

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ОЛШЕВСЬКИЙ Ілля Геннадійович

УДК 681.5:621.1:004.94

ДИСЕРТАЦІЯ

**АВТОМАТИЗОВАНА ТЕХНОЛОГІЯ
КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОГО ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО
КЕРУВАННЯ ТЕПЛОНАСОСНИМИ СИСТЕМАМИ**

Спеціальність: 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Галузь знань: 15 Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

І.Г. Олішевський

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: Гусєв Олександр Юрійович, к.ф-м.н., доцент

Дніпро – 2024

АНОТАЦІЯ

Олішевський І.Г. Автоматизована технологія комп'ютерно-інтегрованого енергоефективного керування теплонасосними системами. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології. – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», МОН України, Дніпро, 2024.

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка присвячена розробці та дослідженню комп'ютерно-інтегрованих методів і засобів автоматизованого керування теплонасосними системами. У цій дисертаційній роботі на основі отриманих теоретичних та експериментальних результатів розв'язано актуальну науково-прикладну задачу створення та дослідження автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування тепловими насосами, що дозволило підвищити енергоефективність систем централізованого теплопостачання будівель шляхом розробки й використання інформаційного, програмного та технічного забезпечення засобів автоматизації.

Метою дисертаційної роботи є вдосконалення техніко-функціональної організації теплотехнічних систем, що реалізують процеси опалення, гарячого водопостачання й кондиціонування завдяки розробці та впровадженню технічного й програмно-інформаційного забезпечення автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого енергоефективного керування тепловими насосами. Об'єкт дослідження – процеси комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами в автоматизованому режимі. Предмет дослідження – методи, засоби та моделі створення автоматизованих систем комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 233 найменувань та 3 додатків.

У вступі зазначено актуальність теми досліджень, сформульовано мету,

об'єкт, предмет і основні завдання досліджень, обґрунтовано методи досліджень, викладено наукову новизну й практичну значимість одержаних результатів, зазначено особистий внесок здобувача, представлено загальну характеристику та структуру дисертації, а також наведено відомості щодо публікацій і результатів апробації й упровадження дисертаційної роботи.

Перший розділ присвячено інформаційному аналізу актуального стану науково-прикладних досліджень та інженерно-технічних рішень у сфері автоматизованого керування теплотехнічними об'єктами та процесами, а також локалізації мети, об'єкту, предмету та основних пріоритетних напрямків і задач з удосконалення й подальшого розвитку відомих автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами.

У другому розділі наведено результати розробки та дослідження щодо обґрунтування параметрів і характеристик структурно-функціонального забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами з урахуванням критерію енергоефективності.

Третій розділ присвячено розробці та дослідженню інформаційного та програмного забезпечення автоматизованої технології керування теплонасосними системами під час процесів опалення та кондиціонування.

У четвертому розділі дисертації було розв'язано дослідницькі задачі, що присвячені створенню та валідації комп'ютерних моделей апаратно-програмного забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого енергоефективного керування теплонасосними системами, а також критичному аналізу отриманих результатів досліджень із формулюванням рекомендацій з практичного використання розробленої автоматизованої технології та обґрунтуванням перспектив її подальшого розвитку.

У загальних висновках наведено основні кількісні та якісні результати дисертаційного дослідження.

У додатках наведено список публікацій здобувача за темою дисертації, акти впровадження та використання результатів дисертаційного дослідження, а також програмне забезпечення розробленої автоматизованої технології комп'ютерно-

інтегрованого енергоефективного керування теплонасосними системами.

Наукова новизна результатів дисертації: синтезовано апаратно-програмне забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами за критерієм енергоефективності; розроблено комплексну модель процесу комп'ютерно-інтегрованого керування системою кондиціонування, яка реалізує адаптивну утилізацію тепла для потреб гарячого водопостачання в залежності від температури теплоносія в тепловому акумуляторі; удосконалено методи побудови автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого енергоефективного керування теплонасосними системами промислових теплотехнічних об'єктів; удосконалено структурно-функціональне забезпечення методу підвищення енергоефективності систем теплопостачання на основі багатоступеневих теплонасосних систем; отримало подальшого розвитку інформаційно-програмне забезпечення засобів комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами.

Практичне значення отриманих результатів досліджень полягає в застосуванні розроблених комп'ютерно-інтегрованих методів, апаратно-програмних рішень і комп'ютерних моделей під час проектування нових або модернізації існуючих засобів автоматизації теплонасосних систем, які є функціональними складовими систем опалення, кондиціонування, вентиляції та гарячого водопостачання побутових, інфраструктурних і промислових об'єктів.

В роботі сформульовано перспективні напрямки подальших досліджень, які дозволять розширити та поглибити можливість наукового обґрунтування програмно-технічних рішень із підвищення енергоефективності теплотехнічних промислових та побутових об'єктів і процесів за рахунок створення й упровадження автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами.

Ключові слова: керування, тепловий насос, комп'ютерна модель, апаратно-програмне забезпечення, структурно-функціональна організація, енергоефективність, комп'ютерно-інтегрована технологія, автоматизація, опалення, кондиціонування.

ABSTRACT

Olishevskiy I.H. Automated technology of computer-integrated energy-efficient control of heat pump systems. – Manuscript.

Thesis for a scientific degree of Doctor of Philosophy (Ph.D.) in speciality 151 Automation and computer-integrated technologies. – Dnipro University of Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2024.

The thesis is a completed research work devoted to the development and study of computer-integrated methods and means of automated control of heat pump systems. In this thesis, based on the theoretical and experimental results obtained, the urgent scientific and applied problem of creating and researching an automated technology for computer-integrated control of heat pumps has been solved, which made it possible to enhance the energy efficiency of district heating systems in buildings by developing and utilising information, software and hardware provision of automation tools.

The thesis aims to improve the technical and functional organisation of heat engineering systems that implement heating, hot water supply and air conditioning processes through the development and implementation of technical, software and information provision for automated technologies of computer-integrated energy-efficient control of heat pumps. The research object is the processes of computer-integrated control of heat pump systems in an automated mode. The research subject is methods, tools and models for creating automated systems of computer-integrated control of heat pump systems.

The thesis includes an introduction, four chapters, general conclusions, a list of 233 references and 3 appendices.

The relevance of the research topic, the main aim, object, subject and main tasks of the research, research methods, scientific novelty and practical significance of the results, the personal contribution of the applicant, the general characteristics and structure of the dissertation, as well as information on publications and the results of the examination and implementation of the dissertation have been described in the introduction.

The first chapter is devoted to the information analysis of the current state of scientific and applied research and engineering solutions in the field of automated control of heat engineering objects and processes, as well as the localisation of the goal, object, subject and main priority directions and tasks for the improvement and further development of known automated technologies of computer-integrated control of heat pump systems.

The results of the development and research on the substantiation of parameters and characteristics of the structural and functional provision of the automated technology of computer-integrated control of heat pump systems with regard to the energy efficiency criterion have been obtained and presented in the second section.

The third chapter is devoted to the development and research of dataware and software provision of the automated control technology of heat pump systems in heating and air conditioning processes.

In the fourth chapter of the thesis, the research tasks have been solved, which are devoted to the creation and validation of computer models of hardware and software of the automated technology of computer-integrated energy-efficient control of heat pump systems, as well as to the critical analysis of the research results with the formulation of recommendations for the practical utilisation of the developed automated technology and justification of the prospects for its further development.

The general conclusions present the main quantitative and qualitative results of the research.

The appendices contain a list of the applicant's publications related to the topic of the thesis, certificates of implementation and use of the results of the research, as well as the software of the developed automated technology of computer-integrated energy-efficient control of heat pump systems.

The scientific novelty of the results obtained: the hardware and software of the automated technology of computer-integrated control of heat pump systems according to the criterion of energy efficiency has been synthesised; a comprehensive model of the process of computer-integrated control of the air conditioning system has been developed, which implements adaptive heat utilisation for the needs of hot water supply depending

on the temperature of the heat source in the heat accumulator; methods for creating automated technologies of computer-integrated energy-efficient control of heat pump systems of industrial heat engineering facilities have been improved; structural and functional provision of the method of improving the energy efficiency of heat supply systems based on multi-stage heat pump systems has been improved; hardware and software provision of computer-integrated control of heat pump systems has been further developed.

The practical significance of the research results lies in the possibility of applying the developed computer-integrated methods, hardware and software solutions, as well as computer models in the development of new or modernisation of existing automation equipment of heat pump systems, which are functional components of heating, air conditioning, ventilation and hot water supply systems for domestic, infrastructure and industrial facilities.

Promising directions for further research have been formulated in the thesis, which allow expansion and deepening of the possibility of scientific substantiation of software and hardware solutions to improve the energy efficiency of heat engineering industrial and domestic facilities and processes through the creation and implementation of automated technologies of computer-integrated control of heat pump systems.

Keywords: control, heat pump, computer model, hardware, software, structural and functional organisation, energy efficiency, computer-integrated technology, automation, heating, air conditioning.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. Олішевський І.Г., Олішевський Г.С. Автоматизована методика розрахунку параметрів для нетрадиційних технологій опалення та кондиціонування будівель. *Електротехніка та електроенергетика*. Запоріжжя, 2021. № 3. С. 40–47. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-3-4> (Стаття в науковому фаховому виданні України категорії Б. Особистий внесок здобувача: аналіз апріорної інформації про об'єкт дослідження, формалізований опис автоматизованої методики та аналіз отриманих результатів).

2. Olishevskiy I.H., Gusev O.Yu., Olishevskiy H.S. Automated methodology of calculating parameters for non-traditional technology of heating mode of hydro-storage power plant station. *Electrical Engineering and Power Engineering*. Zaporizhzhia, 2023. № 1. P. 36–42. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2023-1-4> (Стаття в науковому фаховому виданні України категорії Б. Особистий внесок здобувача: постановка дослідного завдання, обґрунтування методології досліджень, математичні розрахунки та формулювання висновків).

3. Olishevskiy I.H. Substantiation of the energy efficiency of automated heating technology at HPS. *Electrical Engineering and Power Engineering*. Zaporizhzhia, 2024. № 2. P. 36–43. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-2-4> (Стаття в науковому фаховому виданні України категорії Б).

4. Olishevskiy I. Dataware and software of the automated technology for computer-integrated control of heat pump systems. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. Khmelnytskyi, 2024. Vol. 2. P. 205–212. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-23> (Стаття в науковому фаховому виданні України категорії Б).

5. Olishevskiy I. Results of development and research of the technology for automated energy-efficient control of heat pump systems by means of computer experiment. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. Khmelnytskyi, 2024. Vol. 335 (3(1)). P. 419–428. <https://doi.org/10.31891/2307-5732->

2024-335-3-58 (Стаття в науковому фаховому виданні України категорії Б).

6. Papika Yu.A., Lysenko O.H., Koshelenko Ye.V., Olishevskiy I.H. Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality. *Naukovyj Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. Dnipro, 2021. № 2. P. 97–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097> (Стаття в періодичному науковому виданні Scopus, квартиль Q3. Особистий внесок здобувача: виконання розрахунків, обґрунтування можливості використання результатів під час автоматизації мехатронних промислових об'єктів).

7. Система опалення будівлі: пат. на винахід № 123931 Україна: МПК (2021.01), F24D 3/10 (2006.01), F24D 3/18 (2006.01), F24/D 15/00, F24D 4/04 (2006.01), F24S 90/00, F25B 29/00. № а 2019 11504; заявл. 28.11.2019; опубл. 23.06.2021. Бюл. № 25. 8 с. Винахідники: Олішевський І.Г., Олішевський Г.С., Гусев О.Ю. URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=276703> (Патент України на винахід. Особистий внесок здобувача: патентний пошук, обґрунтування підходів до реалізації способу та опис формули способу).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

8. Olishevskiy I., Titov M., Isakova M. Heat Pump Control System for Hot Water Supply And Air Conditioning. *Widening our Horizons: The 19th Int. Forum for Stud. and Young Resear.*, м. Дніпро, 8–12 квіт. 2024 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2024. С. 144–145. URL: <https://im.nmu.org.ua/ua/forum/FORUM2024FINAL.pdf> (Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: постановка задачі досліджень, математичний опис об'єкту автоматизованого керування та критичний аналіз результатів).

9. Olishevskiy I.H., Gusev O.Yu., Mamuzić I. (2024). Automated method of calculating parameters for a heating system based on heat pumps. *17th Symposium „Materials and metallurgy“*: supplement «Book of Abstracts». Zagreb, 25 Mar. 2024. Zagreb, 2024. P. 488. URL: <https://www.croris.hr/crosbi/publikacija/prilog-skup/825203> (Тези доповіді, Scopus. Особистий внесок здобувача: постановка задачі досліджень, математичний опис об'єкту автоматизованого керування та критичний аналіз отриманих результатів).

10. Olishevskiy I. Automated methodology of calculating parameters for heating mode of hydro storage power plant station. *Молодь: наука та інновації*: Матеріали XI Міжн. наук.-техн. конф. студ., асп. та мол. вчених. м. Дніпро, 22–24 лист. 2023 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2023. С. 42–44. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2023/molod-2023-vol2.pdf>. (*Тези доповіді*).

11. Олішевський І.Г., Олішевський Г.С. Обґрунтування можливості функціонування гідроелектростанції в теплофікаційному режимі. *Людина і космос*: XXV Юв. Міжнар. молод. наук.-практ. конф. м. Дніпро, 12 квітн. 2023 р. Дніпро: ДНУ ім. О. Гончара, 2023. С. 170. URL: <https://spacehuman.org/uploads/source/doc/sbornik2023.pdf>. (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: обґрунтування алгоритму функціонування об'єкту дослідження*).

12. Олішевський І.Г., Гусев О.Ю. Розробка інформаційно-вимірювальної системи для керування роботою комплексної системи опалення та кондиціонування. *Молодь: наука та інновації*: Матеріали X Міжн. наук.-техн. конф. студ., асп. та мол. вчених. м. Дніпро, 23–25 лист. 2022 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2022. С. 369–370. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2022/molod-2022.pdf>. (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: обґрунтування переліку інформативних параметрів та моделювання досліджуваного об'єкту*).

13. Олішевський І.Г., Олішевський Г.С. Обґрунтування нетрадиційної технології теплофікаційного режиму гідроакумуючої станції. *Людина і космос*: XXIV Міжнар. молодіжна наук.-практ. конф. м. Дніпро, трав. 2022 р. Дніпро: ДНУ ім. Олеся Гончара, 2022. С. 109. URL: https://spacehuman.org/_files/doc/sbornik2022.pdf. (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: обґрунтування режиму функціонування об'єкту автоматизованого керування*).

14. Olishevskiy I., Gusev O. Outdoor air influence task unit for simulation modeling of automated control of heating and conditioning systems. *«Наукова весна» 2022*: матер. XII Всеукр. наук.-техн. конф. студ., асп. та мол. вчених. м. Дніпро, 23–24 травн. 2022 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2022. С. 174–176. URL: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2022/Scientific_

Spring_2022.pdf. (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: розробка комп'ютерних моделей та аналіз отриманих результатів*).

15. Olishevskiy I., Gusev O. Simulation Modeling of Automated Control System by Complex Heating and Air Conditioning Systems. *Євромови-2021: інновації та розвиток*: 19-та Міжн. наук.-практ. конф. студ. та мол. уч. м. Дніпро, 9 груд. 2021 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2021. С. 213–214. URL: https://pereklad.nmu.org.ua/ua/%D0%84%D0%92%D0%A0%D0%9E%D0%9C%D0%9E%D0%92%D0%98_2021.pdf.

(*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: розробка комп'ютерних моделей та аналіз отриманих результатів*).

16. Олішевський І.Г., Олішевський Г.С. Моделювання системи автоматизованого керування системою опалення із застосуванням теплового акумулятору та сонячних колекторів. *Молодь: наука та інновації*: Матеріали ІХ Міжн. наук.-техн. конф. студ., асп. та мол. вчених. м. Дніпро, 11–12 лист. 2021 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2021. С. 259–260. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2021/molod-2021.pdf>. (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: постановка задачі досліджень, розробка схем досліджуваної системи та аналіз отриманих результатів*).

17. Олішевський І.Г., Гусев О.Ю. Імітаційне моделювання системи автоматизованого керування комплексними системами опалення та кондиціонування. *Молодь: наука та інновації*: Матеріали ІХ Міжн. наук.-техн. конф. студ., асп. та мол. вчених. м. Дніпро, 11–12 лист. 2021 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2021. С. 315–316. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2021/molod-2021.pdf>. (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: розробка комп'ютерних моделей та аналіз отриманих результатів*).

18. Olishevskiy I., Gusev O., Isakova M. Automated heat pump heating system using non-traditional energy sources. *Widening our Horizons: The 16th International Forum for Students and Young Researchers*. м. Дніпро, квіт. 2021 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2021. С. 215–216. URL: <https://im.nmu.org.ua/ua/forum/%D0%A4%D0%9E%D0%A0%D0%A3%D0%9C%20%D0%A0%D0%BE%D0%B7%D1%88%D0%B8%D1%80%D1%8E%D1%8E%D1%87%D0%B8%20%D0%9E%D0%B1%D1%80%>

D1%96%D1%96%CC%88%202021.pdf (Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: постановка задачі, розробка схем системи і аналіз результатів).

19. Olishevskiy I., Gusev O., Nikolskaya A., Lapina V. Constructing and researching a simulation model of heating and air conditioning system for residential building. *Widening our Horizons: The 15th International Forum for Students and Young Researchers*. м. Дніпро, квіт. 2020 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2020. С. 182. URL: <https://im.nmu.org.ua/ua/forum/Розширюючи%20Обрії%202020%20FINAL.pdf> (Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: розробка методики досліджень, реалізація комп'ютерних моделей та критичний аналіз отриманих результатів).

20. Olishevskiy I., Nikolskaya A., Lapina V. Automated technology to control high-power thermal units. *Євромови-2019: інновації та розвиток: 17-та міжнародної науково-практичної конференції студентів та молодих учених*. м. Дніпро, груд. 2019 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2019. С. 95. URL: [https://pereklad.nmu.org.ua/ua/%D0%A1%D0%91%D0%9E%D0%A0%D0%9D%D0%98%D0%9A-2019-1%20\(1\).pdf](https://pereklad.nmu.org.ua/ua/%D0%A1%D0%91%D0%9E%D0%A0%D0%9D%D0%98%D0%9A-2019-1%20(1).pdf). (Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: розробка методики досліджень, реалізація комп'ютерних моделей і критичний аналіз результатів).

21. Система опалення та кондиціонування будівлі: пат. на КМ № 140657 Україна: МПК (2006), F24D 3/00, F24D 3/18 (2006.01), F24D 17/02 (2006.01). № u 201907962; заявл. 11.07.2019; опубл. 10.03.2020. Бюл. № 5. 7 с. Винахідники: Олішевський І.Г., Олішевський Г.С., Гусєв О.Ю. URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=266527> (Патент України на корисну модель. Особистий внесок здобувача: патентний пошук, обґрунтування підходів до реалізації способу та опис формули способу).

22. Система опалення будівлі: пат. на КМ № 143933 Україна: МПК (2006), F24D 3/10 (2006.01), F24D 3/18 (2006.01), F24/D 15/00, F24D 17/02 (2006.01). № u 201911911; заявл. 16.12.2019; опубл. 25.08.2020. Бюл. № 16. 8 с. Винахідники: Олішевський І.Г., Олішевський Г.С., Гусєв О.Ю. URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=270832> (Патент України на корисну модель. Особистий внесок здобувача: патентний пошук, обґрунтування підходів до реалізації способу та опис формули способу).

ЗМІСТ

| | Стор. |
|---|-------|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ..... | 16 |
| ВСТУП..... | 17 |
| РОЗДІЛ 1. ІНФОРМАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ АКТУАЛЬНОГО СТАНУ НАУКОВО-ПРИКЛАДНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ІНЖЕНЕРНО- ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ У СФЕРІ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ ТА ПРОЦЕСАМИ... | 25 |
| 1.1 Аналіз світового й національного досвіду модернізації та підвищення ефективності теплотехнічних систем | 25 |
| 1.2 Аналіз і узагальнення сучасних напрямків і технологій автоматизації та комп'ютерно-інтегрованого керування теплотехнічними процесами та об'єктами | 35 |
| 1.3 Аналіз і узагальнення методів та засобів побудови автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого керування теплотехнічними процесами та об'єктами | 41 |
| 1.4 Мета, напрямки та задачі дисертаційного дослідження | 50 |
| 1.5 Висновки за першим розділом..... | 51 |
| РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ПОБУДОВИ ТА СТРУКТУРНО- ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ КОМП'ЮТЕРНО- ІНТЕГРОВАНОГО ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ ТЕПЛОНАСОСНИМИ СИСТЕМАМИ | 54 |
| 2.1 Структурно-функціональне забезпечення методів комп'ютерно- інтегрованого керування процесом утилізації теплової енергії | 54 |
| 2.1.1 Методи комп'ютерно-інтегрованого керування системою кондиціонування житлових приміщень для потреб гарячого водопостачання..... | 54 |
| 2.1.2 Метод комп'ютерно-інтегрованого керування утилізацією теплоти вентиляційних теплотехнічних систем житлових і адміністративних будівель | 62 |

| | |
|--|------------|
| 2.1.3 Розрахунок параметрів структурно-функціонального забезпечення засобів комп'ютерно-інтегрованого керування нетрадиційними технологіями опалення та кондиціонування | 72 |
| 2.1.4 Обґрунтування вимог до енергетичних характеристик теплових насосів як об'єктів автоматизованого керування під час утилізації тепла..... | 84 |
| 2.2 Структурно-функціональне забезпечення методу підвищення енергоефективності конденсаційних електростанцій | 89 |
| 2.3 Структурно-функціональне забезпечення методу підвищення енергоефективності гідроелектростанцій | 93 |
| 2.4 Структурно-функціональне забезпечення методу підвищення енергоефективності теплопостачання на основі багатоступневих теплонасосних систем | 98 |
| 2.5 Структурно-функціональне забезпечення методу підвищення енергоефективності комплексної системи опалення та кондиціонування житлових будівель із застосуванням теплового акумулятора..... | 106 |
| 2.6 Структурно-функціональне забезпечення методу підвищення енергоефективності системи теплонасосного опалення та кондиціонування приватної будівлі із застосуванням теплового акумулятора та сонячних колекторів..... | 112 |
| 2.7 Висновки за другим розділом..... | 119 |
| РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОГО ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТЕПЛОНАСОСНИМИ СИСТЕМАМИ | 121 |
| 3.1 Інформаційне забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування опаленням будівель | 121 |
| 3.2 Програмне забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування опаленням будівель..... | 126 |

| | |
|---|------------|
| 3.3 Інформаційне забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування кондиціонуванням будівель.... | 131 |
| 3.4 Програмне забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування кондиціонуванням будівель.... | 136 |
| 3.10 Висновки за третім розділом..... | 141 |
| РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРОБКИ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТЕПЛОАСОСНИМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ..... | 144 |
| 4.1 Результати розробки та дослідження комп'ютерної моделі апаратно-програмного забезпечення технології автоматизованого керування процесами опалення та гарячого водопостачання | 144 |
| 4.2 Результати розробки та дослідження комп'ютерної моделі апаратно-програмного забезпечення технології автоматизованого керування процесом кондиціонування з тепловим акумулятором для потреб гарячого водопостачання..... | 167 |
| 4.3 Синтез апаратно-програмного рішення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого енергоефективного керування теплотехнічними системами будинку | 185 |
| 4.4 Результати використання й упровадження автоматизованої технології та перспективні напрямки її подальших досліджень..... | 189 |
| 4.5 Висновки за четвертим розділом..... | 191 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ..... | 193 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 196 |
| Додаток А – Список публікацій здобувача за темою дисертації..... | 220 |
| Додаток Б – Акти впровадження та використання результатів дисертаційного дослідження..... | 226 |
| Додаток В – Програмне забезпечення розробленої та дослідженої автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого енергоефективного керування теплоасосними системами | 231 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

APS – advanced planning and scheduling;
COP – coefficient of performance;
HMI – human-machine interface;
HVAC – heating, ventilation and air conditioning;
IIoT – Industrial Internet of things;
IoT – Internet of things;
MES – manufacturing execution system;
MRP – material requirements planning;
SCADA – supervisory control and data acquisition;
АППАУ – Асоціація підприємств промислової автоматизації України;
ГВС – гаряче водопостачання;
ГЕС – гідроелектростанція;
к.к.д. – коефіцієнт корисної дії;
КЕС – конденсаційна електростанція;
МН – машинне навчання;
НДР – науково-дослідна робота;
ПЛК – програмований логічний контролер;
ТА – тепловий акумулятор;
ТЕС – теплоелектростанція;
ТЕЦ – теплоелектроцентраль;
ТН – тепловий насос;
ХТ – хмарні технології;
ШІ – штучний інтелект.

ВСТУП

Актуальність теми роботи. Сучасний стан національної промисловості та економіки знаходиться під впливом руйнівних факторів, що зумовлені військовим станом в нашій країні. Це в повній мірі впливає на виробничі підприємства, інфраструктурні об'єкти та сфери побутового обслуговування населення, які продовжують функціонування в дуже складних умовах через: руйнування і пошкодження промислових підприємств та інфраструктурних об'єктів, припинення діяльності частини постачальників сировини та послуг, перебої з доставкою матеріалів та технологічних компонентів, проблеми з генеруванням та постачанням електричної і теплової енергії, порушення логістичних зв'язків та інше. У таких умовах важливим є режим жорсткої економії ресурсів, особливо паливно-енергетичних. Підвищення енергоефективності теплової роботи підприємств централізованого тепlopостачання, зокрема, завдяки цільовому використанню теплової енергії на корисні потреби – одна з найбільш важливих проблем із забезпечення стабільності національної енергосистеми в цілому.

На сьогоднішній день світовою наукою та практикою доведено, що розробка й упровадження технологій автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих засобів керування теплотехнічними об'єктами й процесами, що на них протікають, є дієвим підходом щодо підвищення енергоефективності, забезпечення надійної та стабільної роботи систем постачання, розподілу і відведення тепла, адаптивного налаштування режимів експлуатації теплотехнічного устаткування до специфічних вимог різних категорій споживачів та інше. В свою чергу, одним із найбільш перспективних, але недостатньо досліджених підходів до підвищення ефективності теплотехнічних об'єктів є застосування теплових насосів, що оснащені засобами автоматизації та комп'ютерно-інтегрованої техніки, під час регулювання параметрів процесів опалення, вентиляції, кондиціонування та гарячого водопостачання.

В Україні системи централізованого тепlopостачання в останні десятиріччя не зазнавали суттєвої модернізації та реконструкції, а лише підтримувались в

працездатному стані, що вплинуло на суттєві показники їх зношеності, що сягає рівня більше 60 %. З урахуванням цього, а також статистичних показників сталої негативної динаміки втрат теплової енергії у вітчизняних теплових мережах, значної актуальності набувають питання, що пов'язані з розробкою, модернізацією, удосконаленням і впровадженням ефективних методів і засобів, що спрямовані на стимулювання кінцевих споживачів до альтернативних схем енерго- і теплозабезпечення. В цьому контексті автоматизовані теплонасосні системи є одними з найперспективніших рішень щодо забезпечення ефективного опалення, кондиціонування та гарячого водопостачання будівель.

Дослідження науковців Мазур О.В. та Ковальчук Д.А. спрямовані на моделювання теплових процесів з метою підвищення їх ефективності та прогнозування енергетичного ефекту від застосування теплових насосів. У роботах Арсеньєва В.М. розглядаються питання утилізації теплоти продуктів згоряння для цілей тепло- та холодозабезпечення. Вирішенням питань керування процесами, що протікають у теплових системах, займалися вчені Кочан О.В., Cho E., Ha M., Chang S., Hwang Y. У наукових роботах Фіалко Н.М., Степанової А.І. та Навродської Р.О. висвітлено результати досліджень щодо розробки комплексних методик аналізу ефективності та оптимізації систем утилізації тепла. Дослідники Marcic S., Kovacic-Lukman R., Vrtic P. досліджували можливості застосування сонячних колекторів і теплових насосів для систем гарячого водопостачання.

Таким чином, розробка нових і вдосконалення існуючих методів, технологій і моделей підвищення енергоефективності теплової роботи підприємств теплопостачання на основі створення й використання систем автоматизованого керування є актуальною задачею, оскільки вдосконалення систем утилізації теплової енергії напряму пов'язано зі зменшенням витрат на виробництва теплової енергії. Отже, науково-прикладна задача створення та дослідження автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування тепловими насосами, що дозволяє підвищити енергоефективність систем централізованого теплопостачання будівель шляхом розробки й використання інформаційного, програмного та технічного забезпечення засобів автоматизації, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основою цієї роботи є матеріали, що узагальнюють дослідження автора, виконані в рамках реалізації науково-дослідних робіт, що проводяться у Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» відповідно до Закону України № 2623-14 від 11.07.2001 р. «Про пріоритетні напрями розвитку науки та техніки» (зі змінами, внесеними відповідно до Закону № 2859-IX від 05.02.2023 р.), ухвалою Кабінету Міністрів України від 03.03.2021 р. № 179 «Національна економічна стратегія на період до 2030 року», постановою Кабінету Міністрів України від 05.08.2020 р. № 695 «Про затвердження Державної стратегії регіонального розвитку на 2021-2027 роки». Робота виконана в рамках держбюджетної НДР «Дослідження методів підвищення ефективності автоматизованого керування тепловою роботою агрегатів великої потужності промислового та побутового призначення» (№ держреєстрації 0122U002601 від 19.05.2022 р.).

Метою дисертаційної роботи є вдосконалення техніко-функціональної організації теплотехнічних систем, що реалізують процеси опалення, гарячого водопостачання й кондиціонування завдяки розробці та впровадженню технічного й програмно-інформаційного забезпечення автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого енергоефективного керування тепловими насосами.

Об'єкт дослідження – процеси комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами в автоматизованому режимі.

Предмет дослідження – методи, засоби та моделі створення автоматизованих систем комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети дисертаційного дослідження необхідно вирішити наступні задачі:

1. Провести інформаційний аналіз актуального стану науково-прикладних досліджень та інженерно-технічних рішень у сфері автоматизованого керування теплотехнічними об'єктами й процесами з подальшим обґрунтуванням мети та напрямків досліджень дисертаційної роботи.

2. Обґрунтувати параметри та характеристики структурно-функціонального

забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами з урахуванням критерію енергоефективності, що дозволить сформулювати вимоги до розробки програмного, апаратного й інформаційного забезпечення досліджуваної автоматизованої технології.

3. Розробити та дослідити інформаційне й програмне забезпечення автоматизованої технології керування теплонасосними системами, що дозволить оцінити експлуатаційні характеристики досліджуваної автоматизованої технології.

4. Створити та валідувати комп'ютерні моделі апаратно-програмного забезпечення автоматизованої технології керування теплонасосними системами, що дозволить оцінити адекватність і об'єктивність отриманих результатів досліджень розробленої автоматизованої технології.

5. Провести критичний аналіз отриманих результатів досліджень, сформулювати рекомендації з практичного використання розробленої автоматизованої технології та обґрунтувати перспективні напрямки її подальших досліджень.

Методи дослідження. В основу досліджень покладено методи: теорії автоматичного керування під час синтезу структури автоматизованої технології; термодинаміки для розрахунку теплових та енергетичних характеристик систем теплопостачання; комп'ютерного експерименту для розробки та валідації комп'ютерних моделей функціональних елементів автоматизованої технології; програмування для розробки програмних компонент засобів комп'ютерно-інтегрованого керування; математичної статистики та теорії оптимізації для обробки та аналізу результатів комп'ютерного експерименту; критичного аналізу під час співставлення отриманих результатів з раніше відомими.

Наукова новизна отриманих результатів.

У дисертаційній роботі запропоновано нові та вдосконалено відомі методи, засоби й моделі побудови автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого енергоефективного керування теплонасосними системами, а саме:

1. Уперше синтезовано апаратно-програмне забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами за

критерієм енергоефективності, яке, на відміну від відомих, одночасно враховує теплові втрати від покрівлі, стін і вікон будівель, фізико-хімічні властивості холодоагенту, динаміку температури повітря навколишнього середовища і ґрунту, що дозволяє підтримувати комфортну температуру в будівлі під час опалення та кондиціонування.

2. Уперше розроблено комплексну модель процесу комп'ютерно-інтегрованого керування системою кондиціонування, яка реалізує адаптивну утилізацію тепла для потреб гарячого водопостачання в залежності від температури теплоносія в тепловому акумуляторі, що дозволило досягти значення коефіцієнта перетворення енергії (відношення тепловіддачі випарника до загальної споживаної потужності системи кондиціонування) на рівні 3,5.

3. Удосконалено методи побудови автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого енергоефективного керування теплонасосними системами промислових теплотехнічних об'єктів, а саме:

3.1. Запропоновано та доведено ефективність комп'ютерно-інтегрованого методу керування технологічними процесами в умовах конденсаційних електростанцій завдяки використанню автоматизованого теплового насоса під час утилізації тепла, що дозволило досягти значень коефіцієнта використання теплоти до 78 % при коефіцієнті корисної дії базового циклу 41 % за умови відсутності впливу процесу генерації теплової енергії на якісні й кількісні показники виробництва електроенергії.

3.2 Запропоновано та доведено ефективність комп'ютерно-інтегрованого методу керування технологічними процесами в умовах гідроелектростанцій завдяки введенню до схеми технологічного процесу утилізації теплоти автоматизованого теплового насоса, що дозволило збільшити коефіцієнт перетворення енергії на 43 % при допустимих навантаженнях на систему опалення та зменшити витрати умовного палива на величину до 30 % на потреби опалення й гарячого водопостачання в порівнянні з теплотехнічними системами на основі котлів.

4. Удосконалено структурно-функціональне забезпечення методу підвищення енергоефективності систем тепlopостачання на основі багатоступневих теплонасосних систем завдяки встановленню залежності витрат умовного палива від кінцевої температури теплоносія, що дозволяє досягти до 12 % економії умовного палива та підвищити в 2 рази коефіцієнт перетворення енергії в порівнянні з одноступеневою системою або котлом.

6. Отримало подальшого розвитку інформаційно-програмне забезпечення засобів комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами завдяки комплексному врахуванню дестабілізуючого впливу температури ґрунту й повітря навколишнього середовища, режимів роботи функціональних елементів системи, а також зональної температури й концентрації двоокису вуглецю в будівлі у вигляді вбудованого програмного забезпечення мікроконтролерних пристроїв, що дозволило реалізувати механізми автоматизованого керування теплонасосними системами під час опалення, кондиціонування та вентиляції у віддаленому режимі на основі людино-машинного інтерфейсу.

Практична значимість одержаних результатів полягає в застосуванні запропонованих комп'ютерно-інтегрованих методів, апаратно-програмних рішень і комп'ютерних моделей під час проектування нових або модернізації існуючих засобів автоматизації теплонасосних систем, які є функціональними складовими систем опалення, кондиціонування, вентиляції та гарячого водopостачання побутових, інфраструктурних і промислових об'єктів. Отримані результати дисертаційного дослідження використано та впроваджено:

1. Матеріали дисертаційної роботи використані у дослідженнях, проведених під час виконання держбюджетної НДР «Дослідження методів підвищення ефективності автоматизованого керування тепловою роботою агрегатів великої потужності промислового та побутового призначення» (№ держреєстрації 0122U002601 від 19.05.2022 р.).

2. Матеріали дисертаційної роботи використані під час дослідження, проектування та модернізації систем автоматизованого керування тепловою роботою агрегатів великої потужності виробництва ТОВ «Новел Проджектс Енд

Солюшинс» (акт впровадження від 11.04.2024 р.).

3. Результати дисертації впроваджено до навчального процесу під час викладання лекційного матеріалу та практичних робіт із дисципліни «Адаптивні системи управління» аспірантам спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка (акт впровадження від 15.04.2024 р.).

Особистий внесок здобувача. Всі теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто. Внесок здобувача в отримання наукових і прикладних результатів підтверджується самостійним дослідженням і розробкою теоретичних засад і методологічних аспектів науково-прикладної задачі, яка розв'язувалась. У дисертації не були використані ідеї співавторів наукових робіт. У роботах, які опубліковані в співавторстві, особисто здобувачем отримано наступні результати: [1] – аналіз апріорної інформації про об'єкт дослідження, формалізований опис автоматизованої методики та аналіз отриманих результатів; [2] – постановка дослідного завдання, обґрунтування методології досліджень, математичні розрахунки та формулювання висновків; [6] – виконання розрахунків, обґрунтування можливості використання результатів під час автоматизації мехатронних промислових об'єктів; [7, 21, 22] – патентний пошук, обґрунтування підходів до реалізації способів та опис формул способів; [8, 9] – постановка задачі досліджень, математичний опис об'єкту автоматизованого керування та критичний аналіз отриманих результатів; [11] – обґрунтування алгоритму функціонування об'єкту дослідження; [12] – обґрунтування переліку інформативних параметрів та моделювання досліджуваного об'єкту; [13] – обґрунтування режиму функціонування об'єкту автоматизованого керування; [14, 15, 17] – розробка комп'ютерних моделей та аналіз отриманих результатів; [16, 18] – постановка задачі досліджень, розробка схем досліджуваної системи та аналіз отриманих результатів; [19, 20] – розробка методики досліджень, реалізація комп'ютерних моделей та критичний аналіз отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи представлено на таких конференціях, форумах та наукових семінарах: Widening our Horizons: The 19th International Forum (м. Дніпро, Україна, 2024 р.);

17th Symposium „Materials and metallurgy“ (м. Загреб, Хорватія, 2024 р.); Молодь: наука та інновації: XI Міжнародна науково-технічна конференція (м. Дніпро, Україна, 2023 р.); Людина і космос: XXV Ювілейна Міжнародна молодіжна науково-практична конференція (м. Дніпро, Україна, 2023 р.); Молодь: наука та інновації: X Міжнародна науково-технічна конференція (м. Дніпро, Україна, 2022 р.); Людина і космос: XXIV Міжнародна молодіжна науково-практична конференція (м. Дніпро, Україна, 2022 р.); Наукова весна 2022: XII Всеукраїнська науково-технічна конференція (м. Дніпро, Україна, 2022 р.); Євромови-2021: інновації та розвиток: 19-та Міжнародна науково-практична конференція (м. Дніпро, Україна, 2021 р.); Молодь: наука та інновації: IX Міжнародна науково-технічна конференція (м. Дніпро, Україна, 2021 р.); Widening our Horizons: The 16th International Forum (м. Дніпро, Україна, 2021 р.); Widening our Horizons: The 15th International Forum (м. Дніпро, Україна, 2020 р.); Євромови-2019: інновації та розвиток: 17-та Міжнародна науково-практична конференція (м. Дніпро, Україна, 2019 р.).

Публікації. За темою дисертаційного дослідження опубліковано 22 наукові праці, серед яких 1 стаття в періодичному виданні, що включене до наукометричної бази Scopus, 1 патент України на винахід, 5 статей у наукових фахових виданнях України категорії Б (у т.ч. 3 – одноосібні), 2 патенти України на корисну модель, 13 тез доповідей на Всеукраїнських і Міжнародних конференціях (у тому числі, 1 у наукометричній базі Scopus). Основні науково-прикладні результати дисертаційної роботи опубліковано в періодичних наукових виданнях, вони охоплюють усі наукові положення, що виносяться на захист.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 233 найменувань та 3 додатків. Загальний обсяг роботи – 237 сторінок, з яких основний текст викладено на 179 сторінках машинописного тексту, включаючи 94 рисунки і 15 таблиць. Додатки на 18 сторінках містять список публікацій за темою дисертації, акти впровадження і використання результатів дисертації та програмне забезпечення розробленої автоматизованої технології.

РОЗДІЛ 1

ІНФОРМАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ АКТУАЛЬНОГО СТАНУ НАУКОВО-ПРИКЛАДНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ У СФЕРІ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ ТА ПРОЦЕСАМИ

1.1 Аналіз світового й національного досвіду модернізації та підвищення ефективності теплотехнічних систем

Модернізація теплотехнічних систем, в тому числі, шляхом розробки та впровадження технологій автоматизації, є актуальною в світовому масштабі з ряду причин, найбільш вагомими з яких є: оптимізація споживання ресурсів і енергії, зниження витрат на експлуатацію та ремонт, зменшення простоїв технологічного обладнання, підвищення комфорту для споживачів, зменшення негативного впливу на навколишнє середовище та інше.

В свою чергу, впровадження технологій автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих засобів керування теплотехнічними об'єктами і процесами, що на них протікають, є дієвим підходом щодо підвищення енергоефективності, забезпечення надійної та стабільної роботи систем постачання, розподілу й відведення тепла, адаптивного налаштування режимів експлуатації теплотехнічного устаткування до специфічних вимог різних категорій споживачів та інше.

На підставі інформаційного аналізу наукових та аналітичних літературних джерел щодо актуальності та ефективності впровадження систем і технологій автоматизованого керування теплотехнічними процесами та об'єктами [1–6] було встановлено, що ключовими засадами досягнення прикладного ефекту в цьому напрямку є: підвищення енергоефективності, забезпечення надійності та безпеки, зменшення негативного впливу на довкілля, оптимізація експлуатаційних витрат, можливість реалізації процедур аналітики та прогнозування, покращення показників надання послуг для користувачів. Деталізований вигляд результатів

аналізу ключових аспектів досягнення прикладного ефекту від модернізації теплотехнічних об'єктів і процесів наведено на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Деталізація ключових засад досягнення прикладного ефекту від упровадження технологій автоматизації та комп'ютерно-інтегрованого керування теплотехнічними об'єктами та процесами

Світовий досвід реалізації різних стратегій і підходів до модернізації теплотехнічних систем доводить, що на теперішній час існує широкий спектр можливостей щодо підвищення енергоефективності систем генерування та постачання теплової енергії, як у деталізованому вигляді наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Аналіз світового досвіду щодо реалізації стратегій та підходів до модернізації теплотехнічних об'єктів і процесів

| Країна | Опис реалізованих підходів | Літературне джерело |
|-----------|---|---------------------|
| Німеччина | Активно впроваджуються відновлювальні джерела енергії (біогаз, сонячні колектори, геотермальні джерела) до систем тепlopостачання з відповідними засобами автоматизованого керування їх режимами функціонування. Частка відновлювальних джерел у загальному обсязі спожитої енергії становить 58 % за першу половину 2024 року. | [7] |
| Фінляндія | Широкого впровадження та використання набули когенераційні установки й теплові насоси з адаптивними режимами керування для забезпечення енергоефективного тепlopостачання. Додатково активно впроваджуються комп'ютерно-інтегровані технології моніторингу та аналізу джерел втрат тепла в тепломережах задля їх оперативної локалізації та ліквідації. | [8] |
| Китай | Реалізовано значну кількість проєктів модернізації систем тепlopостачання великих міст, у тому числі, шляхом упровадження котлів із інтелектуальним керуванням, що дозволяє підвищити ефективність і знизити шкідливий вплив на довкілля. | [9] |

Продовження табл. 1.1

| | | |
|--------|--|----------|
| Данія | Широкого використання набули когенераційні установки з інтелектуальним комп'ютерно-інтегрованим керуванням, що забезпечують одночасне генерування теплової та електричної енергії, а також використання біомаси як одного з основних видів палива. | [10, 11] |
| Швеція | Частка тепlopостачання, що забезпечується завдяки використанню біомаси та інших відновлювальних джерел енергії досягла рівня 50 %. Динамічного впровадження набули високоефективні теплонасосні системи та котли з інтегрованими засобами цифрового керування. | [12, 13] |

Отже, на підставі проведеного аналізу світового досвіду щодо реалізації стратегій та підходів до модернізації теплотехнічних систем (див. табл. 1.1) можна зробити висновок, що основним глобальним трендом є збільшення частки відновлювальних джерел енергії в загальному обсязі генерування теплової та електричної енергії, які, в свою чергу, мають реалізовувати адаптивні режими функціонування в залежності від умов їх експлуатації. Адаптація до мінливих умов експлуатації може бути реалізована шляхом розробки та інтеграції автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого керування технологічними процесами генерування, акумулювання та розподілення енергії, що дозволяє значно підвищити загальну енергоефективність теплотехнічних об'єктів і процесів.

Зважаючи на вищезазначене, був проведений додатковий аналіз основних напрямків і відповідних техніко-технологічних аспектів щодо підвищення ефективності та вдосконалення теплотехнічних систем [1, 2, 5, 6, 14–16], як у деталізованому вигляді наведено на рисунку 1.2. Цей аналіз дозволив довести

необхідність застосування автоматизованих технологій під час модернізації теплотехнічних об'єктів і процесів.



Рисунок 1.2 – Деталізація основних напрямків і техніко-технологічних аспектів щодо підвищення ефективності та вдосконалення теплотехнічних систем

Як видно з результатів аналізу глобальних напрямків і техніко-технологічних аспектів щодо підвищення ефективності та вдосконалення теплотехнічних систем,

що представлені на рисунку 1.2, то використання методів і впровадження засобів автоматизації основних процесів генерування, акумулювання, розподілення та обліку використання теплової енергії, а також підтримки прийняття рішень щодо оптимізації використання ресурсів і енергії, є обов'язковими під час реалізації стратегії підвищення ефективності та вдосконалення теплотехнічних систем.

В свою чергу, одним із основних функціональних елементів, який довів свою ефективність під час загальної модернізації та автоматизації теплотехнічних процесів, є теплові насоси, що оснащенні комп'ютерно-інтегрованими засобами регулювання параметрів і характеристик режимів їх функціонування. Популярність їх упровадження й використання обумовлена значним впливом на оптимізацію використання енергоресурсів. Нижче в таблиці 1.2 наведено типові приклади зі світової практики щодо підвищення ефективності процесів керування теплотехнічними системами і процесами завдяки інтеграції теплових насосів до загальної схеми автоматизації процесу теплопостачання.

Таблиця 1.2 – Приклади автоматизованого керування теплотехнічними процесами й об'єктами з використанням теплонасосних систем на світовому рівні

| Опис проєкту автоматизації | Отриманий ефект | Літературне джерело |
|---|---|---------------------|
| Житловий комплекс Lystrup Housing Project (м. Орхус, Данія): використано ґрунтові теплові насоси під час гарячого водопостачання та опалення. Система автоматизованого керування тепловими насосами адмініструється центральним сервером, що дозволяє виконувати онлайн-моніторинг і регулювання теплових насосів у реальному часі. | Оптимізація техніко-функціональних характеристик теплотехнічних систем, зниження енергоспоживання, підвищення якості надання послуг споживачам. | [17] |

Продовження табл. 1.2

| | | |
|--|---|-------------|
| <p>Офісний центр The Edge (м. Амстердам, Нідерланди): система автоматичного управління адміністративною будівлею контролює роботу технічних систем, у тому числі, теплових насосів, що апаратно-програмно інтегрована з мережею бездротових сенсорів, що генерують дані про температуру і вологість повітря та освітлення, які аналізуються системою керування в реальному часі та передаються на мобільний застосунок користувачів.</p> | <p>Оптимізація показників енергоефективності, створення комфортних умов для працівників, значне зменшення викидів двоокису вуглецю в атмосферу та інше.</p> | <p>[18]</p> |
| <p>Житлові та громадські будівлі (м. Мальме, Швеція): застосовано повітряні теплові насоси під час кондиціонування та опалення. Впроваджено комп'ютерно-інтегровану систему управління будівлею для онлайн-моніторингу стану й керування режимами роботи теплових насосів. Систему керування побудовано на основі інтелектуальних термостатів для встановлення та підтримання оптимальних умов мікроклімату приміщень.</p> | <p>Оптимізація показників енергоефективності, створення комфортного мікроклімату, зменшення викидів двоокису вуглецю в атмосферу та інше.</p> | <p>[19]</p> |
| <p>Офісна будівля Bullitt Center (м. Сіетл, США): система інтелектуального управління будівлею поєднує адаптацію режимів роботи теплових насосів з іншими технічними системами опалення,</p> | <p>Скорочення експлуатаційних витрат, зниження енергоспоживання, покращення техніко-</p> | <p>[20]</p> |

Продовження табл. 1.2

| | | |
|---|---|-------------|
| <p>кондиціонування та вентиляції. Основу системи становлять інтелектуальні сенсори та програмні засоби аналітики для оптимізації функціонування системи в режимі реального часу.</p> | <p>функціональних характеристик теплонасосних систем.</p> | |
| <p>Проект Smart City (м. Фуджисава, Японія): реалізовано житлову забудову з інтеграцією інтелектуальних теплоенергетичних систем із використанням теплонасосного обладнання. Реалізовані проекти передбачають апаратну й програмну сумісність теплових насосів, теплових акумуляторів, сонячних панелей та технологій Інтернету речей (IoT) для онлайн-моніторингу та керування режимами енерго- і теплоспоживання.</p> | <p>Підвищення енергоефективності, зниження витрат і оптимізація ресурсів під час опалення та охолодження, збільшення рівня комфорту для користувачів послуг.</p> | <p>[21]</p> |
| <p>Енергоефективні та екологічно чисті офісні комплекси (м. Гельсінкі, Фінляндія): розроблено й упроваджено системи на основі ґрунтових теплових насосів з інтелектуальним керуванням процесами кондиціонування й опалення офісних будівель. Система автоматизації, до складу якої входять сенсори температури, вологості та якості повітря, інтегрована зі сервером для моніторингу та керування в онлайн режимі.</p> | <p>Скорочення експлуатаційних витрат, покращення техніко-функціональних характеристик теплонасосних систем, зменшення викидів двоокису вуглецю в атмосферу та інше.</p> | <p>[22]</p> |

Варто зазначити, що в таблиці 1.2 наведено не вичерпний перелік прикладів, які характеризують актуальний світовий досвід з реалізації науково-інженерних

проектів щодо модернізації теплотехнічних процесів завдяки розробці й упровадженню автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого керування опаленням і кондиціонуванням з використанням теплових насосів. Наведені приклади доводять актуальність і високу ефективність інтеграції засобів автоматизації та інтелектуалізації технологічних процесів опалення, кондиціонування й вентиляції житлових, офісних, адміністративних і промислових будівель шляхом розробки та використання програмно-апаратних рішень комп'ютерно-інтегрованого онлайн-моніторингу та регулювання режимів генерування, зберігання й використання теплової енергії.

На національному рівні питання модернізації теплотехнічних систем є актуальним через ряд соціальних, економічних, технічних та екологічних причин. На сьогоднішній день перспективні напрямки вирішення проблеми підвищення ефективності теплотехнічних систем регулюються на законодавчому рівні: Закон України «Про альтернативні джерела енергії» (визначено основні принципи державної політики у сфері енергозабезпечення, у тому числі, щодо підвищення ефективності та автоматизації теплотехнічних систем і об'єктів) [23], Закон України «Про теплопостачання» (врегульовано питання, які пов'язані з використанням відновлюваних джерел енергії, що є одним із основних аспектів під час модернізації теплотехнічних систем і об'єктів) [24], ДСТУ ISO 50001:2014 «Системи енергетичного менеджменту» (сформульовано вимоги до систем енергоменеджменту, в тому числі, засобів моніторингу та автоматизованого керування енергоспоживанням) [25] та інше.

Варто зазначити, що в Україні системи централізованого теплопостачання в останні 40 років підтримувались лише в існуючому стані та відсоток середнього рівня їх зношеності сягає більше 68 % [26]. З урахуванням показників сталої негативної динаміки втрат теплової енергії в теплових мережах України (див. рис. 1.3) [27], значної актуальності набувають питання, що пов'язані з розробкою, модернізацією, удосконаленням і впровадженням ефективних заходів, що спрямовані на стимулювання кінцевих споживачів до використання відновлювальних джерел енергії та розширення можливостей альтернативних схем

енергозабезпечення [28]. В цьому контексті, системи теплових насосів (ТН) та теплових акумуляторів (ТА) є одними з найперспективніших рішень для забезпечення ефективного опалення й кондиціонування будівель і споруд [29, 30].

