

Куць Н. Г.
Луцький національний технічний університет

РЕЗОНАНСНИЙ АВТОМОБІЛЬНИЙ ТЕПЛОВИЙ НАСОС: ПРИНЦИП ДІЇ, ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ

У статті досліджено концепцію резонансного автомобільного теплового насоса як інноваційного елементу систем терморегулювання транспортних засобів. Насос включає теплообмінник взаємодії робочого тіла з повітрям із відбором низькопотенційного тепла, парову машину як виконавчий або допоміжний привід у поєднанні з електрогенератором, а також систему попереднього охолодження робочої речовини. Додатково передбачено теплообмінник глибокого охолодження з використанням магнітодинамічної системи, що може функціонувати як електродвигун або допоміжний генератор для живлення систем керування та допоміжного електрообладнання.

Встановлено, що застосування резонансного підходу дозволяє зменшити енергетичні втрати, підвищити коефіцієнт перетворення теплового насоса та покращити загальну енергоефективність транспортного засобу. Особливу увагу приділено перспективам інтеграції резонансних теплових насосів у електромобілі та гібридні транспортні системи з урахуванням сучасних вимог до екологічності та енергозбереження.

Особливістю запропонованої концепції є використання резонансних режимів роботи елементів системи, що дозволяє узгодити частотні характеристики теплових і механічних процесів, зменшити втрати енергії на перехідних режимах та інтенсифікувати теплообмінні процеси. У результаті досягається підвищення коефіцієнта перетворення (COP) теплового насоса, покращення загального рівня енергоефективності транспортного засобу.

Проаналізовано потенційні режими роботи системи в умовах змінних температур навколишнього середовища, характерних для експлуатації автомобілів у різних кліматичних зонах, а також розглянуто питання надійності, адаптивності та керованості резонансних процесів.

Ключові слова: тепловий насос, резонанс, автомобіль, енергоефективність, коефіцієнт перетворення, терморегулювання, глибоке охолодження.

ВСТУП

Сучасний розвиток транспортної галузі орієнтований на підвищення енергоефективності та зниження викидів. Одним із перспективних напрямів є використання теплових насосів у транспортних засобах, зокрема в електромобілях. Відомо, що теплові насоси дозволяють значно зменшити витрати енергії на обігрів салону та акумуляторних батарей, що особливо актуально в зимових умовах.

Разом із тим, класичні системи мають обмеження ефективності, що стимулює пошук нових принципів роботи, серед яких особливу увагу привертають резонансні явища.

Автомобільний тепловий насос — це термодинамічна система, що переносить тепло від холоднішого середовища до гарячішого за рахунок зовнішньої енергії. Його ефективність визначається коефіцієнтом перетворення, який у сучасних системах може перевищувати 3–4.

Резонанс у фізичних системах виникає при збігу частоти зовнішнього впливу з власною частотою системи. У таких умовах енергетичні втрати мінімізуються, а передача енергії стає максимально ефективною.

Відомі технічні рішення, що забезпечують отримання холоду [1] та перетворення теплової енергії в електричну [2] на основі явища адіабатичного розмагнічування. У першому випадку пристрої розмагнічування дають змогу досягати наднизьких температур, тоді як у другому — забезпечують перетворення внутрішньої теплової енергії в електричну.

Компресори у тепловому насосі можна замінити паровим двигуном, а для забезпечення більш глибокого охолодження робочої рідини застосувати низько обертовий резонансний магнітодинамічний мотор-генератор. У транспортних енергосистемах встановлено, що:

- компресори, турбіни та електромагнітні приводи можуть працювати у резонансних режимах;
- резонанс дозволяє зменшити енергію активації процесів;
- максимальна ефективність досягається саме при резонансних умовах роботи системи.

Замість роботи в довільному режимі система налаштовується на резонансну частоту, при якій мінімізуються втрати енергії, підвищується швидкість теплопереносу, зменшується навантаження на компресор.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМ

У сучасних електромобілях теплові насоси вже використовуються як частина комплексної системи термоменеджменту. Наприклад, новітні системи об'єднують охолодження батареї, електродвигуна та клімат-контроль у єдину енергетичну мережу. Разом із тим, класичні теплові насоси мають обмеження, пов'язані з втратами енергії в компресорі, теплообмінниках та робочому циклі. У зв'язку з цим актуальним є використання резонансних явищ, які дозволяють зменшити енергетичні втрати та підвищити ефективність системи.

