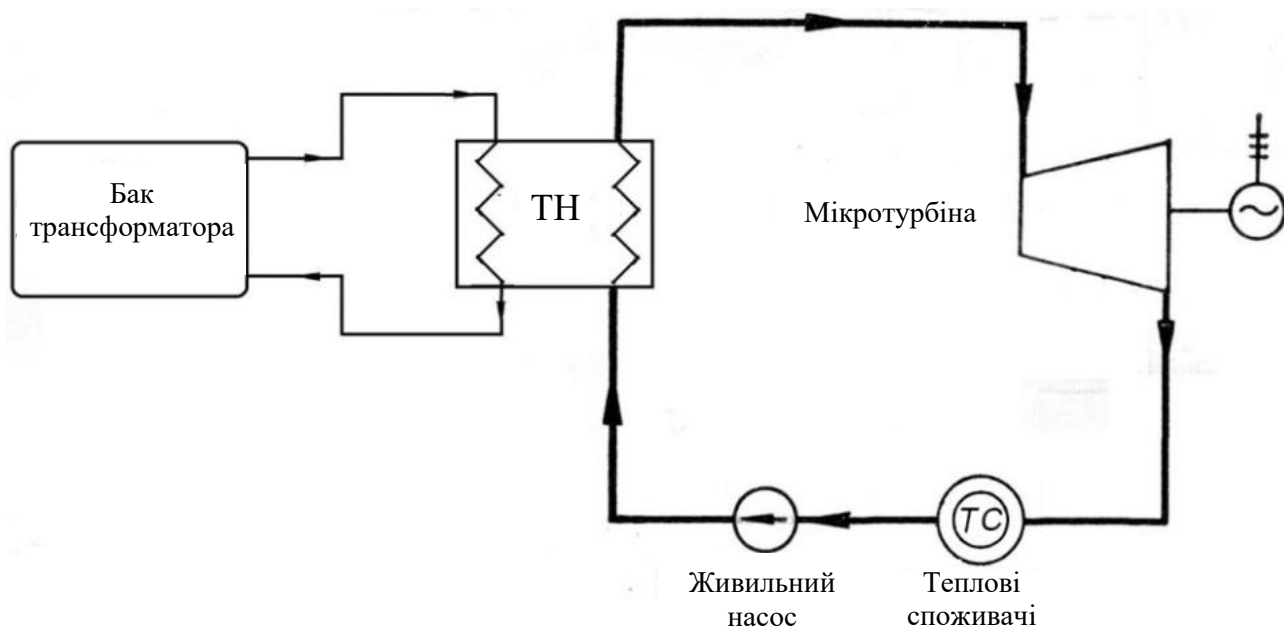


Рис. 6. Схема застосування ТН в теплофікаційному циклі

Було розглянуто також застосування теплового насоса для попереднього підігріву води в мікропаротурбінній установці, що працює на природному паливі (рис. 7). Для даних умов була визначена раціональна температура попереднього підігріву води в тепловому насосі перед котлом, що дорівнює $107\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 8) і відповідає максимуму ККД. Потужність мікротурбінної установки досягла 987 кВт, витрати потужності в компресорі 50 кВт, економія умовного палива в порівнянні з чисто котельною установкою склала 358 т в рік (що складає 8 %), ККД збільшився на 2,2 %.