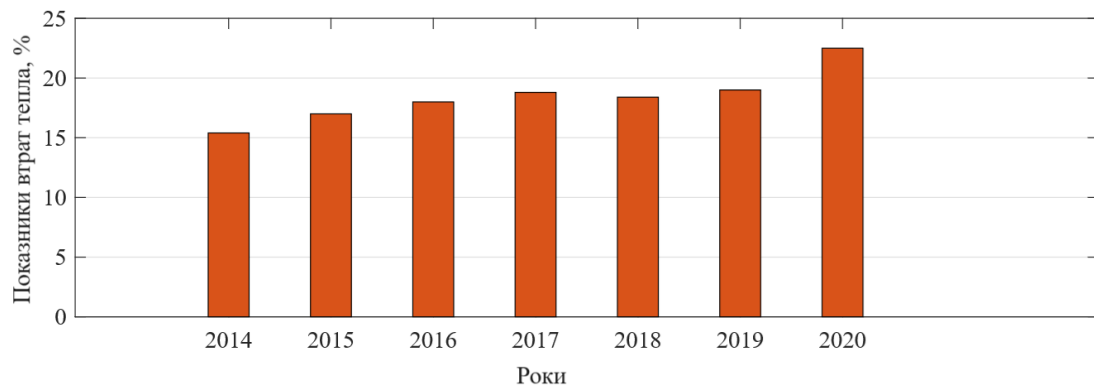


Рисунок 1.3 – Графік динаміки показників втрат тепла в теплових мережах України [28]

Отже, стала негативна динаміка втрат, що виникають під час постачання тепла централізованою системою (див. рис. 1.3), та зростання цін на енергоносії й ресурси обумовлюють необхідність розробки та впровадження нетрадиційних енергоефективних методів теплозабезпечення. Також варто зазначити той факт, що опалення в холодні періоди та гаряче водопостачання протягом року обумовлюють зростання потреби в комп'ютерно-інтегрованому інтелектуальному енергоефективному керуванні теплонасосними системами. Таким чином, виникає необхідність розробки методів і моделей автоматизованого комп'ютерно-інтегрованого керування функціональними елементами теплових мереж, що дозволить підвищити коефіцієнт перетворення енергії та загальну енергоефективність процесів опалення й гарячого водопостачання.

В Україні також відома певна кількість ефективних прикладів реалізації науково-інженерних проєктів з модернізації теплотехнічних систем завдяки розробці та впровадженню автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого керування тепловими насосами, як наприклад [31]:

– заклади освіти (школи та дитячі садки): практичне використання теплових

насосів «вода–ґрунт» для кондиціонування, опалення та гарячого водопостачання;

– житлові будинки: застосування теплових насосів з інтегрованими інтелектуальними термостатами для зонального керування процесами опалення й гарячого водопостачання;

– готельно-розважальні комплекси: впровадження теплонасосного устаткування з автоматизованим керуванням для опалення й гарячого водопостачання номерів і приміщень загального користування, а також підігріву басейнів;

– офісні та адміністративні будівлі: інтеграція теплонасосної системи до загальної технологічної схеми автоматизованого управління будівлями для опалення, гарячого водопостачання та кондиціонування.

Таким чином, отримані результати аналізу світового та національного досвіду модернізації та підвищення ефективності теплотехнічних систем довели важливість і перспективність використання теплових насосів, що оснащені комп'ютерно-інтегрованими технологіями онлайн-моніторингу та керування, під час автоматизованого регулювання процесів опалення, гарячого водопостачання та кондиціонування. Адже, такий підхід дозволяє оптимізувати споживання енергії та ресурсів, зменшити експлуатаційні витрати, підвищити рівень комфорту для користувачів послуг та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, що робить його актуальним для досліджень із подальшим упровадженням у світі та Україні.

1.2 Аналіз і узагальнення сучасних напрямків і технологій автоматизації та комп'ютерно-інтегрованого керування теплотехнічними процесами та об'єктами

Сучасні концепції автоматизації технологічних і виробничих процесів і об'єктів та відповідні програмно-апаратні засоби, що їх реалізують, охоплюють широкий спектр технологій, які використовуються в різних галузях промисловості, енергетики, інфраструктури та побуту. Основною світовою концепцією, що є

актуальною й найбільш використовуваною в різних галузях, у тому числі, під час автоматизованого керування теплотехнічними процесами, є Industry 4.0. Ця концепція передбачає системну інтеграцію цифрових і комп'ютерно-інтегрованих технологій, а також програмних компонент інтелектуальної аналітики даних до виробничих і технологічних процесів різної ієрархічною організації та сфери застосування [32–37], як це показано у вигляді структурної схеми на рисунку 1.4.

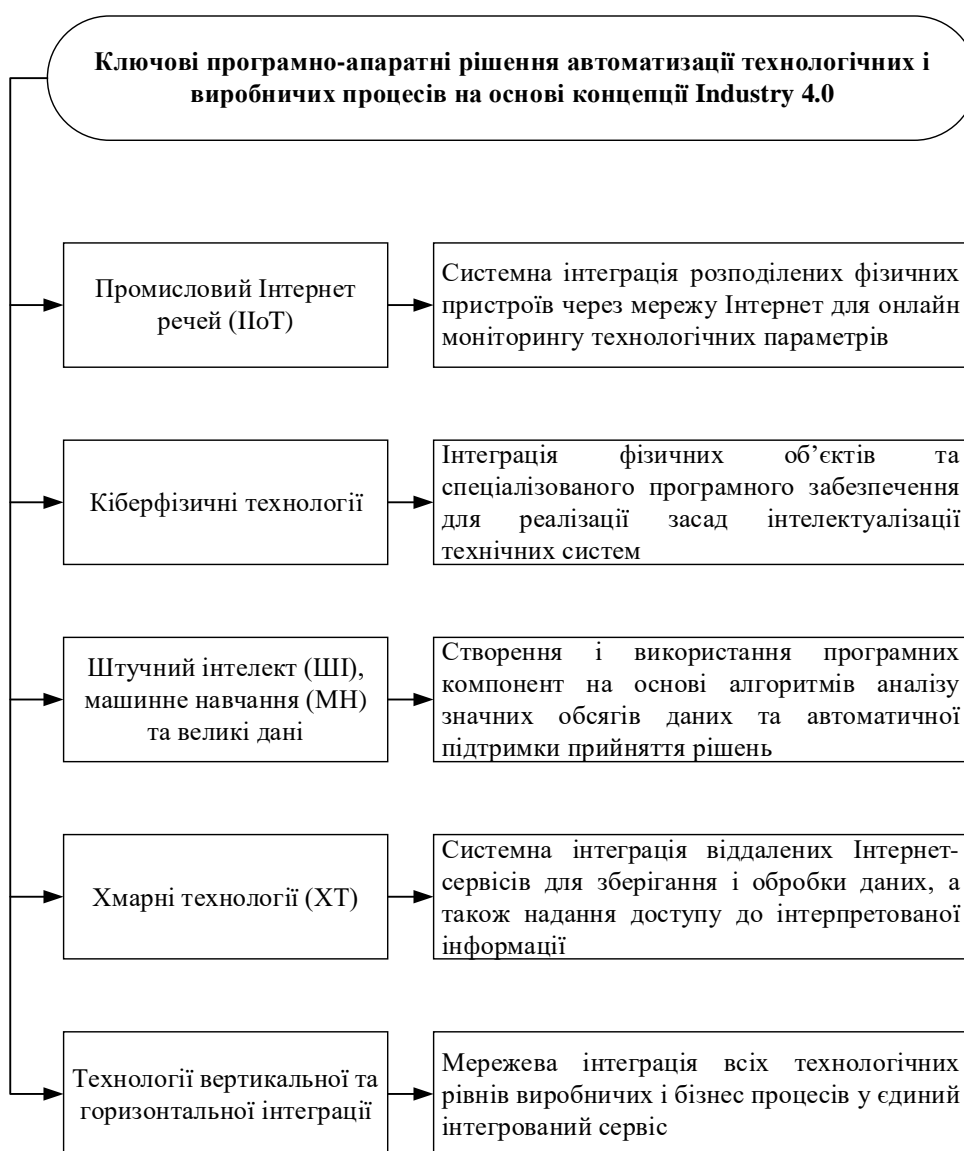


Рисунок 1.4 – Структурна схема системної інтеграції програмно-апаратних рішень автоматизації технологічних і виробничих процесів на основі Industry 4.0

На національному рівні стратегічні напрямки створення й упровадження технологій автоматизації різних виробничих галузей і процесів, у тому числі, теплотехнічних, задекларовано в нормативно-аналітичному документі «Стратегія

розвитку Індустрія 4.0», що був розроблений Асоціацією підприємств промислової автоматизації України (АППАУ), як показано на рисунку 1.5 [38].

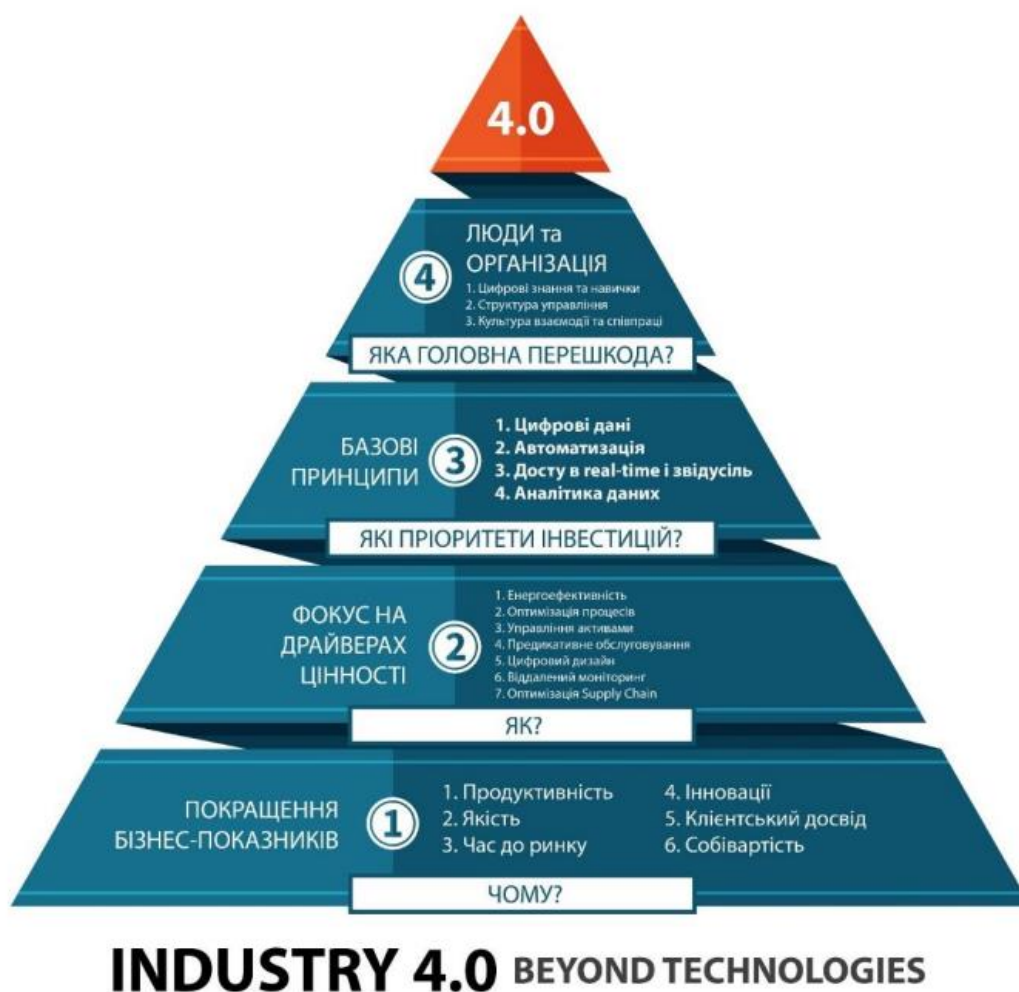


Рисунок 1.5 – Принципи переходу до концепції Industry 4.0 [38]

На основі аналізу структурної схеми та стратегії переходу до Industry 4.0, які наведено на рисунках 1.4 і 1.5, відповідно, а також з урахуванням ключових особливостей теплотехнічних систем як об'єктів автоматизованого керування зі застосуванням сучасних досягнень щодо проектування, дослідження й упровадження комп'ютерно-інтегрованих технологій [39–43], узагальнено функціонал відомих апаратно-програмних рішень, як показано в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Базовий функціонал автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого керування теплотехнічними процесами і об'єктами

| Апаратні і програмні компоненти | Виконувані функції |
|---|--|
| Сенсори: температура, тиск, витрати речовин, вологість та інше | Реалізують зональний неруйнівний моніторинг динаміки інформативних і дестабілізуючих параметрів, що характеризують стан теплотехнічних процесів і об'єктів у реальному часі. |
| Мікроконтролери та програмовані логічні контролери (ПЛК) | Відпрацьовують функціонал збору й агрегування даних із сенсорів, локальну обробку даних та керування виконавчими механізмами теплотехнічних систем. |
| Засоби розподіленого керування | Застосовуються для вимірювального контролю складних і масштабних процесів, забезпечуючи при цьому можливість централізованого управління теплотехнічними системами. |
| Виконавчі механізми та перетворювальна техніка: насоси, теплові акумулятори, компресори, сонячні колектори, клапани, компресори та інше | Основне призначення у відповідності до типу пристрою полягає в наступному: регулювання параметрів потоків речовин, забезпечення процесу циркуляції холодної й гарячої води та повітря, передача тепла між елементами системи і фізичними середовищами, перетворення різних видів енергії, підвищення / зниження тиску та інше. |
| Апаратно-програмні засоби обробки та аналітики даних: SCADA, MES, MRP, APS, HMI та інше | Основне призначення у відповідності до типу рішень полягає в наступному: збір, агрегація, абстракція, обробка та візуалізація даних у реальному часі; інтерфейси людино-машинної взаємодії; планування, управління та оптимізація технологічних і виробничих процесів. |

Продовження табл. 1.3

| | |
|--|--|
| Засоби інфокомунікації: промислові протоколи і мережі, засоби бездротового зв'язку та інше | Реалізують і забезпечують підключення віддалених апаратних елементів теплотехнічних систем, а також надійну взаємодію між сенсорами, мікроконтролерами, ПЛК, виконавчими механізмами і програмним забезпеченням систем автоматизації теплотехнічних процесів і об'єктів. |
|--|--|

Системна інтеграція відомих апаратних і програмних технологій, які описано в таблиці 1.3, під час створення та впровадження автоматизованих систем комп'ютерно-інтегрованого керування теплотехнічними процесами і об'єктами для цілей енергоефективного опалення, кондиціонування та гарячого водопостачання, передбачає наступний алгоритм [44, 45]:

- розподілений у просторі й часі збір вимірювальних даних щодо критичних і дестабілізуючих параметрів теплотехнічних систем;

- передача даних: вимірювальні дані з розподілених сенсорів передаються на мікроконтролери та ПЛК через бездротові інтерфейси та промислові інфокомунікаційні протоколи;

- локальна (периферійна) обробка даних: мікроконтролери та ПЛК реалізують первинну цифрову обробку результатів моніторингу інформативних і дестабілізуючих параметрів та передають отримані дані до підсистем централізованого управління;

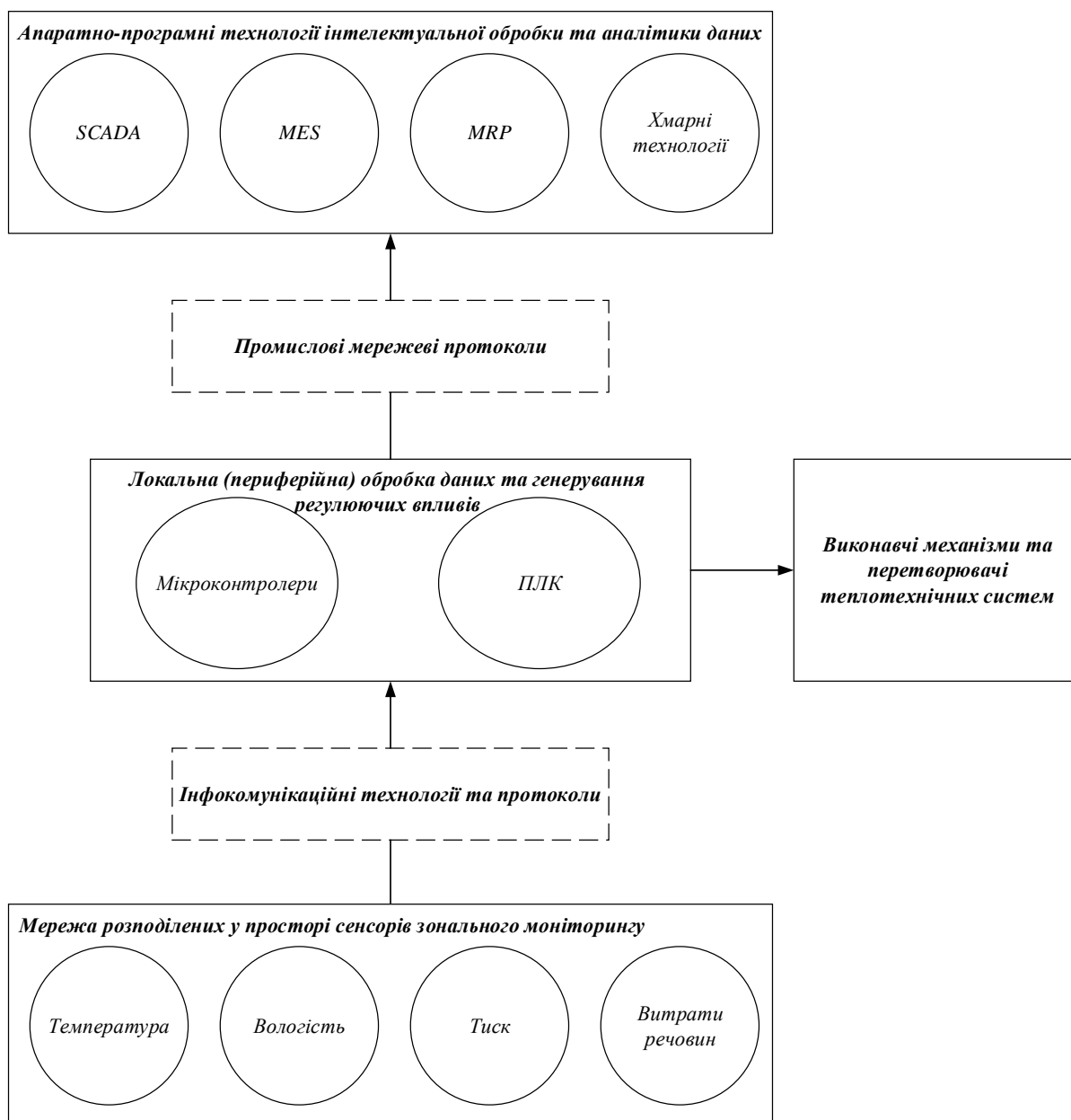
- інтелектуальна аналітика та автоматизована підтримка прийняття рішень: програмно-апаратні компоненти інтелектуальної аналітики значних обсягів даних, як наприклад, SCADA або MES, генерують алгоритм дій, який має бути відпрацьований;

- регулювання параметрів: генерування керуючих впливів засобами ПЛК та їх подача на відповідні виконавчі механізми й перетворювачі;

- оптимізація системних процесів: виявлення та прогнозування критичних режимів роботи елементів системи, а також оптимізація використовуваних ресурсів і енергії на основі програмних засобів, які базуються на алгоритмах штучного

інтелекту та машинного навчання.

Таким чином, з урахуванням наведеної вище інформації, було отримано узагальнену структуру, що розкриває сучасні підходи до системної інтеграції відомих апаратних і програмних технологій задля побудови й упровадження систем автоматизації теплотехнічних об'єктів і процесів із використанням методів і засобів комп'ютерно-інтегрованого керування, як показано на рисунку 1.6.



Рисунку 1.6 – Узагальнена структура побудови автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого керування теплотехнічними процесами і об'єктами

Отже, синтезована узагальнена структура (див. рис. 1.6) дозволила встановити пріоритетні напрямки подальшого аналізу відомих наукових досліджень і практичних розробок щодо методів та засобів створення автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого керування теплотехнічними процесами й об'єктами для цілей енергоефективного опалення, кондиціонування та гарячого водопостачання, до складу яких входять теплові насоси.

1.3 Аналіз і узагальнення методів та засобів побудови автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого керування теплотехнічними процесами та об'єктами

У світовій науковій та інженерній практиці на сьогоднішній день відома значна кількість досліджень і розробок щодо технічного, функціонального та програмно-алгоритмічного забезпечення технологій автоматизованого керування теплотехнічними процесами та об'єктами зі залученням методів і засобів комп'ютерно-інтегрованого моніторингу й контролю. Ширина спектру відомих досліджень і розробок обумовлена вагомою прикладною значущістю отриманого ефекту з точки зору екологічної, економічної, інноваційної і соціальної складових. Результати проведеного критичного аналізу існуючих досягнень у галузі автоматизації теплотехнічних систем наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Результати критичного аналізу існуючих досягнень у галузі модернізації та автоматизації теплотехнічних систем

| Мета і напрямки досліджень | Отриманий результат досліджень | Літературне джерело |
|---|---|----------------------------|
| Показники ефективності впровадження інноваційних технологій | Запропоновано та досліджено нову методологію переходу до четвертого покоління систем централізованого | [46] |

Продовження табл. 1.4

| | | |
|---|---|------|
| під час переходу до систем централізованого теплопостачання четвертого покоління в Україні | теплопостачання з урахуванням обмеженості інвестиційних ресурсів, що полягає в почерговому впровадженні необхідних рішень задля оптимізації працечасових витрат. | |
| Підходи та методи аналізу показників енергоефективності системи теплопостачання університетської інфраструктури | Узагальнено результати енергоаудиту мережі централізованого теплопостачання, що функціонує на основі використання геотермальної енергії. Розроблено та досліджено комплексну методологію енергетичного балансу системи централізованого теплопостачання. | [47] |
| Методи та засоби побудови систем автоматизованого керування мікрокліматом освітніх закладів у Середземноморському регіоні | Розроблено та впроваджено систему автоматизованого управління будівлею освітнього закладу з активним регулюванням короткострокового стану мікроклімату з урахуванням заданих значень параметрів, що впливають на стан мікроклімату, які було отримано за результатами створення й тестування енергетичної моделі будівлі. | [48] |
| Підходи до створення та аналізу гібридної системи опалення | Оцінено ефективність і доцільність використання фотоелектричної установки в якості гібридного | [49] |

Продовження табл. 1.4

| | | |
|---|--|------|
| <p>будинку з урахуванням екологічних аспектів експлуатації</p> | <p>джерела тепла для опалення та гарячого водопостачання, а також досліджено екологічні аспекти щодо зниження негативного впливу на довкілля через зменшення викидів забруднюючих речовин (CO_2 – 94,1 %, NO_x – 95,6 %, SO_x – 91,8 %, PM_{10} – 32,1 % та CO – 9,7 %).</p> | |
| <p>Методи та засоби модернізації систем централізованого теплопостачання з інтегрованими відновлювальними джерелами енергії</p> | <p>Проаналізовано сучасний стан типового обладнання систем централізованого постачання тепла в Україні. Проаналізовано та узагальнено актуальний світовий досвід зі створення і впровадження технологій підвищення енергоефективності систем централізованого теплопостачання споруд і будинків. Обґрунтовано перспективи застосування світових технологій в Україні.</p> | [50] |
| <p>Підходи до побудови та впровадження вертикально-інтегрованих структур керування ефективністю функціонування систем комунальної теплоенергетики</p> | <p>Розроблено та застосовано методи системного поєднання теорії ієрархічних багаторівневих систем, теоретико-множинного підходу та оптимізації параметрів і структури керування технологічними підсистемами генерування, транспортування і використання тепла</p> | [51] |

Продовження табл. 1.4

| | | |
|---|---|------|
| | за критеріями економічної, енергетичної та екологічної ефективності. | |
| Метод та підходи до оптимізації та просторової організації систем опалення | Запропоновано структуру автоматизованої системи опалення, яка дозволяє оптимізувати енергетичні мережі, оцінити роль централізованого опалення в таких оптимізованих енергетичних мережах і визначає раціональні схеми постачання тепла з просторовою роздільною здатністю на рівні вулиць міста. | [52] |
| Методологія проектування системи автоматизації масштабних будівель для покращення їх теплових характеристик | Представлено методологію проектування системи автоматизації масштабної громадської будівлі, що введена в експлуатацію. Розроблена методологія базується на оцінці та діагностуванні технологічного рівня будівлі з подальшим розгортанням засобів комп'ютерно-інтегрованого управління на основі економічних і енергоефективних пристроїв введення та виведення інформації. | [41] |

Варто зазначити, що результати критичного аналізу та систематизації існуючих досягнень у сфері модернізації та автоматизації теплотехнічних систем, які наведено в таблиці 1.4, не носять вичерпного характеру. Вони розкривають загальні світові та вітчизняні тенденції й підходи до підвищення ефективності систем опалення, кондиціонування та гарячого водопостачання з урахуванням

різних критеріїв синтезу та впровадження (економічний, екологічний, техніко-функціональний та енергетичний ефект). Отже, як встановлено на основі отриманих результатів аналізу та узагальнення (див. табл. 1.4), то основним вектором глобальної модернізації теплотехнічних об'єктів і процесів є впровадження методів і засобів автоматизованого керування процесами генерування, транспортування й використання теплової енергії зі залученням комп'ютерно-інтегрованих технологій [41, 46–52].

Як зазначалось вище, теплотехнічні системи опалення, кондиціонування та гарячого водопостачання з використанням теплових насосів (ТН) та теплових акумуляторів (ТА) є одними з найперспективніших рішень для забезпечення ефективного протікання відповідних теплових процесів. Отже, потребують додаткового аналізу й узагальнення, результати якого представлено нижче в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Результати аналізу відомих результатів досліджень і розробок у сфері застосування теплонасосних систем під час автоматизації та підвищення енергоефективності теплотехнічних систем

| Мета і напрямки досліджень | Отриманий результат досліджень і розробок | Літературне джерело |
|---|---|----------------------------|
| Експериментальний зразок системи кондиціонування з тепловим насосом з повітряним джерелом | Розроблено автоматизовану систему кондиціонування з використанням повітряного теплового насосу, яка вирішує проблему обмерзання обладнання під час безперебійної подачі тепла до внутрішнього простору будівлі за незначного регулювання дроселювання й зниженню швидкості компресора теплотехнічної установки. | [53] |

Продовження табл. 1.5

| | | |
|--|--|-------------|
| <p>Підходи до агрегації навантаження повітряних теплових насосів</p> | <p>Запропоновано підхід до автоматизованого управління навантаженням теплових насосів у рамках трирівневої архітектури: електроенергетична система, агрегатор навантаження та теплове навантаження. Вирішено задачу мінімізації витрат на опалення завдяки ціноутворенню на електроенергію в залежності від часу використання з урахуванням можливості регулювання навантаження.</p> | <p>[54]</p> |
| <p>Моделі аналізу та підвищення ефективності повітряного теплового насоса та фотоелектричних панелей, які інтегровано до адміністративних будівель</p> | <p>Представлено результати моделювання в середовищі TRNSYS та аналізу використання систем «тепловий насос-сонячна панель» в умовах адміністративних будівель у різних кліматичних зонах Польщі. Отримано результати досліджень впливу зміни площі, ефективності, типу та розташування фотоелектричних панелей, а також стратегії управління тепловими насосами на обсяги виробленої та спожитої енергії.</p> | <p>[55]</p> |
| <p>Структурно-алгоритмічна організація теплонасосних систем з інтелектуальним</p> | <p>Розроблено інтелектуальні алгоритми керування тепловими насосами. Методами комп'ютерного моделювання в середовищі TRNSYS досліджено 18 систем повітряних і ґрунтових теплових</p> | <p>[56]</p> |

Продовження табл. 1.5

| | | |
|---|--|-------------|
| <p>регулюванням під час керування електричним навантаженням житлових будинків</p> | <p>насосів з інтелектуальним керуванням на основі виміряного споживання електроенергії та даних про використання гарячої води. Доведено можливість зниження загального енергоспоживання, зміщення навантаження з пікових періодів на періоди надлишкової генерації енергії та збільшення власного споживання електроенергії від фотоелектричних установок за рахунок використання інтелектуалізованих теплових насосів.</p> | |
| <p>Експериментальні дослідження та методи аналізу експлуатаційних характеристик теплових насосів змінного об'єму під час їх використання у вентиляційних системах</p> | <p>Досліджено експлуатаційні характеристики теплових насосів і доведено, що введення до загальної технологічної схеми засобів регулювання об'єму в активному контурі опалення в поєднанні зі звичайними регуляторами дозволяє розширити діапазон теплової потужності. Проведені експериментальні дослідження враховували зміну режимів роботи установки шляхом регулювання швидкості компресора, положення розширювального клапана та об'єму контуру регулювання теплотехнічної системи.</p> | <p>[57]</p> |

Продовження табл. 1.5

| | | |
|---|---|-------------|
| <p>Інтеграційні підходи до розробки систем на основі компресорного теплового насоса з фотоелектричною установкою</p> | <p>Теоретична розробка високотемпературного теплового насосу з використанням екологічних холодоагентів. Запропоноване технічне рішення дозволяє настінним радіаторам отримувати гарячу воду з температурою до 85 °С при температурі повітря навколишнього середовища до -20 °С. Додатково було проаналізовано методи забезпечення підтримки фотоелектричних модулів. Запропоновано підходи до енергоефективного опалення будинку з використанням високотемпературного теплового насоса.</p> | <p>[58]</p> |
| <p>Підходи до побудови моделей теплових насосів для одночасного опалення та охолодження</p> | <p>Розроблено та досліджено моделі побудови теплових насосів під час їх використання в режимах опалення та кондиціонування будівель.</p> | <p>[59]</p> |
| <p>Методи побудови та застосування систем теплових насосів для опалення та охолодження будівель з використанням теплової енергії неочищених стічних</p> | <p>Запропоновано спеціальну технологію теплопередачі від стічних вод, що здатна вирішити проблему засмічення та корозії в процесі теплопередачі. На прикладі системи офісної будівлі обґрунтовано параметри проєктованої системи. За допомогою комп'ютерно-інтегрованих засобів було реалізовано</p> | <p>[60]</p> |

Продовження табл. 1.5

| | | |
|-----|--|--|
| ВОД | моніторинг характеристик систем та адаптацію до сезонів використання під час опалення й кондиціонування будівлі. Проаналізовано показники продуктивності розробленої системи. | |
|-----|--|--|

Таким чином, на підставі аналізу та узагальнення результатів, які наведено в таблиці 1.5, встановлено значну популярність і високу ефективність застосування теплових насосів з автоматизованим керуванням під час опалення й кондиціонування будівель і споруд. Цей ефект доведено за показниками енергоефективності, техніко-функціональної сумісності з іншими елементами тепло- та енергозабезпечення, впливу на навколишнє середовище, високого ступеня автоматизації технологічних процесів, адаптації до мінливих умов навколишнього середовища та інше. Одночасно з цим, на підставі аналізу релевантних наукових джерел щодо сучасного стану й тенденцій розвитку теплонасосних систем під час автоматизації та комп'ютерно-інтегрованого керування процесами опалення, гарячого водопостачання та кондиціонування [53–60] було обґрунтовано необхідність подальшого розвитку відомих результатів за наступними напрямками:

- розробка та дослідження структурно-алгоритмічного забезпечення автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами, які функціонують на правах підсистем технологічних процесів опалення, гарячого водопостачання, кондиціонування та вентиляції, з урахуванням оптимізації їх енергоефективності;

- облік специфічних кліматичних умов, у яких планується використовувати розроблювану автоматизовану технологію комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами;

- облік специфічних характеристик інфраструктурних об'єктів, будівель і споруд, у яких планується використовувати розроблювану автоматизовану технологію комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами;

– врахування сучасних досягнень апаратного, програмного та інфокомунікаційного забезпечення під час синтезу архітектури технологій автоматизованого керування теплотехнічними процесами і об'єктами.

Отже, тема дисертаційної роботи є актуальною і потребує додаткових досліджень за зазначеними вище напрямками, що дозволить обґрунтувати напрямки модернізації та підвищення енергоефективності теплотехнічних об'єктів із використанням теплових насосів.

1.4 Мета, напрямки та задачі дисертаційного дослідження

На підставі проведеного інформаційного аналізу актуального стану науково-прикладних досліджень та інженерно-технічних рішень у сфері автоматизованого керування теплотехнічними об'єктами й процесами, які викладено в цьому розділі дисертації, було обґрунтовано мету, об'єкт, предмет та перспективні напрямки і основні задачі цього дисертаційного дослідження.

Метою дисертаційної роботи є вдосконалення техніко-функціональної організації теплотехнічних систем, що реалізують процеси опалення, гарячого водопостачання й кондиціонування завдяки розробці та впровадженню технічного й програмно-інформаційного забезпечення автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого енергоефективного керування тепловими насосами.

Об'єкт дослідження – процеси комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами в автоматизованому режимі.

Предмет дослідження – методи, засоби та моделі створення автоматизованих систем комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети дисертаційного дослідження необхідно вирішити наступні задачі:

1. Провести інформаційний аналіз актуального стану науково-прикладних досліджень та інженерно-технічних рішень у сфері автоматизованого керування теплотехнічними об'єктами й процесами з подальшим

обґрунтуванням мети та напрямків досліджень дисертаційної роботи.

2. Обґрунтувати параметри та характеристики структурно-функціонального забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами з урахуванням критерію енергоефективності, що дозволить сформулювати вимоги до розробки програмного, апаратного й інформаційного забезпечення досліджуваної автоматизованої технології.

3. Розробити та дослідити інформаційне й програмне забезпечення автоматизованої технології керування теплонасосними системами, що дозволить оцінити експлуатаційні характеристики досліджуваної автоматизованої технології.

4. Створити та валідувати комп'ютерні моделі апаратно-програмного забезпечення автоматизованої технології керування теплонасосними системами, що дозволить оцінити адекватність і об'єктивність отриманих результатів досліджень розробленої автоматизованої технології.

5. Провести критичний аналіз отриманих результатів досліджень, сформулювати рекомендації з практичного використання розробленої автоматизованої технології та обґрунтувати перспективні напрямки її подальших досліджень.

Таким чином, науково-прикладна задача створення та дослідження технології автоматизованого керування теплонасосними системами є актуальною, а її розв'язання дозволить підвищити енергоефективність теплопостачання будівель шляхом розробки й використання інформаційного, програмного та технічного забезпечення систем автоматизації.

1.5 Висновки за першим розділом

У результаті досліджень цього розділу дисертації було розв'язано одну з основних її задач щодо інформаційного аналізу актуального стану науково-прикладних досліджень та інженерно-технічних рішень у сфері автоматизованого керування теплотехнічними об'єктами та процесами. Основні результати цього розділу полягають у наступному:

1. Проведено аналіз світового та національного досвіду модернізації й підвищення ефективності теплотехнічних систем. В результаті цього було встановлено, що основним глобальним трендом є збільшення частки відновлювальних джерел енергії в загальному обсязі генерування теплової та електричної енергії, які, в свою чергу, мають реалізовувати адаптивні режими функціонування в залежності від умов їх експлуатації. Показано, що адаптація до мінливих умов експлуатації може бути реалізована шляхом розробки та інтеграції автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого керування технологічними процесами генерування, акумулювання та розподілення енергії, що дозволяє значно підвищити загальну енергоефективність теплотехнічних об'єктів і процесів.

2. Результати аналізу світового та національного досвіду модернізації та підвищення ефективності теплотехнічних систем довели важливість і перспективність використання теплових насосів, що оснащені комп'ютерно-інтегрованими технологіями онлайн-моніторингу та керування під час автоматизованого регулювання процесів опалення, гарячого водопостачання та кондиціонування. Такий підхід дозволяє оптимізувати споживання енергії та ресурсів, зменшити експлуатаційні витрати, підвищити рівень комфорту для користувачів послуг та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, що робить його актуальним для досліджень з подальшим упровадженням у світі та Україні.

3. Проведено аналіз і узагальнення сучасних напрямків і технологій автоматизації та комп'ютерно-інтегрованого керування теплотехнічними процесами й об'єктами, що дозволило обґрунтувати необхідність системної інтеграції цифрових і комп'ютерно-інтегрованих технологій, а також апаратно-програмних компонент вбудованої обробки та аналітики даних під час розробки технологій автоматизованого керування теплонасосними системами.

4. Проаналізовано та узагальнено відомі методи й засоби побудови автоматизованих технологій керування теплотехнічними процесами і об'єктами, в тому числі, з використанням теплових насосів. На підставі цього встановлено, що

основним вектором глобальної модернізації теплотехнічних об'єктів і процесів є впровадження методів та засобів автоматизованого керування процесами генерування, транспортування й використання теплової енергії на основі залучення комп'ютерно-інтегрованих технологій.

5. Сформульовано мету, об'єкт, предмет і основні пріоритетні напрямки та задачі щодо вдосконалення та подальшого розвитку відомих автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами, які функціонують на правах підсистем технологічних процесів опалення, гарячого водопостачання, кондиціонування й вентиляції, з урахуванням оптимізації їх енергоефективності, а саме: розробка та дослідження структурно-алгоритмічного забезпечення автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами з адаптацією режимів регулювання (подача або утилізація) тепла; облік специфічних кліматичних умов та характеристик інфраструктурних об'єктів, будівель і споруд, у яких планується використовувати розроблювану автоматизовану технологію комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами; врахування сучасних світових досягнень у сферах апаратного, програмного та інфокомунікаційного забезпечення технічних систем під час синтезу архітектури технологій автоматизованого керування теплотехнічними процесами та об'єктами.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ПОБУДОВИ ТА СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОГО

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ ТЕПЛОАСОСНИМИ СИСТЕМАМИ

2.1 Структурно-функціональне забезпечення методів комп'ютерно-інтегрованого керування процесом утилізації теплової енергії

2.1.1 Методи комп'ютерно-інтегрованого керування системою кондиціонування житлових приміщень для потреб гарячого водопостачання

На теперішній час у всіх країнах світу знайшли широкого впровадження й застосування системи кондиціонування повітря. Це відповідає природному прагненню людей до побутового комфорту та досягненню санітарних норм, особливо в регіонах із жарким кліматом. Щорічний обсяг продажів побутових та напівпромислових кондиціонерів досягає понад 100 млн виробів. При цьому одним із негативних наслідків використання систем кондиціонування повітря є велика кількість теплової енергії, яка марно викидається в навколишнє середовище та обчислюється мільйонами ГДж.

В свою чергу, в енергетичному секторі України, та не в останню чергу в комунальному господарстві, назріла гостра проблема економії енергетичних ресурсів. Вже багато років стоїть проблема централізованого гарячого водопостачання, яке на більшій частині країни давно відімкнено. В більшості випадків населення застосовує електричні бойлери для гарячого водопостачання, що є дуже дорогавартісним засобом, має тенденцію к постійному здорожчання електроенергії, а також є зовсім не енергоефективним. Те саме можна сказати й у відношенні газових колонок та вартості газу. Також використання газового обладнання створює додаткові ризики безпеки в побутовій сфері.

Автором дисертації проаналізовано можливість застосування такого нетрадиційного методу як щодобове акумулювання теплової енергії системи кондиціонування будівлі в теплий період з подальшим її використанням в автоматизованій системі гарячого водопостачання. Застосування теплового

акумулятора дозволяє суттєво знизити температуру конденсації холодоагенту в системі кондиціонування (до 45 °С) та, відповідно, збільшити холодильний коефіцієнт більш ніж у 2 рази.

Розглянута система являє собою автоматизовану парокompресійну установку, що працює за основним холодильним циклом, при проходженні якого виконується охолодження повітря, а теплова енергія з конденсатора теплового насоса передається до теплового акумулятора [61–64].

Акумуляування теплової енергії є однією з перспективних технологій енергозбереження. До найбільш простих, дешевих, технологічних у виготовленні, безпечних та надійних пристроїв акумуляування відносяться рідинні теплові акумулятори. Вони широко застосовуються для побутових цілей. Отже, для дослідження було обрано витіснювальний рідинний тепловий акумулятор з наповненням водою, що є функціональним елементом загальної схеми автоматизації теплонасосної системи. В якості об'єкта комп'ютерно-інтегрованого контролю прийнято одноповерхову будівлю, з зовнішнім об'ємом 450 м³ (габаритні розміри 15x12x2,5 м) та житловою площею 180 м², що відповідає стандартним типорозмірам. Були проведені дослідження системи кондиціонування та системи гарячого водопостачання будівлі в єдиному комплексі засобів автоматизації з тепловим акумулятором (див. рис. 2.1).

Варто зазначити, що було досліджено дві технології утилізації теплової енергії системи кондиціонування для гарячого водопостачання будівлі із застосуванням теплового акумулятора:

1. Автоматизована технологія утилізації теплоти з постійним об'ємом теплового акумулятора та змінною температурою конденсації холодоагенту системи кондиціонування в залежності від температури повітря навколишнього середовища (див. рис. 2.2).

2. Автоматизована технологія утилізації теплоти зі змінним об'ємом теплового акумулятора та постійною температурою конденсації холодоагенту системи кондиціонування (див. рис. 2.3).

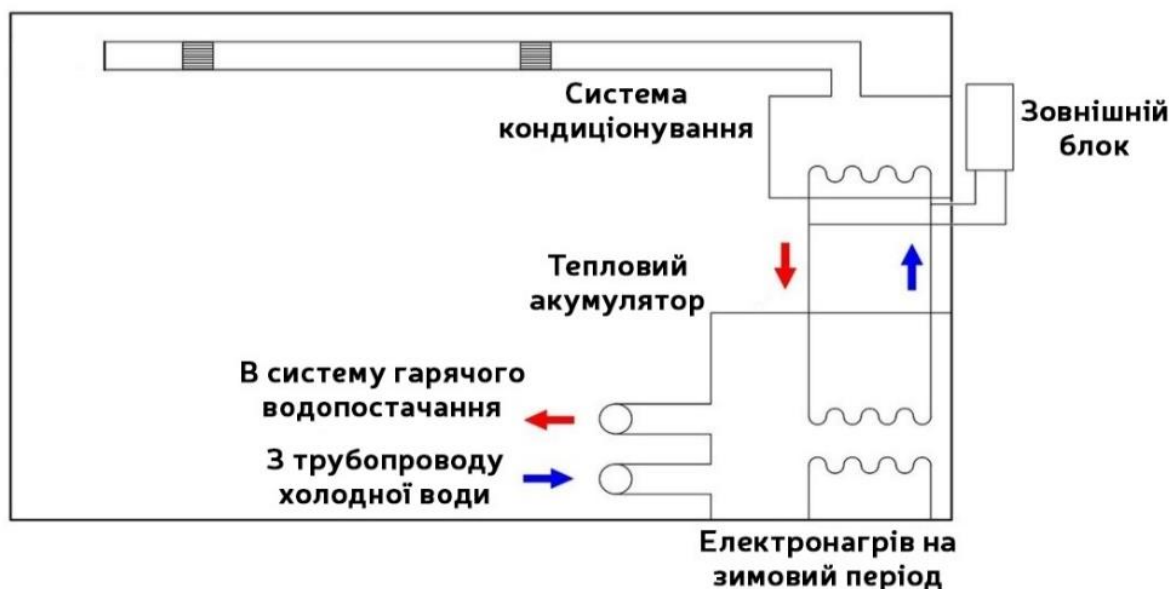


Рисунок 2.1 – Теплова схема системи кондиювання та гарячого водопостачання будівлі

На першому етапі досліджень для цих технологій на основі p,i – діаграми обраного типу холодоагенту було визначено функціональні залежності зміни параметрів циклу охолодження від температури конденсації холодоагенту при температурі випаровування холодоагенту рівній $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. В якості холодоагенту було застосовано фреон–11, який має широкий температурний діапазон та є популярним в промислових системах.

Також була визначена функціональна залежність теплового навантаження охолодження будівлі від температури зовнішнього повітря, що має лінійний характер. Далі було визначено функціональну залежність температури конденсації холодоагенту від маси води в тепловому акумуляторі та температури зовнішнього повітря (див. рис. 2.4). Також були визначені функції витрат умовного палива та добової маси нагрітої води, приведені до температури $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ від маси води в тепловому акумуляторі та температури зовнішнього повітря.

Для першої технології формується функція витрат умовного палива на 1 кг нагрітої води, приведеній до температури $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ від маси води в тепловому акумуляторі за весь теплий сезон (див. рис. 2.5).



Рисунок 2.2 – Блок-схема алгоритму функціонування автоматизованої технології утилізації тепла з постійним об'ємом теплового акумулятора та змінною температурою конденсації холодагенту



Рисунок 2.3 – Блок-схема алгоритму функціонування автоматизованої технології утилізації теплоти зі змінним об'ємом теплового акумулятора та постійною температурою конденсації холодагенту

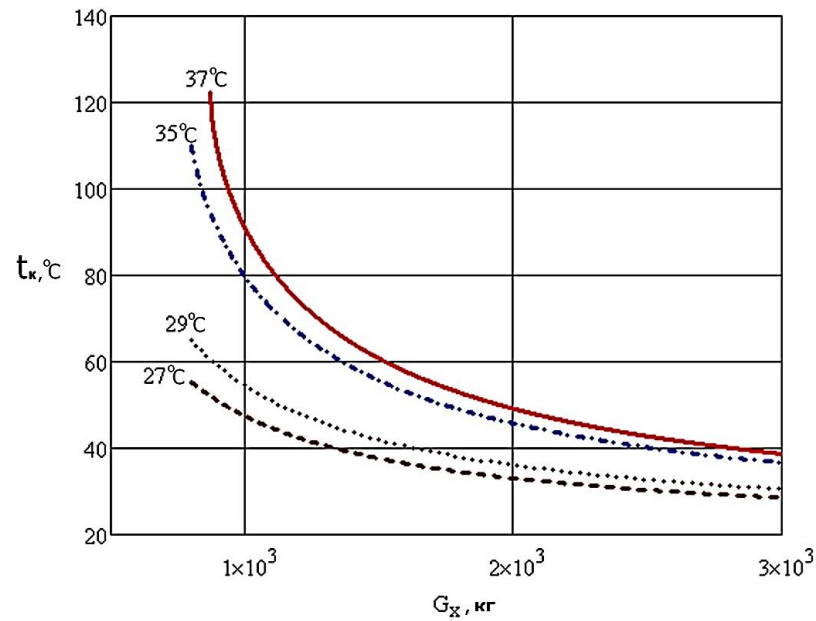


Рисунок 2.4 – Графіки залежності температури конденсації t_k холодоагенту від маси води G_x в ТА та температури зовнішнього повітря

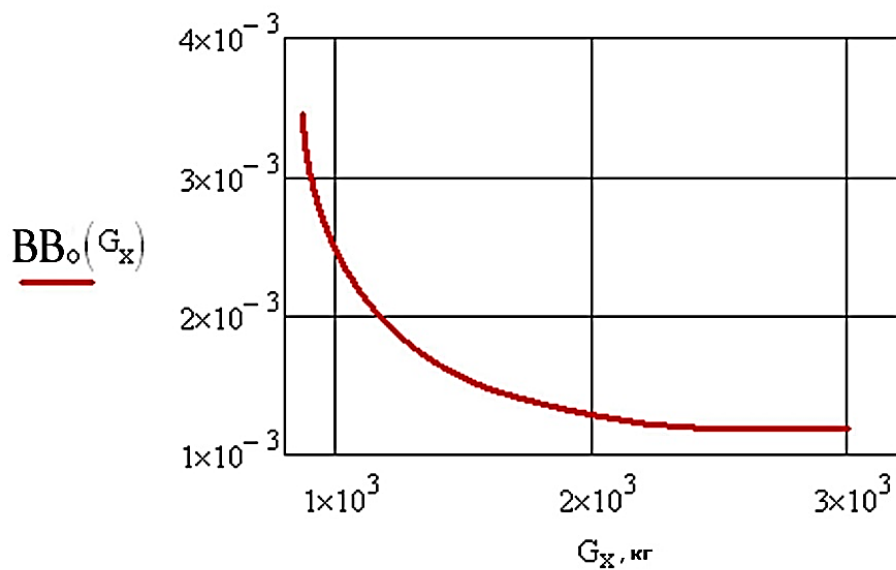


Рисунок 2.5 – Графічна залежність питомих витрат умовного палива BB_0 упродовж теплого сезону від маси води G_x в ТА

Для знаходження оптимальної маси води в ТА було сформовано цільову функцію, що являє собою добуток питомих витрат умовного палива за теплий сезон на масу води в ТА (див. рис. 2.6).

Аналітичними методами визначено екстремум даної функції та отримано раціональну кількість води в ТА, а отже, і сам об'єм ТА у відповідному перерахунку. Для розглянутого прикладу оптимальна маса води в ТА склала 1341,85 кг.

Для другої технології – утилізації теплоти зі змінним об'ємом теплового акумулятора та постійною температурою конденсації холодоагенту системи кондиціонування: встановлюється постійна температура конденсації холодоагенту 43 °С за умови кінцевої температури води в ТА рівній 38 °С.

Формується функція, що визначає необхідну масу води в ТА в залежності від температури конденсації холодоагенту та температури зовнішнього повітря. Далі, ця функція підставляється до всіх раніше визначених функцій, що мають в якості аргументу масу води в ТА. Як результат, отримано модель для автоматизованої технології зі змінним об'ємом ТА.

В таблиці 2.1 приведено порівняльні характеристики за двома розглянутими технологіями утилізації теплоти системи кондиціонування. В результаті дослідження встановлено явну перевагу другої схеми утилізації теплової енергії зі змінним об'ємом ТА та постійною температурою конденсації.

Результати порівняння витрат умовного палива для різних технологій представлено на рисунку 2.7.

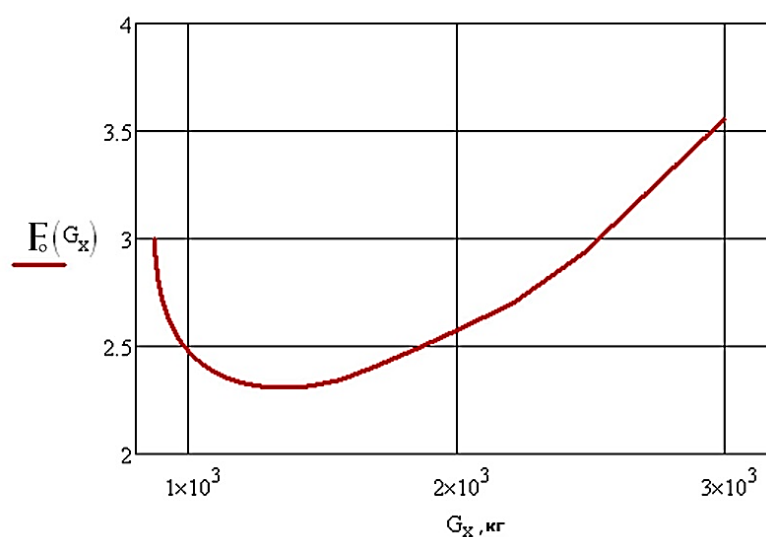


Рисунок 2.6 – Цільова функція F_0 від маси води G_x в ТА

Таблиця 2.1 – Порівняльні характеристики за запропонованими технологіям утилізації теплоти системи кондиціонування

| Технологія | Температура конденсації, °С | Маса води в акумуляторі, кг | Витрата у.п. на кондиціонер з ТА, кг | Витрата у.п. в КТ на ГВП, кг | Маса горяч. води за сезон, кг | Витрата у.п. на кондиціонер без ТА, кг |
|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--|
| Постійний об'єм ТА | від 43 до 66,7 | 1341,86 | 457,48 | 971,97 | 252308,54 | 806,72 |
| Постійна температура конденсації | 43 | від 1172,9 до 2476,1 | 299,16 | 922,07 | 265962,15 | |

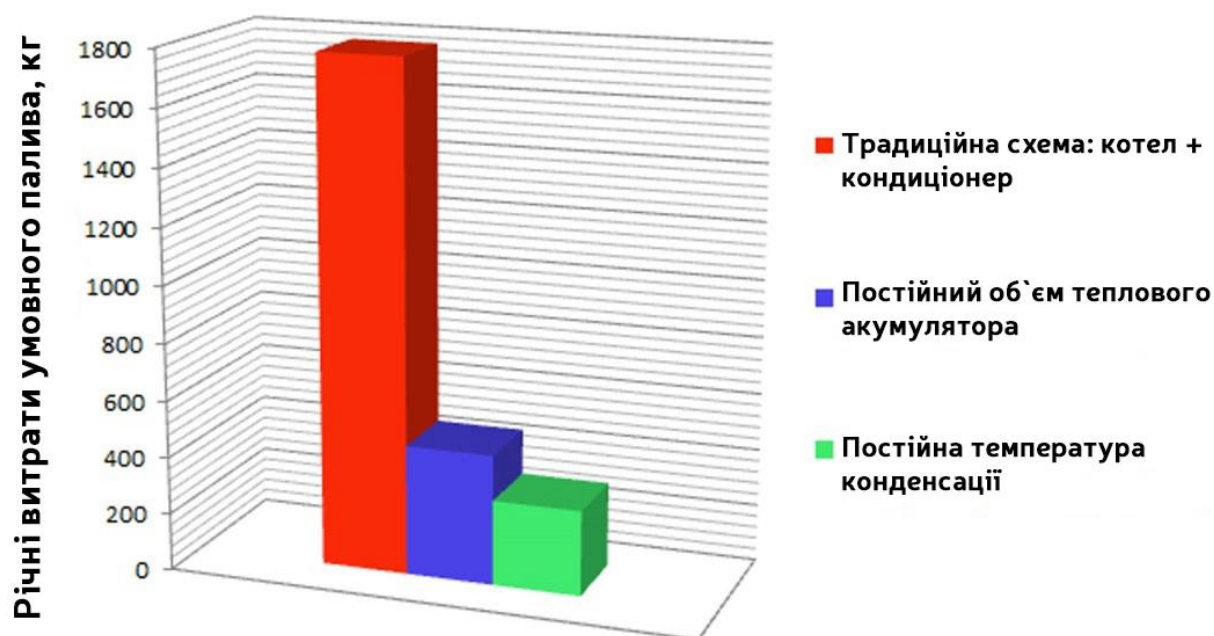


Рисунок 2.7 – Витрата умовного палива для різних технологій утилізації теплоти

2.1.2 Метод комп'ютерно-інтегрованого керування утилізацією теплоти вентиляційних теплотехнічних систем житлових і адміністративних будівель

В сучасному житловому будівництві особлива увага приділяється системам вентиляції. Те саме стосується проектування будівель підприємств. З практики проектування відомо, що в тепловому балансі системи опалення будівлі втрати теплової енергії через систему вентиляції складають значну частину, яка приблизно дорівнює втратам через огорожувальні конструкції. Існує проблема великих втрат теплоти через системи вентиляції в холодну пору року. Ці втрати доводиться компенсувати додатковим навантаженням на систему опалення будівлі та, як наслідок, додатковими витратами палива.