Концепція резонансного автомобільного теплового насоса розглядається як інтегрована система, що поєднує компресор з частотно-регульованим приводом, включаючи теплообмінники (випарник і конденсатор) з електромеханічними або гідродинамічними резонансними контурами та системою керування частотою коливань. Інтеграція резонансного принципу дозволяє використовувати вторинне тепло (waste heat), зменшити споживання електроенергії, підвищити запас ходу електромобіля.

Разом із тим, питання використання резонансних режимів у теплових насосах автомобілів залишається недостатньо дослідженим, особливо в контексті динамічних режимів руху та змінних температурних умов. Недоліком таких пристроїв є їхня порівняно низька ефективність функціонування, зокрема коефіцієнт перетворення енергії, який, як правило, не перевищує 150 % [3]. Це обмежує можливості їх практичного застосування в сучасних транспортних енергетичних системах, де висуваються підвищені вимоги до енергоефективності та раціонального використання ресурсів.

Крім того, запропоновані технічні рішення не реалізують принцип роботи за схемою теплового насоса, що унеможливорює ефективне використання низько потенційної теплової енергії навколишнього середовища та суттєво знижує їх потенціал у системах терморегулювання транспортних засобів [4].

В статті наведено перелік ключових дослідників і науковців, дотичних до теми резонансних та автомобільних теплових насосів, з урахуванням сучасних робіт у сфері транспортної термодинаміки, теплових насосів і суміжних напрямів (резонансні та енергетичні системи). Значний внесок у розвиток теплових насосів у транспортних системах зробила азійська наукова школа (найактивніша у сфері EV) Y. Zhao, T. Zhu, Y. Liu, Q. Chen, X. Zeng та інші дослідники, які розглядають інтегровані системи термоменеджменту електромобілів. Ці дослідники формують сучасну основу технологій теплових насосів у транспорті (особливо EV). Практичні аспекти впровадження теплових насосів у гібридних транспортних засобах висвітлено у роботах японської школи для автовиробників: K. Okamoto Hidefumi Aikawa, Minoru Ohmikawa, Kunihiko Hayashi. Теоретичні основи керованого теплопереносу та резонансних процесів досліджували D. Segal, A. Nitzan, Z. Wang, J. Ren. – це дослідники CO₂ та високоефективних теплових насосів (перспективний напрям для резонансних систем). Ці роботи показують, що коливальні (резонансні) процеси можуть переносити тепло ефективніше та можливе керування тепловими потоками через частотні режими. Таким чином, подальші дослідження у цьому напрямку мають на меті підвищення ефективності управління технічним станом автомобіля та його безпечної експлуатації.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є дослідження принципів функціонування резонансного автомобільного теплового насоса, розроблення теоретичних основ його роботи та обґрунтування можливостей підвищення енергоефективності транспортних енергетичних систем за рахунок використання резонансних і магнітодинамічних процесів.

У зв'язку з цим виникає завдання: створення умов для функціонування магнітодинамічних систем у режимі теплового насоса та підвищення ефективності їх роботи. Це досягається за рахунок забезпечення перетворення теплової енергії навколишнього середовища в механічну роботу з подальшим генеруванням електричної енергії для живлення систем керування та допоміжного обладнання транспортного засобу.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У сучасних умовах розвитку транспортної галузі особливого значення набуває підвищення енергоефективності транспортних засобів та зменшення їхнього впливу на довкілля. Одним із перспективних рішень є застосування теплових насосів у системах клімат-контролю автомобілів, особливо електромобілів.

У роботі досліджено принципи побудови та функціонування резонансного автомобільного теплового насоса як складової системи терморегулювання транспортних засобів. Проведено теоретичний аналіз впливу резонансних явищ на ефективність теплового насоса. Запропоновано

математичну модель процесу та визначено умови досягнення резонансного режиму. Обґрунтовано перспективи використання технології в електромобілях і гібридних транспортних засобах.

Резонансний автомобільний тепловий насос є перспективною технологією підвищення енергоефективності транспортних засобів. Використання резонансних режимів дозволяє суттєво знизити енергетичні втрати та підвищити ефективність роботи системи [5].

Загальна схема запропонованого транспортного резонансного теплового насоса наведена на рисунку 1. Пристрій здійснює перетворення енергії в послідовності термодинамічних та механічних процесів, що забезпечують циркуляцію робочого тіла та перенесення теплової енергії.