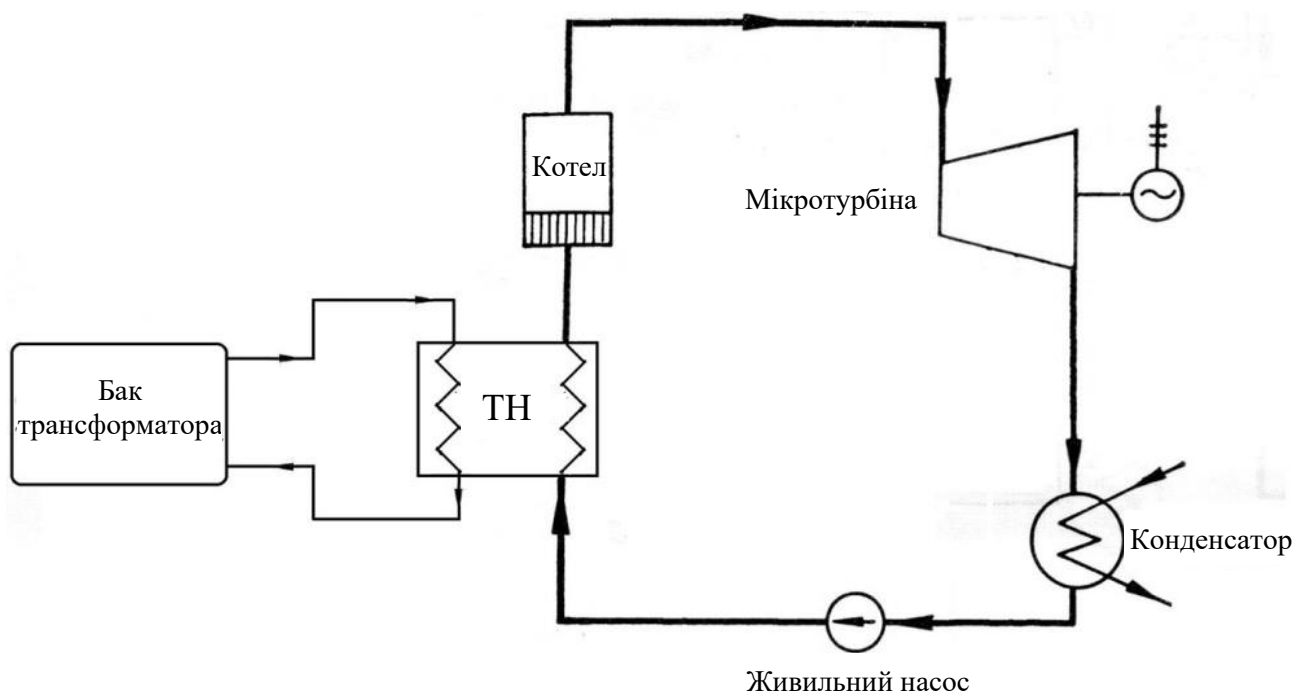


Рис. 7. Схема застосування ТН для попереднього підігріву живильної води в електрофікаційному циклі

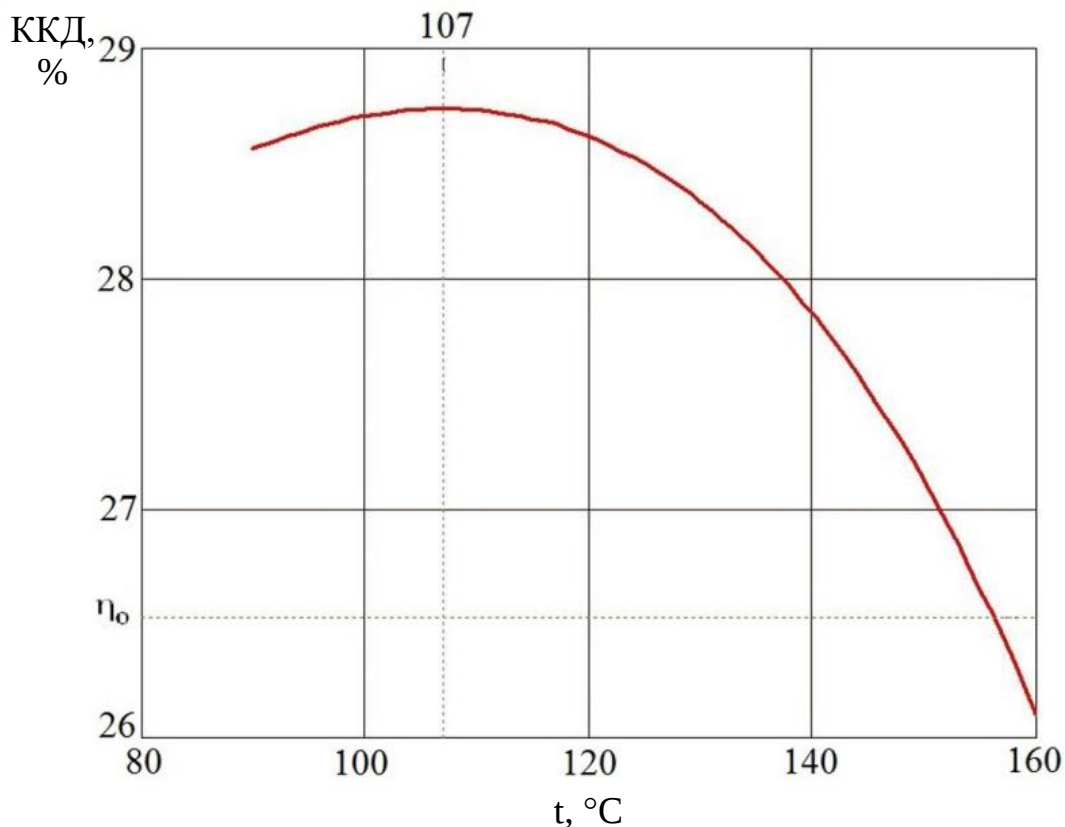


Рис. 8. Раціональне значення температури попереднього підігріву живильної води

І нарешті, була розглянута схема застосування теплового насоса для опалювання і гарячого водопостачання (див. рис. 2). За результатами аналізу було визначено, що застосування теплового насоса дозволяє одержати теплову потужність системи опалювання і гарячого водопостачання, що дорівнює 406,8 кВт. При цьому витрати електричної потужності на привод компресора складуть 37,5 кВт, що відповідає значенню коефіцієнта перетворення енергії більше 13. Це дозволить зменшити витрату умовного палива більш ніж в 4 рази в порівнянні із звичним котлом. Така теплова потужність дає можливість покрити всі власні потреби підприємства в опалюванні і гарячому водопостачанні. Крім того, даних трансформаторів на підприємстві за правилами експлуатації два, що дає додатковий резерв для системи теплопостачання.