Для рішення цієї проблеми в сучасних будівлях застосовують рекуператори, в яких повітря, що виходить з будівлі, частково підігріває зовнішнє повітря, що надходить до будівлі. Однак, при цьому виникає проблема замерзання конденсату, який утворюється на теплообмінних поверхнях рекуператора, що потребує аналізу та визначення оптимальних параметрів процесів теплообміну в ньому [65–68].

Теплова енергія з повітря може бути використана в інших корисних цілях. Автором дисертації було досліджено та обґрунтовано можливість застосування нетрадиційної технології утилізації теплоти повітря, що виходить з системи вентиляції, для подальшого використання в системі гарячого водопостачання. Запропоновано охолоджувати повітря, що виходить з будинку через систему вентиляції за допомогою теплового насоса, з накопиченням отриманої теплової енергії в тепловому акумуляторі, та використанням її для потреб гарячого водопостачання з обов'язковим автоматизованим керуванням режимами роботи зазначеного технологічного ланцюга (див. рис. 2.8).

Другим перспективним способом є використання теплоти повітря в системі вентиляції під час підігріву вхідного повітря за умови відсутності ефекту утворення конденсату в рекуператорі.

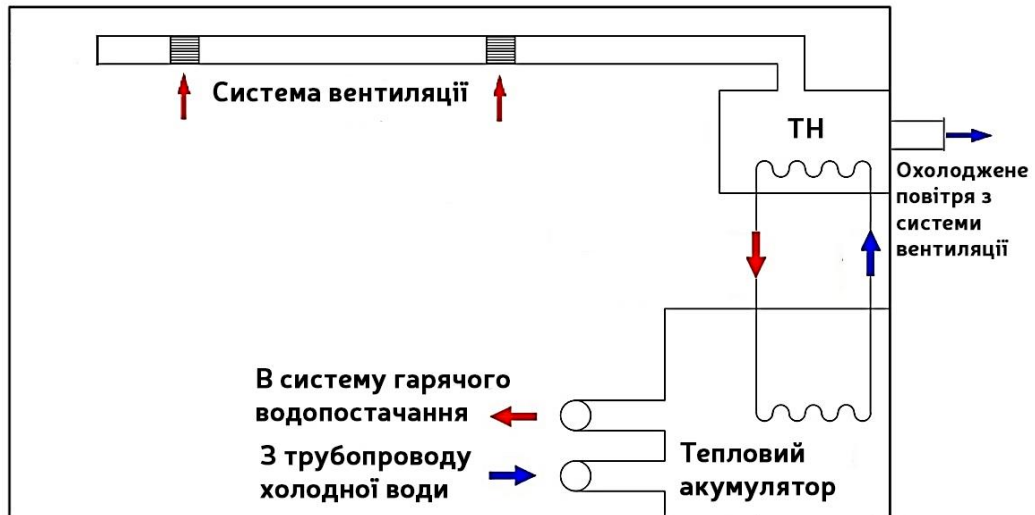


Рисунок 2.8 – Теплова схема комплексної системи ТН, ТА та ГВС будівлі

Даний ТН є парокомпресійною установкою, що працює за основним холодильним циклом. В якості акумулятора було обрано витіснявальний рідинний тепловий акумулятор на базі води, як було детально описано в п. 2.1.1. В якості об'єкта автоматизованого комп'ютерно-інтегрованого контролю було обрано ту саму будівлю, що в пункті 2.1.1 – одноповерховий будинок з зовнішнім об'ємом 450 м^3 . Даний випадок відрізняється тим, що навантаження охолодження для ТН не залежить від суттєво змінної температури зовнішнього повітря та є постійною величиною. Оскільки температура внутрішнього повітря в холодний період підтримується на одному рівні та в цьому дослідженні дорівнює $21 \text{ }^\circ\text{C}$. Крім того, підтримується постійною температура охолодження вихідного повітря на рівні $7 \text{ }^\circ\text{C}$ для уникнення ефекту намерзання конденсату на теплообмінних поверхнях ТН, що обумовлює необхідність введення додаткових засобів контролю цього явища. Отже, об'єм ТА може вважатися постійним, таким чином, не потребує додаткових обчислень для визначення оптимального значення.

Для цієї технології (див. рис. 2.9) на основі p,i – діаграми обраного холодоагенту (фреон-11) було визначено функції зміни параметрів холодильного циклу від температури конденсації холодоагенту за температури випаровування холодоагенту $2 \text{ }^\circ\text{C}$ (для запобігання виникнення ефекту замерзання конденсату з охолоджуваного повітря та подальшого введення в систему автоматизації

додаткових контрольно-діагностичних елементів моніторингу цього ефекту). Тобто, було прийнято рішення не використовувати пристрої для розморожування, щоб уникнути додаткових витрат енергії.

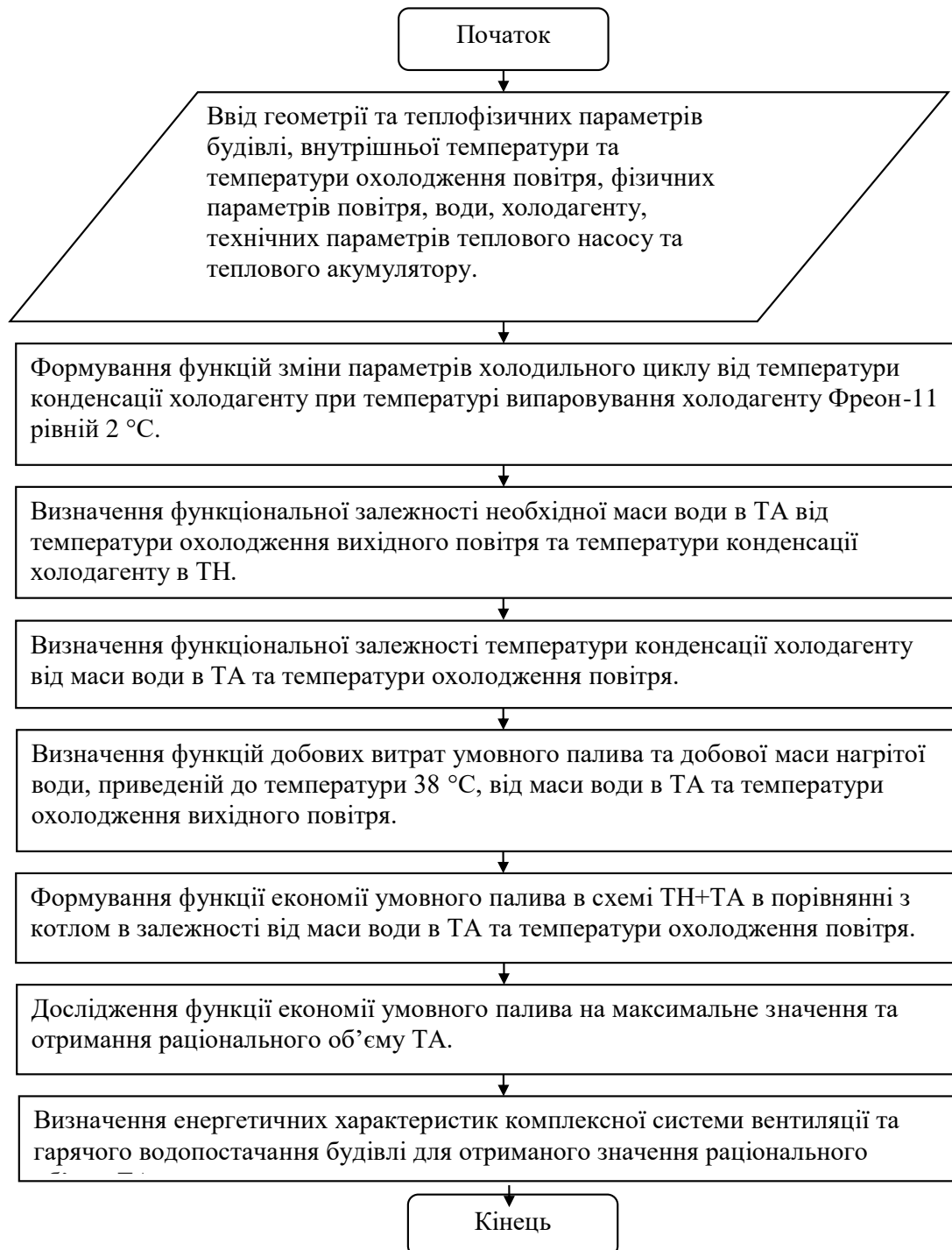


Рисунок 2.9 – Блок-схема алгоритму функціонування автоматизованої технології утилізації теплоти системи вентиляції з ТН та ТА

Додатково під час досліджень було сформовано функціональну залежність необхідної маси води в ТА від температури охолодження вихідного повітря та температури конденсації холодоагенту в ТН (див. рис. 2.10). Для перевірки було сформовано функціональну залежність необхідної температури конденсації холодоагенту від маси води в ТА та температури охолодження вихідного повітря.

Також, визначено функцію витрат умовного палива та функцію маси нагрітої води, приведеної до температури 38 °С на добу, від маси води в ТА та температури охолодження вихідного повітря. Складено функцію відносної економії умовного палива в схемі з ТН і ТА в порівнянні з котлом в залежності від маси води в ТА для заданої температури охолодження вихідного повітря.

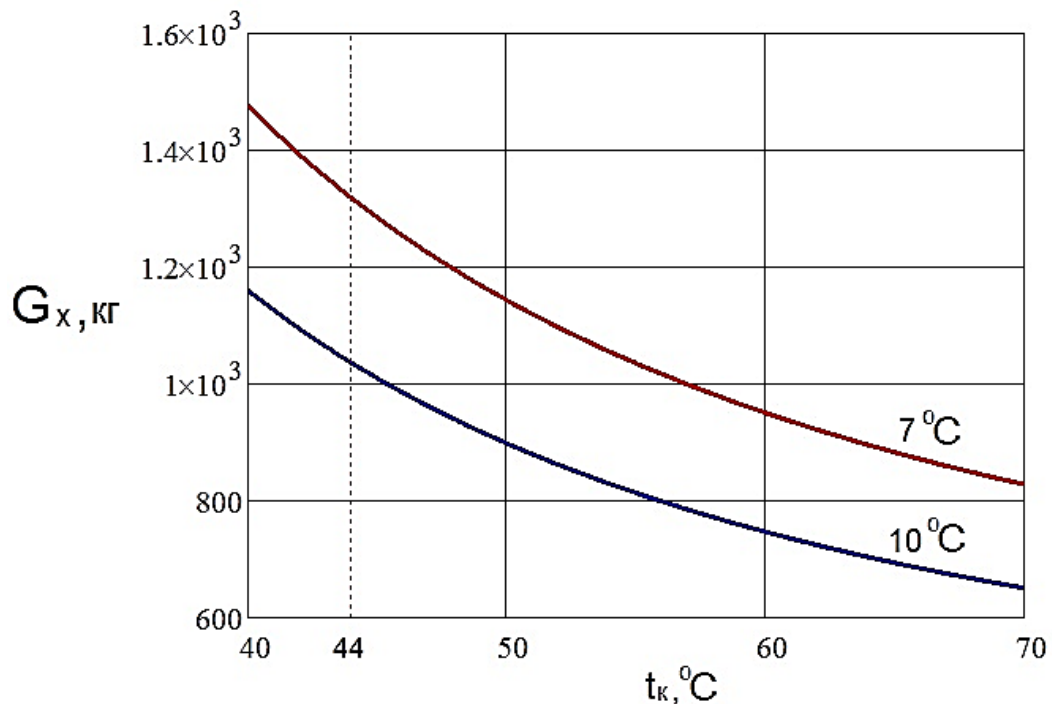


Рисунок 2.10 – Залежність необхідної маси води G_x в ТА від температури конденсації t_k холодоагенту в ТН для різних температур охолодження вихідного повітря

В результаті проведених досліджень отримано оптимальний об'єм ТА (з умови максимальної економії палива), який в масовій інтерпретації відповідає 1319 кг води, що практично співпадає з раціональним об'ємом ТА, який було визначено

в п. 2.1.1 для такої ж будівлі. Тобто, можливо створити єдину автоматизовану систему ГВС, яка функціонує протягом всього року: в теплий період буде використовуватися тепло повітря з системи кондиціонування, а в холодний період – тепло охолодженого повітря з системи вентиляції.

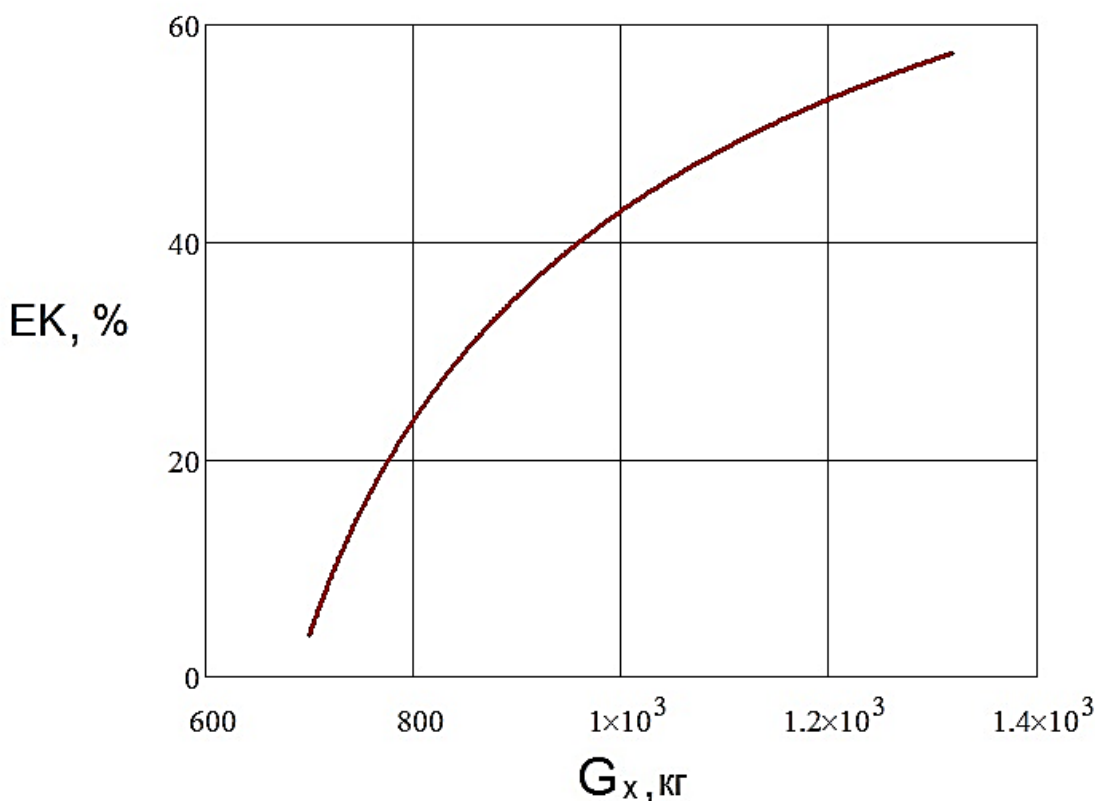


Рисунок 2.11 – Залежність відносної економії умовного палива в схемі з ТН і ТА в порівнянні з котлом від маси води в ТА для температури охолодження вихідного повітря 7 °С

Після проведення аналізу функції економії умовного палива (див. рис. 2.11), зроблено висновок, що найбільша економія палива (57 %) досягається під час нагріву води в ТА до базової температури, яка прийнята рівною 38 °С, що відповідає мінімальній температурі конденсації парів холодоагенту в ТН на рівні 44 °С.

Другий досліджуваний метод побудови автоматизованої технології реалізує керування процесом утилізації теплоти системи вентиляції за допомогою

рекуператора (див. рис. 2.12). В якості рекуператора було обрано теплообмінник пластинчатого типу з протиточною схемою руху теплоносіїв. Витрати прихідного та вихідного повітря прийняті однаковими з умови теплового балансу системи вентиляції. Величина витрати визначається автоматично та залежить від вентилязованого об'єму будівлі та кратності повітряного обміну.

Під час досліджень сформовано функції кінцевих температур зовнішнього та внутрішнього повітря в рекуператорі в залежності від площі теплообміну, коефіцієнту теплопередачі та температури зовнішнього повітря. Сформовано функцію, що визначає коефіцієнт рекуперації в залежності від площі теплообміну рекуператора та температури повітря навколишнього середовища (див. рис. 2.13). В результаті аналізу даної функції підтверджено, що коефіцієнт рекуперації не залежить від температури зовнішнього повітря за одних і тих самих значень температури внутрішнього повітря та коефіцієнта теплопередачі, а залежить тільки від площі теплообміну рекуператора.

В результаті аналізу було відмічено таку особливість розглянутої функції, як наявність двох явно виражених ділянок зростання з різною інтенсивністю наростання. Спочатку ділянка більш інтенсивного зростання, а потім полого ділянка. При цьому коефіцієнт рекуперації можна довести за ідеальних умов до майже 100 %, однак при цьому площу теплообміну на пологій ділянці функції потрібно збільшити на порядок, що є нераціональним з практичної точки зору, оскільки на початку цієї ділянки коефіцієнт рекуперації перевищує 80 %.

Виходя з вищевикладеного, було запропоновано та реалізовано методику визначення оптимальної площі теплообміну рекуператора. Вона полягає в порівнянні площі, що обмежена функцією, яка визначає коефіцієнт рекуперації, та площі трикутника ABC, що побудований на основі цієї ж функції (див. рис. 2.13). На основі аналізу даних порівняння було обрано в якості раціонального значення площу теплообміну, що відповідає відхиленню площі трикутника ABC від площі під відповідною ділянкою на третину. В даному випадку оптимальна площа теплообміну склала 36,3 м², що відповідає коефіцієнту рекуперації 80,4 %. В свою чергу, для досягнення коефіцієнту рекуперації 98 %, площа теплообміну склала би

433 м².

Рисунок 2.12 – Блок-схема алгоритму функціонування автоматизованої технології утилізації тепла системи вентиляції за допомогою рекуператора

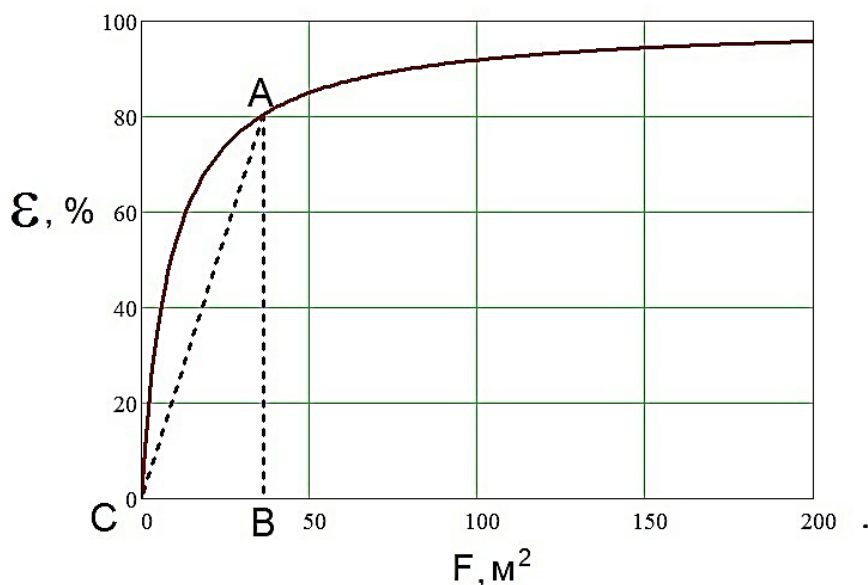


Рисунок 2.13 – Залежність коефіцієнта рекуперації від площі теплообміну пластинчатого рекуператора

Виникає необхідність пошуку оптимального значення площі теплообміну, що забезпечить компактність конструкції та достатньо високе значення коефіцієнту рекуперації. Виходячи з цього, побудовано функції кінцевих температур зовнішнього та внутрішнього повітря в рекуперації від температури зовнішнього повітря для отриманої площі теплообміну (див. рис. 2.14).

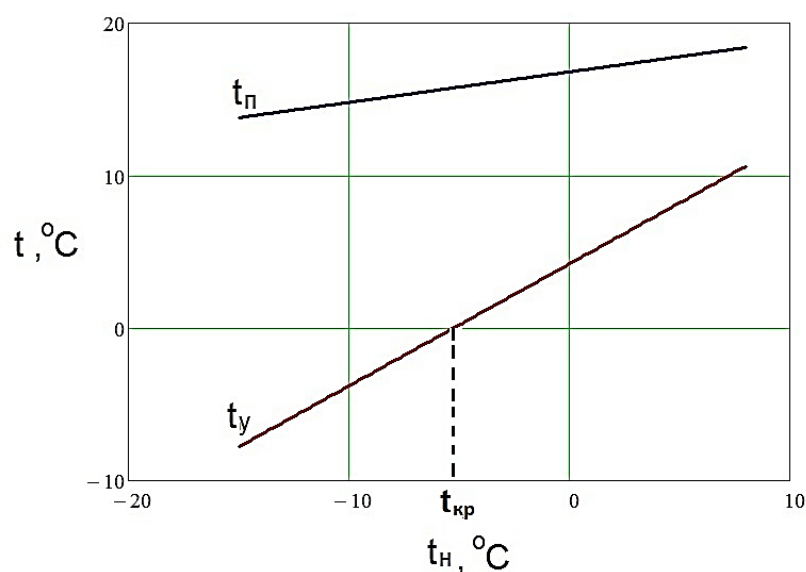


Рисунок 2.14 – Залежності кінцевих температур зовнішнього t_n та внутрішнього t_y повітря в рекуперації від температури зовнішнього повітря t_n

Проаналізувавши ці функції було встановлено, що починаючи з певної від'ємної температури зовнішнього повітря (критичної температури), кінцева температура вихідного повітря сягає нульового значення та під час подальшого зниження температури зовнішнього повітря стає також від'ємною. Виникає вагома фізико-технологічна проблема обмерзання поверхонь теплообмінника через наявність конденсату водяних парів з вихідного повітря.

У практичних випадках ця проблема може бути вирішена різними способами, а саме:

1. Перепуск зовнішнього повітря, що надходить в систему через обхідний канал повз рекуператор. При цьому рекуператор не працює за призначенням, а знаходиться в режимі розморожування. Тобто, спочатку проблема допускається, потім вирішується ціною додаткових витрат енергії системи опалення на вентиляцію під час простою рекуператора. Необхідно акцентувати увагу також на значній інерційності та складності для точного аналітичного опису процесів таяння льоду в порівнянні з іншими фазовими перетвореннями речовин.

2. Попередній нагрів зовнішнього повітря перед рекуператором, щоб уникнути критичної температури в теплообміннику. Такий підхід ускладнює конструкцію системи та режими керування нею, адже потребує додаткових витрат та джерел енергії та, відповідно, знижує ступінь рекуперації системи вентиляції.

У запропонованій в дисертаційному дослідженні схемі, застосовується двоступенева система, в якій рекуператор складається з двох секцій. Режими роботи запропонованої схеми визначаються автоматично на підставі наступного алгоритму. У випадку коли температура зовнішнього повітря вища за критичну, послідовно працюють обидві секції, що забезпечують встановлену вище оптимальну площу теплообміну, та відповідне оптимальне значення коефіцієнта рекуперації. Якщо ж температура зовнішнього повітря стає нижче критичної, то одна з секцій вимикається з процесу зменшуючи площу теплообміну рекуператора до необхідного значення.

Це значення площі теплообміну визначається з умови невід'ємності температури вихідного повітря. Критична температура зовнішнього повітря та

площа теплообміну з умови незамерзання були визначені за допомогою розробленого методу на основі сформованих функцій в залежності від коефіцієнту теплопередачі рекуператора та мінімального значення температури зовнішнього повітря.

В результаті для даного випадку було визначено критичну температуру зовнішнього повітря $t_{кр} = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ та відповідну зменшену площу теплообміну для мінімальної температури зовнішнього повітря $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, що дорівнює $12,4\text{ м}^2$. Відповідно коефіцієнт рекуперації знизився з визначеного вище оптимального значення $80,4\text{ \%}$ до $58,3\text{ \%}$. При цьому отримано безперервно працюючу систему рекуперації повітря з гарантією відсутності обмерзань теплообмінних поверхонь та відсутності ускладнень у конструкції та засобах автоматизованого керування. Отримане в такому режимі зменшення теплоти рекуперації компенсується автоматизованим регулюванням потужності системи опалення будівлі. Крім того, в крайні роки в Україні температура повітря рідко опускається нижче позначки $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ і морози тривають незначний період часу. Отже, більшу частину часу система буде працювати на повну теплову потужність. На рисунку 2.15 представлені функції кінцевих температур зовнішнього та внутрішнього повітря в двоступеневому рекуператорі від температури зовнішнього повітря.

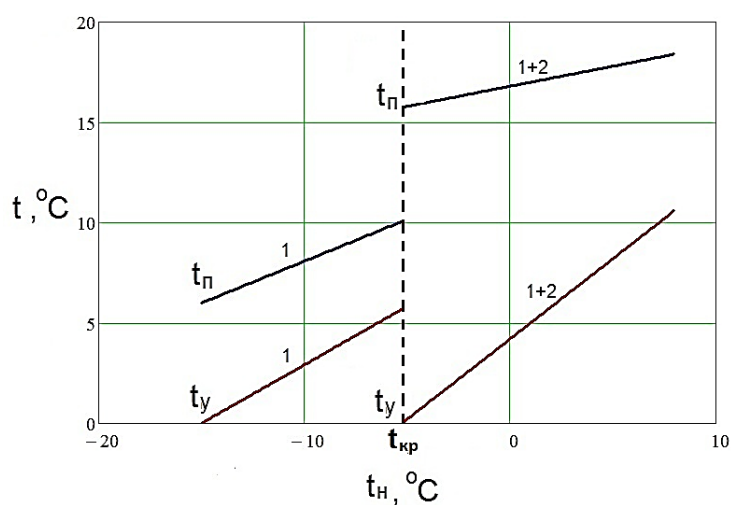


Рисунок 2.15 – Залежності кінцевих температур зовнішнього t_n та внутрішнього t_y повітря в двоступеневому рекуператорі від температури зовнішнього повітря t_n для одного ступеня (1) та послідовно працюючих двох ступенів (1+2)

Також зображено залежності теплового навантаження вентиляції та теплоти рекуперації для одноступеневого та двоступеневого режимів роботи рекуператора від температури зовнішнього повітря (див. рис. 2.16).

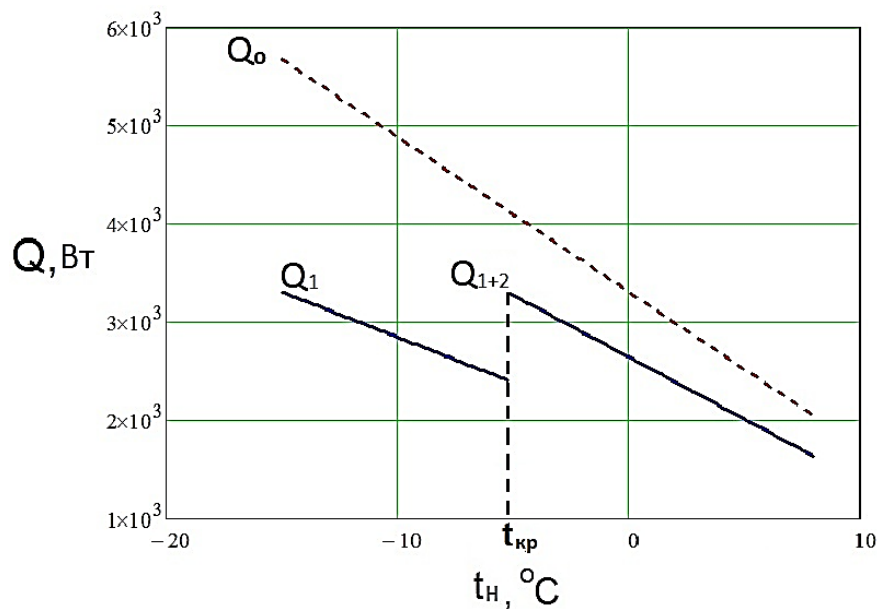


Рисунок 2.16 – Залежності теплового навантаження вентиляції Q_0 , теплоти рекуперації одного ступеня Q_1 та теплоти рекуперації послідовно працюючих двох ступенів Q_{1+2} від температури зовнішнього повітря t_n

Ці функціональні залежності (див. рис. 2.15 і 2.16) покладено в основу розроблюваних комп'ютерних моделей досліджуваної системи автоматизації теплонасосних систем, що висвітлені в наступних розділах дисертації.

2.1.3 Розрахунок параметрів структурно-функціонального забезпечення засобів комп'ютерно-інтегрованого керування нетрадиційними технологіями опалення та кондиціонування

На теперішній час значно актуалізується питання забезпечення енергоефективності систем опалення та кондиціонування. Близько третини від загальносвітового використання паливно-енергетичних ресурсів реалізується на потреби опалення будівель. В умовах глобальної енергетичної кризи з високими

цінами на газ проблему переходу до енергоефективних нетрадиційних способів і технологій опалення необхідно вважати дуже актуальною. Додатково значна кількість енергоресурсів витрачається на потреби гарячого водопостачання, вентиляцію та кондиціонування повітря в спорудах і будівлях. Виходячи з цього, найбільш перспективними системами і технологіями опалення, з точки зору енергоефективності, є системи на основі теплових насосів. При цьому, обсяги енергії, що надходять до кінцевих споживачів від зовнішніх низько потенційних джерел (водойми, ґрунт, повітря), перевищує показники енергії, що витрачаються на привід теплового насосу від 3 до 5 разів. Це відношення характеризує коефіцієнт трансформації енергії теплових насосів. Для підвищення цього коефіцієнту трансформації необхідно зменшувати різницю температур між конденсатором та випаровувачем теплового насосу [69–79].

У системах опалення та гарячого водопостачання спостерігається фіксоване (порогове) значення температури на конденсаторі, нижче якого не можна опуститися через необхідне теплове навантаження. Отже, альтернативним підходом до підвищення енергоефективності є збільшення температури випаровування за допомогою використання різних технічних засобів, таких як тепловий акумулятор.

Варто зазначити, що проаналізовані вище енергоефективні технології потребують введення до загальної технологічної схеми додаткового обладнання, а об'єм отримуваної гарячої води за добу не може бути раціонально використаним повністю, що зменшує адаптивність і ефективність усієї системи. Саме тому, було запропоновано нову нетрадиційну технологію, що використовує теплонасосне обладнання системи опалення, що використовує в якості робочої рідини воду, для режиму охолодження повітря в теплий період та скидання теплоти, що відводиться в ґрунт, зі залученням засобів комп'ютерно-інтегрованого контролю та автоматизованого керування режимами функціонування відповідного обладнання. Для цілей постачання гарячої води запропоновано застосовувати додатковий тепловий насос типу «повітря-рідина», що працює на водонагрів. Цей підхід має зменшити витрати енергетичних ресурсів, виключити необхідність у накопиченні

надлишкових запасів гарячої води та усунути техніко-технологічні складнощі в автоматизованому регулюванні системою. Варто зазначити факт того, що значної актуальності набуло застосування таких технологій у регіонах і країнах з підвищеним температурним режимом у теплу пору року.

У наукових джерелах [80–82] наведені основні засади, на яких базується розрахунок параметрів засобів автоматизації систем опалення, що використані в цій дисертаційній роботі, а також побудова математичних моделей теплових насосів, які використовуються в системах опалення, кондиціонування та гарячого водопостачання.

До уваги були прийняті роботи [83, 84], в яких розглянуто основні аспекти математичного моделювання теплових процесів у будівлях і спорудах. У процесі побудови математичної моделі системи радіаторного опалення була також врахована робота [85]. Системи регулювання були розглянуті раніше авторами дослідження [86]. Математичний апарат, що використовується для опису термодинамічних процесів в зазначених теплотехнічних системах, більш детально розглянуто та описано в наукових працях [87–89].

Для автоматизованого керування роботою теплового насосу як елементу систем опалення, кондиціонування й гарячого водопостачання розглядаються два режими керування: інверторний та циклічний. У випадку широкого впровадження інверторного обладнання для цілей керування електричним приводом теплового насосу, виникає висока вірогідність негативного впливу вищих гармонік, що генеруються напівпровідниковими перетворювачами, на якість електричної енергії, а також на загальну надійність системи електропостачання [79, 90]. Використовуючи методику з роботи [90] було обґрунтовано можливість збереження в допустимих нормах відхилення показників якості електричної енергії у випадку застосування методів інверторного керування, яке є більш ефективним з точки зору енергозбереження, в порівнянні з циклічним підходом.

Було також проведено дослідження технології використання ґрунтового теплового насосу у водяній системі опалення будівлі для цілей адаптивного кондиціонування будівлель. В цьому випадку тепловий насос повинен

функціонувати на охолодження будівлі, відводячи тепло до ґрунту (див. рис. 2.17), що дозволяє знизити температуру конденсації холодоагенту з $46\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ за умови використання схеми з тепловим акумулятором. Це обґрунтовується фізико-хімічними властивостями ґрунтів зберігати на глибині 2 м стабільну температуру порядку $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом року.

Аналізований тепловий насос являє собою парокompресорну установку, що функціонує у відповідності до основного холодильного циклу. Характеристики теплонасосних установок були визначені на підставі розробленої вище автором методики встановлення функціональних залежностей параметрів циклів охолодження від поточної температури конденсації за заданих температур випаровування на основі даних p, i – діаграми обраного виду холодоагенту.

В якості об'єкту комп'ютерно-інтегрованого контролю з метою виконання умов єдності та уніфікації досліджень дисертаційної роботи було використано ту саму типову одноповерхову будівлю, що і в пп. 2.1.1, 2.1.2, із об'ємом 450 м^3 та житловою площею 180 м^2 , як показано на рисунку 2.17.

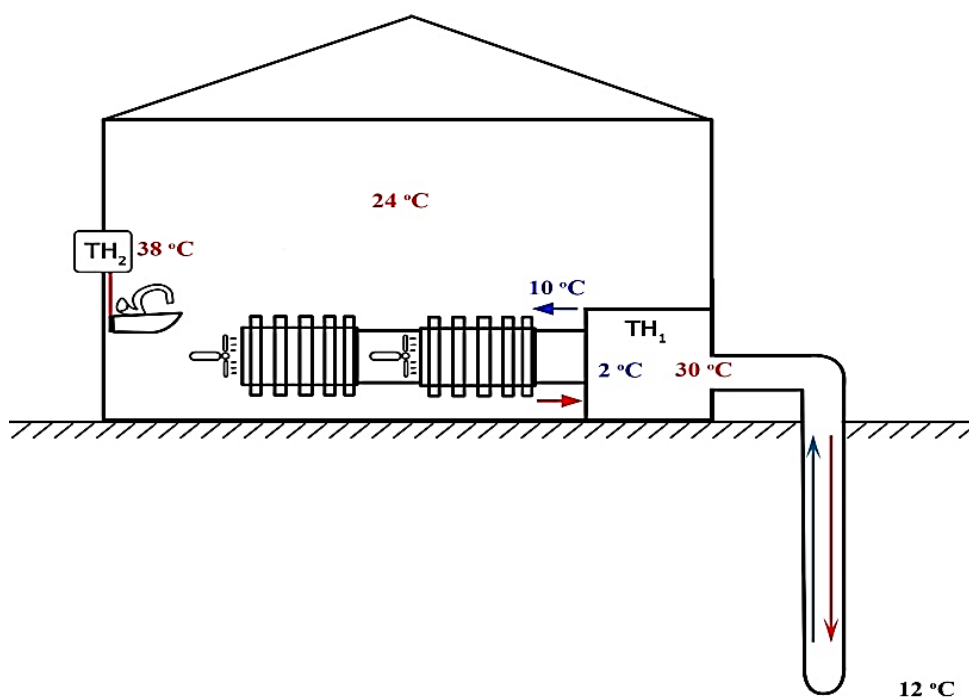


Рисунок 2.17 – Узагальнена схема комплексної системи ТН і ГВС будівлі

Технологія розрахунку параметрів повітряного та ґрунтового ТН для потреб ГВС та кондиціонування будівель включає наступний алгоритм дій [91]:

1. Введення теплофізичних і геометричних параметрів будівель, завдання температур внутрішнього та зовнішнього повітря, а також температури охолодження повітря, фізико-хімічних характеристик повітря, холодоагенту та води, технічних показників теплових насосів, початкових та кінцевих значень температури води в системі за умови різних режимів функціонування та автоматизованого регулювання.

2. Визначення функцій динаміки параметрів і характеристик холодильного циклу від температури конденсації холодоагенту за умови постійної температури випаровування, що необхідна під час моделювання режимів роботи теплових насосів.

3. Встановлення функціональних залежностей теплових навантажень під час опалення та охолодження будівлі як функцій температури зовнішнього повітря.

4. Розрахунок параметрів і порівняльний аналіз теплообмінних поверхонь батарей для режимів кондиціонування та опалення будівель.

5. Формування функціональних залежностей внутрішньої температури повітря і кінцевої температури води, що циркулює в зворотньому трубопроводі, від температури повітря навколишнього середовища та витрати води в системі, відповідно.

6. Аналіз отриманих функціональних залежностей і визначення необхідних параметрів площі поверхонь теплообміну та швидкості їх обдуву, коефіцієнту ребрення радіаторів, необхідної витрати води в системі, що одночасно задовольняє умовам теплових навантажень під час опалення й кондиціонування.

7. Формування вимог до засобів автоматизованого керування витратою води в системі від температури повітря навколишнього середовища за умови підтримання постійної температури внутрішнього повітря на рівні 24 °С.

8. Визначення кількісних оцінок енергетичних характеристик теплонасосної системи гарячого водопостачання типу «повітря-вода».

9. Визначення оптимальних енергетичних характеристик комплексної

системи ґрунтового типу під час теплонасосного кондиціонування та повітряного типу під час теплонасосного гарячого водопостачання будівлі.

Для запропонованої технології на основі p,i – діаграми обраного холодоагенту (фреон–11) було визначено функції зміни параметрів і характеристик холодильного циклу від температури конденсації холодоагенту за температури його випаровування рівній $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для запобігання обмерзання поверхонь випаровувача).

Деталізація застосованого обчислювального процесу є наступною. На першому етапі визначаються теплові навантаження в режимах опалення та кондиціонування будівлі в залежності від температури повітря навколишнього середовища. Для цього мють бути враховані теплофізичні характеристики матеріалів та конструкції будівлі, а також температурні умови динаміки повітря внутрішнього та зовнішнього середовища [91].

Далі виконуються розрахунки площі поверхонь теплообміну засобів опалення та витрати води в системі. В цьому дослідженні для максимального теплового навантаження системи опалення будівлі були прийняті температури в прямому та зворотньому трубопроводах $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, відповідно, а температура води в прямому трубопроводі в режимі охолодження прийнята рівною $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. В якості оптимального значення температури внутрішнього повітря під час холодного періоду року була прийнята температура рівною $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для теплого періоду року – $24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Мінімальна температура повітря навколишнього середовища в холодний період прийнята рівною $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а максимальна в теплий період – $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ [91].

На підставі проведених розрахунків встановлено, що для функціонування вихідної системи опалення в режимі охолодження в оптимальному (максимальному) режимі, необхідно збільшити мінімум у два рази площу теплообміну засобів опалення, а також вдвічі збільшити показник витрати води в системі. З точки зору експлуатаційних характеристики такі дії є нераціональними. Крім того, постійне збільшення витрати води в системі в два рази призведе до значного збільшення споживаної потужності електричного приводу насоса (у вісім

разів) [91].

Таким чином, було прийнято рішення щодо застосування оребрених теплообмінних поверхонь, а також під час функціонування в режимі кондиціонування здійснювати неперервний поперечний обдув поверхонь засобів кондиціонування для підвищення коефіцієнту тепловіддачі від повітря та відповідно коефіцієнта теплопередачі теплотехнічних засобів [91].

З метою визначення оптимальних значень показника коефіцієнту оребрення та швидкості обдуву поверхонь теплообмінних приладів було сформовано функціональні залежності внутрішньої температури повітря від температури повітря навколишнього середовища, а також залежності кінцевої температури води в зворотньому трубопроводі від витрати води в системі, що функціонує в режимі кондиціонування. Ці функціональні залежності були отримані на підставі сумісного рішення системи рівнянь теплового балансу та теплопередачі для теплообмінних засобів, а також використані під час створення і тестування програмного забезпечення автоматизованої технології, які висвітлено в наступних розділах дисертації [91].

У результаті дослідження цих функціональних залежностей щодо обґрунтування значень швидкості обдуву теплообмінних поверхонь та коефіцієнту оребрення, за яких виконуються умови збереження та підтримання заданої температури повітря в будівлі рівною 24 °С. У результаті було встановлено, що швидкість обдуву має дорівнювати 2,5 м/с, а коефіцієнт оребрення – 9. При цьому в єдиному комплексі було виконано розрахунки рівняння теплового балансу та теплопередачі для опалювального режиму роботи системи з метою визначення витрати води та єдиної площі теплообміну в контурі $G=0,133$ кг/с, що являють собою вихідні дані для проектування автоматизованої технології керування теплонасосними системами. Таку витрату води було взято як базову для обох режимів функціонування: опалення та кондиціонування [92, 93].

У відповідності до режиму навантаження в процесі охолодження будівлі визначено функціональні залежності температури води, що циркулює в зворотньому трубопроводі, а також температури охолодженого повітря від

температури повітря навколишнього середовища за умови постійного значення витрати води в теплотехнічній системі та постійної температури води в прямому трубопроводі, що є рівною $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (див. рис. 2.18) [91].

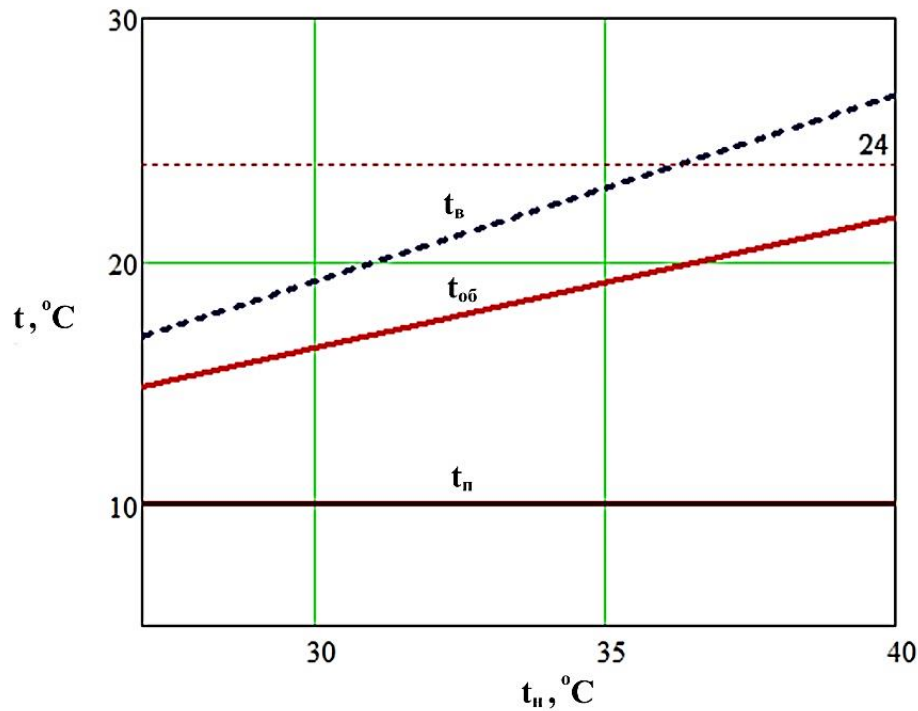


Рисунок 2.18 – Залежності температури води в зворотньому трубопроводі $t_{об}$ та температури охолодженого повітря $t_{в}$ від температури повітря навколишнього середовища $t_{н}$ при постійній температурі води в прямому трубопроводі $t_{п}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Проаналізувавши отримані залежності зроблено висновок, що температура охолодженого повітря значно змінюється під впливом температури повітря навколишнього середовища в діапазоні від $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $27\text{ }^{\circ}\text{C}$. В той самий час, як комфортна температура внутрішнього повітря будівлі для теплого періоду прийнята рівною $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, а отже умова виконується тільки за температури повітря навколишнього середовища $t_{о}=36\text{ }^{\circ}\text{C}$ [91]. Варто зазначити, що зазначені відхилення температури внутрішнього повітря будівлі є небажаними з точки зору негативного впливу на організм людини.

Виходячи з цього, було прийнято рішення щодо здійснення автоматизованого регулювання температури внутрішнього повітря будівлі шляхом

автоматизованого регулювання показника витрати води в системі з метою підтримання температури повітря в будівлі рівною $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ за будь-якої температури повітря навколишнього середовища.

На основі визначеної функціональної залежності температури внутрішнього повітря будівлі від температури повітря навколишнього середовища з урахування показника витрати води в системі була обґрунтована функціональна залежність процесу автоматизованого керування масовою витратою води в системі від температури повітря навколишнього середовища за умови підтримання постійною задану температуру внутрішнього повітря на комфортному рівні (див. рис. 2.19). Ця функціональна залежність являє собою алгоритмічну основу методу комп'ютерно-інтегрованого керування системою кондиціонування будівель [91].

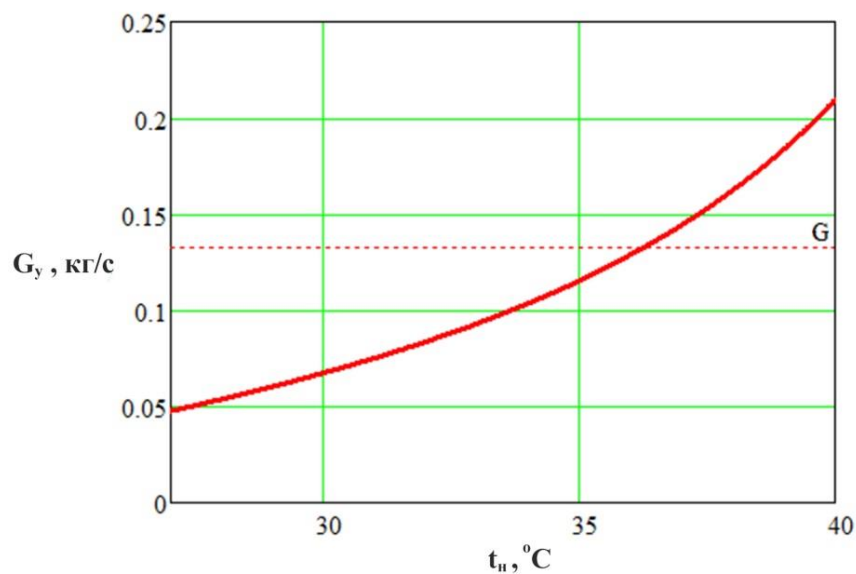


Рисунок 2.19 – Функціональна залежність керування витратою води G_y у системі від температури повітря навколишнього середовища

В результаті аналізу залежності витрати води в системі було встановлено нові залежності температури охолодженого повітря та температури води в зворотньому трубопроводі від температури повітря навколишнього середовища за постійної температури води в прямому трубопроводі на рівні $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (див. рис. 2.20) [91].

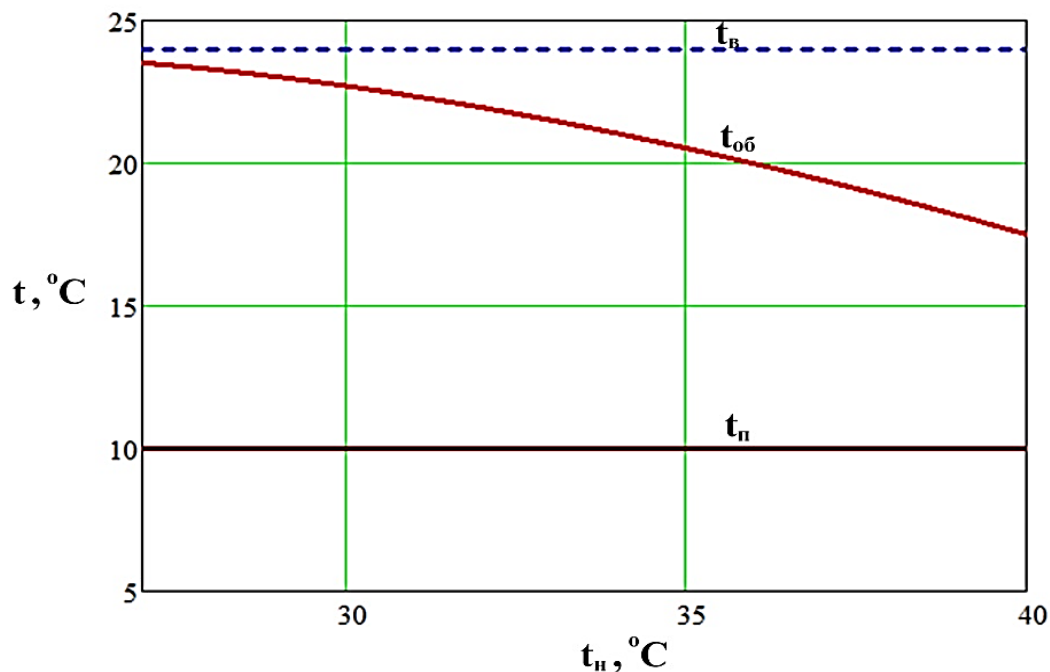


Рисунок 2.20 – Залежність температури охолодженого повітря t_b та температури води в зворотньому трубопроводі $t_{об}$ від температури повітря навколишнього середовища t_n при впровадженні керуючої залежності

Таким чином, на підставі отриманої функціональної залежності керування витратою води в теплотехнічній системі забезпечено виконання умови підтримання постійною комфортну температуру внутрішнього повітря за мінливих температур повітря навколишнього середовища. В якості недоліку цього методу можна зазначити, що спостерігається перевищення значення витрати води в системі відносно базового значення для системи опалення в межах високих температур повітря навколишнього середовища (вище $36\text{ }^{\circ}\text{C}$), що продемонстровано на рисунку 2.21. Проте, ця область є значно меншою за область задіяних температур повітря навколишнього середовища, що з запасом компенсує можливе перевищення витрат енергії в зоні високих температур в порівнянні з базовою реалізацією такої теплонасосної системи [91, 94–98].