У ресивері (1) відбувається випаровування робочої речовини до встановлення термодинамічної рівноваги між паровою та рідкою фазами при температурі навколишнього середовища T_1 . У процесі випаровування відбувається інтенсивне охолодження робочого тіла, внаслідок чого його внутрішня енергія знижується до рівня, що відповідає температурі $T_2 < T_1$. За таких умов формується напрямлений потік теплової енергії від радіатора (3) до ресивера (1).

Підтримання температурного режиму радіатора (3) здійснюється за рахунок примусової конвекції повітря, яка забезпечується вентилятором (2). Сукупність елементів (1–3) формує базовий контур теплового насоса, що забезпечує відбір тепла з навколишнього середовища.

При досягненні в ресивері (1) температури T_1 відкривається клапан (4), після чого пари робочого тіла надходять до системи парового двигуна під підвищеним тиском. Паровий двигун містить один або декілька робочих циліндрів (5), у яких кожен хід поршня виконує корисну механічну роботу.

У процесі адіабатичного розширення відбувається зниження температури пари та її часткова конденсація. Після завершення робочого ходу поршня відкривається клапан (6), і утворена рідка фаза за допомогою насоса (10) повертається до базового контуру теплового насоса (1–3) після додаткового охолодження в магнітодинамічній системі (7–8–9).

Таким чином, запропонована схема забезпечує послідовне перетворення теплової енергії навколишнього середовища у механічну роботу з подальшим її використанням у транспортній енергетичній системі.

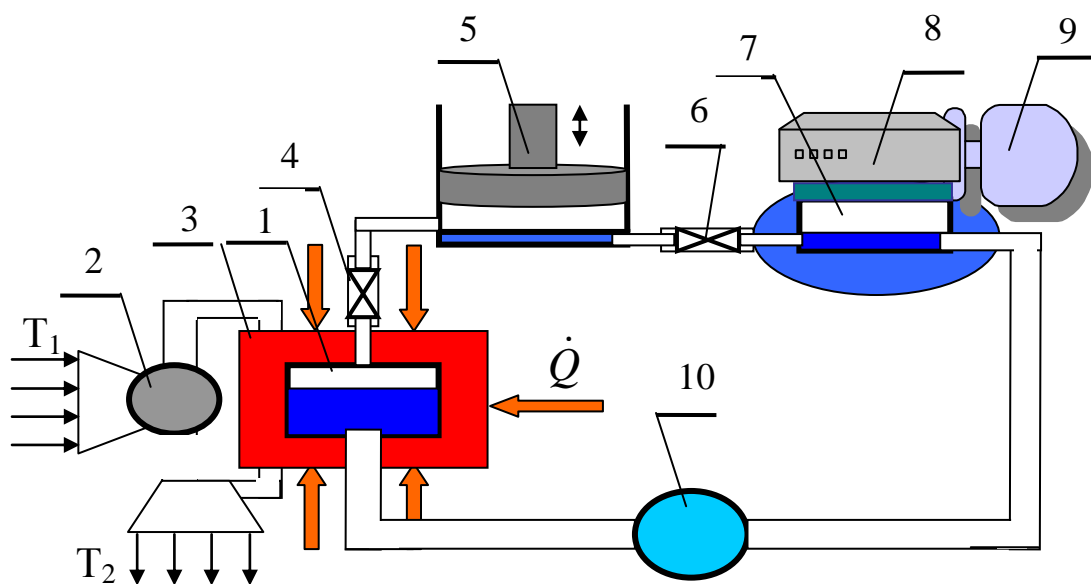


Рисунок 1. – Схема запропонованого транспортного резонансного теплового насоса: ресивер 1, вентилятор повітря 2, водяний радіатор 3, високотемпературний вентиль 4, робочий циліндр парового двигуна 5, низькотемпературний вентиль 6, магнітодинамічний мотор-генератор 7, резонансний контур магнітодинамічного мотор-генератора 8, генератор електричної енергії 9, рідинний електронасос 10, температури навколишнього середовища T_1 , температура внутрішньої енергії T_2 .