Висновки. Таким чином, була розроблена комплексна методика, що дозволяє досліджувати ефективність застосування теплового насоса, що використовує теплову енергію силового трансформатора, для різних варіантів енергетичних установок.

За результатами досліджень було визначено, що найраціональнішою схемою застосування теплового насоса в системі утилізації теплових виділень силового трансформатора ТДНМ - 160 МВА/330 кВ є опалювальна схема, що має явні переваги в справі економії енергоресурсів (економія умовного палива більш ніж у 4 рази у порівнянні з котлом) і вимагає в порівнянні з іншими схемами відчутно менших капітальних і експлуатаційних затрат. Також була обґрунтована

можливість у відчутній економії умовного палива (8%) при застосуванні ТН для попереднього підігріву живильної води для мікротурбіни.

Комплексна методика враховує конкретні параметри силового трансформатора, паросилових і опалювальних установок, характеристики холодоагенту, холодильного циклу і дозволяє робити рекомендації про можливість застосування теплового насоса в різних схемах енергетичних установок.

Методика реалізується на загальнодоступному програмному забезпеченні (Mathcad Professional).

Матеріали статті можуть бути використані студентами спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка при вивченні дисципліни «Енергозбереження в промисловому та муніципальному секторах» і при виконанні кваліфікаційних робіт.

Перелік посилань

1. Олішевський, І.Г., & Олішевський, Г.С. (2021). Автоматизована методика розрахунку параметрів для нетрадиційних технологій опалення та кондиціонування будівель. *Електротехніка та електроенергетика*, 3, 40–47. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-3-4>
2. Wang, Z., Luo, M., Geng, Y., Lin, B., & Zhu, Y. (2018). A model to compare convective and radiant heating systems for intermittent space heating. *Applied Energy*, 215, 211–226. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.088>
3. Christoph F. Reinhart, & Carlos Cerezo Davila. (2016). Urban building energy modeling – A review of a nascent field, *Building and Environment*, 97, 196–202. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001>
4. Ryan E. M., & Sanquist T. F. (2012). Validation of building energy modeling tools under idealized and realistic conditions. *Energy and Buildings*, 47, 375–382. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.020>
5. Cao X., Dai X., & Liu J. (2016). Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. *Energy and Buildings*, 128, 198–213. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089>
6. Olishevskiy I., Gusev O., & Olishevskiy H. (2023). Automated methodology of calculating parameters for non-traditional technology of heating mode of hydro-storage power plant station. *Електротехніка та електроенергетика*, 1, 36–42. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2023-1-4>
7. Olishevskiy, I. H. (2024). Substantiation of energy efficiency of automated heating technology at HPS. *Електротехніка та електроенергетика*, 2, 36–43. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-2-4>
8. Разумний, Ю. Т., Заїка, В. Т., & Степаненко, Ю. В. (2005). *Енергозбереження: навч. посіб.* Дніпропетровськ: Видавництво Нац. гірн. ун-ту.

ABSTRACT

Purpose. Analysis and justification of the use of a heat pump method of utilizing heat emissions in the cooling system of a powerful power transformer for various energy consumption schemes with subsequent recommendation of the most rational options.

The methods. When developing the calculation methodology, methods of analysis and mathematical modeling of thermodynamic processes occurring during the refrigeration cycle of a heat pump, as well as steam processes in a microturbine, were used.

Findings. An assessment of previously developed proposals for the transformation of electrical energy into thermal energy in various sources of electrical generation was carried out. The need for the

introduction of non-traditional energy-saving technologies for the utilization of heat emissions of powerful power transformers was substantiated. According to the results of the research, it was determined that the most rational scheme for using a heat pump in the system for the utilization of heat emissions of a power transformer TDNM - 160 MVA/330 kV is a heating scheme, which has clear advantages in terms of energy saving (savings of conventional fuel by more than 4 times compared to a boiler) and requires significantly lower capital and operating costs compared to other schemes. The possibility of significant savings in conventional fuel (8%) when using a heat pump for preheating feed water for a microturbine is substantiated.

The originality. Mathematical dependences of the heat pump parameters were obtained to study unconventional methods of its application in the cooling system of powerful power transformers in order to utilize heat emissions for the needs of various power plants with the determination of rational modes of their operation.

Practical implementation. A comprehensive calculation methodology has been developed that takes into account specific parameters of the power transformer, steam power and heating plants, characteristics of the refrigerant, refrigeration cycle and other parameters of the heat pump and allows determining rational operating modes of power equipment and making recommendations on the possibility of using a heat pump in certain schemes of power plants.

Keywords: *energy saving, conversion coefficient, steam microturbine, power transformer, heat pump, heat utilization.*