Для потреб гарячого водопостачання запропоновано застосовувати в загальній технологічній схемі замість теплового акумулятора тепловий насос типу «повітря-рідина», який буде використовувати тепло від повітря навколишнього

середовища та працювати в режимі підвищення ефективності: з температурою випаровування холодоагенту (фреон–11) рівною 20 °С для діапазону температур повітря навколишнього середовища від 27 °С до 37 °С та з температурою випаровування рівною 30 °С для діапазону температур повітря навколишнього середовища вище 37 °С. Це дозволить підвищити коефіцієнт перетворення енергії теплового насосу від 1,5 до 2 разів (до значень на рівні від 14 до 22) у порівнянні з інтеграційною схемою на базі кондиціонера та теплового акумулятора.

Метод автоматизованого керування для системи гарячого водопостачання розроблявся за наступних умов: 7 осіб проживає в будівлі, 70 літрів гарячої води на кожну людину на добу, температура води рівна 38 °С, початкова температура для нагріву дорівнює 15 °С, питомі витрати гарячої води дорівнюють 5 літрів на хвилину, тепла потужність системи – 8 кВт, електрична потужність приводу теплового насосу – 760 Вт в першому режимі та 470 Вт в другому режимі [91].

На наступному етапі було проведено порівняння витрат умовного палива між старою системою (кондиціонер і тепловий акумулятор) та новою системою (з двома окремими тепловими насосами для режимів кондиціонування та гарячого водопостачання будівлі в залежності від температури повітря навколишнього середовища). Під час досліджень було враховано витрати енергії на приводи теплових насосів систем гарячого водопостачання та водного охолодження, а також циркуляційного водного насосу системи кондиціонування та опалення будівлі (див. рис. 2.19). При цьому розглядався варіант з регульованою витратою води в системі відповідно зі запропонованою функціональною залежністю автоматизованого керування теплонасосною системою [91].

Аналізуючи отримані кількісні оцінки економії умовного палива, можна зробити висновок щодо вагомої переваги нової нетрадиційної схеми застосування системи гарячого водопостачання та кондиціонування будівлі в теплий період року, яка оснащена засобами автоматизації на основі запропонованих автором дисертації комп'ютерно-інтегрованих методів керування, порівняно з дослідженою раніше системою з тепловим акумулятором [91]. Варто акцентувати увагу на досягненні максимуму економії (на рівні 18 %), що припадає на область найбільш

розповсюдженого температурного діапазону повітря влітку. При цьому рівень витрати води в системі є наближеним до постійного рівня витрат води в опалювальному режимі, а також є меншим. Однак, навіть за мінімального рівня економії, що дорівнює 13,5 %, запропонований підхід також має відчутне значення.

Завдяки застосуванню теплового насосу типу «повітря-вода», який функціонує в автоматизованому режимі, що характеризується більш високими температурами випаровування (дорівнюють 20 °C та 30 °C) та відповідно коефіцієнтами перетворення енергії в порівнянні із кондиціонером, було оцінено показники економії умовного палива окремо для системи гарячого водопостачання – від 35 % до 60 %. Оцінку виконано без урахування того, що об'єм теплового акумулятора в старій схемі в два рази перевищував потреби в гарячій воді. Отже, в новому методі побудови автоматизованої технології відсутня необхідність у процедурі нагріву значних надлишкових обсягів води, що призводить до додаткової економії матеріальних і енергетичних ресурсів.

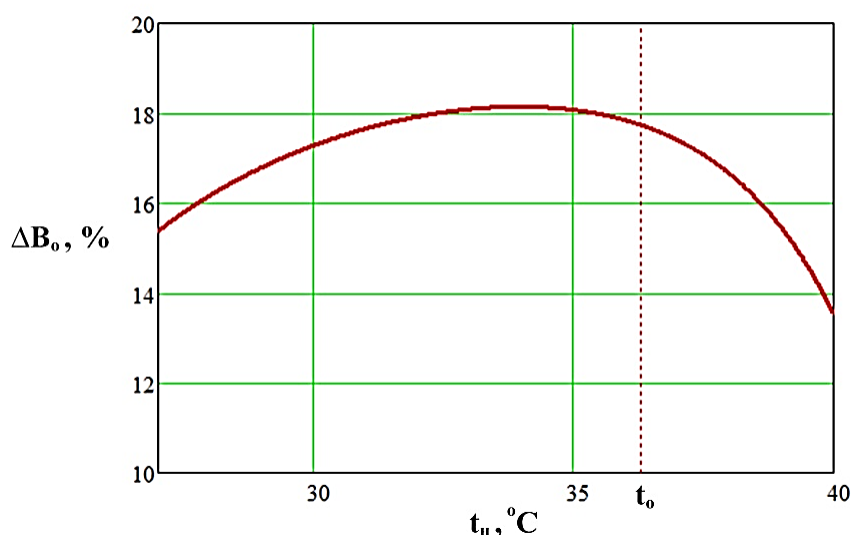


Рисунок 2.21 – Залежність показника економії умовного палива в новій схемі гарячого водопостачання та кондиціонування

В свою чергу, в холодний період року, тепловий насос типу «повітря-рідина» може бути автоматично переналаштованим на режим утилізації тепла, що надходить через систему вентиляції, для зменшення навантаження на систему

гарячого водопостачання шляхом попереднього охолодження води до температур в діапазоні від 5 °С до 11 °С. При цьому для системи гарячого водопостачання спостерігається економія теплової енергії на рівні 18 % та, як наслідок, – значна економія палива.

Таким чином, використання розробленого підходу до обґрунтування та розрахунку параметрів засобів, що реалізують запропонований вище комп'ютерно-інтегрований метод керування нетрадиційними технологіями опалення та кондиціонування, дозволить підвищити енергоефективність систем кондиціонування й гарячого водопостачання будівлі в теплий період.

2.1.4 Обґрунтування вимог до енергетичних характеристик теплових насосів як об'єктів автоматизованого керування під час утилізації тепла

Розрахунок параметрів та обґрунтування вимог до енергетичних характеристик теплових насосів як об'єктів комп'ютерно-інтегрованого керування під час утилізації тепла виконано на підставі наступного алгоритму:

1. Вибір холодоагенту.

2. Формування та введення функцій розподілу значень ентальпій холодоагенту від температури конденсації для чотирьох базових точок холодильного циклу у відповідності до кожної заданої температури випаровування (на основі p, i – діаграми обраного холодоагенту, як показано на рисунку 2.22) [99–104].

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

4. Вибір режиму роботи теплового насоса: кондиціонування або опалення.

- 4.1. Для режиму кондиціонування: формування функціональних залежностей енергетичних параметрів ТН (масова витрата холодоагенту, потужність привода компресора ТН, теплова потужність конденсатора та холодильний коефіцієнт) від

навантаження охолодження та температури конденсації для заданих температур випаровування холодоагенту.

4.2. Для режиму опалення: формування функціональних залежностей енергетичних параметрів ТН (масова витрата холодоагенту, потужність привода компресора ТН, холодильна потужність випаровувача, коефіцієнт перетворення енергії) від навантаження опалення та температури конденсації для заданих температур випаровування холодоагенту.

5. У відповідності до заданих параметрів холодоагенту, режиму роботи ТН, навантаження опалення або охолодження, температури конденсації й температури випаровування холодоагенту за допомогою сформованих функцій визначаються енергетичні параметри ТН, що використовуються в подальших розрахунках енергоустановок [105–109].

Рохрахунок енергетичних характеристик для кожного пункту запропонованого алгоритму виконується на підставі відомих функціональних залежностей [110]. На першому етапі формування та введення функцій значення ентальпій холодоагенту від температури конденсації для чотирьох базових точок холодильного циклу за кожною заданою температурою випаровування здійснюється на основі базового холодильного циклу (див. рис. 2.22).

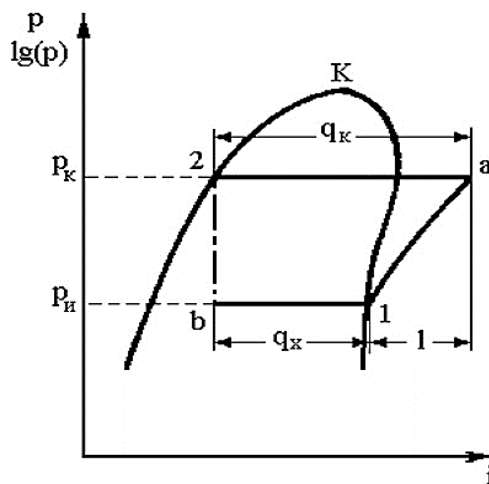


Рисунок 2.22 – Базовий холодильний цикл теплового насоса від температури конденсації t_k [110]

Для будь-якої температури випаровування [110]:

$$i_2(t_k) = i_b(t_k) = 200,285 + 0,797 \cdot t_k + 0,000917 \cdot t_k^2, \text{ кДж/кг} \quad (2.1)$$

Для температури випаровування 4 °С [110]:

$$i_{a_4}(t_k) = 0,572 \cdot (t_k - 4) + 390, \text{ кДж/кг} \quad (2.2)$$

$$i_{1_4}(t_k) = 390, \text{ кДж/кг} \quad (2.3)$$

Аналогічні розрахунки виконуються для температур випаровування 15 °С та 30 °С.

Наступним етапом є формування функцій питомих характеристик холодильного циклу. Для температури випаровування 4 °С розрахунки є наступними.

Питома холодопродуктивність [110]:

$$q_{x4}(t_k) = i_{1_4}(t_k) - i_b(t_k), \text{ кДж/кг} \quad (2.4)$$

Питоме навантаження конденсатора [110]:

$$q_{k4}(t_k) = i_{a_4}(t_k) - i_b(t_k), \text{ кДж/кг} \quad (2.5)$$

Питома теоретична робота компресора [110]:

$$l_{k4}(t_k) = i_{a_4}(t_k) - i_{1_4}(t_k), \text{ кДж/кг} \quad (2.6)$$

Аналогічні розрахунки виконуються для температур випаровування 15 °С та 30 °С.

Для режиму опалення використані функціональні залежності є такими. Для температури випаровування 4°C.

Масова витрата холодоагента в контурі [110]:

$$M_{k4}(Q_k, t_k) = \frac{Q_k}{1000 \cdot q_{k4}(t_k)}, \text{ кг/с} \quad (2.7)$$

де Q_k – теплова потужність конденсатора, що дорівнює потужності системи опалення, Вт.

Холодильна потужність випарувача [110]:

$$Q_{x4}(Q_k, t_k) = 1000 \cdot q_{x4}(t_k) \cdot M_{k4}(Q_k, t_k), \text{ Вт} \quad (2.8)$$

Потужність, що споживається компресором [110]:

$$N_{k4}(Q_k, t_k) = \frac{1000 \cdot l_{k4}(t_k) \cdot M_{k4}(Q_k, t_k)}{\eta_a \cdot \eta_m}, \quad (2.9)$$

де η_a – адіабатний к.к.д. компресора, η_m – механічний к.к.д. компресора.

Витрата умовного палива на привод компресора [110]:

$$B_{k4}(Q_k, t_k) = \frac{N_{k4}(Q_k, t_k) \cdot b_t}{\eta_e \cdot 3600000}, \text{ кг/с} \quad (2.10)$$

де η_e – к.к.д. електропривода компресора, $b_t = 0,31$ кг у.п./кВт·год – коефіцієнт перерахунку фізичних параметрів.

Витрата умовного палива в котлі [110]:

$$B_{KA}(Q_k) = \frac{Q_k}{29300000 \cdot \eta_k}, \text{ кг/с} \quad (2.11)$$

де η_k – к.к.д. котла.

Коефіцієнт перетворення енергії:

$$\Psi_{k4}(t_k) = \frac{q_{k4}(t_k) \cdot \eta_a \cdot \eta_m}{l_{k4}(t_k)}. \quad (2.12)$$

Аналогічні розрахунки виконуються для температур випаровування 15 °С та 30 °С.

Для режиму охолодження математичні розрахунки є наступними. Для температури випаровування 4 °С встановлено наступні чисельні параметри досліджуваного процесу.

Масова витрата холодоагента в контурі [110]:

$$M_{x4}(Q_x, t_k) = \frac{Q_x}{1000 \cdot q_{x4}(t_k)}, \quad (2.13)$$

де Q_x – холодильна потужність випарувача, яка дорівнює потужності системи охолодження, Вт.

Теплова потужність конденсатора [110]:

$$Q_{k4}(Q_x, t_k) = 1000 \cdot q_{k4}(t_k) \cdot M_{x4}(Q_x, t_k), \text{ Вт} \quad (2.14)$$

Потужність, що споживається компресором [110]:

$$N_{k4}(Q_x, t_k) = \frac{1000 \cdot l_{k4}(t_k) \cdot M_{x4}(Q_x, t_k)}{\eta_a \cdot \eta_m}, \text{ Вт} \quad (2.15)$$

де η_a – адіабатний к.к.д. компресора, η_m – механічний к.к.д. компресора.

Витрата умовного палива на привід компресора [110]:

$$B_{k4}(Q_x, t_k) = \frac{N_{k4}(Q_x, t_k) \cdot b_t}{\eta_e \cdot 3600000}, \quad (2.16)$$

де η_e – к.к.д. електропривода компресора, $b_t=0,31$ кг у.п./кВт·год – коефіцієнт перерахунку фізичних параметрів.

Холодильний коефіцієнт:

$$\varepsilon_{x4}(t_k) = \frac{q_{x4}(t_k) \cdot \eta_a \cdot \eta_m}{l_{k4}(t_k)}. \quad (2.17)$$

Аналогічні розрахунки виконуються для температур випаровування за прийнятих температур 15 °С та 30 °С.

Таким чином, проведені вище розрахунки за формулами (2.1)–(2.17) дозволили обґрунтувати вимоги до енергетичних характеристик теплових насосів як об'єктів комп'ютерно-інтегрованого керування під час утилізації тепла.

2.2 Структурно-функціональне забезпечення методу підвищення енергоефективності конденсаційних електростанцій

На теперішній час все більшого застосування під час утилізації теплових викидів в енергосистемах отримує теплонасосне обладнання. Принцип дії теплових насосів у зазначеному режимі функціонування полягає у відборі теплової енергії у різних низькопотенційних (низькотемпературних) джерел енергії з подальшою її трансформацією у високотемпературну теплову енергію для наступного передавання кінцевому споживачеві [107, 111–114]. При цьому треба врахувати, що витрачається енергія на привід компресору теплового насосу.

В якості перспективного низькопотенційного джерела теплової енергії на КЕС у цьому дисертаційному дослідженні пропонується використовувати воду системи охолодження, що виходить з конденсатора конденсаційної турбіни. Під час такого процесу температура води досягає 23 °С та вище. Теплову енергію можна використати за допомогою ТН з автоматизованих керуванням для підігріву води в системі ГВП побутових споживачів [115–118].

В якості аналізованого об'єкту автоматизованого керування та подальшого обґрунтування енергетичної ефективності застосування теплонасосного обладнання було обрано Криворізьку КЕС з конденсаційною паровою турбіною типу К-300-240 ХТГЗ з наступними параметрами: потужність – 300 МВт, тиск пари – 24 МПа, температура пари – 545 °С, тиск у конденсаторі – 4 кПа, температура в конденсаторі – 29 °С, витрата пари в контурі – 183 кг/с. В рамках дослідження до теплової схеми КЕС інтегровано тепловий насос, який використовує теплоту, що відводиться в конденсаторі, для системи ГВП, як показано на рисунку 2.23.

Цей ТН повинен використовувати теплову енергію, що відводиться з конденсатора, для потреб гарячого водопостачання, яке являє собою постійне теплове навантаження, що не залежить від сезону. Підігрів води здійснюється до температури 65 °С, що є достатнім для системи ГВП, але є замалим для системи опалення.

Таким чином, мінімізуємо різницю температур між випаровувачем та конденсатором та досягаємо високого значення коефіцієнту перетворення енергії теплового насосу.

Вихідні дані для рішення цієї задачі є наступними:

- тепловий насос працює на холодоагенті фреон–11;
- модель побудована на холодильному циклі для даного типу холодоагенту в p, i – координатах;
- регулювання теплової потужності здійснюється шляхом зміни витрати холодоагенту через компресор теплового насосу.

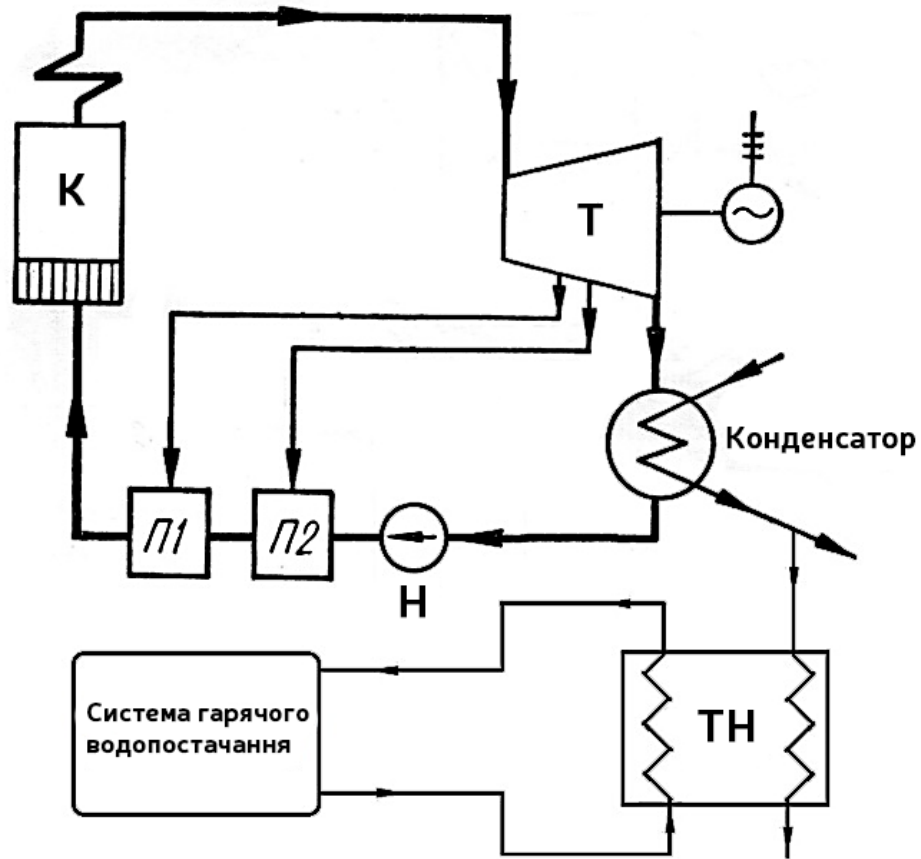


Рисунок 2.23 – Схема застосування теплового насоса на КЕС (П1, П2 – підігрівачи води живлення перед котлом; Н – насос живлення)

На підставі розробленої в цьому дисертаційному дослідженні комплексної методики аналізу було визначено раціональний режим роботи для спільної системи, в яку інтегровано КЕС і ТН, при якому було досягнуто значення коефіцієнту використання теплоти, який відповідає рівню теплоелектроцентралей [119]. При цьому коефіцієнт використання теплоти для аналізованої теплової схеми являє собою відношення суми корисної електричної та теплової потужностей паросилової установки до витрат теплової енергії на привід парової турбіни та компресор теплового насосу.

Характеристики теплового насосу визначались на основі базового холодильного циклу, зображеного на рисунку 2.24.

Всі зображені процеси було описано у вигляді функцій від температури конденсації на основі p,i – діаграми фреона-11. Температура випаровування

прийнята постійно рівною 20 °С.

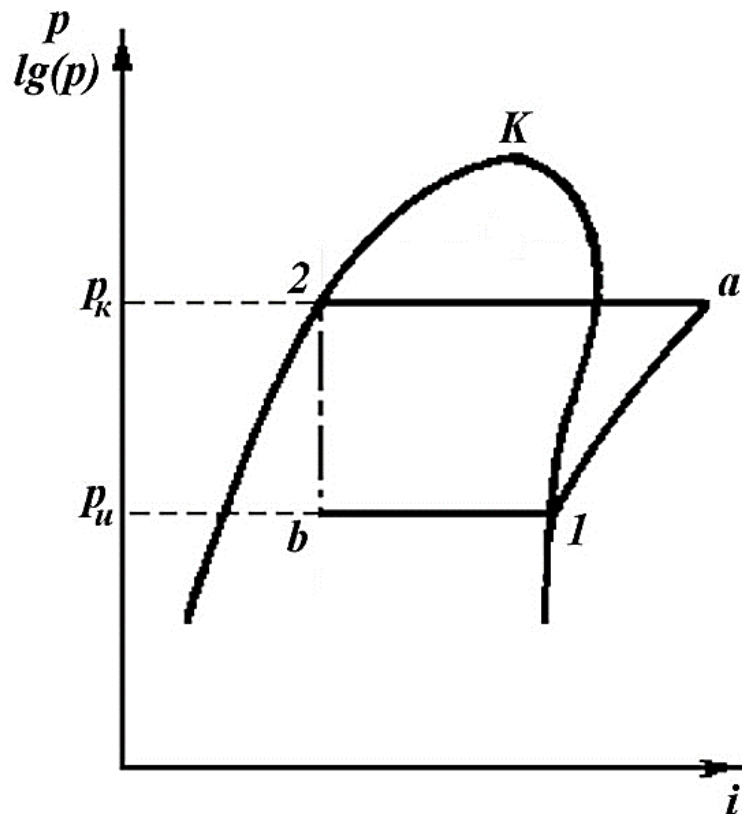


Рисунок 2.24 – Холодильний цикл теплового насосу (p – тиск; i – питома ентальпія; p_k – тиск холодоагента в конденсаторі теплового насосу; p_u – тиск холодоагента у випарнику теплового насосу) [110]

Використовуючи розроблену технологію утилізації теплоти, яка реалізується зі залученням засобів комп'ютерно-інтегрованої техніки в автоматизованому режимі, було проаналізовано та визначено, що запропонована схема інтеграції КЕС і ТН дозволяє досягти значень коефіцієнта використання теплоти, рівного 78 % при к.к.д. базового циклу на рівні 41 %, що відповідає значенням цих коефіцієнтів для типових ТЕЦ та КЕС одночасно [119]. При цьому генерація теплової енергії не впливає на якісні і кількісні показники виробництва електроенергії. Це дозволяє обґрунтувати доцільність використання ТН з інтегрованими засобами автоматизації виробничого процесу для цілей теплофікайного режиму роботи КЕС.

2.3 Структурно-функціональне забезпечення методу підвищення енергоефективності гідроелектростанцій

У сьогоденних умовах в енергетичній системі України спостерігаються суттєві проблеми зі значним дефіцитом усіх видів енергії, не тільки електричної але й теплової. Особливо критичним це є в холодну пору року. Для подолання цієї проблеми необхідно відновлювати зруйновані потужності генерації та мережі, але це потребує значних капітальних витрат, що є практично неможливим у теперішній час.

Саме тому, слід використовувати різноманітні технічні вдосконалення та нетрадиційні заходи щодо існуючого енергетичного обладнання з метою підвищення варіативності та адаптивності використання існуючих генеруючих потужностей та можливостей ефективної трансформації теплової енергії в електричну й навпаки, в тому числі, зі залученням методів і засобів комп'ютерно-інтегрованих технологій автоматизованого керування технологічними процесами.

Зараз генерування електричної та теплової енергії реалізується переважно окремо, відповідно, на атомних і теплових станціях та у котельнях.

На сучасному технологічному рівні теплові електростанції (ТЕС) мають відносно незначний коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) – максимальне значення знаходиться на рівні 42 % і переважна кількість теплової енергії викидається в навколишнє середовище, що є абсолютно нераціональним і неефективним підходом. Тому, для підвищення ступеня цільового використання теплової енергії впроваджуються теплоелектроцентралі (ТЕЦ). На ТЕЦ здійснюється сукупне генерування електричної та теплової енергії. При цьому майже вдвічі зростає коефіцієнт корисного використання теплової енергії – до 80 % у ТЕЦ, що облаштовані конденсаційними турбінами. Але, разом із тим, значно зменшується частка вироблення електроенергії в загальному енергетичному балансі станції в порівнянні з ТЕС (в середньому в два рази). Також принцип сукупного паралельного виробництва теплової і електричної енергії обумовлює значну

взаємозалежність цих видів генерації та накладає суттєві обмеження на адаптацію та перемикання режимів виробництва цих видів енергії.

Отже, ідея щодо експлуатації гідроелектростанції (ГЕС) в теплофікаційному режимі є актуальною. Для реалізації такої нетрадиційної технології було запропоновано застосувати тепловий насос (ТН), який працює в автоматизованому адаптивному режимі. Тобто, під час активного режиму роботи ГЕС тепловий насос відбирає низькопотенційну теплову енергію від потоку води, що протікає крізь турбіну та нагріває воду, що подається до систем централізованого опалення та гарячого водопостачання [119–121].

В результаті цього була запропонована й досліджена технологія застосування теплофікаційного режиму роботи ГЕС для цілей опалення та гарячого водопостачання. Для реалізації цієї ідеї було вирішено застосувати автоматизовані ТН, як показано на рисунку 2.25.

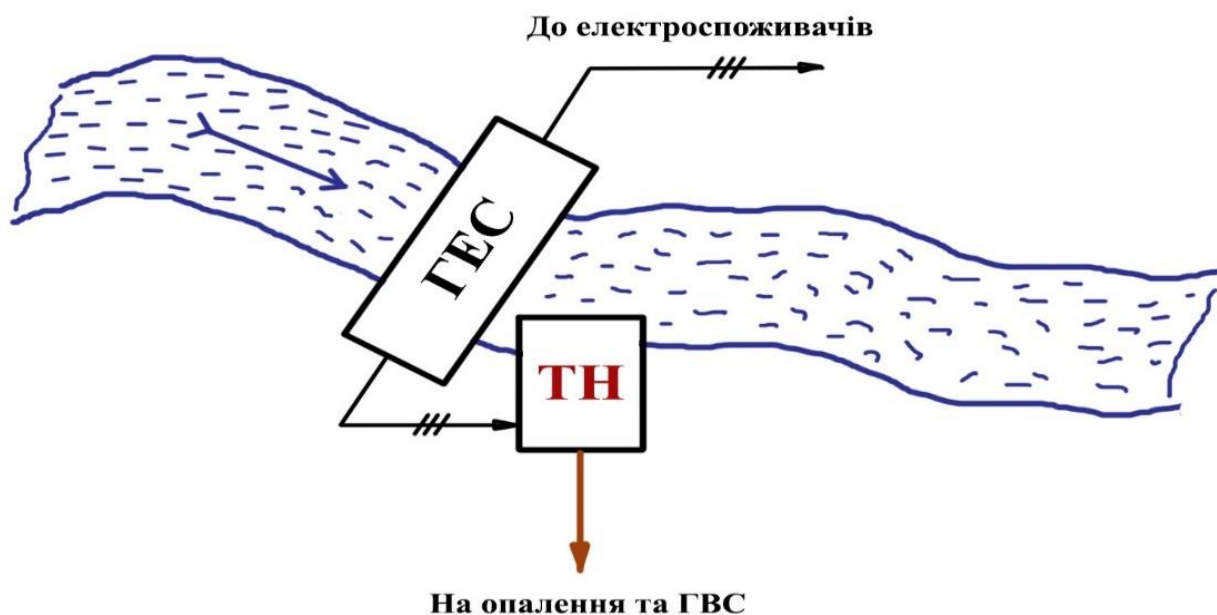


Рисунок 2.25 – Схема застосування теплофікаційного режиму на ГЕС

В якості ТН було застосовано парокомпресорну установку, яка працює за основним холодильним циклом. Для цієї технології на підставі p,i – діаграми вибраного холодоагенту (фреон–11) були визначені функції зміни параметрів

холодильного циклу від теплової потужності конденсатора та температури конденсації холодоагенту за температури випаровування холодоагенту 2 °С.

В якості аналізованого об'єкту автоматизованого керування було прийнято гідроагрегат з типовою потужністю для Запорізької ГЕС 120 МВт.

Вода в ТН має нагріватися в діапазоні від 5 °С до 85 °С, температура конденсації холодоагенту прийнята рівною 90 °С.

Автоматизована методика розрахунку параметрів комплексної системи ГЕС, що працює в теплофікаційному режимі характеризується наступним алгоритмом дій:

1. Введення вхідних даних до апаратно-програмних модулів автоматизованого регулювання, а саме: завдання потужності гідроагрегату, геометричного напору станції, початкових та кінцевих температур води, що віддає тепло до ТН та води в системі опалення та ГВС, фізичних параметрів води та холодоагенту, технічних параметрів теплового насосу.

2. Алгоритмізація та програмне формування функцій динаміки характеристик холодильного циклу в залежності від теплової потужності конденсатора й температури конденсації холодоагенту за умови постійних температур випаровування, що необхідні в процесі моделювання роботи теплових насосів.

3. Програмне формування функції залежності теплової потужності ТН та функції залежності електричної потужності, що використовується під час електропостачання споживачів від електричної потужності компресора ТН для заданої температури конденсації холодоагенту.

4. Визначення балансової потужності компресора ТН і відповідних йому параметрів ТН та потужності електропостачання електроспоживачів.

5. Програмне формування функції залежності електричної потужності компресора ТН та функції залежності електричної потужності, що використовується під час електропостачання споживачів від теплової потужності ТН для заданої температури конденсації холодоагенту.

6. Визначення параметрів ТН та потужності споживачів електроенергії ГЕС для довільних значень потужності компресора або теплової потужності ТН.

7. Аналіз і порівняння отриманих параметрів ТН та системи електропостачання ГЕС з подальшим вибором найбільш доцільного теплофікаційного режиму роботи ГЕС.

За цією технологією було досліджено роботу гідроагрегата з типовою потужністю 120 МВт у теплофікаційному режимі для різних витрат енергії на електропривод компресора ТН. У відповідності з цими витратами змінювалися величини й співвідношення часток електричної та теплової генерацій вдосконаленої технології для ГЕС (див. рис. 2.26).

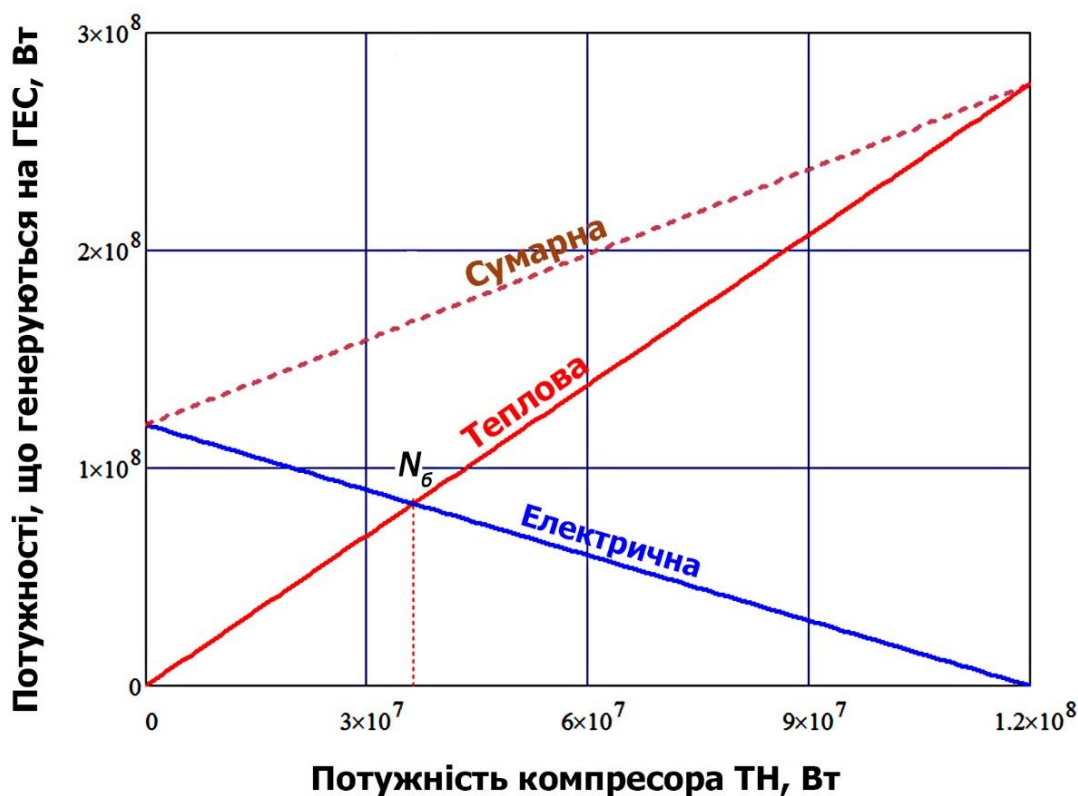


Рисунок 2.26 – Графік визначення балансової потужності N_6 компресора ТН для температури конденсації холодоагенту 90°C

На рисунку 2.26 представлено залежності потужностей електричної, теплової та сумарної генерацій ГЕС від потужності компресора ТН для температури

конденсації холодоагенту $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, тобто для умов максимального навантаження на систему в опалювальний період.

В свою чергу, за умови зменшення температури конденсації до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ при середніх навантаженнях на систему опалення, ефективність такої системи суттєво зросте разом з коефіцієнтом перетворення з 2,3 до 3,3.

Аналізуючи отримані графічні залежності (див. рис. 2.27), можна виділити такі особливості цієї технології, як можливість забезпечувати роботу ГЕС суто в електричному або суто тепловому режимі або автоматично маневрувати у різних співвідношеннях частками електричної та теплової генерацій, чого неможливо досягнути на ТЕЦ. При цьому, помітний інтерес може викликати режим рівного співвідношення часток електричної та теплової генерацій, який названо балансовим. За допомогою цієї методики є можливість визначення умов досягнення цього режиму. А саме, йдеться про визначення відповідного значення потужності компресора ТН, яку також названо балансовою (N_b). Було відмічено, що за такого режиму на потреби теплопостачання витрачається близько 30 % електроенергії, забезпечуючи при цьому рівне співвідношення генерацій електричної та теплової енергії. Крім того, застосування цієї технології дозволяє заощадити до третини умовного палива на потреби опалення та ГВС у порівнянні з котлом при середніх навантаженнях на систему опалення.

Також нижче на рисунку 2.27 представлено розраховані залежності електричної потужності компресора ТН та електричної потужності, що йде на електропостачання споживачів від теплової потужності ТН для температури конденсації холодоагенту $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. На підставі цих функцій реалізуються програмні компоненти засобів автоматизації технологічних процесів в умовах ГЕС щодо відсоткового перерозподілу часток електричної та теплової генерацій в залежності від поточних потреб споживачів теплової енергії.

Додатково варто акцентувати увагу на достатній кількості джерел низькопотенційної енергії, близьке розташування ГЕС до великих міст, відносно невеликі витрати на функціонування теплонасосного обладнання й практично повну автономність від паливних ресурсів.

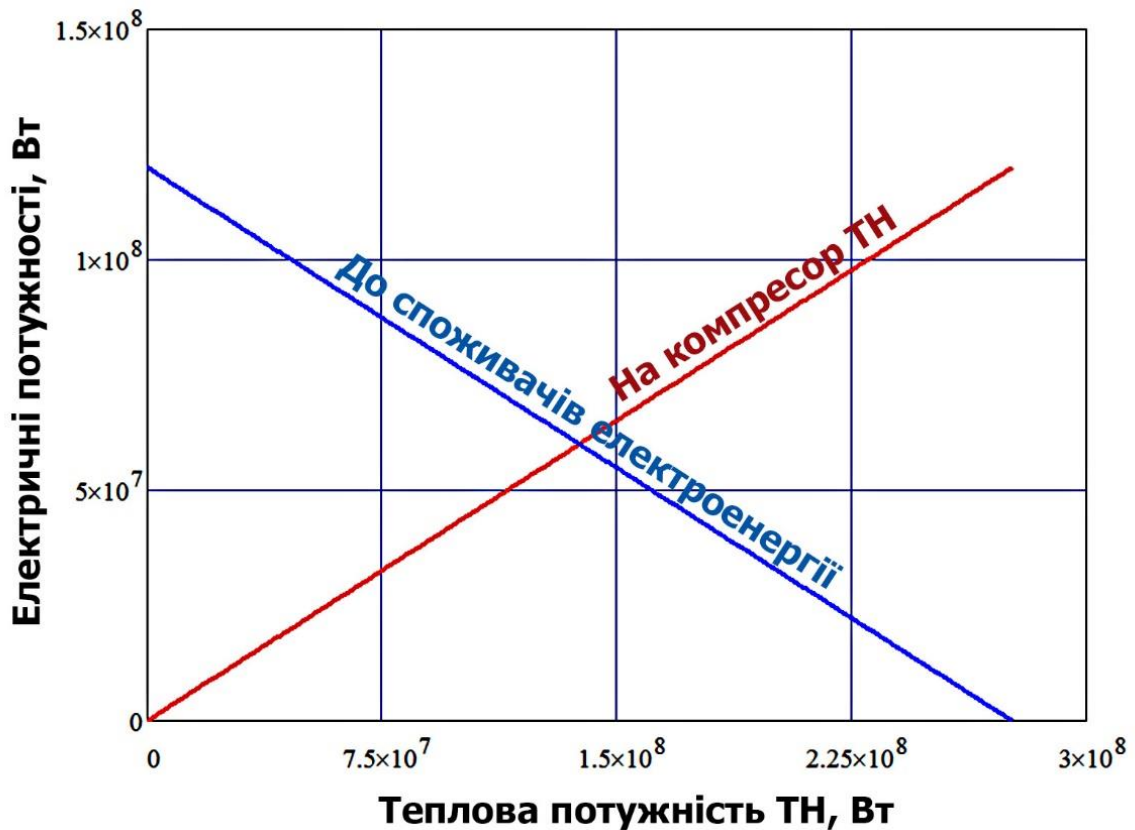


Рисунок 2.27 – Залежності потужностей електричної генерації ГЕС від теплової потужності ТН для температури конденсації холодоагенту 90°C

До труднощів впровадження цієї нетрадиційної автоматизованої технології слід віднести необхідність у проектуванні спеціалізованого високопотужного теплонасосного обладнання зі складними адаптивними до мінливих умов використання контурами регулювання технологічних процесів.

2.4 Структурно-функціональне забезпечення методу підвищення енергоефективності тепlopостачання на основі багатоступневих теплонасосних систем

Для кожної теплонасоної системи тепlopостачання існує критична температура нагріву теплоносія, за якої така система споживає таку ж кількість енергії, як і котельний агрегат. А при подальшому збільшенні навантаження, ТН стає більш енерговитратним, ніж котел. Внаслідок цього, застосовують бівалентні

системи опалення, які є комбінацією теплового насоса та водонагрівачого котла, який ввимається в загальну схему в моменти пікових навантажень на систему опалення та ГВП. Режими роботи такої системи перемикаються на підставі впливних сигналів, які генеруються засобами автоматизації теплотехнічних процесів. Але під час використання бівалентної схеми опалення доводиться застосовувати дороге котельне обладнання великої теплової потужності (не менш ніж 60 % від загального навантаження). Ціни на паливо та енергію мають стійку тенденцію до здорожчання. Тому, актуальним є питання пошуку механізмів підвищення ефективності теплонасосних систем опалення. Одним із можливих підходів є збільшення кількості теплових насосів, що послідовно нагрівають холодоагент до необхідної температури в синхронізованому засобами комп'ютерно-інтегрованої техніки режимі [122–127].

Задачу підвищення енергоефективності в цьому випадку сформульовано наступним чином: виконати аналіз системи та обґрунтувати оптимальне значення проміжної температури холодоагенту в двоступеневій теплонасосній системі опалення, визначити раціональну кількість ступенів теплонасосної установки опалення за умови мінімальної витрати умовного палива.

Для вирішення цієї задачі дослідження були встановлені залежності витрат умовного палива від кінцевої температури теплоносія для таких систем опалення: котельної, теплонасосної, двоступеневої теплонасосної та багатоступеневої теплонасосної установок.

В якості холодоагенту використано фреон–11. Всі процеси в різних режимах роботи ТН описані у вигляді функцій від температури конденсації t_k на основі p, i – діаграми фреону, як показано на рисунку 2.22. Керування тепловою потужністю здійснюється через зміну витрати холодоагенту через компресор для кожного теплового насоса.

Для базової одноступеневої схеми ТН температура випаровування t_u була прийнята постійно рівною 0 °С. Відповідна ентальпія i_1 у точці «1» на p, i – діаграмі дорівнює 388 кДж/кг. З урахуванням цього, залежності ентальпії на входах у

конденсатор та, відповідно, у випровувач від температури конденсації мають вигляд, що обчислюється за формулами [110]:

$$i_b(t_k) = 200,285 + 0,797 t_k + 0,000917 t_k^2, \quad (2.18)$$

$$i_a(t_k) = \frac{443 - 388}{100} t_k + 388. \quad (2.19)$$

У виразі (2.18) застосовано апроксимацію у вигляді полінома другого степеня, а у виразі (2.19) – лінійну інтерполяцію.

Залежність температури конденсації від температури теплоносія на виході з ТН обчислена за формулою [110]:

$$t_k(t_{np}) = t_{np} + 5. \quad (2.20)$$

Функціональні залежності основних параметрів холодильного циклу визначаються в наступному вигляді [110]:

– питома навантаження конденсатора:

$$q_k(t_k) = i_a(t_k) - i_b(t_k), \quad (2.21)$$

– питома холодопродуктивність:

$$q_x(t_k) = i_l - i_b(t_k), \quad (2.22)$$

– питома теоретична робота компресора:

$$l_k(t_k) = i_a(t_k) - i_l, \quad (2.23)$$

– масова витрата холодоагенту в контурі:

$$M_x(t_k) = \frac{Q_o}{q_k(t_k)}, \quad (2.24)$$

де Q_o – теплове навантаження системи опалення.

– коефіцієнт перетворення теплового насосу:

$$\psi(t_k) = \frac{q_k(t_k)}{l_k(t_k)}, \quad (2.25)$$

Потужність на валу компресора теплового насоса в залежності від температури конденсації [110]:

$$N_k(t_k) = \frac{l_k(t_k) M_x(t_k)}{\eta_a \eta_m}, \quad (2.26)$$

де η_a – адіабатний к.к.д. компресора; η_m – механічний к.к.д. компресора.

Аналогічно було складено вирази, що відповідають формулам (2.18) – (2.26), для холодильних циклів з температурами випаровування 15 °С, 30 °С, 45 °С, 60 °С, 75 °С. Для вирішення цієї дослідної задачі було використано методи аналізу та чисельного моделювання, реалізовані в середовищі PTC Mathcad Express (Trial version). Всі розрахунки проводились для теплового навантаження на систему опалення 1 МВт.

У результаті порівняння параметрів одноступеневої теплонасосної установки та котельної установки, було визначено, що під час досягнення температури теплоносія критичного значення 84,5 °С, витрати умовного палива обох систем співпадали. А під час подальшого зростання температури теплоносія витрата умовного палива в ТН стає більше, ніж в котлі.

Виконано дослідження двоступеневої теплонасосної установки (див. рис. 2.28), в якій у першому ТН здійснюється попередній нагрів теплоносія до

проміжної температури t_{np} , потім у другому ТН здійснюється доведення температури холодоагенту до кінцевої температури.

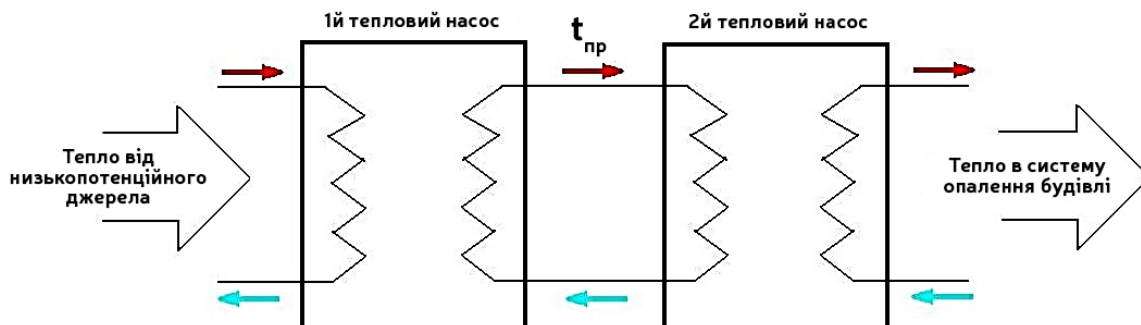


Рисунок 2.28 – Схема двоступеневої теплонасосної установки

Для різних значень проміжної температури нагріву t_{np} проведено розрахунки параметрів двоступеневої теплонасосної установки: потужність на валу компресорів N_k ; холодильна потужність ТН Q_x ; коефіцієнт перетворення енергії ψ ; сумарні витрати умовного палива теплонасосної системи B_Σ . Результати розрахунків для критичної температури теплоносія $84,5\text{ }^\circ\text{C}$ наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри двоступеневої теплонасосної установки в залежності від проміжної температури нагріву

| t_{np} , $^\circ\text{C}$ | Перший ТН | | | Другий ТН | | | ΣN_k , кВт | B_Σ , кг/с |
|--------------------------------|-------------|-------------|--------|-------------|-------------|--------|--------------------|-------------------|
| | N_k , кВт | Q_x , кВт | ψ | N_k , кВт | Q_x , кВт | ψ | | |
| - | 409,6 | 688,7 | 3,213 | - | - | - | 409,6 | 0,03792 |
| 15 | 59,79 | 708,1 | 16,58 | 324,3 | 753,5 | 4,057 | 384,1 | 0,03556 |
| 30 | 115,4 | 723,1 | 9,244 | 248,9 | 810,8 | 5,286 | 364,3 | 0,03373 |
| 45 | 180,1 | 724,6 | 6,294 | 182,3 | 861,5 | 7,219 | 362,4 | 0,03355 |
| 60 | 255,9 | 718,2 | 4,693 | 114,9 | 912,7 | 11,45 | 370,8 | 0,03433 |
| 75 | 340,8 | 695 | 3,684 | 60,48 | 954 | 21,75 | 401,3 | 0,03715 |

На підставі аналізу залежності витрати умовного палива від значень температури проміжного нагріву (див. рис. 2.29) видно, що оптимальне значення проміжної температури є близьким до 40 °С, що дає можливість отримати до 12 % економії палива в порів'янні з котлом або одноступеневим ТН. При цьому потужності на валах обох компресорів мають приблизно однакове значення, а коефіцієнти перетворення в 2 рази перевищують значення коефіцієнта для одноступеневого ТН.

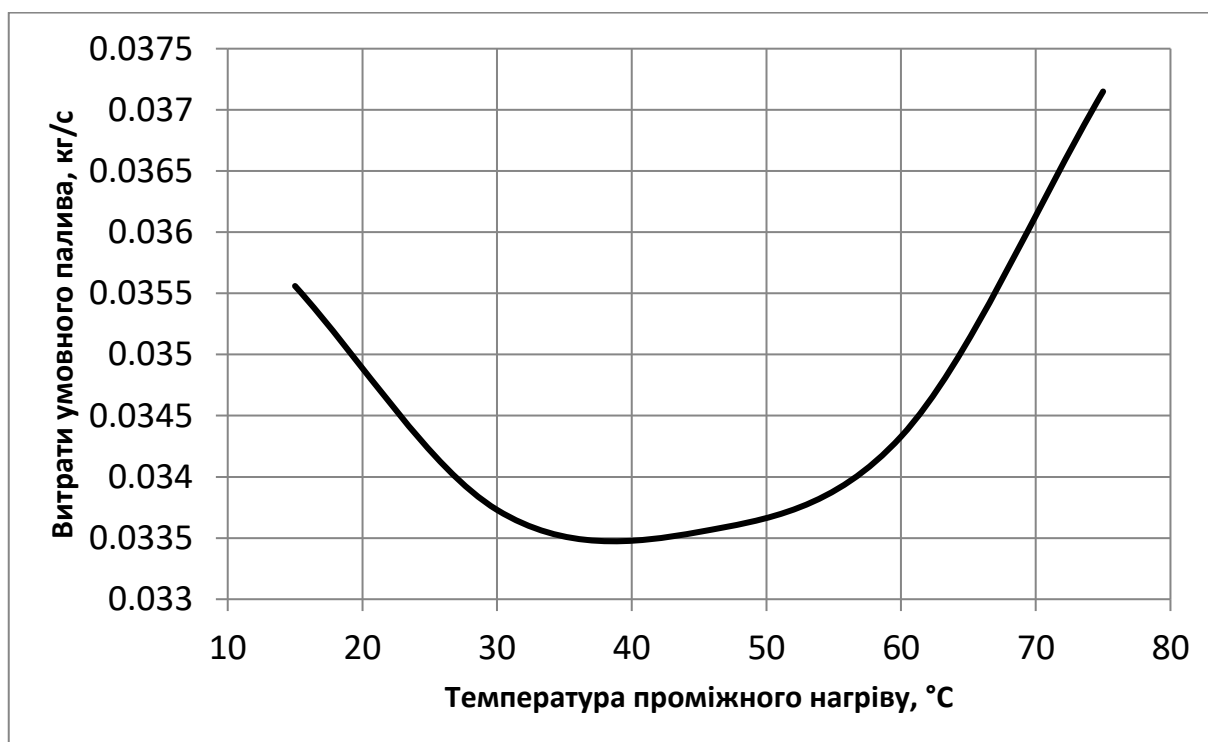


Рисунок 2.29 – Залежність витрати умовного палива двоступеневої теплонасосної системи від температури проміжного нагріву

Також було виконано дослідження енергоефективності різних схем багатоступеневих теплонасосних систем із різними значеннями температури проміжного підігріву між ступенями, як показано на рисунку 2.30.

Вихідні дані за показниками теплового навантаження та кінцевої температури теплоносія було прийнято такими ж, як і для двоступеневої системи. В результаті розрахунків було оцінено значення основних параметрів теплових

насосів, що функціонують у складі відповідних систем. В таблиці 2.3. наведено дані за потужністю на валах компресорів для відповідних схем.