Загальна кінематична схема резонансного транспортного теплового автомобільного насоса описує послідовність перетворення енергії та рух робочого тіла в межах системи. У ресивері (1) відбувається випаровування робочої рідини з утворенням пари. Вентилятор (2) забезпечує примусову циркуляцію повітря через водяний радіатор (3), який здійснює теплопередачу від повітряного потоку

до робочого тіла теплового насоса. Високотемпературний вентиль (4) регулює подачу пари високого тиску до циліндрів парового двигуна. Робочий циліндр парового двигуна (5) перетворює зворотно-поступальний рух поршня у обертальний рух основного вала двигуна, забезпечуючи генерацію механічної енергії. Низькотемпературний вентиль (6) виконує функцію відведення утвореної робочої рідини до камери глибокого охолодження, яка пов'язана з магнітодинамічним мотор-генератором (7). Резонансний контур (8) магнітодинамічного мотор-генератора забезпечує інтенсифікацію тепловідведення від низькотемпературного теплообмінника шляхом резонансних процесів. Генератор електричної енергії (9) здійснює вироблення електроенергії для живлення системи керування та допоміжного електрообладнання резонансного транспортного теплового насоса. Рідинний електронасос (10) забезпечує циркуляцію робочої рідини всередині замкненого контуру теплового насоса, підтримуючи безперервність термодинамічного циклу.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Резонансний транспортний тепловий насос містить високотемпературний теплообмінник, паровий двигун та низькотемпературний теплообмінник, який відрізняється тим, що компресор у тепловому насосі замінено паровим двигуном, а для забезпечення більш глибокого охолодження робочої рідини застосовано низькообертотний резонансний магнітодинамічний мотор-генератор [6-7].

2. Резонансний транспортний тепловий насос за рис.1, який відрізняється тим, що високотемпературний теплообмінник з навколишнім середовищем виконано у вигляді послідовного процесу теплообміну: від повітряного потоку до водяного радіатора і від водяного радіатора до робочого тіла.

3. Резонансний транспортний тепловий насос за рис. 1, який відрізняється тим, що паровий двигун виконано у вигляді одного або декількох циліндрів із робочим ходом у прямому та зворотному напрямках.

4. Резонансний транспортний тепловий насос за рис. 1, який відрізняється тим, що резонансна магнітодинамічна система побудована на явищі резонансу струму та використовується для додаткового охолодження робочого тіла після проходження через паровий двигун.

5. Резонансний транспортний тепловий насос за п. 1, який відрізняється тим, що як робоче тіло використовуються рідкі речовини з низькою енергією зв'язку між кластерними структурами, що є співмірною із середньою тепловою енергією навколишнього повітря

Основні процеси циклу теплового резонансного насоса: випаровування, стиснення, конденсація, дроселювання. У резонансному тепловому насосі компресор працює на власній частоті, мінімізуються втрати на тертя та збільшується амплітуда коливань робочого середовища [8].

Переваги резонансного підходу полягають в підвищенні ККД, а робота в резонансі забезпечує мінімальні втрати енергії, зменшення навантаження на елементи системи, що знижує знос компресора та електроприводу, підвищує інтенсифікацію теплообміну. Коливальні процеси покращують теплопередачу.

Проблеми та обмеження резонансного підходу полягають у складності налаштування резонансних режимів, необхідності точного керування частотою, залежність від змінних умов експлуатації (температура, навантаження) та в недостатній кількості практичних досліджень на транспорті в даному підході.

ВИСНОВКИ

Резонансний автомобільний тепловий насос є перспективним напрямом розвитку транспортних енергетичних систем. Використання резонансних режимів дозволяє значно підвищити енергоефективність, знизити витрати енергії та забезпечити більш раціональне використання теплових потоків у транспортних засобах. Подальші дослідження у цьому напрямі можуть привести до створення принципово нових типів автомобільних енергосистем.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на:

- розробку адаптивних систем керування резонансом;
- використання нанотехнологій та нових матеріалів;
- інтеграцію з електромобілями та автономними енергосистемами;
- створення резонансних електромеханічних перетворювачів нового покоління.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Voloshchuk V. A., Nekrashevych O. V., Bohza M. S. Dynamic characteristics of an air-source heat pump system // ResearchGate. 2023.