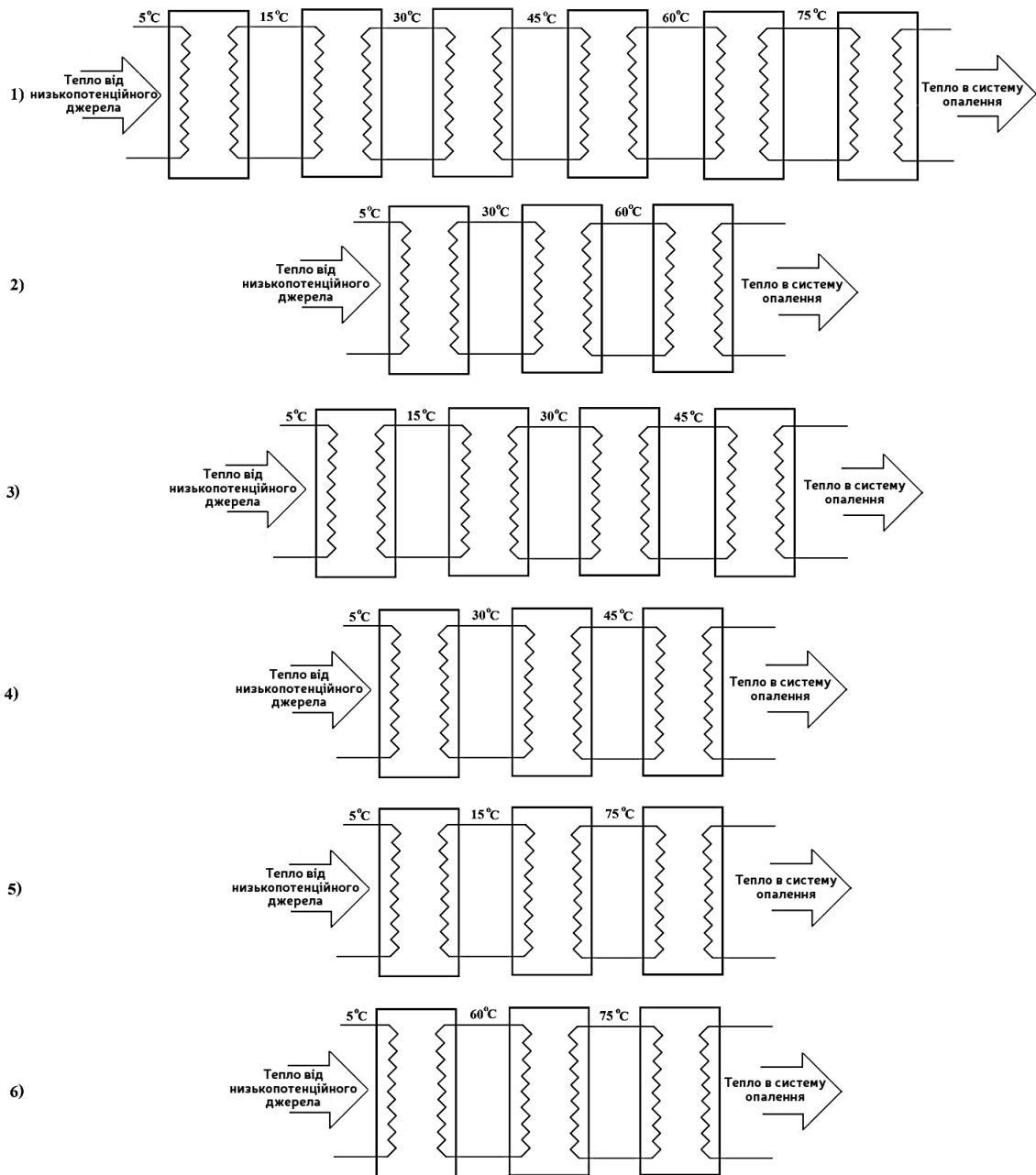


Рисунок 2.30 – Варіанти схем багатоступеневих теплонасосних систем

Після аналізу отриманих даних зроблено висновок, що найбільш енергоефективним є варіант № 2, в якому задіяно триступеневу систему з діленням інтервалів температур проміжного нагріву з кроком 30 °С. Ця схема має найменшу витрату умовного палива, в порівнянні навіть зі схемою № 1 (ділення температур

проміжного нагріву інтервалами з кроком 15 °С), оскільки збільшення коефіцієнтів перетворення, що входять в систему теплових насосів нівелюється сумарними функціональними втратами енергії в компресорах у результаті збільшення їх кількості.

Таблиця 2.3 – Потужності компресорів для різних схем багатоступневих теплонасосних установок

| № | N_{k1} , кВт | N_{k2} , кВт | N_{k3} , кВт | N_{k4} , кВт | N_{k5} , кВт | N_{k6} , кВт | ΣN_k , кВт |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|
| 1 | 59,71 | 61,13 | 63,6 | 68,43 | 71,92 | 60,48 | 385,3 |
| 2 | 116,4 | – | 124,5 | – | 114,9 | – | 355,8 |
| 3 | 60,71 | 62,15 | 64,66 | 182,3 | – | – | 369,8 |
| 4 | 115,6 | – | 64,66 | 182,3 | – | – | 362,6 |
| 5 | 59,85 | 262,8 | – | – | – | 60,48 | 383,1 |
| 6 | 252,1 | – | – | – | 71,92 | 60,48 | 384,5 |
| t_{np} , °С | – | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 | – |

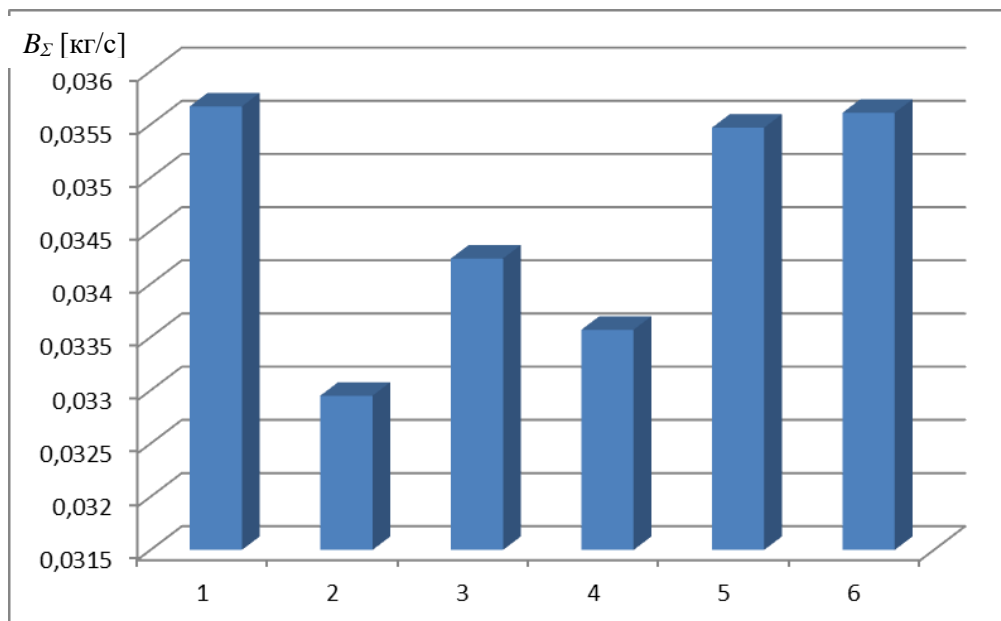


Рисунок 2.31 – Діаграма витрат умовного палива B_Σ для різних варіантів схем ступінчатих теплонасосних установок

Отже, варіант № 2 є більш економічно доцільним у порівнянні з двоступенвою установкою на 1,6 %.

Таким чином, наведені вище результати досліджень структурно-функціонального забезпечення методу підвищення енергоефективності теплопостачання на основі багатоступневих теплонасосних систем являють собою функціональну основу розроблюваної системи автоматизації теплонасосних систем.

2.5 Структурно-функціональне забезпечення методу підвищення енергоефективності комплексної системи опалення та кондиціонування житлових будівель із застосуванням теплового акумулятора

В якості основного підходу до підвищення енергоефективності теплонасосних систем опалення та кондиціонування пропонується застосування процесу акумуляування теплової енергії системи кондиціонування в теплий період з подальшим її використанням в системі опалення в холодний період.

Завданням дослідження є аналіз ефективності комплексної системи кондиціонування та теплонасосного опалення із застосуванням теплового акумулятора, а також обґрунтування оптимального об'єму теплового акумулятору за умови мінімуму споживання умовного палива для систем кондиціонування та опалення [128–130].

У цьому дисертаційному дослідженні розглянуто кондиціонер, що працює на базі основного парокомпресійного холодильного циклу, при якому холодоагент відбирає тепло в охолоджуваного повітря та передає його на трансформовану теплоту від процесу стискання холодоагенту в компресорі в тепловий акумулятор (ТА) [131–135]. В якості низькопотенційного джерела теплоти було запропоновано використовувати витіснювальний рідинний тепловий водний акумулятор [136–144].

Акумулятор теплоти являє собою задовільно теплоізольовану від зовнішнього середовища ємність з водою, в підземному розміщені. Таке рішення

характеризуєть додатково природоохоронним ефектом, оскільки вплив теплових насосів на водойми, підземні водоносні горизонти, ґрунт та інше є незначним [80, 82–86, 90, 145–163].

За результатами дослідження встановлено, що застосування такого акумулятора дозволить суттєво знизити температуру конденсації холодоагенту в кондиціонері з 80–90 °С до 45 °С, а також збільшити більш ніж у два рази холодильний коефіцієнт. Також застосування теплового акумулятора дозволить підвищити початкову температуру випаровування холодоагенту в тепловому насосі до 30 °С, що буде ступінчато знижуватися до 15 °С та 4 °С під час зниження температури води в акумуляторі. При цьому коефіцієнт перетворення енергії теплового насосу підвищується в 1,5–2 рази в залежності від теплового навантаження системи опалення та температури води в тепловому акумуляторі.

В якості об'єкту автоматизованого керування під час розрахунків було обрано двоповерховий будинок із зовнішнім об'ємом 1125 м³ (габаритні розміри 15x15x5 м). На підставі розробленої автоматизованої методики було проведено дослідження роботи системи кондиціонування та теплонасосної системи опалення в єдиному комплексі з тепловим акумулятором та сонячними колекторами [164–170] (див. рис. 2.32).

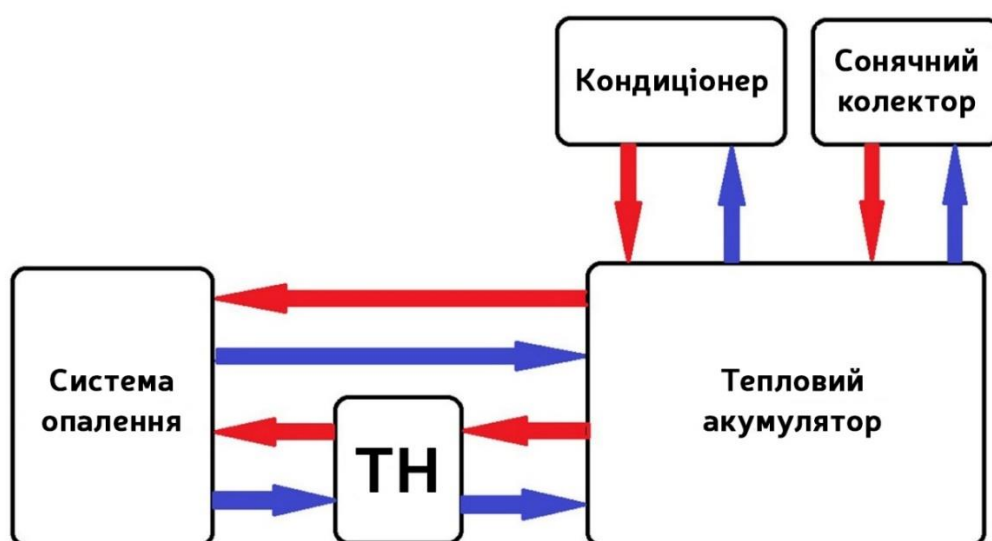


Рисунок 2.32 – Теплова схема теплонасосної системи кондиціонування та опалення будівлі

В процесі досліджень було підібрано об'єм ТА за умови необхідного значення кінцевої температури води в акумуляторі, теплової енергії накопиченої в ньому за теплий сезон від системи кондиціонування та мінімально можливої температури конденсації в конденсаторі (45 °С). Температура випаровування у випарнику при цьому прийнята рівною 10 °С. Визначено кількість умовного палива, що є необхідним для роботи системи кондиціонування з урахуванням середньомісячних температур теплого сезону (з середини травня до середини вересня) та навантаження на систему опалення будівлі. При цьому початкова температура води в акумуляторі прийнята рівною 25 °С, а підігрів води до цієї температури від базових 10–12 °С відбувається за допомогою сонячних колекторів. Розрахунки показують, що для кліматичної зони Дніпропетровської області та площі сонячних колекторів 100 м², цей підігрів можна зробити за півтора місяці до початку теплого сезону. В подальшому колектор необхідний для підтримання теплового балансу в системі та може бути використаний на інші побутові потреби.

Використовуючи теплофізичні характеристики будівлі, визначено функціональну залежність теплового навантаження під час опалення від дії температури повітря навколишнього середовища.

На основі цієї характеристики навантаження було отримано температурний графік регулювання опалювального навантаження (див. рис. 2.33), який покладено в основу структурно-алгоритмічної організації досліджуваної автоматизованої технології. На графіку представлено зміну температури води в прямому та зворотньому трубопроводах для радіаторної системи опалення.

У відповідності зі встановленими температурами було визначено режими роботи системи опалення для адаптації режимів автоматизованого керування до різних місяців опалювального сезону. При цьому половину жовтня будівля зможе опалюватися без застосування ТН напряму від теплового акумулятора. Далі буде працювати ТН послідовно змінюючи температуру випаровування холодоагенту на наступні значення: 30 °С, 15 °С та 4 °С. Для визначеного оптимального об'єму акумулятора, який склав 1000 м³, було встановлено температурні режими роботи системи опалення, як показано в таблиці 2.4.

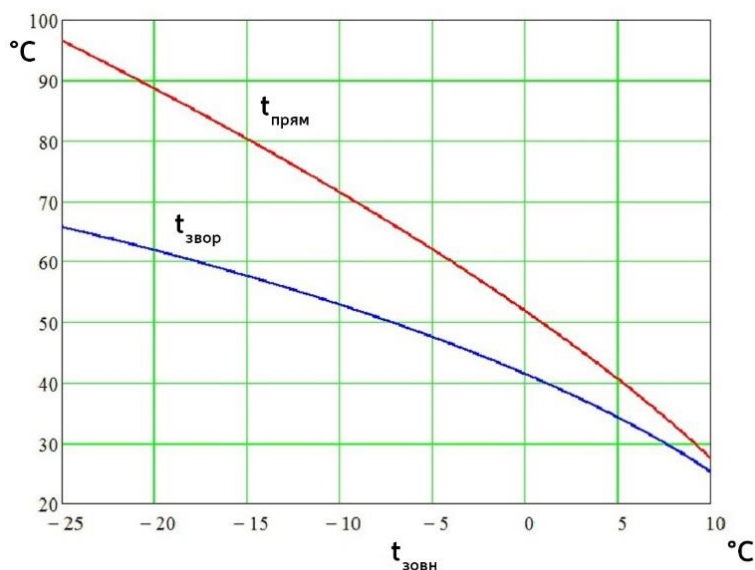


Рисунок 2.33 – Температурний графік регулювання опалювального навантаження

На основі отриманих режимів визначено витрати умовного палива за опалювальний сезон для активної роботи компресора теплового насосу. Окремо було обчислено витрати умовного палива для системи кондиціонування при температурі конденсації 85 °C (2223,52 кг у.п.) та теплонасосної системи опалення будівлі (3128,43 кг у.п.) без застосування ТА, а також обчислено витрати для системи опалення з котельним агрегатом, що склали 5007,73 кг у.п.

Характеристики кондиціонера та теплового насосу визначались на основі базових холодильних циклів, в загальному вигляді зображених на рисунку 2.22.

В якості холодоагенту використано фреон–11. На основі p,i – діаграми фреону описані у вигляді функцій від температури конденсації t_k всі зображені процеси для кондиціонера з урахуванням різних режимів роботи теплового насосу. Результати розрахунків витрат умовного палива для різних об'ємів теплових акумуляторів представлені в таблиці 2.5 та зображені на рисунку 2.34. Графічну інтерпретацію порівняльного аналізу витрат умовного палива для різних технологій за рік представлено на рисунку 2.35.

Таблиця 2.4 – Режимы роботи та температури системи опалення за опалювальний сезон при необхідному об'ємі теплового акумулятора

| Місяць | Температура, °С | | | | |
|------------------|-----------------|--------------------|--------------------|----------------------------|-----------------|
| | Прямий трубопр. | Зворотній трубопр. | Вода в акумуляторі | Випаровування холодоагенту | Середня повітря |
| Жовтень (15дн) | 38,15 | 32,63 | 39,46 | – | 6 |
| Листопад (20 дн) | 47,49 | 38,7 | 38,08 | 30 | 2 |
| Листопад (10 дн) | | | 35,36 | 15 | |
| Грудень | 56,02 | 43,97 | 34,06 | 15 | -2 |
| Січень | 67,76 | 50,82 | 28,74 | 15 | -8 |
| Лютий | 62,03 | 47,53 | 21,61 | 4 | -5 |
| Березень | 45,24 | 37,27 | 16,32 | 4 | 3 |
| Квітень | – | – | 12,84 | – | – |

Таблиця 2.5 – Результати розрахунків витрат у.п. для різних об'ємів теплового акумулятора

| Об'єм акумулятора, м ³ | Температура конденс. в кондиціонері, °С | Максимальна температура в акумуляторі, °С | Витрата у.п. на кондиц., кг | Витрата у.п. на ТН, кг | Сумарна витрата у.п., кг |
|-----------------------------------|---|---|-----------------------------|------------------------|--------------------------|
| 800 | 48 | 43,28 | 876,78 | 2431,76 | 3308,55 |
| 900 | 47 | 42,03 | 825,35 | 2454,36 | 3279,71 |
| 1000 | 45 | 39,46 | 793,86 | 2467,4 | 3261,27 |
| 1100 | 43 | 37,82 | 749,09 | 2531,94 | 3281,03 |
| 1200 | 42 | 36,92 | 713,78 | 2596,37 | 3310,15 |



Рисунок 2.34 – Залежність сумарних витрат умовного палива від об'єму ТА для комплексної системи кондиціонування та опалення

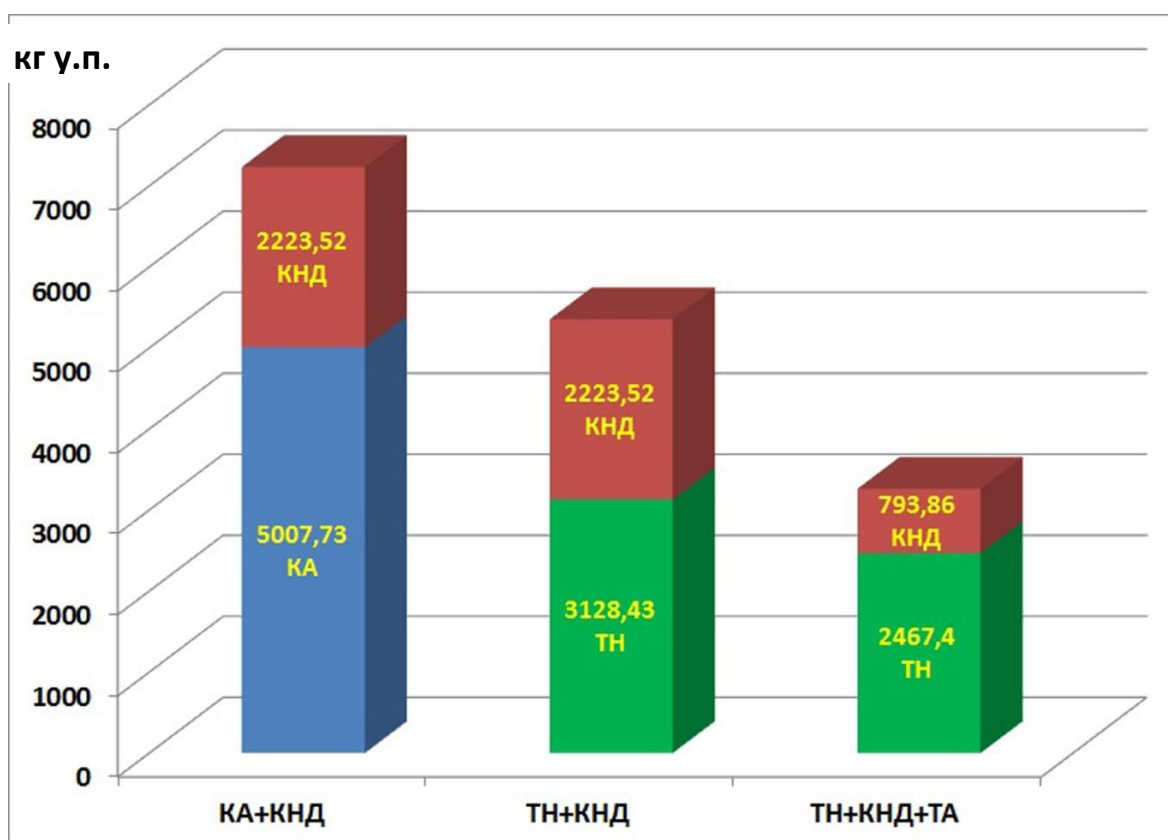


Рисунок 2.35 – Витрати умовного палива для різних технологій кондиціонування та опалення за рік

Таким чином, наведені вище результати розробки структурно-функціонального забезпечення методу підвищення енергоефективності комплексної системи опалення та кондиціонування житлових будівель із застосуванням теплового акумулятора являють собою теретичну основу розроблюваної системи автоматизації теплонасосних систем.

2.6 Структурно-функціональне забезпечення методу підвищення енергоефективності системи теплонасосного опалення та кондиціонування приватної будівлі із застосуванням теплового акумулятора та сонячних колекторів

Системи опалення є одними із найбільш затратних за критерієм використання паливно-енергетичних ресурсів (не менш ніж 30 % від загальних обсягів споживання). Це обумовлює постійний пошук і реалізацію різних техніко-технологічних рішень щодо підвищення енергоефективності систем опалення. Окрім цього, великого розповсюдження набули системи кондиціонування повітря. Значні обсяги теплової енергії, обчислювані мільйонами ГДж, марно викидається до навколишнього середовища через зовнішні блоки кондиціонерів.

Аналіз різних технічних рішень щодо створення систем опалення та кондиціонування показав, що найбільш вдалим з точки зору енергоефективності є рішення, запропоноване в роботі [171], що включає тепловий насос, ґрунтовий теплообмінник, систему повітряного опалення/кондиціонування на основі фенкойлів, пластинчатий теплообмінник, що встановлений між тепловим насосом та системою повітряного опалення/кондиціонування, які охоплені відповідними контурами автоматизованого керування.

В системі зроблено акцент на відновленні природного теплового стану ґрунтового масиву після вичерпування теплоти тепловим насосом, а також регулюванні параметрів теплової потужності за рахунок збільшення/зменшення загальної площі теплообміну (зміни довжини трубної системи «ґрунтовий колектор – резервний трубопровід – теплообмінник»).

Недоліком цього підходу є значна втрата теплової енергії внаслідок розсіювання теплової енергії в ґрунті та недостатньо високий коефіцієнт перетворення енергії.

Автором дисертації поставлена та вирішена задача вдосконалення системи опалення та кондиціонування, в якій шляхом введення нових конструктивних елементів та їх сполученням досягається можливість можифікованого характеру формування, взаємодії та циркуляції потоків теплової енергії незалежно від обраного режиму, а також можливість комп'ютерно-інтегрованого керування та регулювання параметрів потоку теплової енергії безперервно впродовж року практично без втрат енергії та, відповідно, за рахунок цього розширення області застосування при значному зменшенні витрат [171–174].

Задача вирішується тим, що у відомій системі опалення будівлі, яка включає джерело тепла, тепловий насос і радіаторний елемент опалення, що пов'язані з головним теплообмінником та охоплені відповідними контурами автоматизованого керування. Під час досліджень запропоновано наступні оригінальні модифікації: джерело тепла виконано у вигляді контуру із сонячного колектора та теплового акумулятора, а також уведено елемент кондиціонування, головний та додатковий теплообмінники. При цьому головний теплообмінник пов'язаний із тепловим насосом та сполучений із тепловим акумулятором та додатковим теплообмінником, який, у свою чергу, пов'язаний з елементом кондиціонування й тепловим насосом та сполучений із радіаторним елементом опалення та тепловим акумулятором з можливістю варіативного формування та взаємодії теплових потоків.

На рисунку 2.36 наведено структурну схему системи, що реалізує запропонований метод. Тепловий акумулятор (1) пов'язаний через циркуляційний насос (3), теплообмінник (10) і вентиль (11) із сонячним колектором або їх системою (2), через циркуляційний насос (12) і вентилі (17, 19 і 20) з головним теплообмінником (7), а також через вентилі (16, 18, 21, 22) і циркуляційний насос (14) із радіаторним елементом опалення (6). Тепловий насос (5), що пов'язаний через випаровувач/конденсатор теплового насосу (8) з головним теплообмінником

(7) через конденсатор теплового насосу (9) та вентилялі (25 і 26) з додатковим теплообмінником (4), а також через вентилялі (23 і 24) і випаровувач (28) з системою кондиціонування й вентиляції (27). Додатковий теплообмінник (4) через вентилялі (14 і 15) та циркуляційний насос (13) пов'язаний із радіаторним елементом опалення будівлі (6), а також через циркуляційні насоси (12, 13 і 14) та вентилялі (29, 18, 15, 16 і 22) з тепловим акумулятором (1) [171–174].

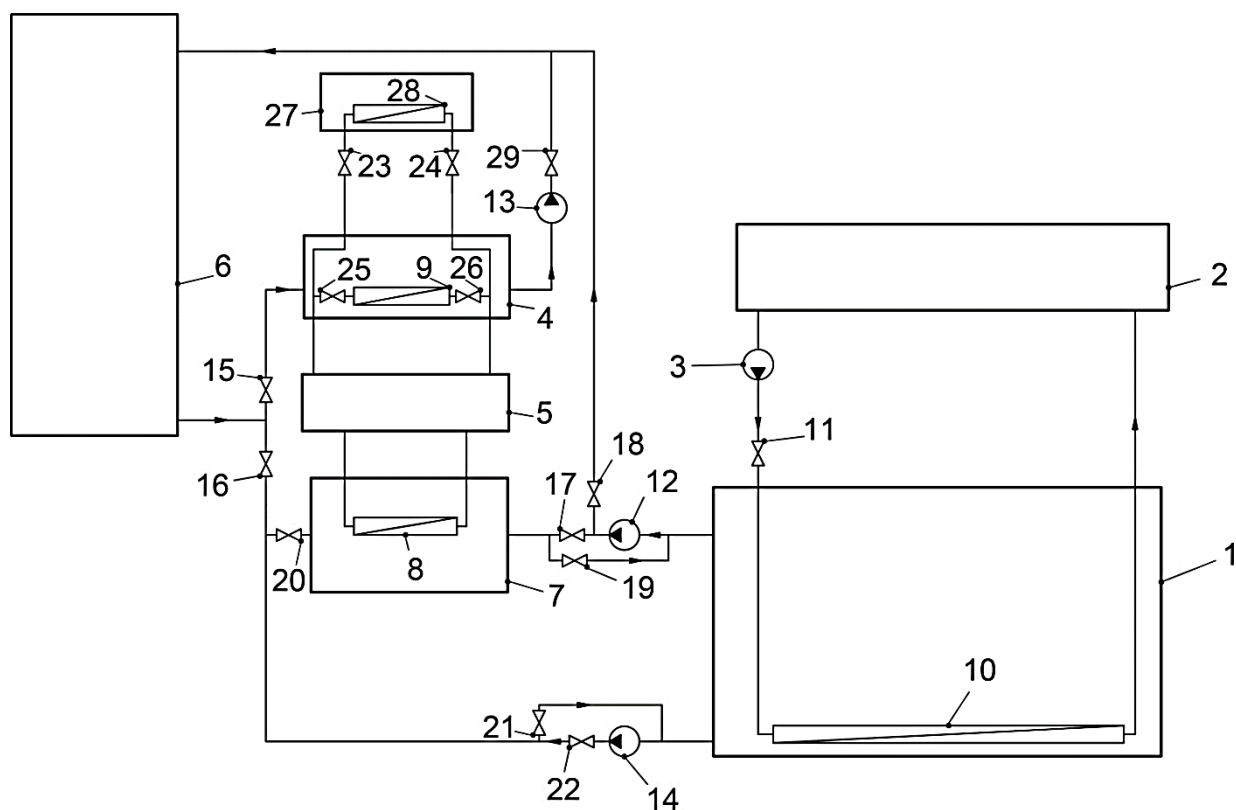


Рисунок 2.36 – Структурна схема реалізації методу опалення та кондиціонування з тепловим акумулятором та сонячними колекторами зі залученням технологій комп'ютерно-інтегрованого керування

Практично система працює безперервно впродовж року: на опалення в холодний сезон та на кондиціонування у теплий сезон. У будь-який момент можливим є автоматизоване керування системою та регулювання напрямів потоку в обраному режимі керуючи параметрами обігріву та кондиціонування. Система може працювати у трьох режимах, які реалізується наступним чином.

Режим перший – опалення безпосередньо з теплового акумулятора. Передбачено окремий контур для подачі води в радіаторний елемент опалення (6) безпосередньо з теплового акумулятора (1), він складається з наступних елементів: тепловий акумулятор (1), циркуляційний насос (12), відкритий вентиль (18), радіаторний елемент опалення (6), відкритий вентиль (16), відкритий вентиль (21), тепловий акумулятор (1). Як показують розрахунки, є можливість забезпечити опалення в перші тижні холодної пори року з температурою води, до якої нагрілася вода в тепловому акумуляторі (1) за теплий період. При цьому виникає додаткова економія за рахунок електроенергії на привод теплового насосу (5).

Режим другий – теплонасосне опалення. В опалювальний сезон система вмикається в режим опалення, де тепловий акумулятор (1) являє собою теплоізольовану ємність з водою. За допомогою циркуляційного насосу (3) забезпечується рух води в замкненому контурі сонячного колектора через теплообмінник (10), який розташовано в тепловому акумуляторі (1), завдяки чому виконується передача теплової енергії з сонячного колектора (2) до теплового акумулятора (1). Система сонячних колекторів (2), кількість і тип яких визначається для кожного окремого випадку, забезпечує надходження до теплового акумулятора чітко визначеного відсотку річної теплової енергії. Тепловий насос (5), що працює на забезпечення опалення, забирає тепло через випаровувач (8), який розміщено в головному теплообміннику (7), через який циркулює вода з теплового акумулятора (1) в «прямому» напрямку руху (забір води із верхньої частини, де зосереджена більш тепла вода). Трансформована у високопотенційну теплову енергію передається через конденсатор (9) і вентилі (25 і 26) в теплообміннику (4) у контур радіаторного елемента опалення (6). Під час «прямого» напрямку руху вода з теплового акумулятора (1) циркулює вздовж наступного контуру: тепловий акумулятор (1), циркуляційний насос (12), відкритий вентиль (17), головний теплообмінник (7), відкритий вентиль (20), відкритий вентиль (21), тепловий акумулятор (1). Опалювальна схема містить наступні функціональні елементи: тепловий насос (5), теплообмінник (4), циркуляційний насос (13), відкритий вентиль (29), радіаторний елемент опалення

(6), відкритий вентиль (15), теплообмінник (4). Як наслідок, реалізується інше формування теплових потоків та їх взаємодія, що забезпечує економію палива та практично виключає втрати енергії.

Режим третій: після закінчення опалювального сезону вимикається опалювальний режим системи та вмикається режим кондиціонування, при цьому відбувається накопичення теплової енергії в тепловому акумуляторі (1). Через випаровувач (28) і відкриті вентиля (23 і 24) тепловий насос (5) відбирає тепло з системи кондиціонування та вентиляції. Вентиляції (29, 15, 25 і 26) знаходяться в закритому стані. Тепловий насос (5) зкидає через конденсатор (8) у головний теплообмінник (7) теплову енергію із системи кондиціонування й вентиляції (27). Через головний теплообмінник (7) циркулює вода безпосередньо з теплового акумулятора (1) в «зворотньому» напрямку руху (забір води із нижньої частини, де зосереджена більш холодна вода). Під час зворотнього напрямку руху вода з теплового акумулятора (1) циркулює вздовж такого контуру: тепловий акумулятор (1), циркуляційний насос (14), відкритий вентиль (22), відкритий вентиль (20), головний теплообмінник (7), відкритий вентиль (19), тепловий акумулятор (1). Подача теплової енергії зі сонячного колектора (2) до теплового акумулятора (1) продовжується протягом усього року. Це є невід'ємним етапом безперервної роботи та формування потоків теплової енергії практично без втрат енергії.

Кількість теплоти, що передається до теплового акумулятора з системи кондиціонування й вентиляції за теплий період обчислюється за формулою:

$$Q_c(t_i, t_{kn}) = \sum_{i=1}^n (K_i \cdot 24 \cdot 3600 \cdot Q_{kn}(Q_{kon}(t_i), t_{kn})), \quad (2.27)$$

де K_i – кількість днів певного місяця; n – кількість місяців, які працює система кондиціонування та вентиляції, Q_{kn} – залежність теплової потужності конденсатора кондиціонера від холодильної потужності Q_{kon} для певної температури випаровування; t_{kn} – температура конденсації; t_i – середнє статистичне значення температури повітря в певному місяці для певної кліматичної зони.

Кількість теплоти, що передана до теплового акумулятора зі системи сонячних колекторів за рік, може бути обчислена за формулою:

$$Q_{kol}(S) = S \cdot 365 \cdot W \cdot 3600000, \quad (2.28)$$

де S – площа сонячних колекторів, W – середня сонячна інсоляція на добу.

Кількість теплоти, яка споживається з теплового акумулятора системою опалення в холодний період, може бути обчислена за формулою:

$$Q_h(t_i, t_{ev}) = \sum_{i=1}^n (q_x(t_d, t_{ev}) \cdot M_0(Q_{so}(t_i), t_d)), \quad (2.29)$$

де K_i – кількість днів певного місяця; n – кількість місяців, які працює система опалення, q_x – питома холодопродуктивність; t_{ev} – температура випаровування холодоагенту; Q_{so} – залежність теплової потужності системи опалення для конкретної будівлі від температури зовнішнього повітря; t_i – середнє статистичне значення температури повітря в певному місяці; M_0 – масова витрата холодоагенту в ТН; t_d – температура води в прямому трубопроводі системи.

Рівняння річного теплового балансу теплового акумулятора є наступним:

$$Q_c + Q_{kol} = Q_h. \quad (2.30)$$

Кількість умовного палива за теплий період, яке необхідне для роботи компресора кондиціонера з тепловим акумулятором, обчислюється за формулою:

$$B_{ak}(t_i, t_{kn}) = \sum_{i=1}^n (K_i \cdot 3600 \cdot 24 \cdot Bn_j(Q_{kon}(t_i), t_{kn})), \quad (2.31)$$

де K_i – кількість днів певного місяця; n – кількість місяців, які працює система кондиціонування та вентиляції; Bn_j – залежність кількості умовного палива від холодильної потужності Q_{kon} для певної температури конденсації j ; t_{kn} –

температура конденсації; t_i – середнє статистичне значення температури повітря в певному місяці для певної кліматичної зони.

Кількість умовного палива, що необхідне для роботи системи опалення від теплового насоса з тепловим акумулятором за холодний період, може бути обчислена за формулою:

$$B_{hp}(t_i, t_{ev}) = \sum_{i=1}^n \left(K_i \cdot 3600 \cdot 24 \cdot Bn_j \left(Q_{so}(t_i), t_{pm}(t_i) \right) \right), \quad (2.32)$$

де K_i – кількість днів певного місяця; n – кількість місяців, які працює система; Bn_j – залежність кількості умовного палива від теплового навантаження та температури в прямому трубопроводі; Q_{so} – теплове навантаження системи опалення; t_{ev} – температура випаровування; t_i – середнє статистичне значення температури повітря в певному місяці для певної кліматичної зони.

Таким чином, за рахунок впровадження принципу комбінованого регулювання циркуляційних потоків в автоматизованому режимі відповідно до контурів системи розроблювана технологія здатна накопичувати теплову енергію протягом усього року та використовувати її практично без втрат, виконуючи свої основні функції: опалювання та кондиціонування. Показник економії палива в основному під час використання запропонованого методу обумовлено зменшенням різниці температур між конденсатором та випаровувачем теплових насосів опалення та кондиціонування. На підставі проведених досліджень у цьому підрозділі було встановлено, що застосування автоматизованої технології, що реалізує запропонований комп'ютерно-інтегрований метод, дозволить збільшити холодильний коефіцієнт під час експлуатації системи кондиціонування більш ніж у два рази. Для теплонасосного опалення це, в свою чергу, дозволить збільшити коефіцієнт перетворення енергії теплового насосу в 1,5–2 рази в залежності від поточного теплового навантаження під час опалення й температури води в ТА.

2.6 Висновки за другим розділом

На підставі досліджень цього розділу було розв'язано одну з основних дисертаційних задач щодо обґрунтування параметрів і характеристик структурно-функціонального забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами з урахуванням критерію енергоефективності. В результаті цього було отримано наступні результати:

1. Розроблено та досліджено структурно-функціональне забезпечення методів комп'ютерно-інтегрованого керування процесом утилізації теплової енергії, що дозволило обґрунтувати оптимізовані значення конструктивних параметрів та енергетичних характеристик теплонасосного обладнання, виконати аналіз та довести енергоефективність використання теплонасосних систем різного призначення під час: кондиціонування житлових приміщень для потреб гарячого водопостачання; впровадження і використання вентиляційних теплотехнічних систем житлових і адміністративних будівель; застосування нетрадиційних технологій опалення та кондиціонування.

2. Обґрунтовано структурно-функціональне забезпечення методу підвищення енергоефективності конденсаційних електростанцій. У результаті цього було доведено ефективність упровадження комп'ютерно-інтегрованих технологій керування тепловим насосом у тепловій схемі КЕС, який функціонує в якості водонагрівача в системі гарячого водопостачання побутових споживачів, що дозволяє працювати електростанції в теплофікаційному режимі.

3. Визначено, що застосування автоматизованого теплонасосного обладнання дає можливість забезпечити роботу ГЕС в суто електричному або суто тепловому режимі. Це дозволяє адаптувати режими генерування електричної та теплової енергії. Крім того методами математичного моделювання встановлено, що під час зменшення температури конденсації до 70 °С при середніх навантаженнях на систему опалення, енергоефективність цієї системи зростає разом з коефіцієнтом перетворення в діапазоні від 2,3 до 3,3.

4. Доведено ефективність запропонованого структурно-функціонального забезпечення методу підвищення енергоефективності теплопостачання на основі багатоступеневих теплонасосних систем. На основі аналізу різних схем

багатоступеневого автоматизованого теплонасосного устаткування доведено, що найбільш енергоефективною, з точки зору мінімальної витрати умовного палива, є трьохступенева теплонасосна установка з температурами проміжного нагріву холодоагенту 30 °С та 60 °С, що забезпечує також рівномірний розподіл навантаження на компресори. З урахуванням незначної переваги цієї установки в порівнянні з двоступеневою системою зважаючи на капітальні витрати та інтегральну надійність системи, дозволяє стверджувати, що оптимальною є двоступенева автоматизована архітектура такої установки.

5. Методами математичного моделювання визначено, що застосування теплового акумулятора в комплексній автоматизованій системі кондиціонування та теплонасосного опалення будівель дозволяє заощадити до 39 % умовного палива в порівнянні зі схемою без теплового акумулятора, а також до 79 % у порівнянні зі схемою з котлом та кондиціонером без теплового акумулятора.

6. Синтезовано структурно-функціональне забезпечення методу підвищення енергоефективності комплексної системи опалення та кондиціонування житлових будівель із застосуванням теплового акумулятора та сонячних колекторів. За рахунок оригінальної комбінації режимів регулювання циркуляційних потоків вздовж контурів системи, запропонована технологія здатна накопичувати теплову енергію протягом всього року, а також використовувати її практично без втрат, виконуючи свої основні функції: опалення та кондиціонування.

7. Оцінено прикладний ефект від застосування автоматизованої технології, що реалізує розроблені методи комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами, який полягає в збільшенні холодинного коефіцієнту для системи кондиціонування більш ніж у два рази, а також для теплонасосного опалення дозволить підвищити коефіцієнт перетворення енергії теплового насосу в діапазоні від 1,5 до 2 разів у залежності від теплового навантаження опалення та температури води в тепловому акумуляторі.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОГО ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТЕПЛОНАСОСНИМИ СИСТЕМАМИ

3.1 Інформаційне забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування опаленням будівель

Розробка та впровадження автоматизованих технологій керування теплонасосними системами, в тому числі, й під час комп'ютерно-інтегрованого керування процесом опалення будівель, дозволяє оптимізувати використання енергії та ресурсів, як це було доведено в другому розділі цієї дисертації. В свою чергу, інформаційне забезпечення таких технологій дозволяє забезпечити точний зональний контроль і регулювання температури в приміщеннях і будівлях, що оптимізує витрати енергії та відповідно мінімізує витрати на опалення [175, 176].

Прецизійне автоматизоване керування температурним режимом у реальному часі дозволяє забезпечити стабільний і комфортний мікроклімат у житлових будівлях і адміністративних спорудах. Інформаційне забезпечення комп'ютерно-інтегрованих підсистем автоматизованого керування дозволяє враховувати різні дестабілізуючі фактори та інформативні параметри, такі як погодні умови, конструкції будівель, фізико-хімічні властивості матеріалів будівлі й холодоагенту та інше [177, 178].

В основу розроблюваного інформаційного забезпечення технології автоматизованого керування опаленням будівель із використанням запропонованого комп'ютерно-інтегрованого методу підвищення енергоефективності системи теплонасосного опалення (див. пп. 2.5 і 2.6) покладено модель, яка включає наступні процедури та функції [179]:

– моніторинг температури повітря навколишнього середовища, температури ґрунту та режимів роботи функціональних елементів системи (див. рис. 2.32: система опалення, тепловий насос, тепловий акумулятор і сонячний колектор), а також зональний моніторинг температури повітря в будівлі;

- комп'ютерно-інтегрована обробка даних моніторингу;
- автоматизоване керування тепловим насосом та режимами зональної подачі теплоносія до будівлі;
- аналіз енергоефективності реалізації запропонованого комп'ютерно-інтегрованого методу керування системою опалення на основі теплових насосів.

Отже, узагальнену графічну інтерпретацію запропонованого інформаційного забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування опаленням будівель у вигляді функціональної схеми та блок-схеми з урахуванням відомих результатів досліджень [180, 181] наведено на рисунках 3.1 і 3.2.

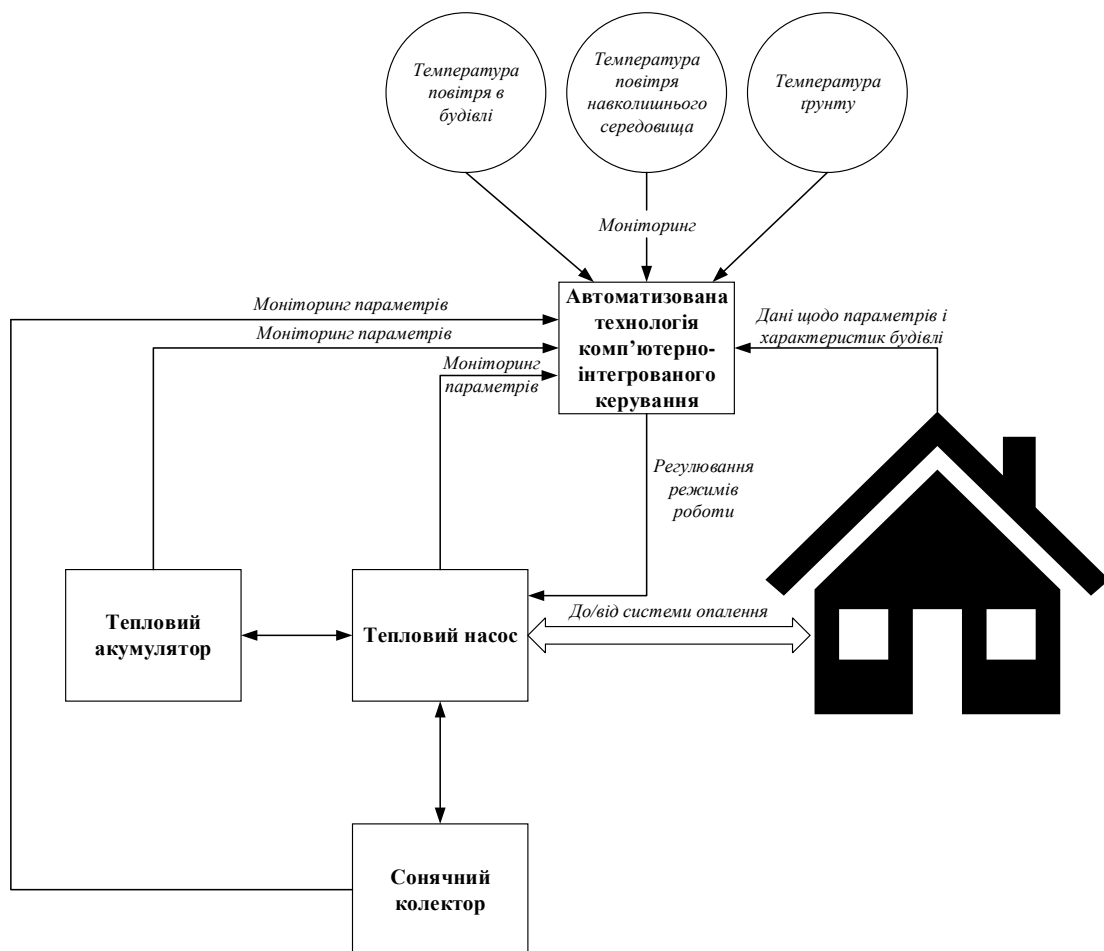


Рисунок 3.1 – Функціональна схема реалізації інформаційної моделі комп'ютерно-інтегрованої підсистеми керування опаленням будівель



Рисунок 3.2 – Блок-схема реалізації інформаційної моделі енергоефективного комп'ютерно-інтегрованого керування опаленням будівель

Основною метою вирішення науково-дослідного завдання розробки інформаційного забезпечення комп'ютерно-інтегрованої підсистеми опалення будівель є обґрунтування вимог до вбудованої програмної компоненти автоматизованого керування цією технологією. Отже, виходячи з цього, виникає

необхідність у математичному описі основних етапів збору та обробки даних з наступним генеруванням керуючих і регулюючих впливів у відповідності до запропонованої вище інформаційної моделі (див. рис. 3.1 і 3.2).

Основу математичного опису досліджуваної технології становить рівняння теплового балансу будинку [180, 182]:

$$T_{in}(t+1) = T_{in}(t) + (P_{HP}(t) - Q_{SUM}(t)) \cdot \Delta t, \quad (3.1)$$

де T_{in} – температура повітря в будівлі; P_{HP} – потужність теплового насосу; Q_{SUM} – сумарні теплові втрати; t – поточний час; Δt – аналізований часовий інтервал.

Параметр рівняння (3.1), який відповідає за сумарні втрати тепла (Q_{SUM}), може бути обчислений на підставі рівняння [182, 183] з урахуванням складових втрат тепла через стіни, дах, вікна та підлогу будівлі:

$$Q_{SUM}(t) = k_{AIR}(T_{in}(t) - T_{out\ air}(t)) + k_{GROUND}(T_{in}(t) - T_{out\ ground}(t)), \quad (3.2)$$

де Q_{SUM} – сумарні втрати тепла; T_{in} – температура повітря в будівлі; $T_{out\ air}$ – температура зовнішнього повітря; $T_{out\ ground}$ – температура ґрунту; k_{AIR} – сумарний коефіцієнт теплових втрат будинку через вікна, дах і стіни будинку; k_{GROUND} – коефіцієнт теплових втрат будинку через підлогу; t – поточний час.

Параметр теплової потужності теплового насосу (P_{HP}) у рівнянні (3.1) є регульованим параметром, а отже, потребує вибору закону регулювання. З аналізу апріорної інформації щодо синтезу регуляторів температури різного класу будівель [184–186] встановлено, що задовільними властивостями характеризуються ПІ-регулятори. В свою чергу, цей тип регулятора під час керування температурою будівель може бути описаний рівнянням:

$$P_{HP}(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt, \quad (3.3)$$

де P_{HP} – потужність теплового насосу; e – похибка регулювання, яка обчислюється як різниця між цільовою та поточною температурою повітря в будівлі; K_P – пропорційний коефіцієнт; K_I – інтегральний коефіцієнт; t – поточний момент часу; T – аналізований період часу.

У формулі (3.3) похибка регулювання температури на основі ПІ-закону обчислюється в дискретні моменти часу програмним блоком автоматизованої технології на основі даних моніторингу температури в приміщенні як різниця між цільовою та поточною температурою повітря в будівлі за формулою:

$$e(t) = T_{in\ target} - T_{in}(t), \quad (3.4)$$

де e – похибка регулювання температури повітря в будівлі; $T_{in\ target}$ – цільова температура повітря в будівлі; T_{in} – поточна температура повітря в будівлі; t – поточний момент часу.

Як зазначалось вище, то розроблюване інформаційне забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування опаленням будівель передбачає зональне регулювання внутрішньої температури, отже, формула (3.4) під час відпрацювання програмного блоку передбачає її циклічне застосування для кожної зони будівлі з подальшим осередненим і градієнтним аналізом.

З урахуванням факту обробки даних моніторингу та подальшого автоматизованого регулювання температури будівлі на основі керування тепловим насосом цифровими засобами, то інтегральна складова похибки, що входить до формули (3.3), має бути обчислена на підставі наступного рівняння:

$$\int_0^T e(t)dt = \sum_{i=0}^T e_i \Delta t, \quad (3.5)$$

де e – похибка регулювання температури повітря в будівлі; i – порядковий номер

дискретного відліку часу; Δt – аналізований часовий інтервал; T – період часу.

Таким чином, дослідження з розробки інформаційного забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування опаленням будівель, які були реалізовані в цьому підрозділі дисертації шляхом синтезу функціональної та блок-схеми інформаційної моделі досліджуваної технології, а також математичного опису основних етапів збору й обробки даних з наступним генеруванням сигналів керування тепловим насосом задля досягнення та підтримання цільової температури повітря всередині будівлі, становлять собою алгоритмічну основу програмного забезпечення створюваної автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування опаленням будівель.

3.2 Програмне забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування опаленням будівель

В основу розроблюваного програмного забезпечення, яке являє собою функціонально-алгоритмічну основу процесу обґрунтування вимог до автоматизованої теплонасосної системи опалення будівель, покладено наступний функціональний ланцюг, який відпрацьовується циклічно в реальному часі:

- завдання цільового значення температури повітря в будівлі;
- визначення динамічного діапазону зміни дестабілізуючих факторів: температура повітря навколишнього середовища та ґрунту;
- на кожному часовому кроці моделювання обчислюється похибка регулювання температури в будівлі;
- обчислюється інтегральна складова похибки регулювання;
- оцінюється вихідне значення сигналу ПІ-регулятора на основі даних щодо поточної похибки з урахуванням інтегральної складової;
- обчислюється значення потужності теплового насоса на основі вихідного сигналу ПІ-регулятора;
- вводяться обмеження на параметр потужності теплового насоса (виключення можливості появи від'ємних значень);

- виконується оцінка сумарних втрат тепла через стіни, дах, вікна й підлогу;
- обчислюється оновлене значення поточної температури в будівлі на підставі даних щодо потужності теплового насоса та сумарних втрат тепла.

В якості основи для розробки програмного забезпечення було взято одноповерхову будівлю з внутрішнім об'ємом 450 м³ та габаритними розмірами 15x12x2,5 м, що задовольняє вимогам до типових конструкцій такого типу. Будівельний матеріал несучого шару огорожувальних конструкцій – легкий бетон. Матеріал теплоізоляції – мінеральна вата, що є популярним на сьогоднішній день матеріалом через свої задовільними теплові властивості, що дозволяє підтримувати комфортну температуру всередині будинку протягом усього року, зменшуючи тепловтрати взимку й надходження тепла влітку. Статистичні дані щодо динаміки температури повітря навколишнього середовища обрані для кліматичних умов Дніпропетровської області. Під час розробки програмної компоненти комп'ютерно-інтегрованої підсистеми опалення будівель ПІ-регулятор налаштовано для підтримки цільової температури повітря в будівлі на рівні 21 °С, в той час як температура навколишнього середовища змінюється від – 3 °С до 9 °С, а температура ґрунту – від 6 °С до 10 °С [179]. Результати розробки відповідного програмного забезпечення з описом прикладного призначення основних процедур і функцій наведено в таблиці 3.1, а повний програмний код представлено в додатку В (див. дод. В.1).

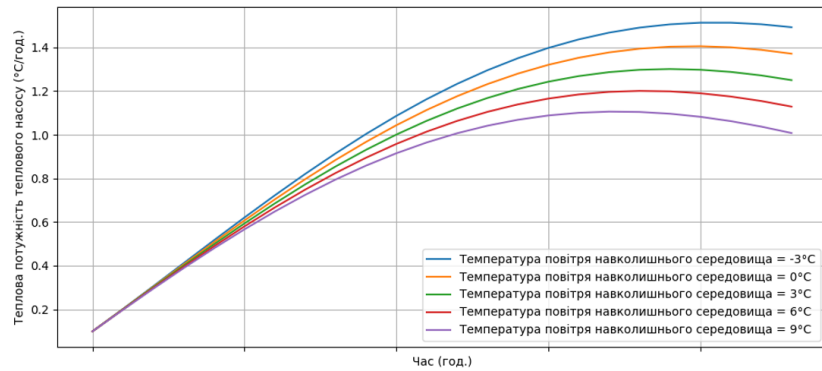
Таблиця 3.1 – Основні процедури та функції програмної компоненти автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування опаленням

| Призначення | Синтаксис |
|---|---|
| Налаштування початкових параметрів моделі | <pre>t_targ = 21 t_amb = np.arange(-3, 10, 3) t_gr = np.arange(6, 11, 2) area_total= 450 t_init= 12 time_step = 1 total_time = 24</pre> |

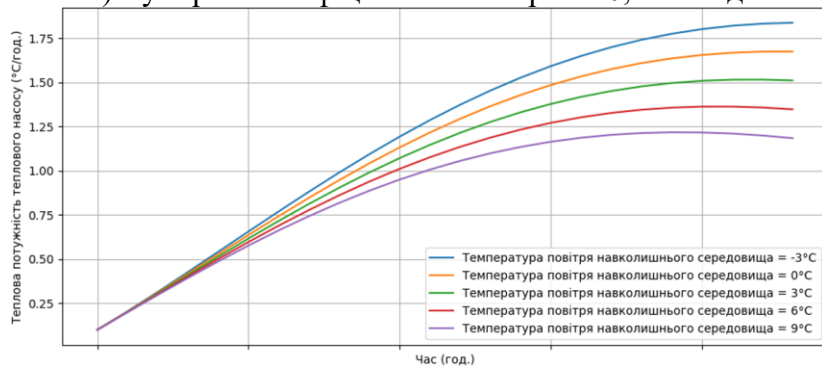
| | |
|--|---|
| Розподіл втрат тепла за відповідними джерелами | <pre>hl_floor = 0.05 hl_walls = 0.05 hl_windows = 0.05 hl_ceiling = 0.05</pre> |
| Налаштування ПІ-регулятора | <pre>Kp = 0.1 Ki = 0.01</pre> |
| Обчислення сумарних втрат тепла | <pre>heat_loss_coeffs = np.arange(0.2, 0.6, 0.1)</pre> |
| Реалізація основної функції регулювання температури повітря в приміщенні на основі ПІ-закону | <pre>def pi_controller(err, integral, prev_power): control_signal = Kp * err + Ki * integral new_power = prev_power + 0.1 * (control_signal - prev_power) return max(0, new_power) def simulate_heat_pump_power(initial_temp, ambient_temp, heat_loss_coeff, t_gr): room_temp = initial_temp integral = 0 prev_power = 0 heat_pump_powers = [] for t in range(total_time): err = t_targ - room_temp integral += err * time_step power_heater = pi_controller(err, integral, prev_power) prev_power = power_heater heat_pump_powers.append(power_heater) heat_loss = (hl_floor * (room_temp - t_gr) + hl_walls * (room_temp - ambient_temp) + hl_windows * (room_temp - ambient_temp) + hl_ceiling * (room_temp - ambient_temp)) room_temp += (power_heater - heat_loss_coeff * heat_loss) * time_step return heat_pump_powers</pre> |

На підставі реалізація та валідації програмної компоненти досліджуваної автоматизованої технології керування опаленням будівлі мовою Python в онлайн-середовищі JupyterLite (див. табл. 3.1) [187, 188] було отримано графічні залежності динаміки потужності теплового насосу під час опалення будівель (див. рис. 3.3), які дозволили обґрунтувати вимоги до техніко-функціональних

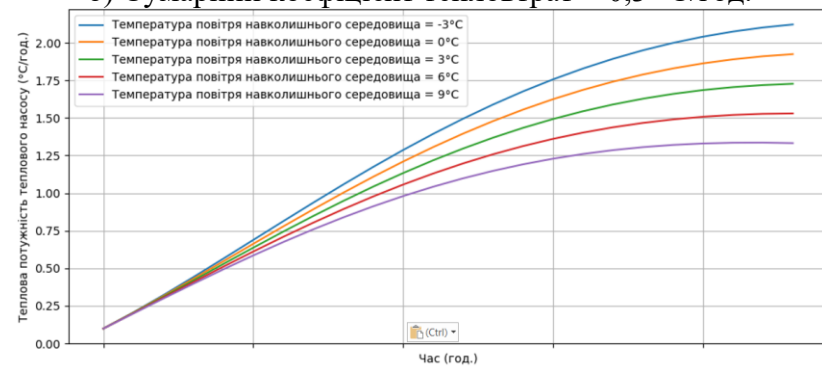
параметрів і характеристик теплонасосного обладнання [179].



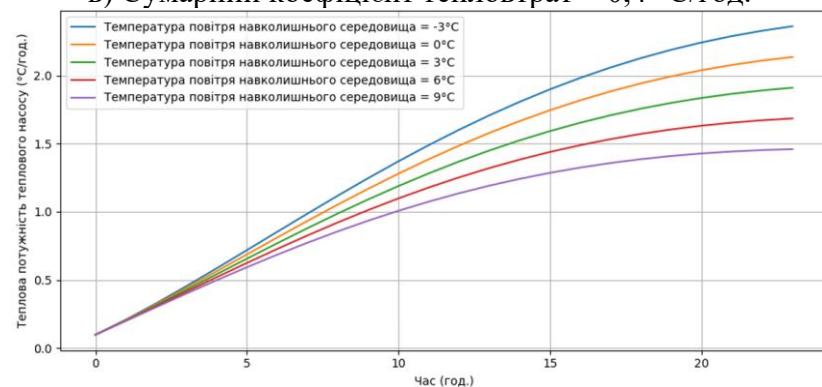
а) Сумарний коефіцієнт тепловтрат = $0,2 \text{ }^{\circ}\text{C/год.}$



б) Сумарний коефіцієнт тепловтрат = $0,3 \text{ }^{\circ}\text{C/год.}$



в) Сумарний коефіцієнт тепловтрат = $0,4 \text{ }^{\circ}\text{C/год.}$



г) Сумарний коефіцієнт тепловтрат = $0,5 \text{ }^{\circ}\text{C/год.}$

Рисунок 3.3 – Графічні залежності динаміки потужності теплого насоса під час опалення будівель

Варто зазначити, що графічні залежності, які наведено на рисунку 3.3, характеризують добову динаміку теплової потужності під час опалення будівель, а отже, для більш швидкого опалення та підтримання відповідної цільової температури необхідно масштабувати теплову потужність насосу, яку зазначено за віссю ординат за відповідних зовнішніх умов, шляхом переналаштування пропорційного та інтегрального коефіцієнтів ПІ-регулятора, що було реалізовано в наступному розділі дисертації.

Виходячи з аналізу отриманих результатів досліджень програмної компоненти автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування опаленням будівлі можна зробити наступні висновки [179]:

– теплова потужність теплового насосу є значно чутливим параметром до показників сумарних теплових втрат будівлі: за умови підвищення сумарних теплових втрат будівлі з $0,2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год.}$ до $0,5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год.}$ стале значення теплової потужності зростає в діапазоні від $1,25 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год.}$ (за середньої температури повітря навколишнього середовища $3 \text{ }^\circ\text{C}$) до $1,85 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год.}$ (за середньої температури повітря навколишнього середовища $3 \text{ }^\circ\text{C}$), що становить 48 % від початкової теплової потужності;

– теплова потужність теплового насосу є значно чутливою до динаміки температури повітря навколишнього середовища: при зміні температури на $12 \text{ }^\circ\text{C}$ (у діапазоні від $-3 \text{ }^\circ\text{C}$ до $9 \text{ }^\circ\text{C}$) теплова потужність зростає з $1,0 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год.}$ до $1,5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год.}$ (за мінімальних сумарних теплових втрат $0,2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год.}$) та з $1,45 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год.}$ до $2,4 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год.}$ (за сумарних теплових втрат $0,5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год.}$), що у відносних одиницях становить від 50 % до 65 %;

– зазначені вище чисельні характеристики динаміки теплової потужності теплонасосного обладнання під час опалення будівель проведені з розрахунку досягнення цільової температури $21 \text{ }^\circ\text{C}$ з початкового значення $12 \text{ }^\circ\text{C}$ за добу.

Таким чином, дослідження з розробки програмного забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування опаленням будівель, які було реалізовані в цьому підрозділі дисертації шляхом створення, тестування й валідації програмної компоненти мовою Python в онлайн-середовищі

JupyterLite дозволили обґрунтувати вимоги до техніко-функціональних характеристик теплового насосу, що, в свою чергу, є центральним структурним елементом розроблюваної технології автоматизованого керування опаленням.

3.3 Інформаційне забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування кондиціонуванням будівель

Як було зазначено в пп. 2.5 і 2.6, одним із основних режимів функціонування досліджуваної технології автоматизованого керування теплонасосними системами є режим кондиціонування, який ініціалізується після закінчення опалювального сезону в теплу пору року. Цей режим також має супроводжуватись накопиченням енергії в тепловому акумуляторі.

Автоматизоване керування температурою будівель у режимі кондиціонування на основі комп'ютерно-інтегрованих методів і засобів з подальшим накопиченням енергії в тепловому акумуляторі дозволяє забезпечити стабільний і комфортний мікроклімат у житлових будівелях і адміністративних спорудах із урахуванням оптимізації показників енергоспоживання та енерговитрат. Інформаційне забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування режимом кондиціонування дозволяє враховувати дестабілізуючі фактори та інформативні параметри різної природи, такі як погодні умови, фізико-хімічні властивості матеріалів будівлі, конструкції будівель, сезонність та інше.

В основу розроблюваного інформаційного забезпечення автоматизованої технології кондиціонування будівель із використанням запропонованого комп'ютерно-інтегрованого методу підвищення енергоефективності теплонасосних систем за аналогією з процесом опалення (див. п. 3.1) покладено модель, яка включає й реалізує наступні процедури, операції та функції [179]:

– моніторинг температури повітря навколишнього середовища та режимів роботи функціональних елементів системи (див. рис. 2.36: система кондиціонування й вентиляції, випаровувач, конденсатор, тепловий насос і

тепловий акумулятор), а також зональний комп'ютерно-інтегрований моніторинг температури повітря в будівлі;

– комп'ютерно-інтегрована обробка даних моніторингу на основі мікроконтролерних засобів;

– автоматизоване керування режимами роботи теплового насосу (відбирання та скидання теплової енергії до головного теплообмінника);

– аналіз енергоефективності реалізації запропонованого комп'ютерно-інтегрованого методу керування системами теплонасосного кондиціонування будівель.

Таким чином, запроповану узагальнену графічну інтерпретацію розробленого вище інформаційного забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування режимом кондиціонування будівель у вигляді функціональної схеми та блок-схеми з урахуванням відомих результатів досліджень [189, 190] наведено на рисунках 3.4 і 3.5, відповідно.

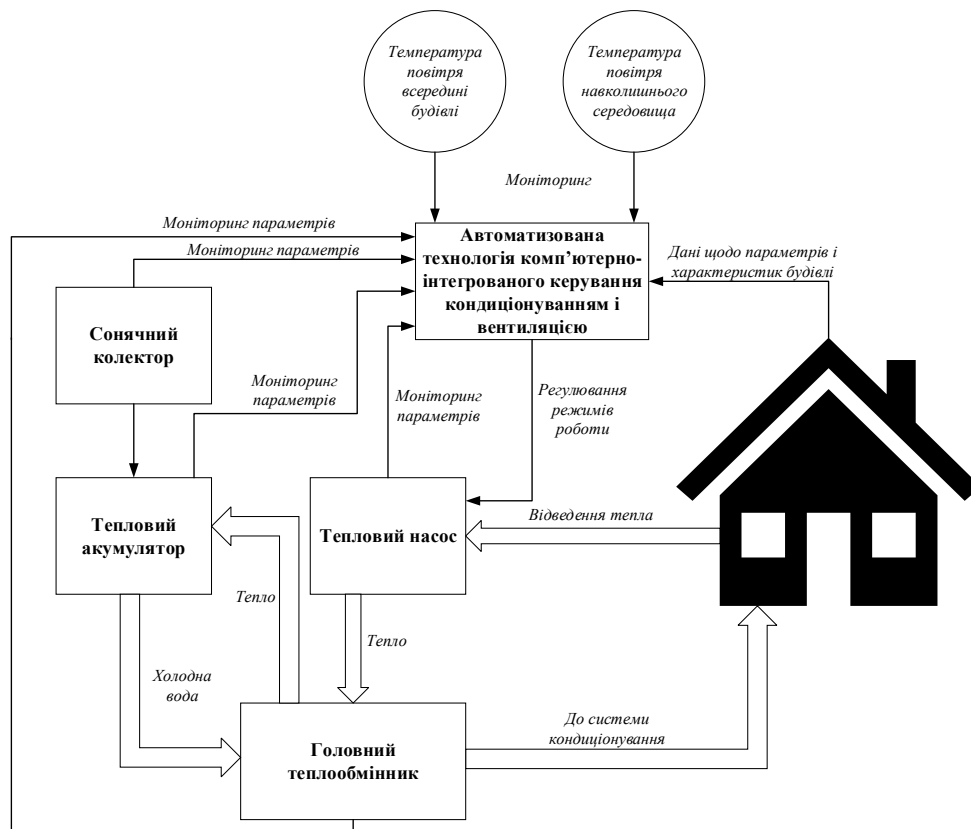


Рисунок 3.4 – Функціональна схема реалізації інформаційної моделі комп'ютерно-інтегрованої підсистеми кондиціонування будівель

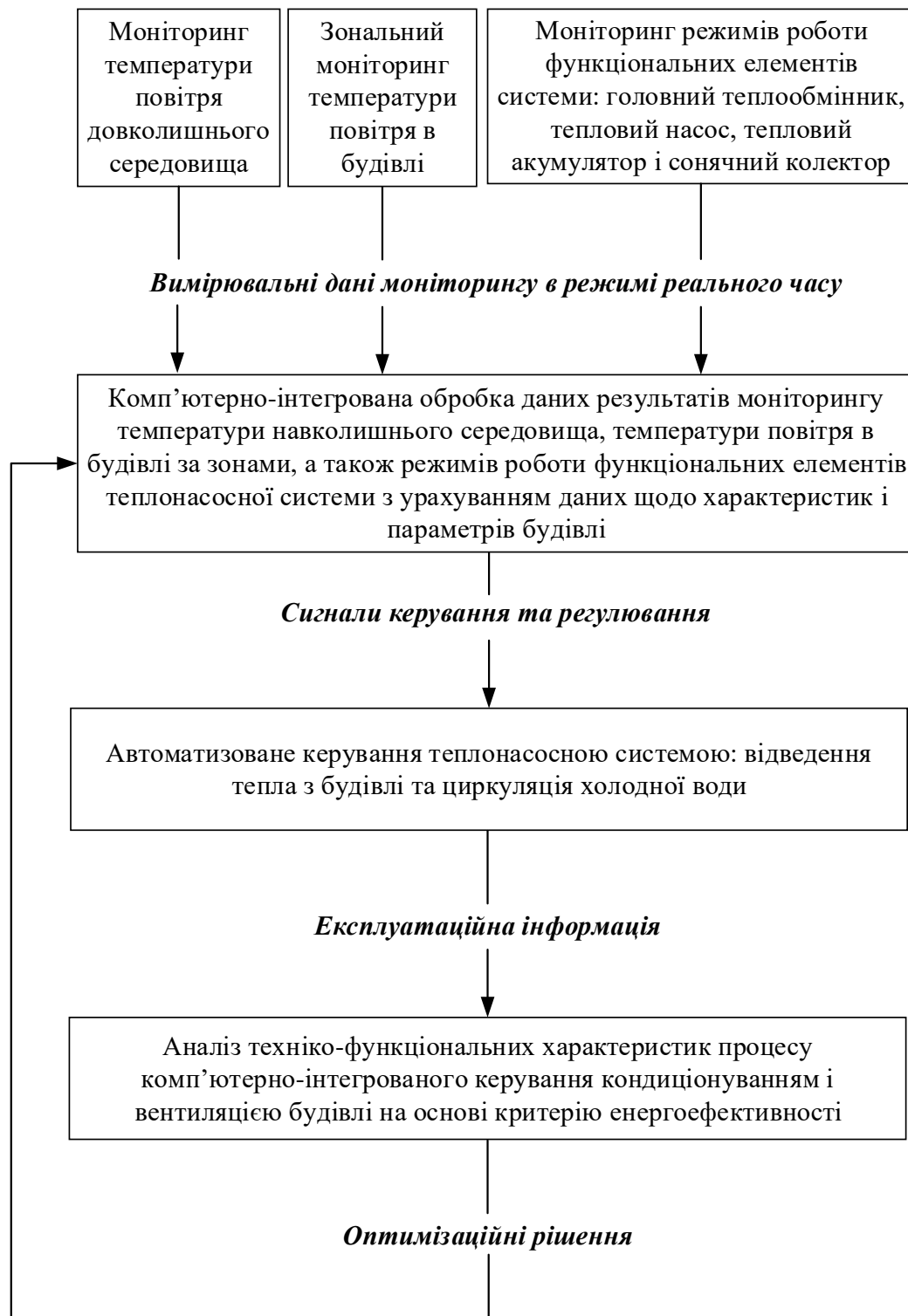


Рисунок 3.5 – Блок-схема реалізації інформаційної моделі енергоефективного комп'ютерно-інтегрованого керування режимом кондиціонування будівель

Основною метою вирішення науково-дослідного завдання розробки інформаційного забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування режимом кондиціонування будівель є формулювання

сукупності вимог до вбудованої програмної компоненти автоматизованого керування цим процесом. Таким чином, виникає необхідність у розробці відповідного математичного опису основних етапів збору та обробки даних з наступним генеруванням керуючих і регулюючих сигналів у відповідності до наведеної вище інформаційної моделі (див. рис. 3.4 і 3.5).

В основу запропонованого математичного опису автоматизованого керування процесом кондиціонування будівель із можливістю накопичення тепла в тепловому акумуляторі покладено модель теплового балансу будівлі з урахуванням регулюючих впливів [191, 192]:

$$T_{in}(t+1) = T_{in}(t) + \frac{\alpha(T_{out}(t) - T_{in}(t)) + \beta \cdot u(t)}{S_{area}}, \quad (3.6)$$

де T_{in} – температура повітря всередині будівлі; T_{out} – температура повітря навколишнього середовища; α – коефіцієнт теплообміну між будівлею та навколишнім середовищем; β – коефіцієнт обліку зовнішніх умов; u – сигнал керування; S_{area} – сумарна площа будівлі, що враховує наступні поверхні: стеля, підлога, вікна та стіни; t – поточний момент час.

Варто зазначити, що в рівнянні (3.6) враховано конкуруючі процеси теплообміну, а саме: нагрів будівлі за рахунок більш високих зовнішніх температур в порівнянні з цільовою температурою в приміщенні $\alpha(T_{out}(t) - T_{in}(t))$ та сумарні втрати тепла через стіни, вікна, стелю й підлогу будівлі $\beta \cdot u(t)$.

Параметр (u) у рівнянні (3.6) є регульованим, а отже, потребує вибору закону регулювання. З аналізу апріорної інформації щодо синтезу регуляторів температури різного класу будівель [193] встановлено, що задовільними властивостями характеризуються ПІ-регулятори. В свою чергу, цей тип регуляторів під час автоматизованого керування температурою будівель у режимі кондиціонування може бути описаний наступним рівнянням:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_I \sum_{i=0}^T e_i \Delta t, \quad (3.7)$$

де u – сигнал керування теплонасосною системою; K_p – пропорційний коефіцієнт; K_I – інтегральний коефіцієнт; e – похибка регулювання; t – поточний момент часу; i – порядковий номер відліку часу; Δt – аналізований часовий інтервал; T – період.

У формулі (3.7) похибка регулювання температури в режимі кондиціонування на основі ПІ-закону обчислюється в дискретні моменти часу програмним блоком автоматизованої технології на основі даних моніторингу температури в приміщенні як різниця між цільовою та поточною температурою повітря в будівлі аналогічно до процесу опалення з використанням формули (3.4).

Теплова потужність системи кондиціонування (утилізації тепла), яка ґрунтується на принципі, що відображений на функціональній схемі реалізації інформаційної моделі автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування режимом кондиціонування (див. рис. 3.4), може бути оцінена за формулою [194, 195]:

$$P_C = S_{area} \cdot |u(t)|, \quad (3.8)$$

де P_C – теплова потужність системи кондиціонування (утилізації тепла); u – сигнал керування теплонасосною системою; S_{area} – сумарна площа будівлі, що враховує наступні поверхні: стеля, підлога, вікна та стіни; t – поточний момент часу.

У формулі (3.8) модуль сигналу керування теплонасосною системою ($|u(t)|$) показує напрямок руху теплової енергії, а саме, її відведення (охолодження) будівлі.

Таким чином, дослідження з розробки інформаційного забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування режимом кондиціонування будівель за рахунок утилізації (відведення) тепла, які були реалізовані в цьому підрозділі дисертації шляхом синтезу функціональної та блок-

схеми інформаційної моделі досліджуваної технології, а також математичного опису основних етапів збору та обробки даних моніторингу параметрів процесів і об'єктів, що реалізують кондиціонування будівель, з наступним генеруванням керуючих сигналів тепловим насосом задля досягнення й підтримання цільової температури повітря всередині будівлі, становлять собою алгоритмічну основу програмного забезпечення досліджуваної технології автоматизованого керування кондиціонуванням будівель.

3.4 Програмне забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування кондиціонуванням будівель

Базову функціонально-алгоритмічну основу розроблюваного програмного забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування режимом кондиціонування будівель становить наступна сукупність процедур, функцій і операцій, які відпрацьовуються мікроконтролерним блоком у режимі реального часу [179]:

- завдання цільового значення температури повітря в будівлі, яке має бути досягнуто та підтримуватись протягом встановленого періоду часу;
- паралельний комп'ютерно-інтегрований моніторинг температури повітря навколишнього середовища та внутрішньої температури повітря в будівлі;
- оцінка відхилення температури повітря в будівлі від її цільового значення за формулою (3.4);
- обчислення сигналу регулювання температури за формулою (3.7);
- оцінка показників приросту та втрат тепла за рахунок теплообміну з навколишнім середовищем і впливом на підсистему кондиціонування;
- розрахунок оновленого значення температури всередині будівлі;
- обчислення теплової потужності автоматизованої технології керування процесом кондиціонування будівлі.

Під час розробки програмного забезпечення було взято такий самий об'єкт, як і під час досліджень технології керування опаленням, а саме: одноповерхова

будівля з внутрішнім об'ємом 450 м³ та габаритними розмірами 15x12x2,5 м. Будівельний матеріал несучого шару огорожувальних конструкцій – легкий бетон. Матеріал теплоізоляції – мінеральна вата. Статистичні дані щодо динаміки температури повітря навколишнього середовища обрані для кліматичних умов Дніпропетровської області. Під час розробки програмної компоненти досліджуваної технології ПІ-регулятор налаштовано для підтримання цільової температури повітря в будівлі на рівні 22 °С, в той час як температура навколишнього середовища змінюється від 30 °С до 36 °С [179]. Результати розробки відповідного програмного забезпечення з описом прикладного призначення основних процедур і функцій наведено в таблиці 3.2, а повний програмний код представлено в додатку В (див. дод. В.2).

Таблиця 3.2 – Основні процедури та функції програмної компоненти автоматизованої технології керування процесом кондиціонування будівель

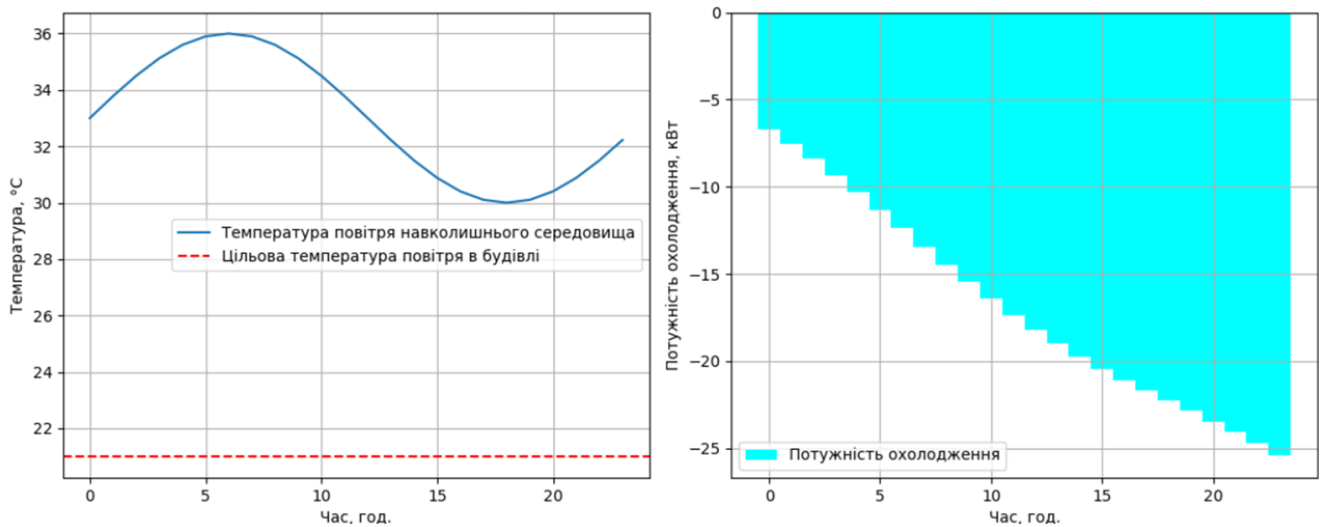
| Призначення | Синтаксис |
|---|--|
| Налаштування початкових параметрів моделі | <pre>area = 450 initial_temp_indoor = 30.0 target_temp_indoor = 21.0 min_outdoor_temp = 30.0 max_outdoor_temp = 36.0</pre> |
| Налаштування ПІ-регулятора | <pre>Kp = 0.1 Ki = 0.01 class PIController: def __init__(self, Kp, Ki): self.Kp = Kp self.Ki = Ki self.integral = 0</pre> |
| Налаштування коефіцієнтів теплообміну та динаміки температури повітря в будівлі та навколишнього середовища | <pre>heat_exchange_coefficients = np.arange(1, 5, 1) initial_temp_indooreratures = np.linspace(initial_temp_indoor, target_temp_indoor, hours_per_day) outdoor_temperatures = (max_outdoor_temp - min_outdoor_temp) / 2 * np.sin(2 * np.pi * time_intervals / hours_per_day) + (max_outdoor_temp + min_outdoor_temp) / 2</pre> |

Продовження табл. 3.2

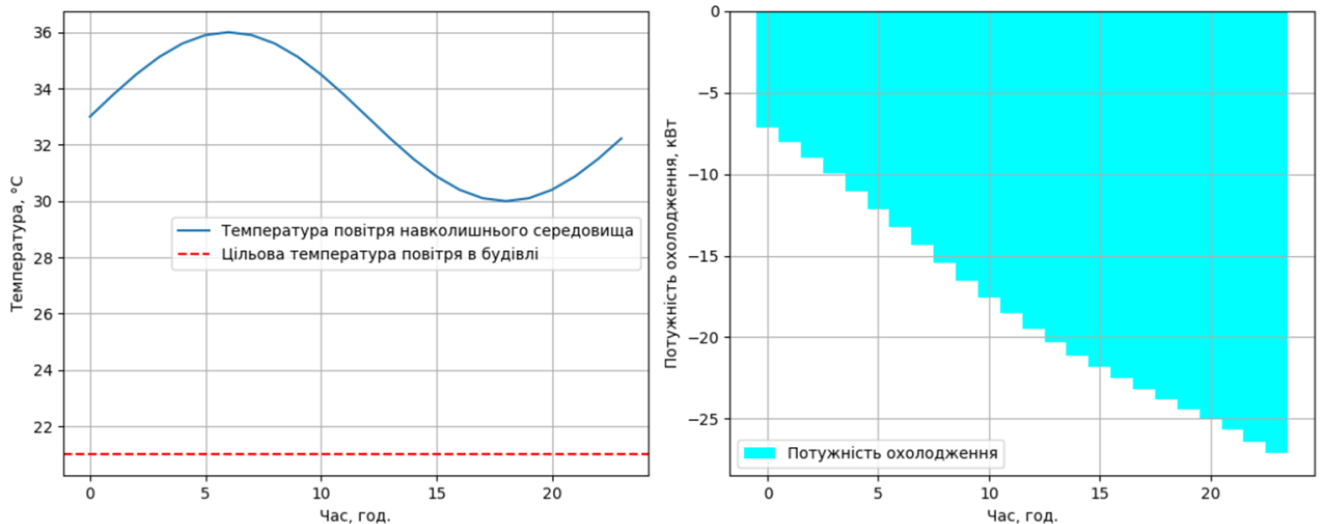
| | |
|--|---|
| Основна функція програми кондиціонування будівлі | <pre> # Реалізація ПІ-регулювання температури повітря в будівлі for i, heat_exchange_coeff in enumerate(heat_exchange_coefficients): temperature_controller = PIController(Kp, Ki) heat_powers = [] indoor_temperatures = [] current_indoor_temp = initial_temp_indooreratures[0] for t in time_intervals: outdoor_temp = outdoor_temperatures[t] err_temp = target_temp_indoor - current_indoor_temp control_signal = temperature_controller.control(err_temp) # Теплова модель будівлі delta_t = outdoor_temp - current_indoor_temp heat_gain = area * 0.1 * delta_t heat_loss = heat_exchange_coeff * (current_indoor_temp - outdoor_temp) # Розрахунок поточної потужності heat_power = np.abs(control_signal) * area / 1000 heat_powers.append(heat_power) # Розрахунок поточної температури повітря в будівлі current_indoor_temp += (heat_gain - heat_loss + control_signal) / area # Накопичення значень температури для графічного відображення indoor_temperatures.append(current_indoor_temp) </pre> |
|--|---|

На підставі реалізації програмної компоненти досліджуваної

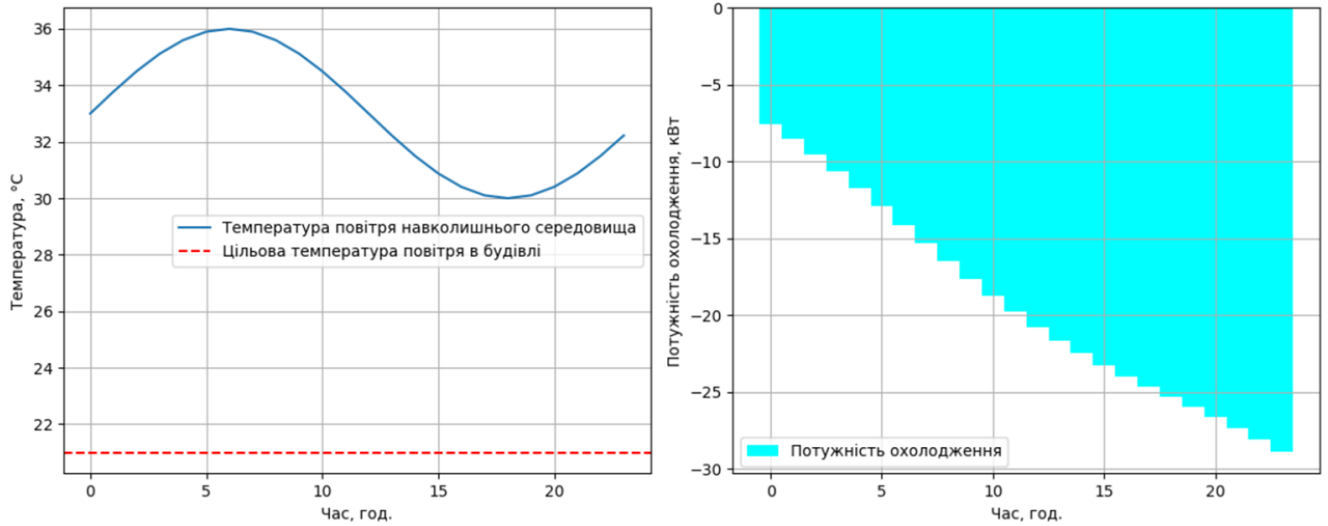
автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування режимом кондиціонування будівель з використанням теплового насосу для утилізації тепла мовою Python в онлайн-середовищі JupyterLite (див. табл. 3.2) [187, 188] було отримано графічні залежності (див. рис. 3.6), які дозволили обґрунтувати вимоги до техніко-функціональних параметрів і характеристик теплонасосного обладнання, яке використовується в режимі кондиціонування будівель [179].



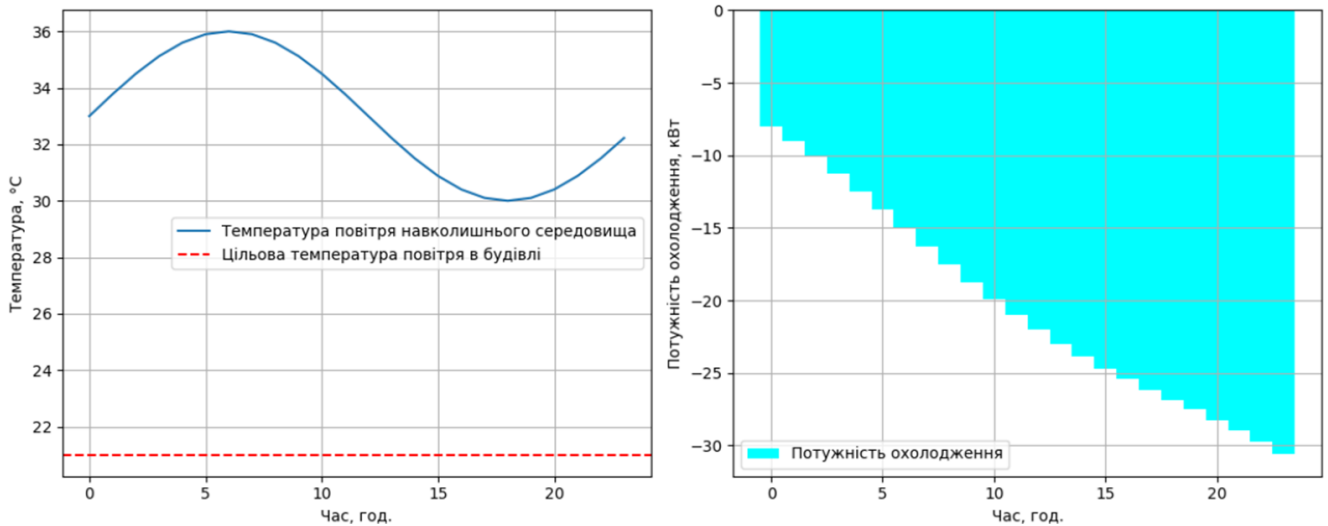
а) коефіцієнт теплообміну з навколишнім середовищем – 1 °C/год.



б) коефіцієнт теплообміну з навколишнім середовищем – 2 °C/год.



в) коефіцієнт теплообміну з навколишнім середовищем – 3 °C/год.



г) коефіцієнт теплообміну з навколишнім середовищем – 4 °C/год.

Рисунок 3.6 – Графічні залежності динаміки потужності теплового насосу під час кондиціонування (утилізації тепла) будівель

Варто зазначити, що графічні залежності, які наведено на рисунку 3.6, характеризують добову динаміку теплової потужності під час кондиціонування будівель (від'ємні значення теплової потужності на графічних залежностях на рисунку 3.6 показують напрямок руху теплової енергії – відведення з будівлі), а отже, для більш швидкого охолодження (утилізації тепла) та підтримання відповідної цільової температури шляхом кондиціонування та вентиляції необхідно масштабувати теплову потужність насоса, яку зазначено за віссю

ординат (параметр – потужність охолодження) за відповідних зовнішніх умов, шляхом переналаштування пропорційного та інтегрального коефіцієнтів ПІ-регулятора, що було реалізовано в наступному розділі дисертації..

Виходячи з аналізу отриманих результатів досліджень програмної компоненти автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування кондиціонуванням можна зробити наступний проміжний висновок. Теплова потужність теплового насосу є значно чутливим параметром до показника теплообміну з навколишнім середовищем: підвищення коефіцієнта теплообміну в 4 рази (з 1 °С/год. до 4 °С/год.) призводить до збільшення теплової потужності системи кондиціонування на 20 % (з 25 кВт до 30 кВт) за умови рівності температури повітря навколишнього середовища. Зазначені вище чисельні характеристики динаміки теплової потужності теплонасосного обладнання під час кондиціонування (утилізації тепла) будівель проведені з розрахунку досягнення цільової температури 22 °С з початкового значення 33 °С (середня температура навколишнього середовища) в досліджуваних кліматичних умовах [179].

Таким чином, дослідження з розробки програмного забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування процесом кондиціонування будівель, які було реалізовано в цьому підрозділі дисертації шляхом створення, тестування та валідації програмної компоненти мовою Python в онлайн-середовищі JupyterLite дозволили обґрунтувати вимоги до техніко-функціональних характеристик теплонасосного обладнання (див. рис. 3.6), що, в свою чергу, є центральним структурним елементом розробленої технології автоматизованого керування кондиціонуванням будівель.

3.5 Висновки за третім розділом

У цьому розділі дисертації було розв'язано одну з основних її задач, що присвячена розробці та дослідженню інформаційного й програмного забезпечення автоматизованої технології керування теплонасосними системами під час

протікання процесів опалення та кондиціонування. Основні кількісні та якісні результати цього розділу полягають у наступному:

1. Розроблено інформаційне забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування опаленням будівель, яке враховує наступні функціональні процедури: моніторинг температури повітря навколишнього середовища, температури ґрунту та режимів роботи функціональних елементів системи, а також зональний моніторинг температури повітря в будівлі; комп'ютерно-інтегрована обробка даних моніторингу; автоматизоване керування тепловим насосом та режимами зональної подачі теплоносія до будівлі; аналіз енергоефективності реалізації запропонованого комп'ютерно-інтегрованого методу керування системами теплонасосного опалення. Це дозволило обґрунтувати алгоритмічну основу програмного забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування опаленням будівель.

2. Реалізовано та протестовано методами комп'ютерного експерименту програмне забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування опаленням будівель. В результаті було встановлено, що: теплова потужність теплового насосу є значно чутливим параметром до показників сумарних теплових втрат будівлі (за умови підвищення сумарних теплових втрат будівлі з $0,2$ °C/год. до $0,5$ °C/год. стале значення теплової потужності зростає на 48 %); теплова потужність теплового насосу є значно чутливою до динаміки температури повітря навколишнього середовища: при зміні температури на 12 °C (у діапазоні від -3 °C до 9 °C) теплова потужність зростає в середньому на 58 %. Це дозволило обґрунтувати вимоги до техніко-функціональних характеристик теплового насосу, що, в свою чергу, є центральним структурним елементом запропонованої технології автоматизованого керування опаленням будівель.

3. Розроблено інформаційне забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування кондиціонуванням будівель, яке враховує наступні функціональні процедури: моніторинг температури повітря навколишнього середовища та режимів роботи функціональних елементів системи, а також зональний комп'ютерно-інтегрований моніторинг температури повітря в

будівлі; комп'ютерно-інтегрована обробка даних моніторингу на основі мікроконтролерних засобів; автоматизоване керування режимами роботи теплового насосу (відбирання та скидання теплової енергії до головного теплообмінника); аналіз енергоефективності реалізації запропонованого комп'ютерно-інтегрованого методу керування системами теплонасосного кондиціонування будівель. Це дозволило обґрунтувати алгоритмічну основу програмного забезпечення технології автоматизованого керування процесом кондиціонування будівель.

4. Реалізовано та протестовано методами комп'ютерного експерименту програмне забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування кондиціонуванням будівель. У результаті цього було встановлено, що теплова потужність теплового насосу є значно чутливим параметром до показника теплообміну з навколишнім середовищем: збільшення коефіцієнту теплообміну в 4 рази (з 1 °С/год. до 4 °С/год.) призводить до зростання теплової потужності підсистеми кондиціонування на 20 % за умови рівності температури повітря навколишнього середовища (змінюється в діапазоні від 30 °С до 36 °С) під час підтримання цільової температури повітря в будівлі на рівні 22 °С.

5. Отримані результати досліджень цього розділу використано в якості структурно-алгоритмічного базису під час подальших досліджень і розробок автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування процесами опалення та кондиціонування будівель методами імітаційного і комп'ютерного експерименту задля оцінки об'єктивності та адекватності запропонованого інформаційного й програмного забезпечення досліджуваної автоматизованої технології.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРОБКИ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТЕПЛОНАСОСНИМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

4.1 Результати розробки та дослідження комп'ютерної моделі апаратно-програмного забезпечення технології автоматизованого керування процесами опалення та гарячого водопостачання

У цьому підрозділі розглядається процес комп'ютерного моделювання автоматизованої технології керування процесом опалення (див. рис. 2.17) за допомогою засобів MATLAB Simscape (безкоштовна студентська версія). Запропонована та розроблена технологія призначена для створення в приміщеннях будівель температурного режиму, що відповідає санітарним вимогам та системи акумулювання теплової енергії кондиціонування в теплий період (див. рис. 2.1) з подальшим її використанням в автоматизованій системі гарячого водопостачання.

В якості основи для моделювання було взято одноповерхову будівлю з внутрішнім об'ємом 450 м³ та габаритними розмірами 15x12x2,5 м (див. рис. 4.1). Експлікацію приміщень будівлі наведено у таблиці 4.1.

Матеріал несучого шару огорожуючих конструкцій – легкий бетон, що забезпечує міцну й довговічну конструкцію, зберігаючи при цьому легкість у обробці та монтажі. Матеріал теплоізоляції – мінеральна вата, матеріал, відомий своїми задовільними тепловими властивостями, що допомагає підтримувати комфортну температуру в будинку протягом усього року, зменшуючи тепловтрати взимку та надходження тепла влітку. Декоративно-оздоблювальні матеріали в процесі моделювання не враховано. Статистичні дані температур зовнішнього повітря обрані для кліматичних умов Дніпропетровської області.

Таблиця 4.1 – Експлікація приміщень

| № | Назва приміщень | Назва в моделі | Площа, м.кв. |
|------------------------|-----------------|---------------------|--------------|
| 1 | Спальня 1 | Bedroom 1 | 19,8 |
| 2 | Спальня 2 | Bedroom 2 | 20,5 |
| 3 | Кухня-вітальня | Kitchen-living room | 71,7 |
| 4 | Санвузол | – | 5,3 |
| 5 | Коридор | – | 10,8 |
| 6 | Спальня 3 | Bedroom 3 | 25,1 |
| 7 | Спальня 4 | Bedroom 4 | 15,4 |
| Житлова площа будинку | | – | 152,5 |
| Загальна площа будинку | | – | 180 |

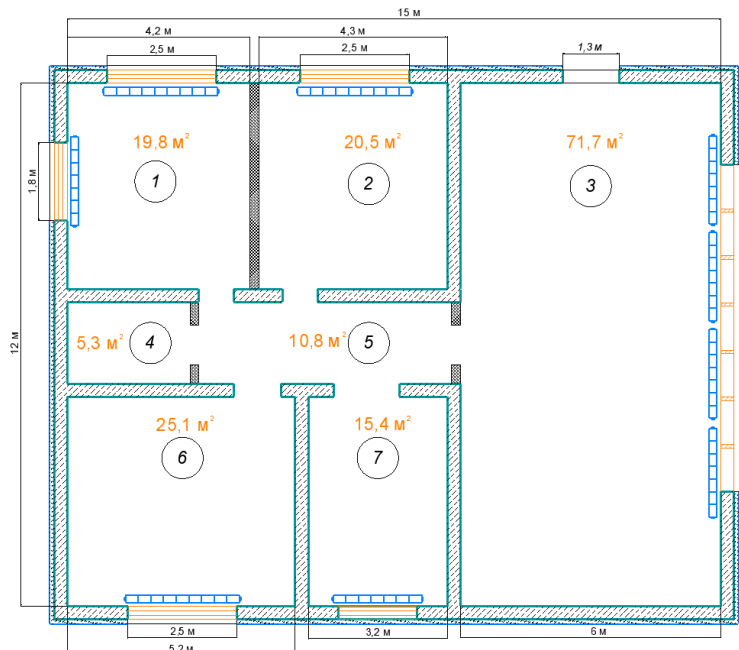


Рисунок 4.1 – План будинку

На рисунку 4.2 наведено комп'ютерну модель системи, яка призначена для створення в приміщеннях будинку (див. рис. 4.1) температурного режиму, що відповідає санітарним вимогам (для моделювання встановлено термостат на рівні 21°C), та для гарячого водопостачання, де: 1 – регулятор «Controller» для генерації завдання на відповідні актуатори в системі з метою підтримки заданої температури в будинку; 2 – блок конфігурації холодоагенту «Two-Phase Fluid»; 3 – підсистема геотермального теплового насосу «Heat pump»; 4 – блок завдання температури навколишнього середовища «Ambient temperature variation»; 5 – підсистема з тепловою моделю приміщень житлового будинку «House Subsystem», радіаторами гарячого водопостачання для розподілу тепла та

теплового акумулятора; 6 – підсистема «Underground Environment», яка описує ряд з'єднаних труб у єдиний контур, що закопаний горизонтально на незначній глибині біля житлового будинку; 7 – блок завдання температури ґрунту «Underground temperature variation». Деталізацію налаштування параметрів моделі у вигляді програмного коду в середовищі Matlab наведено в додатку В (див. дод. В.3). Геотермальний тепловий насос (див. рис. 4.2, позначка 3) використовує R410a – двофазний рідкий холодоагент (див. рис. 4.2, позначка 2) як робочу рідину (обрано у якості аналогу до фреон–11). Тепловий насос забирає природне тепло, що зберігається в ґрунті (див. рис. 4.2, позначка 6), і передає його до радіаторів гарячого водопостачання (див. рис. 4.2, позначка 5). Регулятор (див. рис. 4.2, позначка 1) генерує впливи керування компресором у підсистемі теплового насосу (див. рис. 4.2, позначка 3) та насосами в підсистемі теплової моделі будинку (див. рис. 4.2, позначка 5) для підтримки заданого значення температури. В розробленій моделі регулятор (див. рис. 4.2, позначка 1) налаштовано для підтримання середньої температури повітря в будівлі на заданому рівні 21 °С, в той час як температура навколишнього середовища змінюється від –3 °С до 9 °С, а температура ґрунту – від 6 °С до 10 [196].

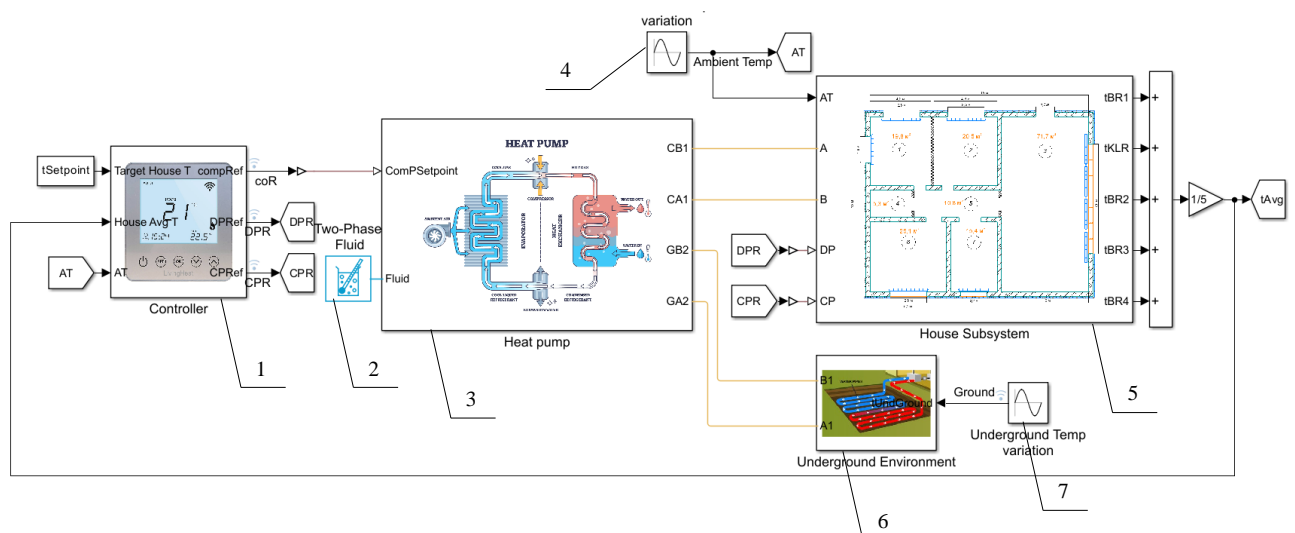


Рисунок 4.2 – Схема комп'ютерної моделі автоматизованої технології керування опаленням і гарячим водопостачанням на базі геотермального теплового насосу

На рисунку 4.3 зображено підсистему «House Subsystem» – теплову модель житлового будинку з радіаторами гарячого водопостачання, де: 1 – циркуляційний насос, що забезпечує рух потоку води через конденсатор теплового насосу (див. рис. 4.2, позначка 3); 2 – тепловий акумулятор, у якому зберігається гаряча вода, що виходить із конденсатора; 3 – розподільчий насос, який подає потік гарячої води з ТА до радіаторів; 4 – блок конфігурації фізико-хімічних властивостей рідини до підключеної мережі термальних рідин; 5 – блок підсистеми радіаторів (параметри індивідуальні для кожної кімнати); 6 – блок підсистеми теплової моделі приміщення (параметри індивідуальні для кожної кімнати). В підсистемі житлового будинку (див. рис. 4.3) задаються теплофізичні характеристики будівлі, а саме: структура, теплопровідність і товщина слоїв огорожуючих конструкцій, площа та тип скління, рівень побутових тепловиділень та ін. Описується температурний режим зовнішнього середовища на основі статистичних даних обраної кліматичної зони, що характеризується середньою за місяць температурою і враховує її добові коливання [196].

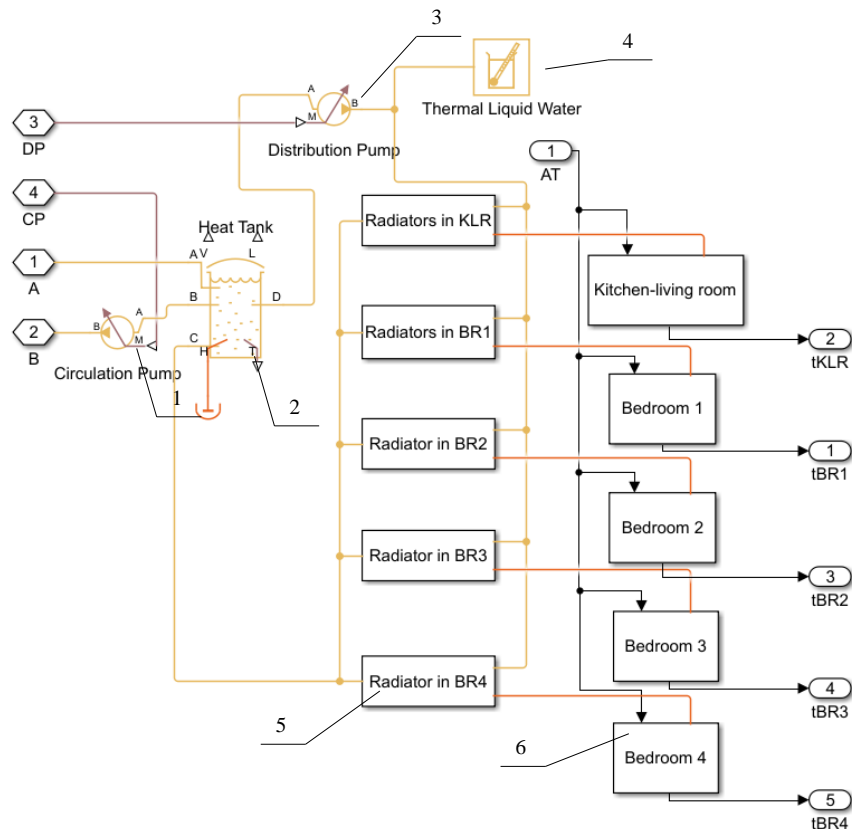


Рисунок 4.3 – Схема підсистеми «House Subsystem»

Житловий будинок (див. рис. 4.1) має радіатори (один або декілька, див. рис. 4.3, позначка 5) різної конфігурації в кожній кімнаті та п'ять кімнат, які потрібно опалювати. Компоненти моделей радіаторів наведено на рисунку 4.4, де: 1 – труба [197]; 2 – теплова маса [198]; 3 – конвективний теплообмін [199].