2. Chaikovskaya E. I. Development of energy-saving technology for maintaining heat pump systems // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 5. С. 10–16.
3. Куць Н. Г. Транспорт і енергетичні комплекси з тепловими насосами : монографія. Харків : НТУ «ХП», 2014. 312 с.
4. Куць Н. Г. Транспортний гібридний енергокомплекс // *Вісник Національного технічного університету «ХП»*. Серія: Автомобіле- та тракторобудування. Харків : НТУ «ХП», 2015. № 10 (1119). С. 45–50.
5. Куць Н. Г. Спосіб роботи бортового енергоблока транспортного засобу : пат. на корисну модель Україна. № 99457 ; заявл. 10.1.2014 ; опубл. 10.06.2015. Бюл.№11.
6. International Energy Agency. Heat Pumps – Analysis and Outlook 2024. Paris : IEA, 2024. 220 p.
7. Denso Corporation. Thermal Management Systems for Electric Vehicles. Tokyo : Denso Corporation, 2023. 95 p.
8. Басок Б. І., Давиденко Б. В., Гончарук С. М. Аналіз енергетичної ефективності теплових насосів // *Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика*. 2018. № 10. С. 45–52.

REFERENCES

1. Voloshchuk, V. A., Nekrashevych, O. V., & Bohza, M. S. (2023). Dynamic characteristics of an air-source heat pump system. ResearchGate.
2. Chaikovskaya, E. I. (2018). Development of energy-saving technology for maintaining heat pump systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, (5), 10–16.
3. Kuts, N. H. (2014). Transport and energy complexes with heat pumps. Kharkiv: NTU “KhPP”.
4. Kuts, N. H. (2015). Transport hybrid energy complex. *Bulletin of the National Technical University “KhPI”*. Series: Automobile and Tractor Engineering, (10(1119)), 45–50.
5. Kuts, N. G. Method of operation of an on-board power unit for a vehicle: Utility Model Patent of Ukraine No. 99457; filed Jan. 10, 2014; published June 10, 2015. Bulletin No. 11.
6. International Energy Agency. (2024). Heat pumps – Analysis and outlook 2024. Paris: IEA.
7. Denso Corporation. (2023). Thermal management systems for electric vehicles. Tokyo: Denso Corporation.
8. Basok, B. I., Davydenko, B. V., & Honcharuk, S. M. (2018). Analysis of energy efficiency of heat pump systems. *Technical Thermophysics and Industrial Heat Engineering*, (10), 45–52.

Kuts N.G. Resonant automotive heat pump: principle of operation, efficiency, and implementation prospects

The article investigates the concept of a resonant automotive heat pump as an innovative component of vehicle thermal management systems. The proposed system includes a heat exchanger for interaction between the working fluid and ambient air with extraction of low-grade heat, a steam engine serving as a primary or auxiliary drive in combination with an electric generator, as well as a system for preliminary cooling of the working fluid. In addition, a deep-cooling heat exchanger based on a magnetodynamic system is incorporated, which can operate either as an electric motor or as an auxiliary generator to supply power to control systems and auxiliary electrical equipment.

It has been established that the application of a resonant approach makes it possible to reduce energy losses, increase the coefficient of performance of the heat pump, and improve the overall energy efficiency of the vehicle. Particular attention is paid to the prospects of integrating resonant heat pumps into electric vehicles and hybrid transport systems in accordance with modern environmental and energy-saving requirements.

The physical principles of heat pump operation are analyzed, and the possibility of improving their efficiency through the use of resonant modes in mechanical, hydrodynamic, and electromagnetic subsystems is substantiated. A theoretical analysis of the influence of resonance on heat transfer processes and energy consumption is carried out, and a mathematical model describing the conditions for achieving the resonant operating mode of the compressor is proposed. It is shown that the use of resonant modes in combination with multi-channel energy conversion ensures improved system efficiency, intensification of heat and mass transfer processes, and reduction of energy losses. The proposed technical solution is aimed at more efficient conversion of various types of energy and a significant reduction in the weight and size characteristics of the vehicle power system.

An analysis of the physical fundamentals of heat pump operation in transport applications has been conducted, and the impact of resonant modes on improving their energy efficiency has been investigated. The feasibility of applying resonance phenomena in compressor, electromechanical, and hydrodynamic

systems of vehicles is substantiated. Prospects for integrating resonant heat pumps into modern electric and hybrid vehicles are identified.

Keywords: *heat pump, resonance, automobile, energy efficiency, coefficient of performance, thermal management, deep cooling.*

КУЦЬ Надія Григорівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет e-mail: kuts.nadia86@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-1934-7189>

Nadiia KYTS, PhD in Engeneering, associate professor of Automobiles and Transport Technologies department, Lutsk National Technical University e-mail: kuts.nadia86@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-1934-7189>

Дата надходження статті до видання: 05.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

<https://doi.org/10.36910/nsn20y09>