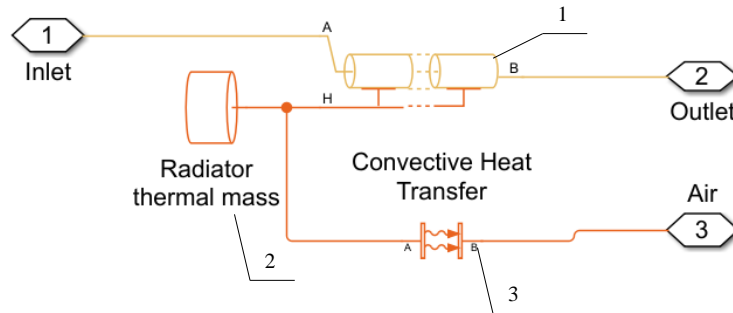


Рисунок 4.4 – Схема підсистеми з моделлю радіатора

Блок труби «Pipe (TL)» [197] (див. рис. 4.4, позначка 1) моделює потік теплоносія через трубу. Блок знаходить температуру вздовж усієї труби, виходячи з різниці температур між портами, висоти труби та додаткової теплопередачі в порті H. Врахування теплопередачі до стінок труби та від них здійснюється відповідно до аналітичної моделі – кореляція Гнілінського (Gnielinski correlation) [200], яка моделює число Нуссельта (Nusselt number) як функцію чисел Рейнольдса і Прандтля (Reynolds and Prandtl) із заздалегідь визначеними коефіцієнтами. Теплообмін між рідиною та стінками труби відбувається шляхом конвекції Q_{Conv} і теплопровідності Q_{Cond} , де чистий тепловий потік QH дорівнює $QH = Q_{Conv} + Q_{Cond}$ [197].

Передача тепла, що обумовлена процесом теплопровідності, розраховується за формулою (4.1) [197]:

$$Q_{Cond} = \frac{k_l S_H}{D} (T_H - T_l), \quad (4.1)$$

де D – номінальний гідравлічний діаметр; k_l – коефіцієнт теплопровідності

теплоносія, визначений зсередини для кожного сегмента труби; S_H – площа поверхні стінок труби; T_H – температура стінки труби; T_I – температура рідини у внутрішньому вузлі блоку.

Теплопередача за рахунок конвекції розраховується за формулою (4.2) [197]:

$$Q_{Conv} = c_{p,Avg} |\dot{m}_{Avg}| (T_H - T_{In}) \left[1 - \exp\left(-\frac{hS_H}{c_{p,Avg} |\dot{m}_{Avg}|}\right) \right], \quad (4.2)$$

де $c_{p,Avg}$ – середня питома теплоємність рідини, яку блок обчислює за допомогою пошукової таблиці; \dot{m}_{Avg} – середня масова витрата через трубу; T_{In} – температура рідини на вході; h – коефіцієнт тепловіддачі труби.

Блок теплової маси «Thermal Mass» [198] (див. рис. 4.4, позначка 2) відображає здатність матеріалу або комбінації матеріалів зберігати внутрішню енергію. Маса матеріалу та його питома теплоємність характеризують цю властивість. Теплова маса розраховується за формулою (4.3) [198]:

$$Q = cm \frac{dT}{dt}, \quad (4.3)$$

де Q – тепловий потік; c – питома теплоємність матеріалу маси; m – маса; T – температура; t – час.

Під час моделювання прийнято, що тепла маса (параметр Mass type) залишається постійною.

Блок конвективного теплообміну «Convective Heat Transfer» [199] (див. рис. (4.4), позначка 3) моделює передачу тепла в тепловій мережі конвекцією за рахунок руху рідини. Швидкість тепловіддачі пропорційна різниці температур, коефіцієнту тепловіддачі та площі поверхні, що контактує з рідиною та розраховується за формулою (4.4) [199]:

$$Q = kA(T_A - T_B), \quad (4.4)$$

де Q – тепловий потік; k – коефіцієнт конвективної тепловіддачі; A – площа поверхні; T_A , T_B – температури двох тіл.

Для задачі моделювання коефіцієнт тепловіддачі приймається за константу.

Підсистема радіатора (див. рис. 4.4) моделює процес функціонування радіатора на основі теплопровідності та конвекції. Стінки радіатора заповнені гарячою водою від теплового акумулятора та передають тепло в кімнату (див. рис. 4.3, позначка б) шляхом випромінювання.

Кожна кімната обмінюється теплом з навколишнім середовищем через зовнішні стіни, дах та вікна (див. рис. 4.5).

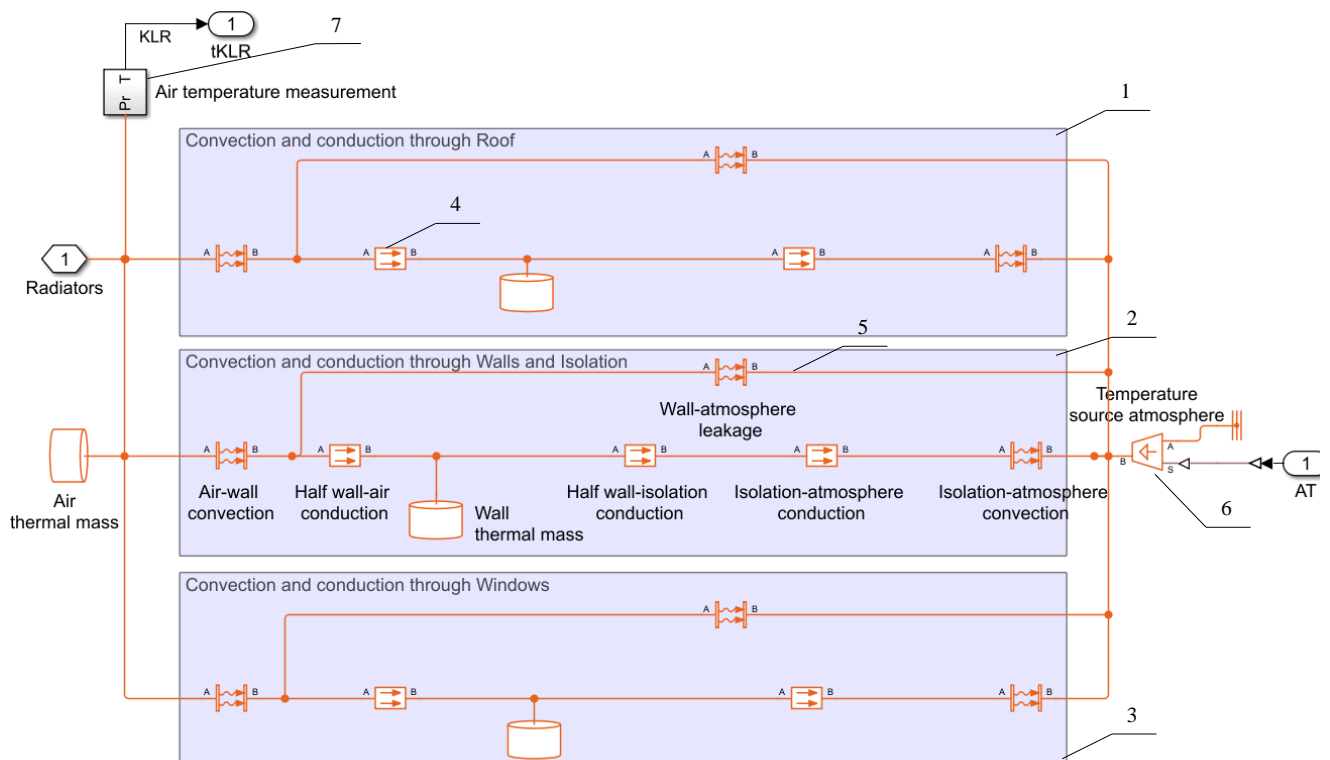


Рисунок 4.5 – Схема підсистеми моделі обміну тепла приміщення з навколишнім середовищем через дах, стіни та вікна

Схема підсистеми, яку наведено на рисунку 4.5, включає: 1 – шлях обміну тепла приміщення з навколишнім середовищем через дах; 2 – шлях обміну тепла

приміщення з навколишнім середовищем через стіни та теплоізоляцію (скловату); 3 – шлях обміну тепла приміщення з навколишнім середовищем через вікна; 4 – блок моделює передачу тепла в тепловій мережі шляхом процесу провідності через шар матеріалу; 5 – врахування втрат тепла в приміщенні через теплообмін із навколишнім середовищем; 6 – ідеальне джерело енергії в тепловій мережі, яке може підтримувати контрольовану різницю температур незалежно від швидкості теплового потоку, та використовується для врахування процесу додаткового нагріву/охолодження будинку в залежності від температури навколишнього середовища (теплове випромінювання); 7 – блок вимірювання температури повітря в приміщенні.

Кожен шлях (див. рис. 4.5, позначки 1–3) моделюється як комбінація теплової конвекції, теплопровідності та теплової маси. Наприклад, (див. рис. 4.5, позначка 2), обмін тепла приміщення з навколишнім середовищем через стіни та теплоізоляцію передбачає наступне: тепла енергія, що надходить на вхід системи «1 – Radiators», накопичується у блоці «Air thermal mass» – повітряна маса у приміщенні, далі тепло всередині приміщення передається від теплової повітряної маси до внутрішньої поверхні легких бетонних стін переважно шляхом конвекції (блок «Air-wall convection»). Коли тепло з повітря приміщення передається на внутрішню поверхню стіни (конвекція), то матеріал стіни починає поглинати це тепло. Далі тепло рухається крізь половину товщини стіни з легкого бетону шляхом теплопровідності (блок «Half wall-air conduction»). Швидкість передачі тепла залежить від теплопровідності бетону, а об'єм тепла на кожному кроці моделювання – від товщини стін та їх площі. Коли тепло проходить крізь стіну (процес теплопровідність), матеріал стіни зберігає частину теплової енергії. Поглинуте тепло зберігається в матеріалі стіни. Ця здатність зберігати тепло обумовлена питомою теплоємністю матеріалу, тобто кількістю тепла, необхідного для зміни температури матеріалу на певну величину. Коли температура всередині приміщення падає, то тепло, що зберігається в стіні, починає віддаватися назад у приміщення. Цей процес допомагає регулювати температуру в приміщенні, забезпечуючи необхідні теплові умови, коли температура повітря знижується.

Аналогічно, тепло, що накопичене в стіні, може також відвоитись у зовнішнє середовище, особливо коли зовнішня температура нижча за температуру стіни. Здатність стін зберігати й віддавати тепло допомагає підтримувати більш стабільну температуру в приміщенні, зменшуючи потребу в опаленні та охолодженні. Стримуючи температурні коливання, термомаса може сприяти економії енергії, оскільки зменшує навантаження на системи опалення та охолодження. Протягом дня приміщення може нагріватися під впливом сонячної радіації, електроприладів або інших джерел тепла. Стіни поглинають це надлишкове тепло, запобігаючи перегріванню приміщення. Вночі, коли зовнішня температура падає та може знадобитися опалення, стіни повільно віддають накопичене тепло, допомагаючи підтримувати кімнату в нагрітому стані. Таким чином, тепло дійсно зберігається в стіні завдяки процесу утворення теплової маси і це зберігання відіграє вирішальну роль під час регулювання температури в приміщенні та підвищенні загальної енергоефективності будівлі. Для врахування цього процесу під час моделювання було додано блок «Wall thermal mass». Далі тепло рухається крізь іншу половину товщини стіни шляхом теплопровідності (блок «Half wall-isolation conduction»). Коли тепло досягає скловолоконної ізоляції, швидкість передачі тепла значно сповільнюється через низьку теплопровідність скловолокна. Ізоляція діє як бар'єр, зменшуючи кількість тепла, що проходить крізь неї (блок «Isolation-atmosphere conduction»). Як тільки тепло досягає зовнішньої поверхні ізоляції, воно передається в зовнішнє середовище шляхом конвекції (блок «Isolation-atmosphere convection»). Втрати тепла від стін безпосередньо до навколишнього середовища враховано блоком «Convective Heat Transfer» з назвою «Wall-atmosphere leakage». Коефіцієнт втрат встановлено на рівні 14 % (9 % для даху, 18 % для вікон). Нарешті, процес сонячної радіації та інфрачервоне випромінювання навколишнього середовища та передачі тепла з навколишнього середовища до стін, враховано блоком «Controlled Temperature Source» із підписом «Temperature source atmosphere» (див. рис. 4.5, позначка 6).

Для спрощення моделі, зроблено припущення, що тепло не передається всередині приміщення між кімнатами. Початкова температура в будівлі прийнята

рівною 12 °С.

Блок «Conductive Heat Transfer» [201] (див. рис. 4.5, позначка 4) використано для моделювання процесу теплопровідності через шар матеріалу. Швидкість теплопередачі підпорядковується закону Фур'є та пропорційна різниці температур, теплопровідності матеріалу, площі, нормальній до напрямку теплового потоку, і обернено пропорційна товщині шару та розраховується за формулою [201]:

$$Q = k \frac{A}{D} (T_A - T_B), \quad (4.5)$$

де Q – тепловий потік; k – коефіцієнт теплопровідності матеріалу; A – площа, нормальна до напрямку теплового потоку; D – відстань між шарами, тобто товщина матеріалу; T_A – температура шару А; T_B – температура шару Б;

У процесі моделювання параметр теплопровідності вважається постійною величиною, а його значення відповідає характеристикам відповідних матеріалів.

Як зазначалось вище, тепла енергія на вході системи «1 – Radiators» (див. рис. 4.5) вивільняється радіаторами (див. рис. 4.3, позначка 5). Для задач моделювання всі радіатори в будинку з'єднані в один контур, таким чином, щоб за допомогою регулятора температури (див. рис. 4.2, позначка 1), можна було підтримувати середню температуру в усій будівлі, натомість незалежному регулюванню рівня температури в кожній кімнаті окремо. Радіатори, в свою чергу, отримують тепло від теплового акумулятора (див. рис. 4.3, позначка 2), до якого за допомогою циркуляційного насосу (див. рис. 4.3, позначка 1) нагнітається тепло від конденсатора теплового насосу.

Тепловий насос у цій роботі є геотермальним. Такий тип насосу використовує в даному випадку ґрунт в якості джерела тепла взимку. Ці теплові насоси менш поширені, ніж повітряні, але набувають все більшої популярності. Їх основна перевага полягає в тому, що вони не схильні до екстремальних температурних коливань, використовуючи ґрунт як джерело постійної температури, що робить їх найбільш енергоефективним типом теплових насосів. В комп'ютерній моделі, яку

наведено на рисунку 4.2, система геотермального теплового насосу представлена двома ключовими підсистемами: підсистема самого теплового насосу «Heat pump» (див. рис. 4.2, позначка 3) та підсистема «Underground Environment» з контуром, що закопаний горизонтально на глибині біля 2 метрів (див. рис. 4.2, позначка 6).

На рисунку 4.6 наведено схему теплообмінника типу «ґрунт-вода» (горизонтальні геоконтури), де: 1 – блок завдання параметрів антифризу (використано пропілен-гліколь); 2 – блок труби «Pipe (TL)» [197], аналогічний до наведеного на рисунку 4.4, позначка 1, моделює потік антифризу через геотермальний теплообмінник; 3 – блок «Pipe Bend (TL)» моделює вигин труби в геотермальному теплообміннику; 4 – ідеальне джерело енергії в тепловій мережі, блок аналогічний до наведеного на рисунку 4.5, позначка 6; 5 – блок «PS Constant» завдання об’ємної витрати; 6 – блок «Flow Rate Source (TL)» являє собою ідеальне джерело механічної енергії в мережі геотермального теплообмінника, яке може підтримувати постійну або контрольовану масову або об’ємну витрату незалежно від перепаду тиску; 7 – блок «Gas-Charged Accumulator (TL)» газонаповнений термальний рідинний акумулятор.

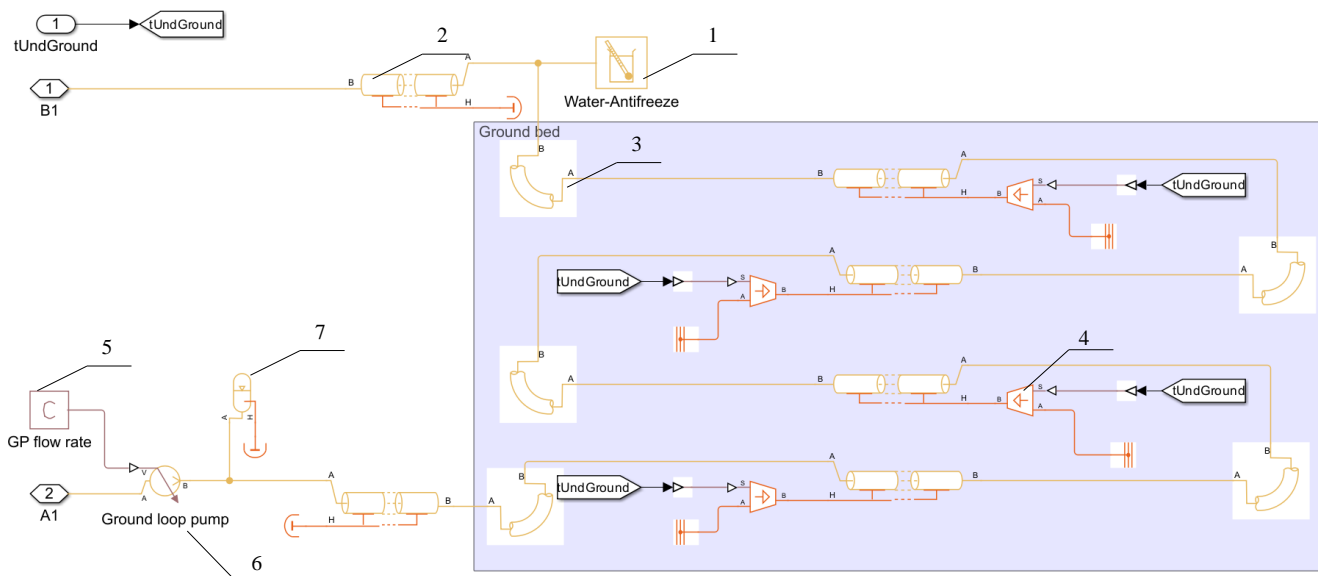


Рисунок 4.6 – Схема підсистеми «Underground Environment»

Система із замкнутим контуром (див. рис. 4.6) забирає тепло з ґрунту за допомогою безперервного контуру теплообмінника, закопаного під землею, а саме,

розчин антифризу, охолоджений холодильною системою теплового насоса (див. рис. 4.2, позначка 3) до температури на кілька градусів нижчої, ніж температура зовнішнього ґрунту, циркулює вздовж змодельованого трубопровода (комбінація блоків позначених 2 та 3 на рисунку 4.6) і поглинає тепло з ґрунту (див. рис. 4.6, позначка 4). Для імітації такого контуру було використано блок «Pipe (TL)» [197] та блок «Pipe Bend (TL)» [202]. За допомогою блоку Pipe Bend (TL) враховано вигини труби підземного контуру в мережі теплоносія, а також втрати через тертя й викривлення труби, а також додатково враховано стисливість рідини. Коефіцієнт втрат тиску через зміну геометрії складається з коефіцієнта поправки на кут C_{angle} та коефіцієнта вигину C_{bend} і розраховується за формулою (4.6):

$$K_{loss} = C_{angle} \cdot C_{bend} \cdot \quad (4.6)$$

Блок «Pipe Bend (TL)» [202] дозволяє розраховувати параметр C_{angle} за формулою (4.7):

$$C_{angle} = 0,0148\theta - 3,9716 \cdot 10^{-5} \theta^2, \quad (4.7)$$

де θ – кут вигину, град.

Блок «Pipe Bend (TL)» [202] дозволяє розраховувати параметр C_{bend} на основі табличного відношення радіуса вигину r до діаметра труби d , для вигинів під кутом 90° на основі даних з [203].

Блок «Gas-Charged Accumulator (TL)» [204] (див. рис. 4.6, позначка 7) являє собою контейнер із термальною рідиною під тиском із зарядом стисненого газу. Контейнер складається з камер для термальної рідини та газу, розділених герметичною та ізольованою діафрагмою. Діафрагма відокремлює герметичну газову камеру від рідинної камери з отвором. У верхній і нижній частині акумулятора є жорсткі обмежувачі. Якщо тиск на вході більший за тиск газового

заряду, то об'єм рідинної камери збільшується, стискаючи при цьому газову камеру. Якщо тиск на вході нижчий за тиск газового заряду, то об'єм рідинної камери зменшується, тим самим розгерметизуючи газову камеру. Жорсткі упори обмежують рух діафрагми, коли рідинна камера заповнена і коли рідинна камера порожня. Якщо вказана жорсткість пружини занадто низька, то об'єм рідини може миттєво впасти нижче нуля або піднятися вище ємності [205]. Таким чином, в комп'ютерній моделі, газонаповнений акумулятор у ґрунтовому контурі системи теплового насоса застосовано для стабілізації тиску, компенсації теплового розширення, накопичення надлишкової енергії та захисту системи від надлишкового тиску.

Рівняння збереження маси в «Gas-Charged Accumulator (TL)» має вигляд формули (4.8) [202]:

$$V_L \rho_L \left(\frac{1}{\beta_L} \frac{dp_L}{dt} - \alpha_L \frac{dT_L}{dt} \right) + \rho_L \frac{dV_L}{dt} = \dot{m}_A, \quad (4.8)$$

де ρ_L – густина теплової рідини; β_L – ізотермічний об'ємний модуль; α_L – коефіцієнт ізобарного теплового розширення; p_L – тиск теплоносія; T_L – температура теплової рідини; \dot{m}_A – масова витрата теплоносія, що надходить до акумулятора через порт А.

Уздовж зворотного магістрального трубопроводу антифриз надходить до випарника теплового насоса (див. рис. 4.7, позначка 1).

На рисунку 4.7 наведено схему моделі теплового насоса, де: 1 – теплообмінник-випарник; 2 – розширювальний клапан; 3 – компресор; 4 – теплообмінник-компресор; 5 – блоки вимірювання температури, тиску, питомої ентальпії, густини; 6 – блок «Receiver Accumulator (2P)» для гарантії, що в компресор повертається тільки пара; 7 – блок «Receiver Accumulator (2P)» гарантує, що до термостатичного розширювального клапана 2 повертається тільки рідина.

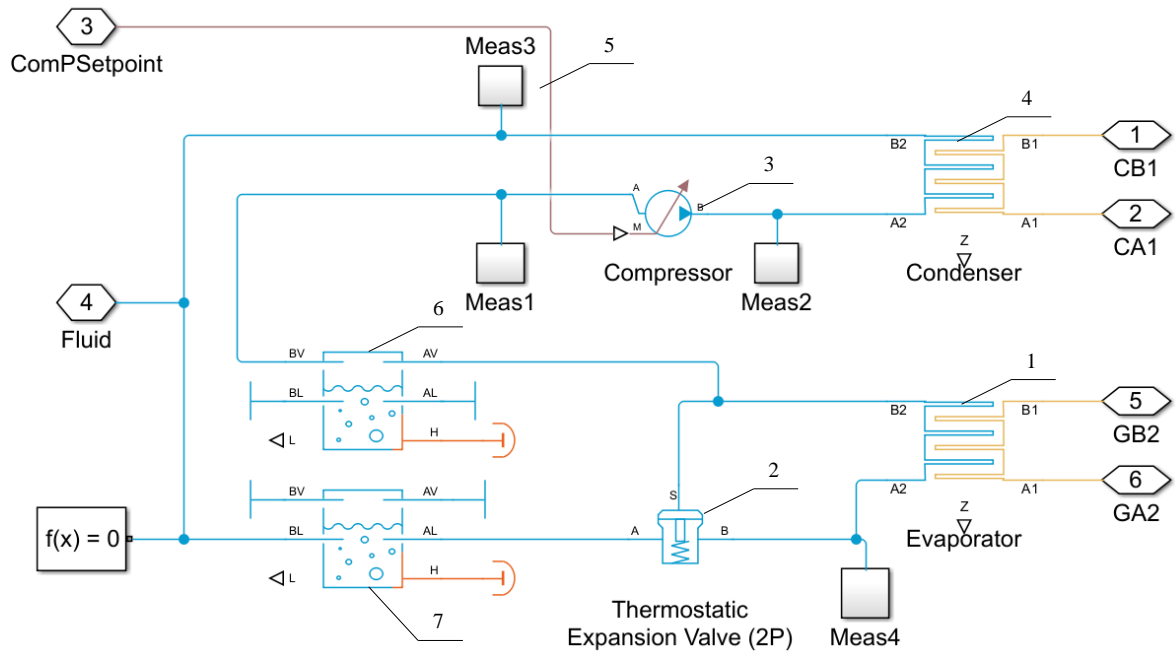


Рисунок 4.7 – Схема моделі підсистеми теплового насоса «Heat pump»

Холодний фреон «4 – Fluid» (вхід системи) всередині теплового насоса поглинає енергію антифризу через випарник [195, 206–209], охолоджуючи його на кілька градусів. Після цього антифриз прокачується насосом далі вздовж трубок, щоб забрати тепло з ґрунту знову.

Блок «Condenser Evaporator (TL-2P)» (див. рис. 4.7, позначки 1, 4) [206] застосовано для моделювання теплообмінника з однією мережею теплоносія, яка протікає між портами A1 і B1 та однією мережею двофазної рідини, яка протікає між портами A2 і B2. «Condenser Evaporator (TL-2P)» використано як для конденсатора, так і випарника теплового насоса. Потоки рідини у випарнику вирівняні в перехресній конфігурації, в компресорі – в зустрічній. При чому, для випарника з перехресним розрашуванням потоків встановлено умову термічного змішування в кожному з каналів потоку – обидві рідини не змішуються, що означає, що рідина може рухатись тільки вздовж шляху потоку (наприклад, сторона з ребрами вважається незмішаним потоком). Блок використовує метод Effectiveness-NTU (E-NTU) для моделювання теплопередачі. Двофазний теплообмінник Two-Phase Fluid 2 side моделює до трьох зон рідини за довжиною трубок із різними коефіцієнтами теплопередачі: зона рідини, зона суміші та зона пари. Части

відповідних зон змінюються від 0 до 1. Швидкість теплопередачі розраховується для кожної фази рідини. Відповідно до трьох зон теплоносія, які виникають на стороні двофазного теплоносія в теплообміннику, швидкість теплопередачі розраховується в трьох секціях. Теплопередача в зоні розраховується за формулою (4.9) [206]:

$$Q_{zone} = \varepsilon C_{Min} (T_{In,2P} - T_{In,TL}), \quad (4.9)$$

де C_{Min} – менша з теплоємностей двох рідин у відповідній зоні. Показник теплоємності є добутком питомої теплоємності рідини на масову витрату рідини. C_{Min} завжди має позитивне значення; $T_{In,2P}$ – температура двофазної рідини на вході в зону; $T_{In,TL}$ – температура на вході в зону теплоносія; ε – ефективність теплообмінника.

Ефективність є функцією теплової потужності та кількості одиниць передачі NTU , а також змінюється в залежності від розташування потоку в теплообміннику. Параметр NTU розраховується за формулою (4.10) [206]:

$$NTU = \frac{\zeta}{C_{Min} R}, \quad (4.10)$$

де ζ – частка довжини окремої зони; R – загальний тепловий опір між двома потоками, зумовлений конвекцією, провідністю та будь-якими забрудненнями на стінках трубки.

Далі весь процес відбувається безпосередньо в установці теплового насоса. Тепло від антифризу призводить до збільшення тиску, кипіння холодоагенту і його перетворення на низькотемпературну пару (див. рис. 4.7, позначка б).

Блок «Receiver Accumulator (2P)» (див. рис. 4.7, позначка б) [210] було використано для моделювання резервуара з рідиною, яка може зазнавати фазових змін. Рідка та газоподібна фази, які називаються зонами, моделюються як окремі

об'єми, які можуть змінюватися в розмірах під час моделювання, але не зміщуються. Відносна кількість простору, яку займає зона в системі, називається часткою зони, що може коливається в діапазоні від 0 до 1. Фаза паро-рідинної суміші не моделюється. У системі HVAC (опалення, вентиляції та кондиціонування повітря), коли цей елемент розміщений між конденсатором і розширювальним клапаном, він виконує функцію ресивера. Підключення рідини до блоку здійснено через порти AL і BL. Якщо елемент розміщений між випарником і компресором, він виконує роль акумулятора. Підключення пари до блоку в моделі здійснено через порти AV і BV.

Загальна тепловіддача Q_H є сумою тепловіддачі в рідкій і паровій фазах та розраховується за формулою (4.11) [210]:

$$Q_H = Q_L + Q_V. \quad (4.11)$$

Частка тепловіддачі, яка надходить до об'єму рідини Q_L , відповідає за теплообмін між рідиною і стінкою та між рідиною і паром, розраховується за формулою (4.12) [210]:

$$Q_L = (S_c + \zeta_L S_s) \alpha_L (T_H - T_L) + S_c \alpha_{LV} (T_V - T_L), \quad (4.12)$$

де ζ_L – об'ємна частка рідини в резервуарі; S_c – площа поперечного перерізу резервуара; S_s – площа поверхні збоку резервуара, яку блок «Receiver Accumulator (2P)» розраховує на основі об'єму та площі поперечного перерізу резервуара; α_L – коефіцієнт тепловіддачі рідини; T_H – температура стінки резервуара; T_L – температура рідини.

Коефіцієнт теплопередачі між рідиною та паром розраховується за формулою (4.13) [210]:

$$\alpha_{LV} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_L} + \frac{1}{\alpha_V}}. \quad (4.13)$$

Частка тепловіддачі, що надходить до об'єму пари Q_V і враховує теплообмін між парою і стінкою та між рідиною і парою, розраховується за формулою (4.14) [210]:

$$Q_V = [S_c + (1 - \zeta_L)S_s] \alpha_V (T_H - T_L) + S_c \alpha_{LV} (T_L - T_V), \quad (4.14)$$

де α_V – коефіцієнт тепловіддачі пари; T_V – температура пари.

Об'ємна частка рідини ζ_L визначається з масової частки рідини за формулою (4.15) [210]:

$$\zeta_L = \frac{f_{M,L} \nu_L}{f_{M,L} \nu_L + (1 - f_{M,L}) \nu_V}, \quad (4.15)$$

де $f_{M,L}$ – масова частка рідини; ν_L – питомий об'єм рідини; ν_V – питомий об'єм пари.

Далі пара з блоку «Receiver Accumulator (2P)» (див. рис. 4.7, позначка 6) переміщується в компресор (див. рис. 4.7, позначка 3), де вона потім стискається, що зменшує її об'єм і це призводить до її нагрівання. З компресора сильно стиснена пара надходить до конденсатора (див. рис. 4.7, позначка 4), де вона віддає енергію тепловому акумулятору (див. рис. 4.3, позначка 2) і далі гідравлічній системі для опалення будинку. Віддавши своє тепло, холодоагент потрапляє до ресивера (див. рис. 4.3, позначка 7) і далі проходить через розширювальний пристрій «Thermostatic Expansion Valve (2P)» (див. рис. 4.3, позначка 2) [211, 212], де його температура і тиск ще більше знижуються, перш ніж він повернеться до першого теплообмінника, щоб почати цикл знову.

Сигнал завдання (на масову витрату незалежно від перепаду тиску) надходить на вхід компресора (див. рис. 4.7, позначка 3) від підсистеми регулятора «Controller» (див. рис. 4.2, позначка 1). На рисунку 4.8 наведено схему моделі, яка входить до підсистеми «Controller», де: 1 – ПІ-регулятор; 2 – планувальник подачі циркуляційного насосу; 3 – фільтр.

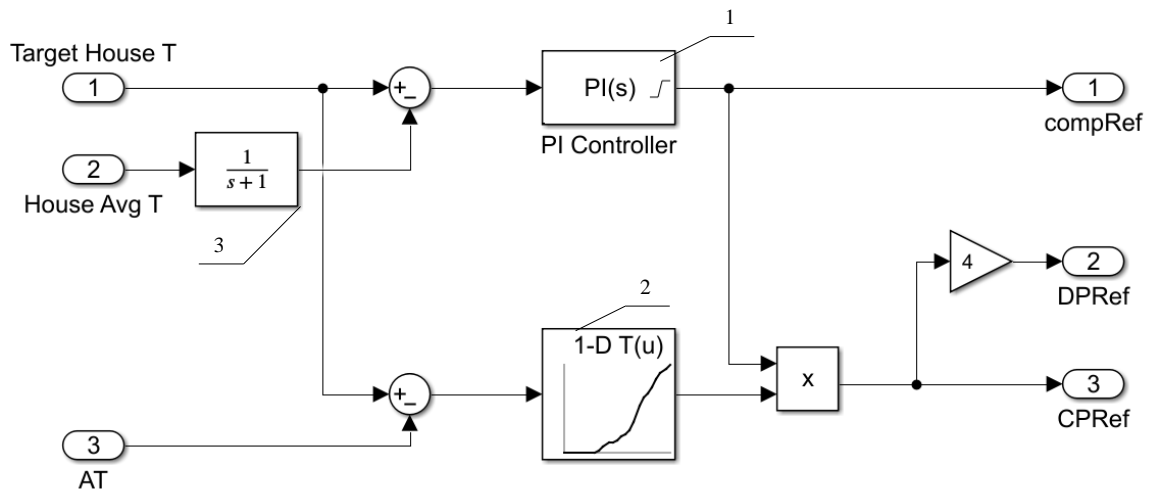


Рисунок 4.8 – Схема моделі підсистеми регулятора «Controller»

ПІ-регулятор модулює масову витрату холодоагенту (compRef) та гарячої води до циркуляційного (CPRef) та розподільчого (DPRef) насосів. На вхід ПІ-регулятора подається різниця між заданим значенням температури та відфільтрованим значенням вимірної температури у будівлі (див. рис. 4.8, позначка 3). Модуляція масової витрати циркуляційного та розподільчого насосів виконується за допомогою loop-up table (див. рис. 4.8, позначка 2). Графік залежності коефіцієнта підсилення подачі циркуляційного насосу від різниці між заданим значенням температури та температурою навколишнього середовища, що реалізована в loop-up table, наведена на рисунку 4.9. Регулятор підтримує середню температуру повітря в будівлі на рівні 21 °C, реагуючи на коливання температури навколишнього середовища від –3 °C до 9 °C і ґрунту – від 6 °C до 10 °C.

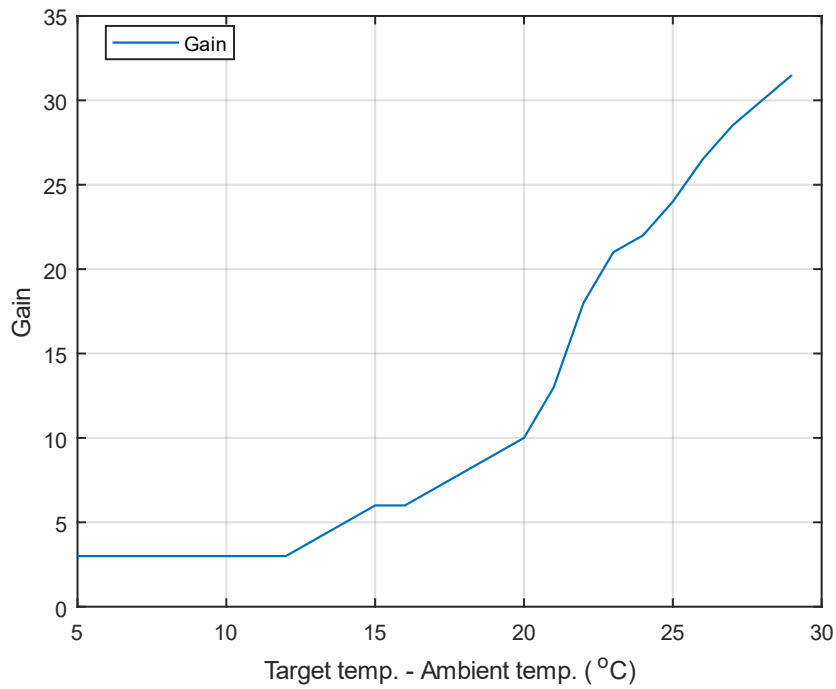


Рисунок 4.9 – Графік залежності коефіцієнта підсилення подачі циркуляційного насоса

Графіки на рисунку 4.10 показують зміну коливань температури в кожній кімнаті порівняно з коливаннями температури зовнішнього повітря та ґрунту.

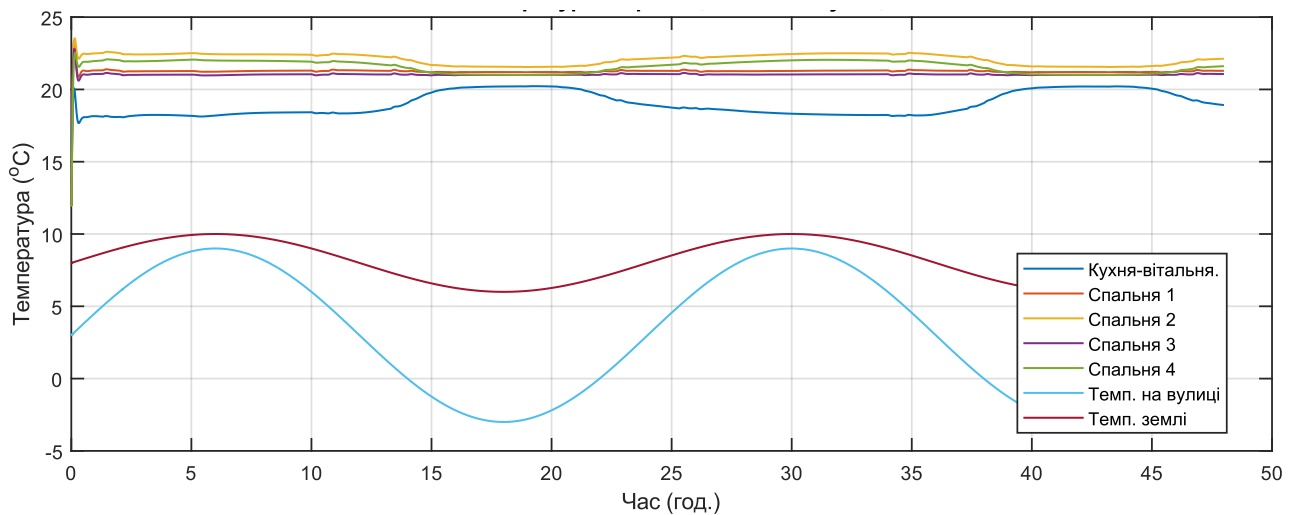


Рисунок 4.10 – Графіки зміни температури ґрунту, повітря навколишнього середовища та в будинку

На рисунку 4.11 наведено графіки зміни середніх температур даху, стін та

вікон. Початкова температура в приміщеннях дорівнює $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ і тепловий насос швидко підвищує середню температуру в приміщенні до заданої температури $21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Початкова температура ґрунту дорівнює $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, зовнішнього повітря – $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Час моделювання складає 48 годин.

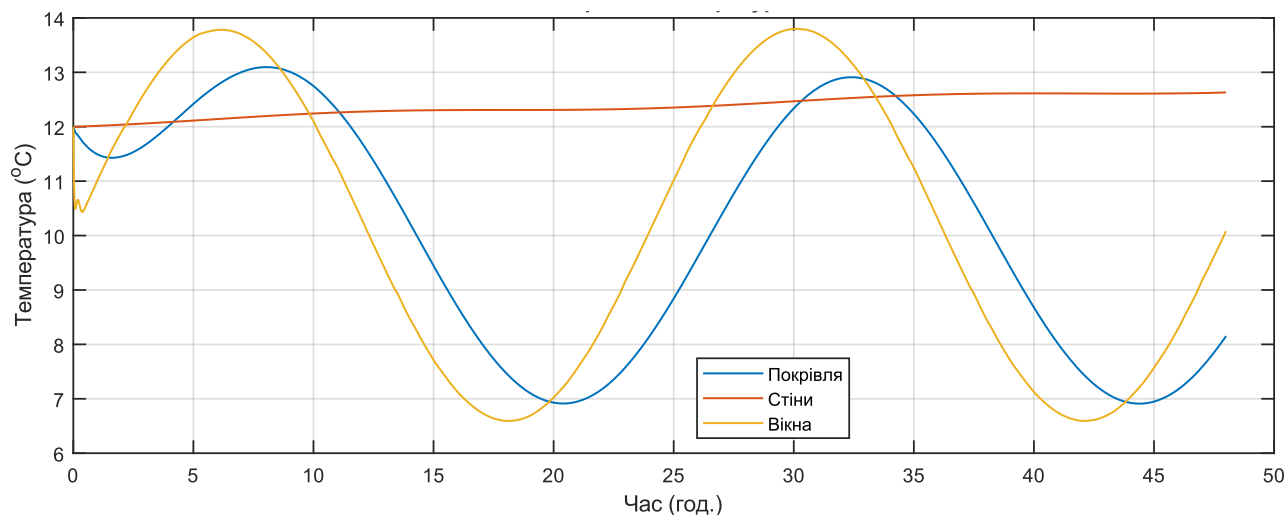


Рисунок 4.11 – Графіки зміни середніх температур покрівлі, стін та вікон

Графіки енергоспоживання та теплового навантаження різних компонентів теплового насоса наведено на рисунках 4.12 і 4.13. На рисунку 4.12 показано потужність, споживану компресором та теплове навантаження компонентів теплового насоса.

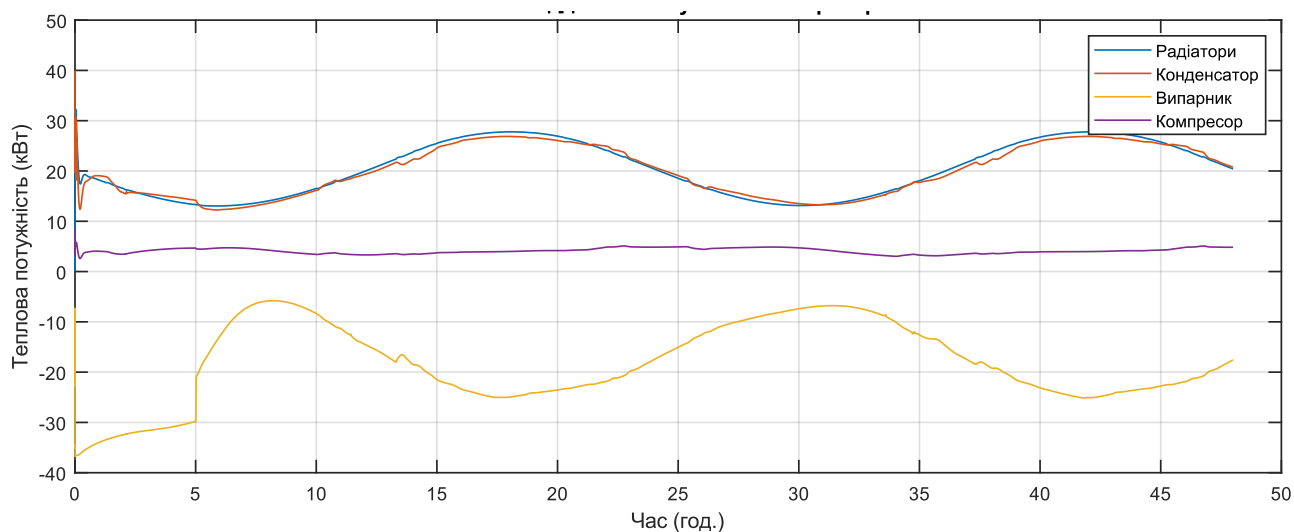


Рисунок 4.12 – Графіки тепловіддачі та потужності компресора

На рисунку 4.13 наведено графік зміни коефіцієнта перетворення тепла (Coefficient of performance, COP), який є відношенням теплової потужності конденсатора до споживаної потужності компресором. Графіки на рисунках 4.12 і 4.13 показують, що більше енергії споживається, коли теплове навантаження вище, тобто коли температура навколишнього середовища понижується, і менше енергії споживається, коли теплове навантаження нижче, тобто коли температура навколишнього середовища вища [196].

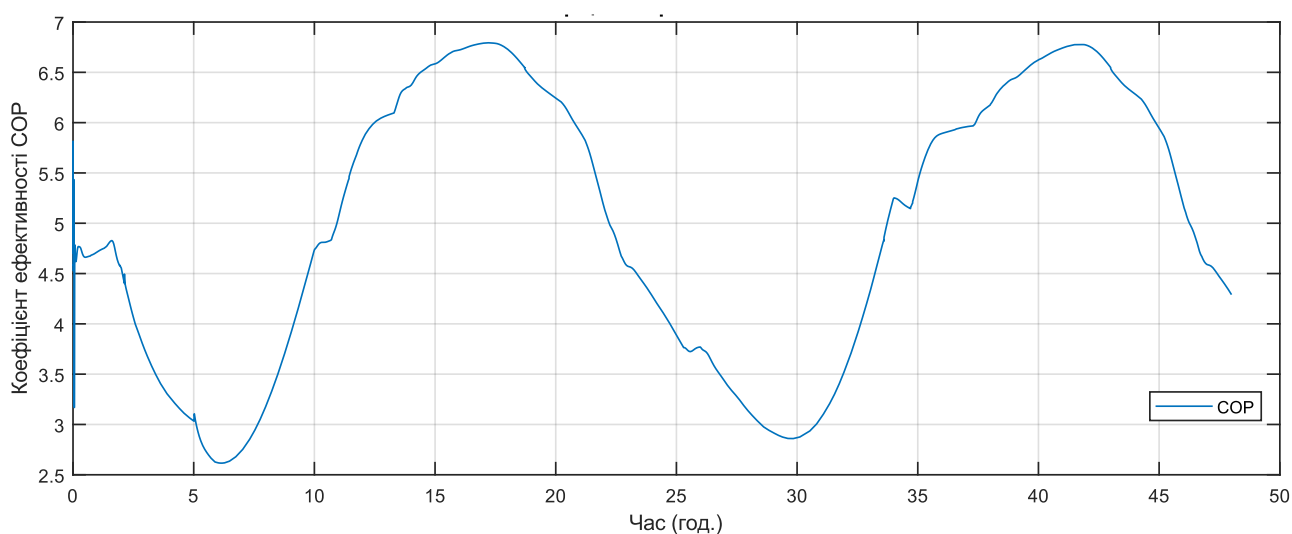


Рисунок 4.13 – Графік зміни коефіцієнта перетворення тепла

З графіку, який наведено на рисунку 4.13, можна бачити, що обладнання надає теплової енергії як мінімум в 3 рази більше, ніж споживає електрики для своєї роботи.

На рисунках 4.14 і 4.15 наведено графіки зміни тиску та витрати холодоагенту. Рисунок 4.14 показує тиск холодоагенту на конденсаторі та на випарнику, а нижче на рисунку 4.15 показано динаміку масової витрати холодоагенту. Більш високі значення тиску та витрати відповідають нижчим температурам навколишнього середовища, коли тепловому насосу потрібно передати більше тепла, тоді як нижчий тиск і витрати відповідають вищим температурам навколишнього середовища, коли тепловому насосу потрібно передати менше тепла для прогріву приміщень.

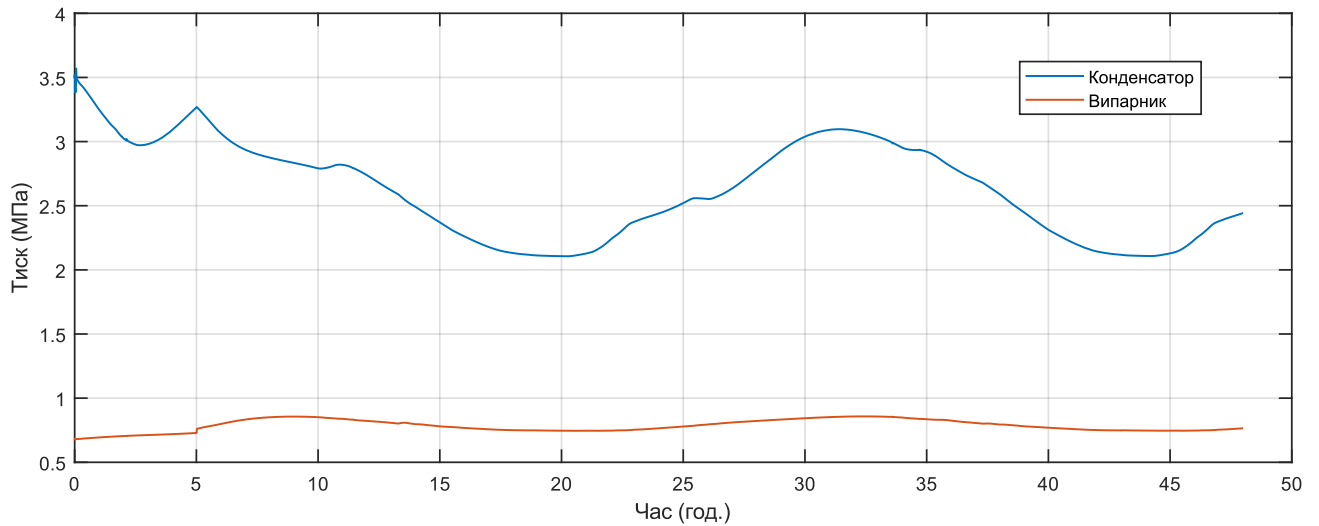


Рисунок 4.14 – Графік зміни тиску в конденсаторі та випарнику

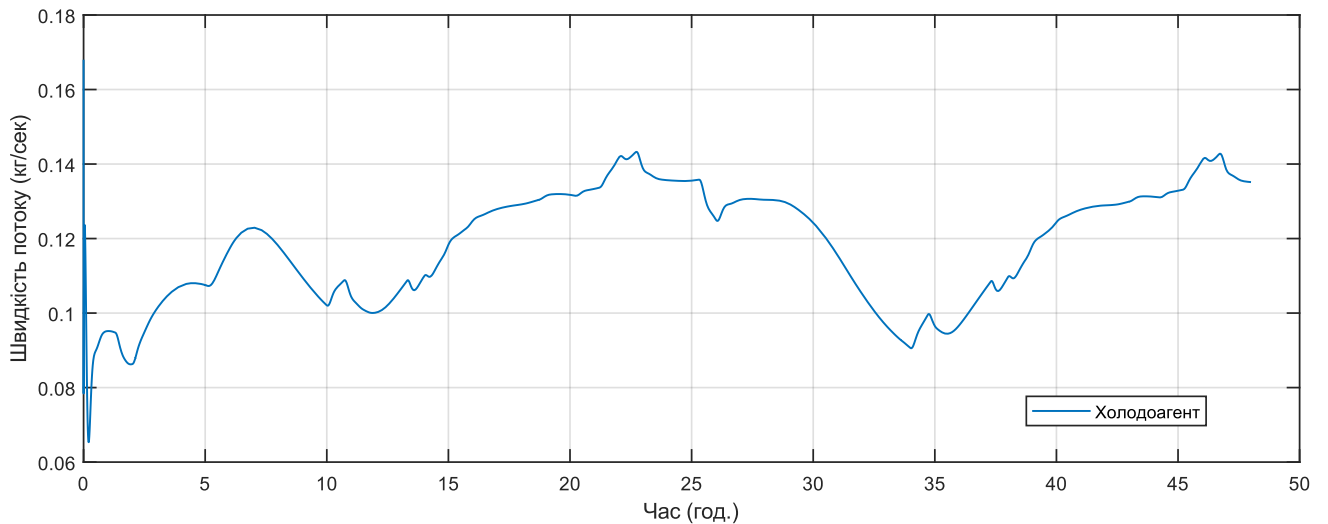


Рисунок 4.15 – Графік зміни швидкості потоку холодоагенту

На рисунку 4.16 наведено графік зміни середньої температури повітря в будинку та динаміки температур повітря навколишнього середовища і ґрунту. З графіку видно, що тепловий насос швидко підвищує середню температуру в приміщенні до заданого рівня 21 °С та підтримує його протягом всього часу моделювання незважаючи на збурення в системі керування у вигляді коливань температури зовнішнього повітря та ґрунту.

На рисунку 4.17 показано результат моделювання масової витрати холодоагенту (compRef) та гарячої води до циркуляційного (CPRef) та

розподільчого (DPRef) насосів при зазначених збуреннях у системі.

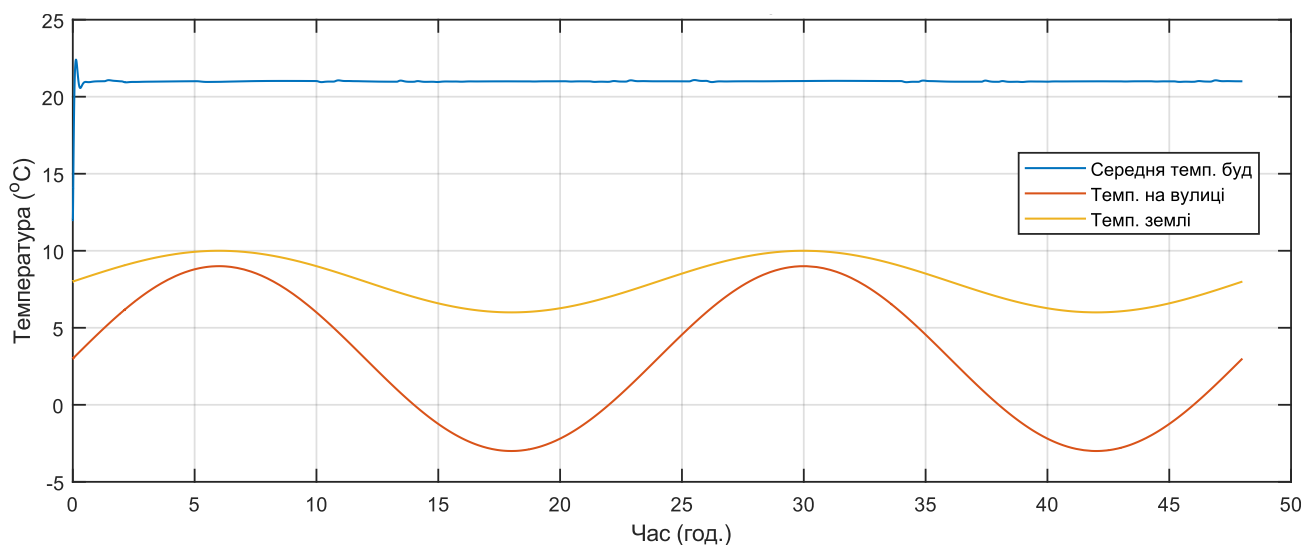


Рисунок 4.16 – Графік зміни середньої температура повітря в приміщенні

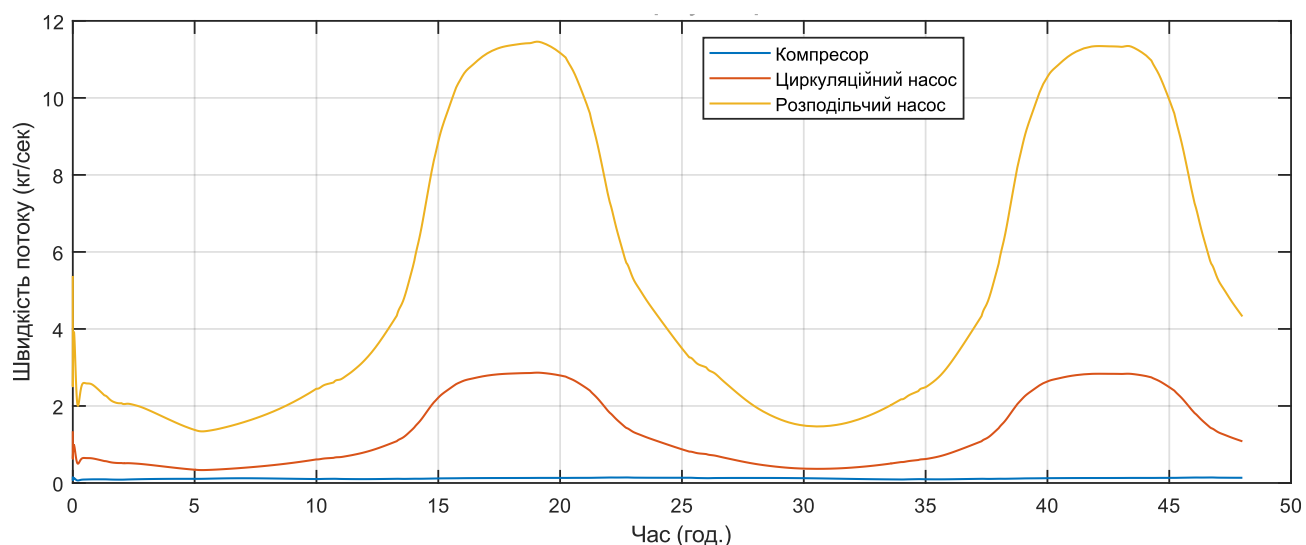


Рисунок 4.17 – Криві сигналів керування на виході підсистеми «Controller»

За даними блоків вимірювання «Meas1-4» (див. рис. 4.7, позначка 5) підсистеми теплового насосу «Heat pump» було побудовано p,i -діаграму циклу роботи теплового насосу (див. рис. 4.18).

Отриманий результат моделювання у вигляді p,i -діаграми циклу роботи теплового насосу на якісному рівні відповідає аналогічним теоретичним моделям, які наведено в другому розділі дисертаційного дослідження.

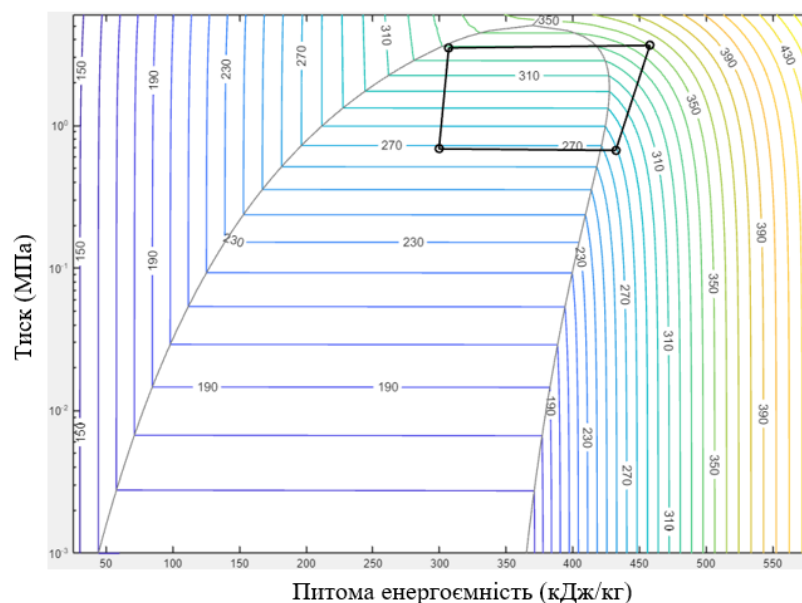


Рисунок 4.18 – Графічна інтерпретація p,i -діаграми теплового насосу з R410a

Таким чином, отримані результати розробки та досліджень комп'ютерної моделі апаратно-програмного забезпечення технології автоматизованого керування процесами опалення та гарячого водопостачання дозволили підтвердити адекватність і об'єктивність методів і структурно-алгоритмічної організації засобів комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами, які було запропоновано та обґрунтовано в попередніх розділах дисертації.

4.2 Результати розробки та дослідження комп'ютерної моделі апаратно-програмного забезпечення технології автоматизованого керування процесом кондиціонування з тепловим акумулятором для потреб гарячого водопостачання

У цьому підрозділі наведено результати розробки та комп'ютерного моделювання автоматизованої технології за допомогою засобів MATLAB Simscape (безкоштовна студентська версія), що була запропонована й описана у п.2.1.1 (див. рис. 2.1), яка являє собою автоматизовану парокомпресійну установку, що працює у відповідності до основного холодильного циклу, при проходженні якого, виконується охолодження повітря в будинку, а тепла енергія з конденсатора

може бути утилізована до теплового акумулятора [61–64]. У моделі парокompресійної установки використано двофазний рідкий холодоагент (R410a) в якості робочої рідини (обрано як аналог фреон–11). Вихідні дані до розробки моделі зведено до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Параметри холодильного циклу

| Параметр | Прийняте значення |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| Температура зовнішнього повітря | від 30 °С до 36 °С |
| Бажана температура в будинку | 22 °С |
| Площа будинку | 180 м ² |
| Холодильна потужність | 20 кВт або 5,6 тон охолодженої маси |

З метою визначення параметрів конденсатора, випарника, розширювального клапану та ресивера (блок «Receiver Accumulator (2P)») [210], що моделює резервуар з рідиною, яка може зазнавати фазових змін, розміщеного між конденсатором і розширювальним клапаном на p,i -діаграмі холодоагента (див. рис. 4.19) визначено 4 точки бажаного холодильного циклу за допомогою блоку «Two-Phase Fluid Predefined Properties (2P)» [213]. Координати відповідних точок на p,i -діаграмі зведено до таблиці 4.3.

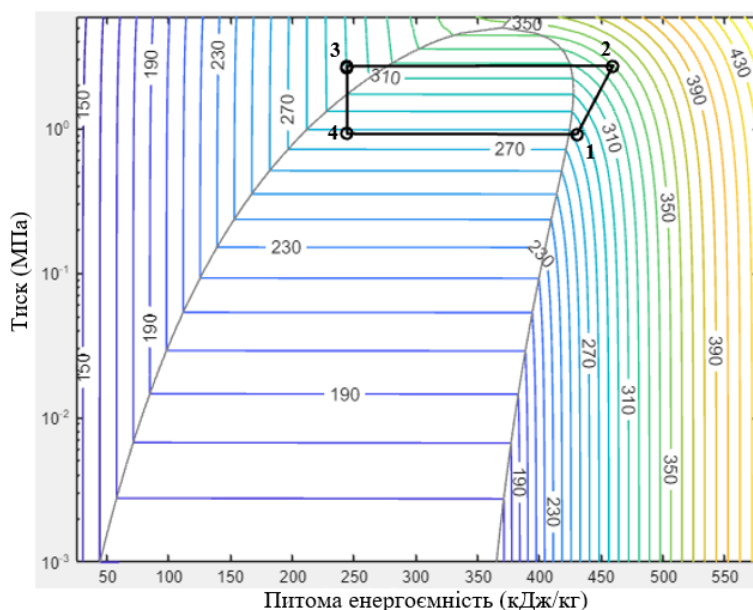


Рисунок 4.19 – Графічна інтерпретація p,i -діаграми R410a

Таблиця 4.3 – Необхідні характеристики холодильного циклу

| | Номер точки | Тиск, МПа | Питома енергоємність, кДж/кг | Примітка |
|--------------------|-------------|-----------|------------------------------|---|
| Випарник, вихід | 1 | 0,795 | 429,17 | Температура випаровування холодоагенту 5 °С |
| Конденсатор, вхід | 2 | 2,72 | 457 | Номінальна температура на вході 65 °С |
| Конденсатор, вихід | 3 | 2,72 | 245,26 | Переохолодження конденсатора 5 °С |
| Випарник, вхід | 4 | 0,795 | 245,26 | — |

Температура конденсації холодоагенту в системі кондиціонування дорівнює 45 °С (відповідно до параметрів холодоагенту), що дозволяє забезпечити різницю з температурою повітря навколишнього середовища в діапазоні від 9 до 15 °С. Під час моделювання прийнято температурний режим навколишнього середовища від 30 °С до 36 °С протягом 8 годин. Температура випаровування холодоагенту у випарнику прийнята на рівні 5 °С для забезпечення відведення тепла з будинку при бажаній температурі 22 °С.

Схема комп'ютерної моделі розробленої системи кондиціонування з можливістю акумуляції теплової енергії зі зовнішнього блоку системи кондиціонування наведена на рисунку 4.20, де: 1 – зовнішній блок системи кондиціонування, підсистема «AC outdoor subsystem»; 2 – внутрішній блок системи кондиціонування «AC indoor subsystem»; 3 – тепла модель будинку «House subsystem»; 4 – блок завдання температури навколишнього середовища «Ambient temp» (повітря навколишнього середовища); 5 – усереднене значення температури в приміщеннях будинку, де охолоджується повітря в теплий сезон «T_house»; 6 – термостати для підтримки заданої температури повітря в будинку «Thermostat_AC» та температури гарячої води в тепловому акумуляторі «Thermostat_HT»; 7 – блок «MATLAB Function» з логікою керування тепловідведенням з конденсатора зовнішнього блоку 1 [196].

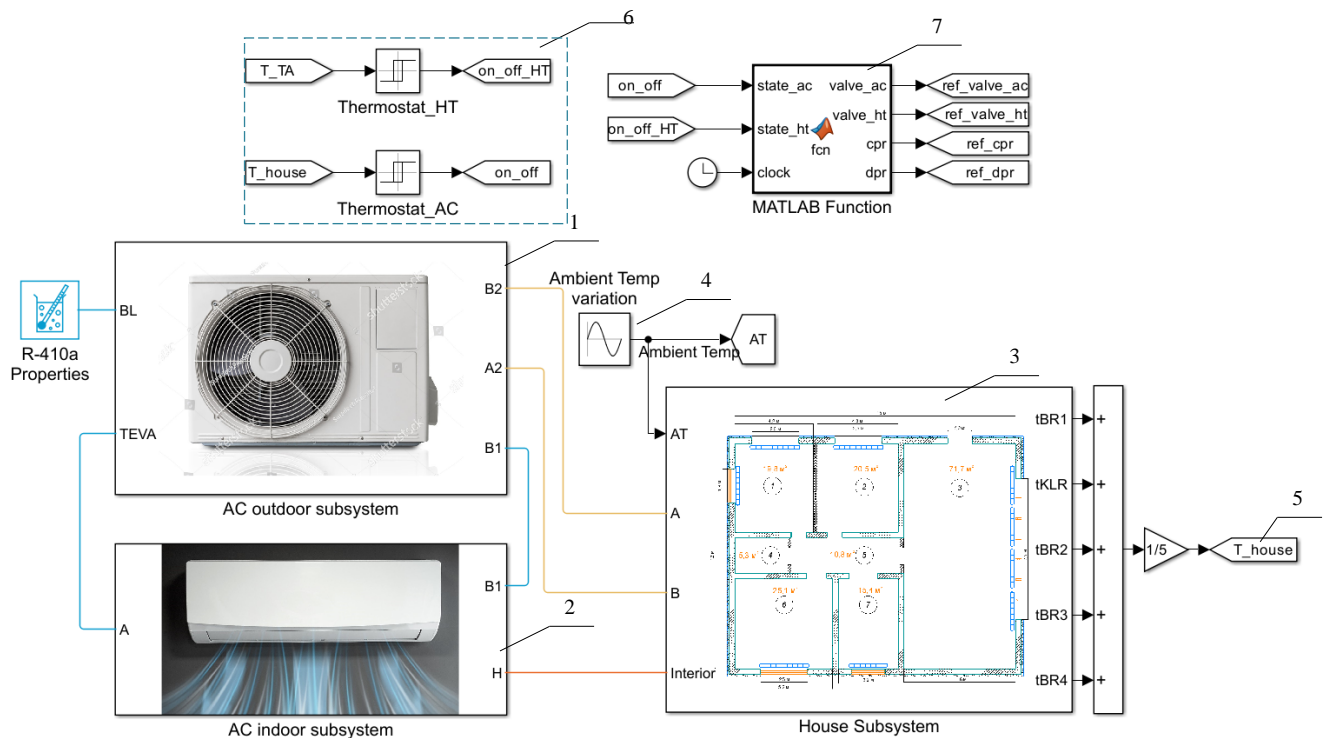


Рисунок 4.20 – Схема комп'ютерної моделі системи кондиціонування з ТА

На рисунку 4.21 наведено схему моделі будинку «House subsystem», де: 1 – циркуляційний насос для забору тепла з конденсатора зовнішнього блоку системи кондиціонування; 2 – тепловий акумулятор; 3 – розподільчий насос; 4 – блок параметризації теплоносія в контурі гарячого водопостачання; 5 – елементи для імітації витрат умовного палива та маси нагрітої води; 6 – датчик вимірювання температури в тепловому акумуляторі; 7 – блоки підсистем теплових моделей приміщень (див. рис. 4.1 та рис. 4.5); 8 – завдання на циркуляційний насос 1 та розподільчий насос 3. Модель, яку наведено на рисунку 4.21, є аналогічною моделі, що представлена на рисунку 4.3. Відмінність полягає у відсутності радіаторів системи опалення, наявності блоку 5 для імітації витрат гарячої води та входу «3 Interior», на який подається потік холодного повітря від випарника внутрішнього блоку кондиціонера (див. рис. 4.20, позначка 2). Входи «1 – А» та «2 – В» з'єднані з виходами конденсатора «2 – А2» та «1 – В2» (див. рис. 4.24, позначка 4), відповідно. Виходи підсистеми «tKLR», «tBR1», «tBR2», «tBR3» та «tBR4» призначено для вимірювання значення температури в кожній кімнаті.

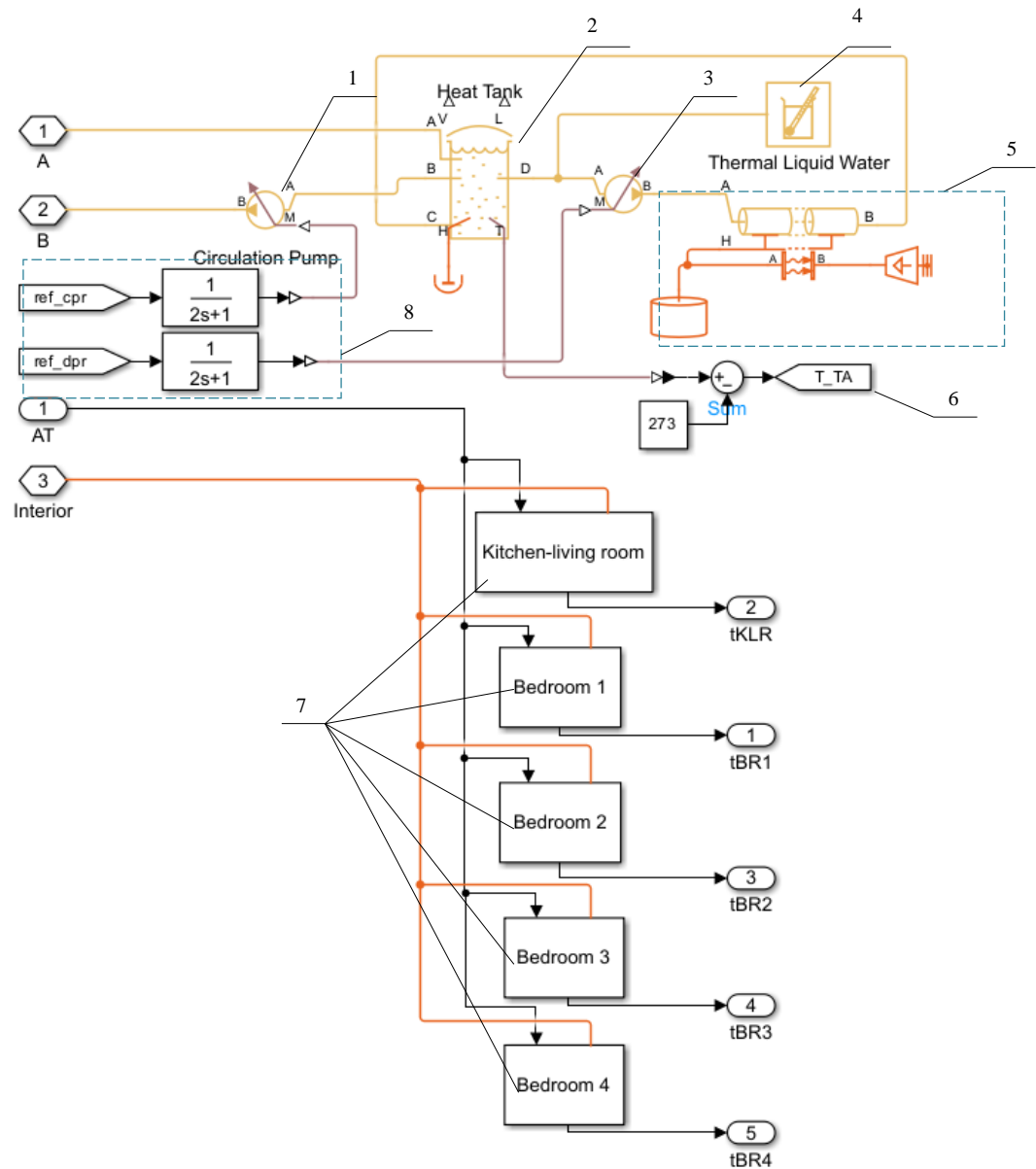


Рисунок 4.21 – Схема підсистема «House subsystem»

На рисунку 4.22 наведено схему розробленої підсистеми «AC indoor subsystem», яка моделює роботу внутрішнього блоку системи кондиціонування, де: 1 – розширювальний клапан; 2 – випарник; 3 – блок для завдання об’єму повітряної маси, яка підлягає охолодженню; 4 – підсистема «Blower subsystem», яка описує привод вентилятора.

Схему розробленої підсистеми «Blower subsystem» наведено на рисунку 4.23, де: 1 – блок «Fan (MA)» [214] представляє вентилятор у мережі з вологим повітрям; 2 – блок «Ideal Angular Velocity Source» [215] є ідеальним джерелом кутової швидкості, яке генерує на своїх клеммах різницю швидкостей, пропорційну

фізичному вхідному сигналу; 3 – «PS Gain» [216] виконує поелементне множення вхідного фізичного сигналу на постійну величину (задається параметр Gain та одиниця виміру) [196].

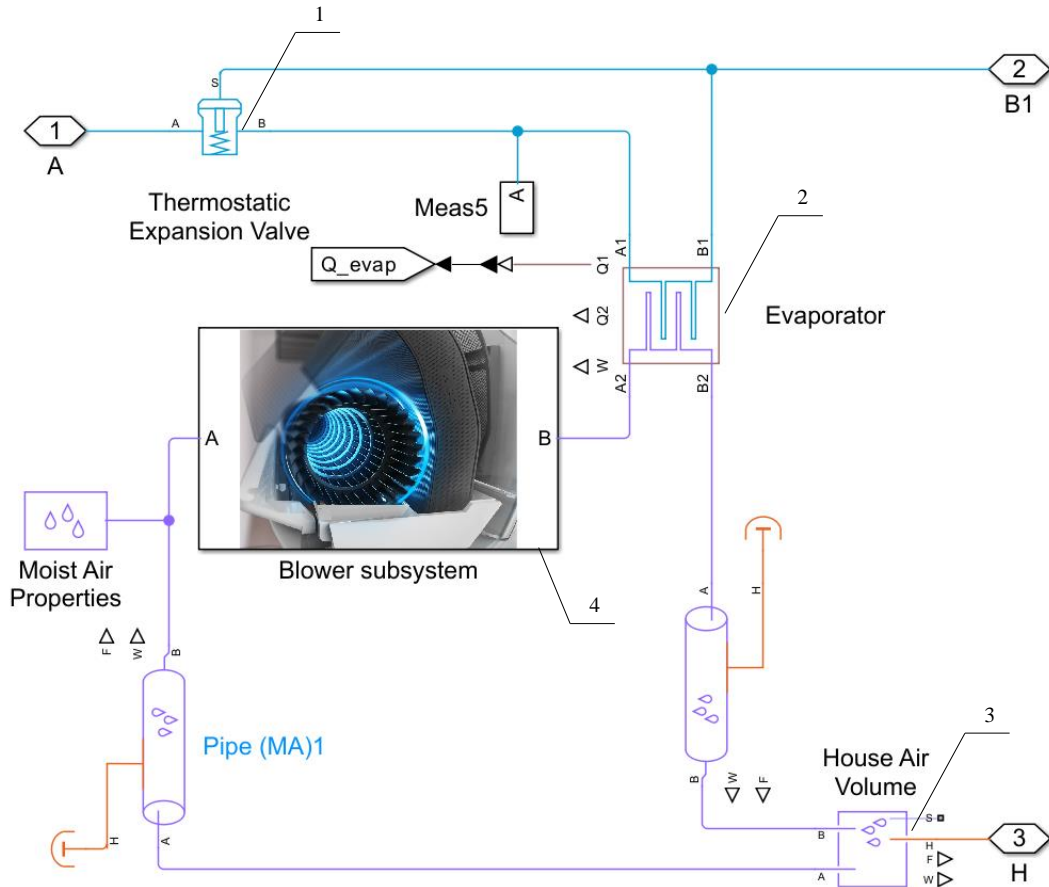


Рисунок 4.22 – Схема підсистеми «AC indoor subsystem»

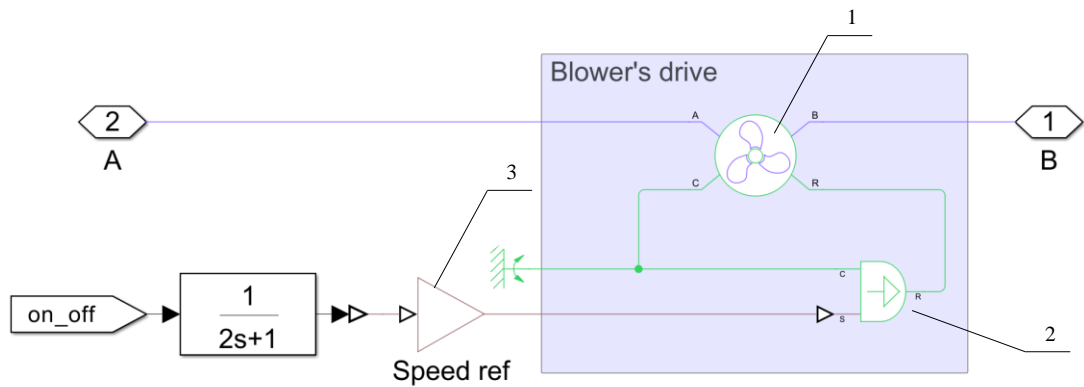


Рисунок 4.23 – Схема підсистеми «Blower subsystem»

Взаємодію між випарником (див. рис. 4.22, позначка 2) і повітряною масою (див. рис. 4.22, позначка 3) в будинку (див. рис. 4.21, позначка 7) представлено та змодельовано за допомогою блоку «System-Level Condenser Evaporator (2P-MA)» [217]. Блок може працювати як конденсатор (див. рис. 4.24, позначка 2) або як випарник в холодильній системі в залежності від напрямку теплопередачі. Блок використовує дані щодо продуктивності з технічного паспорта теплообмінника, а не детальну геометрію теплообмінника, що спрощує процес розробки й дослідження, у порівнянні з моделлю, яку наведено на рисунку 4.7.

Перед імплементацією замкненого контуру моделі [218] парокомпресійної установки, що працює у відповідності до основного холодильного циклу, виконано попередню оцінку масових витрат холодоагенту й приблизних значень витрат повітря з урахуванням інформації наведеної в таблицях 4.2 і 4.3, а саме:

– для холодоагенту витрати попередньо оцінено як результат ділення холодопродуктивності на різницю між питомою ентальпією на виході з випарника та питомою ентальпією на вході у випарник, що дає $20 \text{ кВт} / (429,17 \text{ кДж/кг} - 245,26 \text{ кДж/кг}) = 0,11 \text{ кг/сек}$;

– для повітря витрати попередньо оцінено як холодопродуктивність ділену на коефіцієнт тиску повітря й отриманий результат розділено на бажаний перепад температури у випарнику. У системі, що моделюється, прийнято рівень $10 \text{ }^\circ\text{C}$, що еквівалентно падінню температури на 10 K . Отже, $20 \text{ кВт} / 1 \text{ кг/кДж/K} / 10 \text{ K} = 2,0 \text{ кг/сек}$. Щоб розрахувати об'ємну швидкість потоку масову швидкість потоку повітря розділено на густину повітря, що дає $2,0 \text{ кг/сек} / 1,2 \text{ кг/м}^3 = 1,66 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Усталене значення фракції розкриття термостатичного розширювального клапану (див. рис. 4.22, позначка 1) для цієї моделі складає близько 0,8 (див. рис. 4.38). Термостатичний розширювальний клапан (ЕРВ) застосовано під час моделювання для керування роботою випарника. Цей блок модулює потік у випарник на основі виміряного перегріву. Вхід «1 – А» та вихід «2 – В1» підсистеми «AC indoor subsystem» з'єднуються з рештою елементів холодильного контуру замкненої системи через термінали «4 – TEVA» та «5 – В1» підсистеми «AC outdoor subsystem» (див. рис. 4.24) [196].

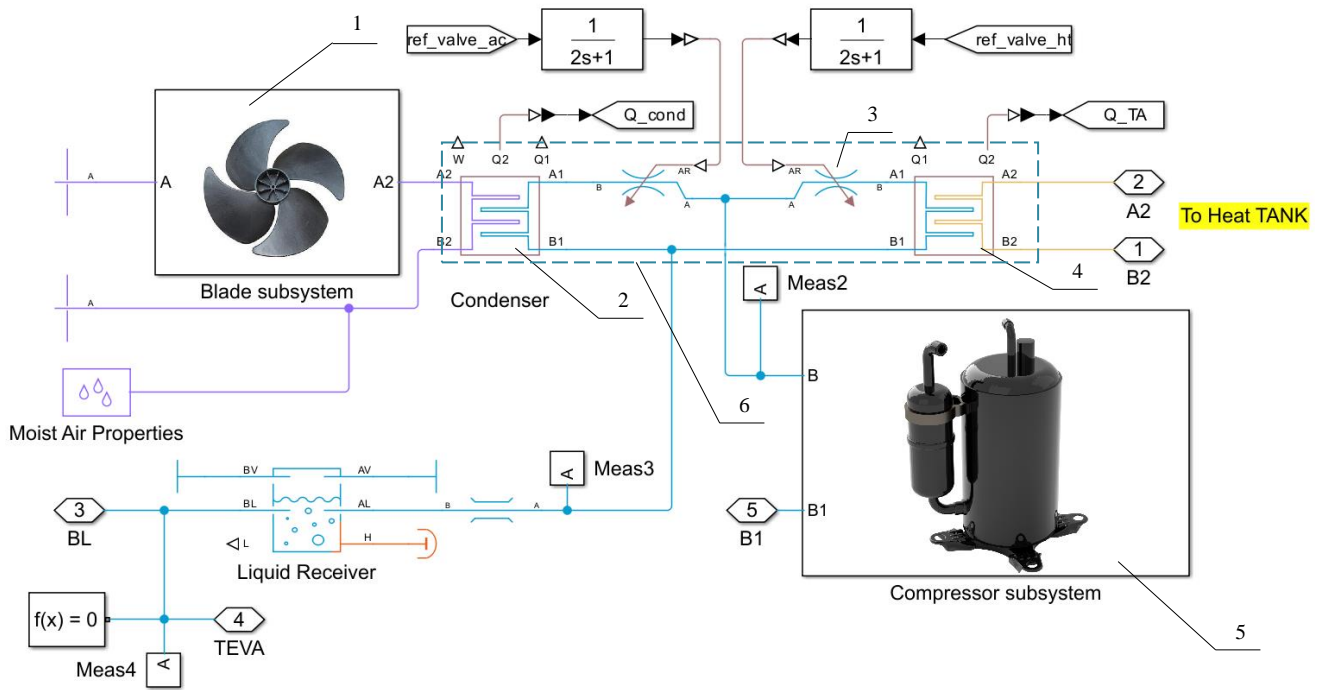


Рисунок 4.24 – Схема підсистеми «AC outdoor subsystem»

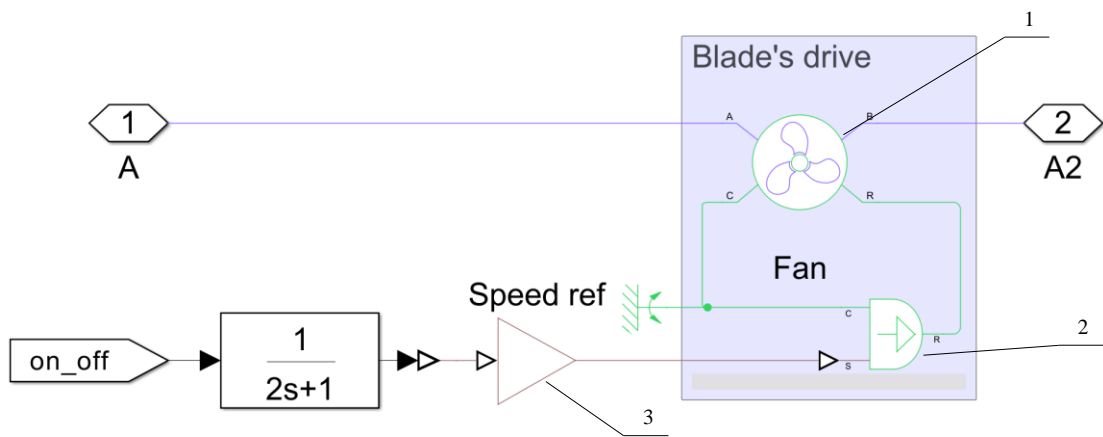


Рисунок 4.25 – Схема підсистеми «Blade subsystem»

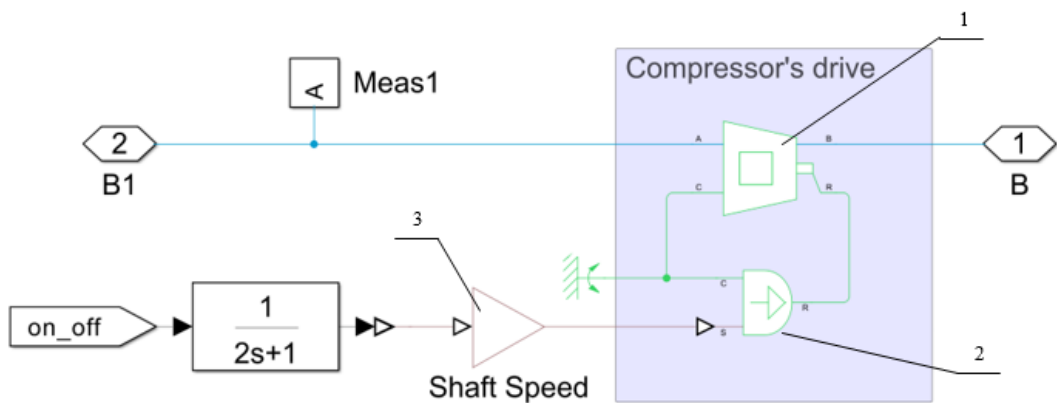


Рисунок 4.26 – Схема підсистеми «Compressor subsystem»

Підсистема «AC outdoor subsystem» (див. рис. 2.24), де: 1 – блок «Blade subsystem», модель привода вентилятора зовнішнього блоку системи кондиціонування; 2 – взаємодія між конденсатором та повітряною масою навколишнього середовища; 3 – «Local Restriction (2P)» [219] для локального обмеження площі прохідного перерізу отвору у двофазній рідинній мережі; 4 – взаємодія між конденсатором та водною масою теплового акумулятора; 5 – компресор; 6 – конденсатор.

Підсистема «Blade subsystem» (див. рис. 4.25) складається з: 1 – блок «Fan (MA)» [214] представляє вентилятор у мережі з вологим повітрям; 2 – блок «Ideal Angular Velocity Source» [215] є ідеальним джерелом кутової швидкості, яке генерує на своїх клеммах різницю швидкостей, пропорційну фізичному вхідному сигналу; 3 – «PS Gain» [216] виконує поелементне множення вхідного фізичного сигналу на постійну величину (задається параметр Gain та одиниця виміру).

Для задач моделювання конденсатор, який наведено на рисунку 4.24, умовно розділено на дві частини. Взаємодію між конденсатором та масою зовнішнього повітря (див. рис. 4.24, позначка 2) представлено за допомогою блоку «System-Level Condenser Evaporator (2P-MA)» [217]. Взаємодію між конденсатором та водною масою теплового акумулятора (див. рис. 4.24, позначка 4) представлено за допомогою блоку «System-Level Condenser Evaporator (2P-TL)» [195, 207, 208, 220–222], який моделює теплообмінник між мережею двофазної рідини та мережею теплоносія. Аналогічно до блоку «System-Level Condenser Evaporator (2P-MA)» [217] він може діяти як конденсатор або як випарник у холодильній системі в залежності від напрямку теплопередачі.

Підсистема «Compressor subsystem» (див. рис. 4.26) складається з: 1 – блок «Positive-Displacement Compressor (2P)» [223], який представляє спіральний компресор у двофазній мережі з рідиною; 2 – блок «Ideal Angular Velocity Source» [215] є ідеальним джерелом кутової швидкості, яке генерує на своїх клеммах різницю швидкостей, пропорційну фізичному вхідному сигналу; 3 – «PS Gain» [216] виконує поелементне множення вхідного фізичного сигналу на постійну величину (задається параметр Gain та одиниця виміру).

Порт R і порт C блоку «Positive-Displacement Compressor (2P)» [223] – це механічні порти збереження обертання, пов’язані з валом і корпусом компресора, відповідно. При позитивному обертанні порту R (див. рис. 4.26, позначка 2) по відношенню до порту C двофазна рідина тече від порту A до порту B. На рисунку 4.27 показано основні етапи роботи компресора у вигляді P-V діаграми.

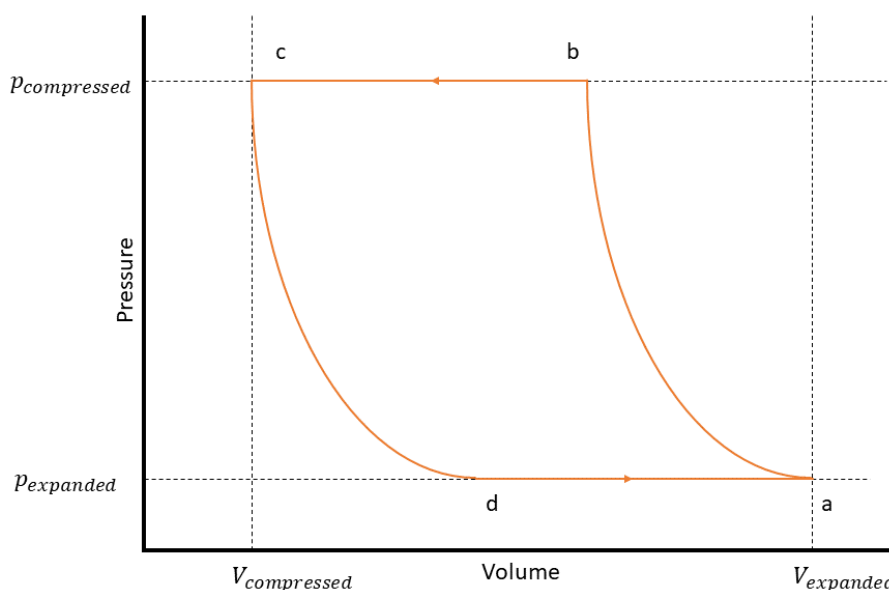


Рисунок 4.27 – Графічна інтерпретація P-V діаграми компресора [223]

Блок «Positive-Displacement Compressor (2P)» характеризується наступними станами [223]: a – циліндр компресора заповнений під тиском на вході; b – тиск всередині компресора перевищує тиск на виході, що призводить до нагнітання рідини; c – компресор досягає верхньої точки ходу поршня та в циліндрі залишається тільки зазорний об’єм; d – тиск всередині циліндра падає нижче тиску на вході, що призводить до всмоктування рідини.

Таким чином, алгоритм роботи побудованої моделі холодильного циклу описується наступним чином. Випарник (див. рис. 4.22, позначка 2) поглинає тепло з повітря в будинку та перетворює холодоагент на перегріту пару. Потім компресор (див. рис. 4.24, позначка 5) створює тиск і проганяє холодоагент через конденсатор (див. рис. 4.24, позначка б), де тепло, поглинуте холодоагентом, і робота стиснення відводяться в зовнішнє середовище (див. рис. 4.24, позначка 2) або тепловий

акумулятор (див. рис. 4.24, позначка 4) для системи гарячого водопостачання. Це призводить до того, що холодоагент конденсується в переохолоджену рідину, яка потім зберігається в рідинному ресивері (див. рис. 4.24). Клапан (див. рис. 4.22, позначка 1) контролює кількість холодоагенту, що надходить із ресивера до випарника, щоб підтримувати необхідний рівень перегріву. Клапан також викликає падіння тиску, що охолоджує холодоагент і дозволяє йому поглинати тепло у випарнику. Навантаженням охолодження в цій моделі є будинок (див. рис. 4.1), представлений як об'єм повітря у вологій зоні (див. рис. 4.22, позначка 3). Теплова мережа (див. рис. 4.21, позначка 7) моделює теплообмін між гарячим зовнішнім середовищем і повітрям у будинку через стіни, дах і вікна. Генерація тепла від мешканців та приладів всередині будинку в розробленій комп'ютерній моделі не врахована. Вентилятор (див. рис. 4.22, позначка 4) забезпечує циркуляцію повітря через випарник для охолодження. Система контролюється термостатом, який вмикає та вимикає систему для підтримання заданої температури повітря на рівні 22 °C та температури води в тепловому акумуляторі на рівні 38°C. Алгоритм роботи термостату представлено діаграмою станів у MATLAB Stateflow, як показано на рисунку 4.28.

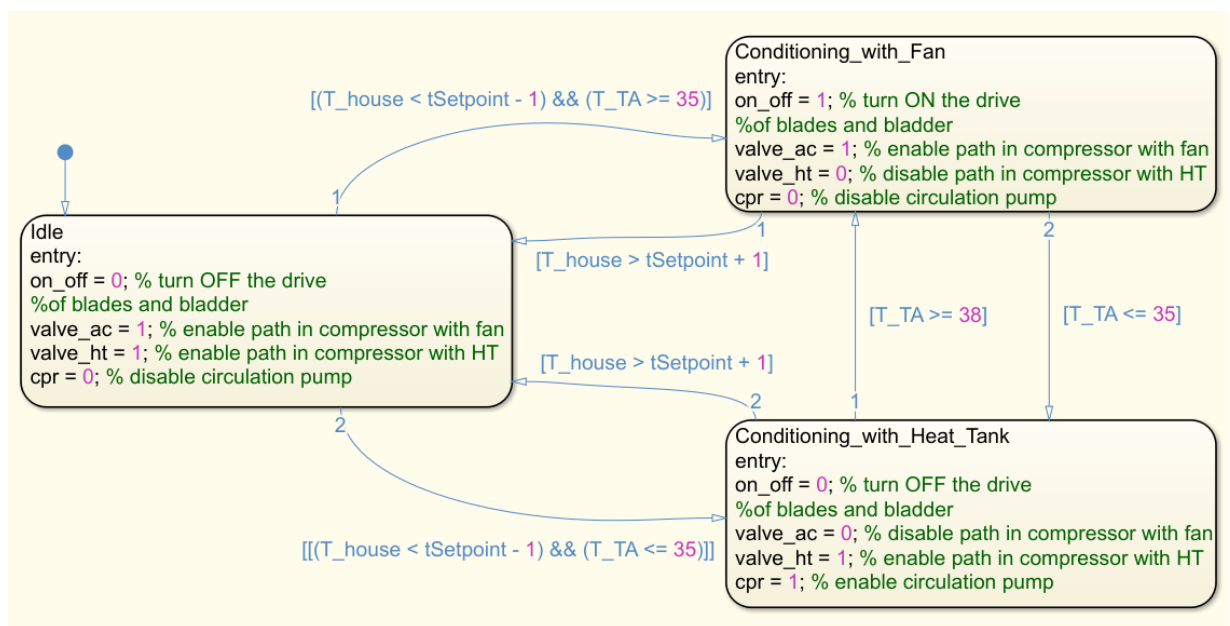


Рисунок 4.28 – Схематичне представлення діаграми станів термостату системи кондиціонування

Результати моделювання описаної комп'ютерної моделі кондиціонування з тепловим акумулятором для потреб гарячого водопостачання представлено нижче. Графіки показників роботи виключно системи кондиціонування без активації контурів ТА показано на рисунках 4.29–4.38. Графіки роботи моделі з підтримкою заданої температури як у будинку, так і в тепловому акумуляторі наведено на рисунках 4.39–4.42.

На рисунку 4.29 показано графік зміни температури зовнішнього повітря, значення уставки на бажаний рівень температури в приміщенні, а також наведено графік усередненого значення температури в будинку [196].

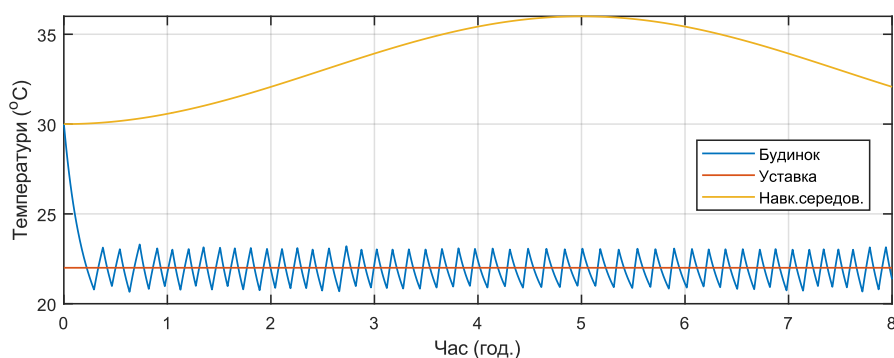


Рисунок 4.29 – Графік зміни температури в будинку

Рисунок 4.30 показує графіки теплообміну в конденсаторі та випарнику, а також теплової потужності, що надходить у будинок із навколишнього середовища через дах, стіни та вікна.

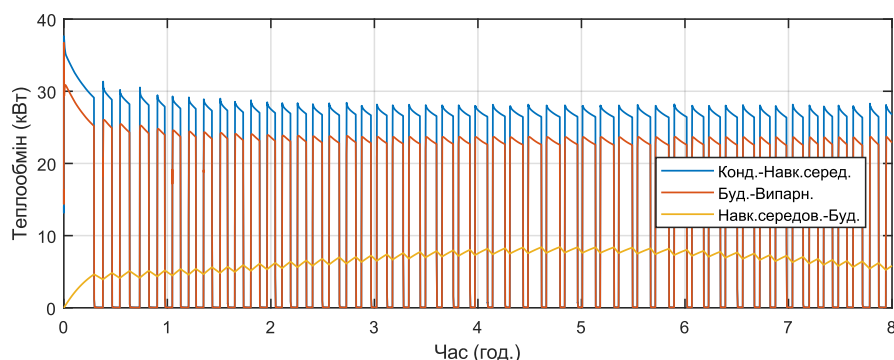


Рисунок 4.30 – Графічне представлення процесу теплообміну через конденсатор, зовнішню середу та випарник

Графіки на рисунку 4.31 показують теплообмін у конденсаторі та випарнику, а також потужність, споживану компресором.

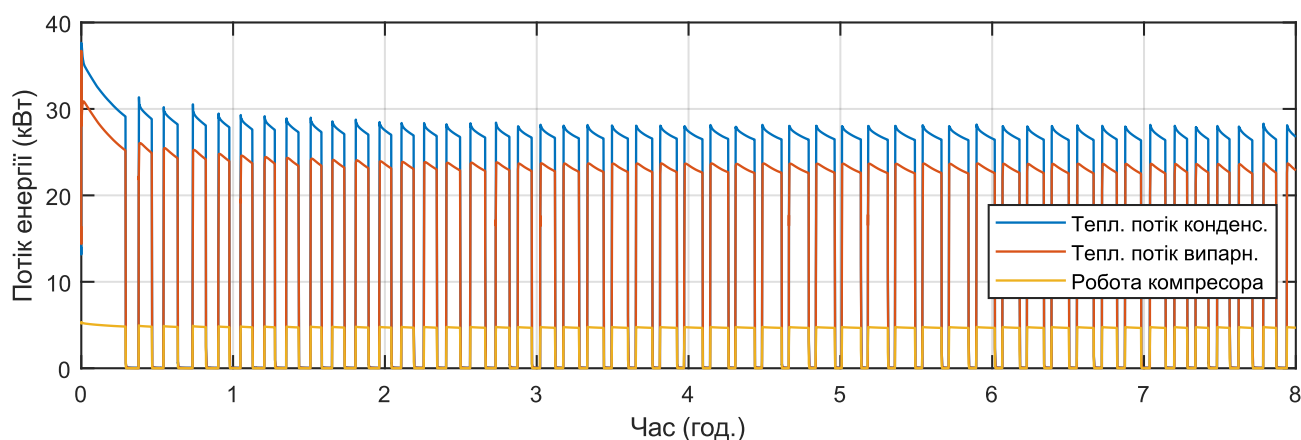


Рисунок 4.31 – Графічне представлення енергетичних потоків у конденсаторі, випарнику та споживаної потужності компресором

Рисунок 4.32 розкриває зміст споживаної потужності вентиляторами (зовнішній та внутрішній блоки).

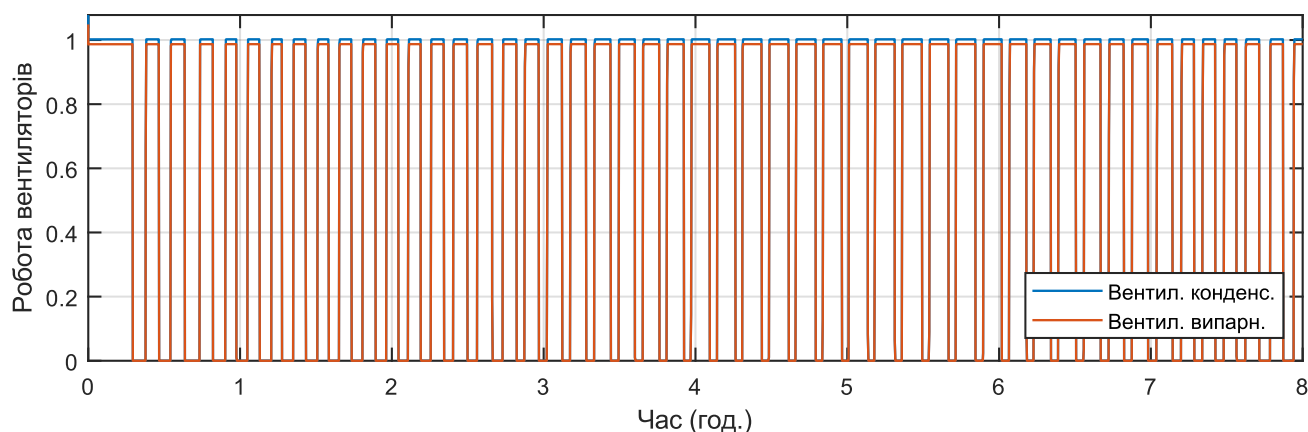


Рисунок 4.32 – Графік зміни споживаної потужності (кВт) вентиляторів

На рисунку 4.33 наведено графік зміни коефіцієнту ефективності (coefficient of performance), який розраховано як відношення тепловіддачі випарника до загальної споживаної потужності (загальне споживання компресора та вентиляторів).

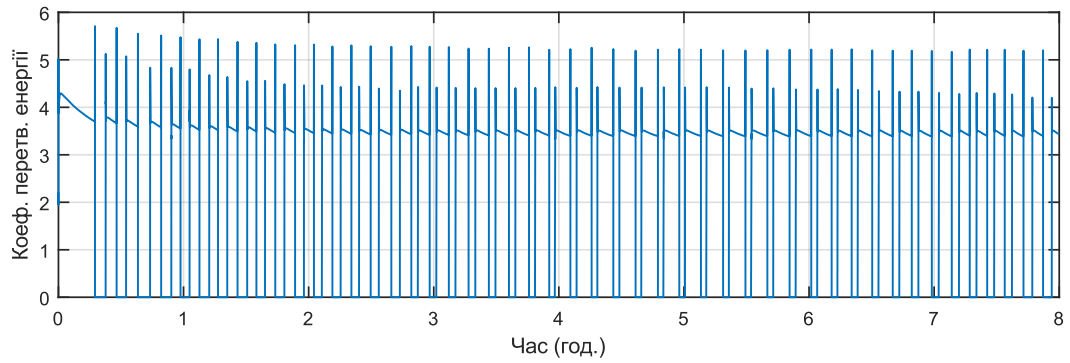


Рисунок 4.33 – Графічна інтерпретація коефіцієнту ефективності

На рисунках 4.34–4.36 показано графіки високого та низького тиску в холодильному циклі, а також відповідні температури насичення. Розрахункова температура конденсації становить $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, а розрахункова температура випаровування – $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Розрахункова масова витрата холодоагенту становить $0,11\text{ кг/с}$ (в модель закладено $0,15\text{ кг/с}$).

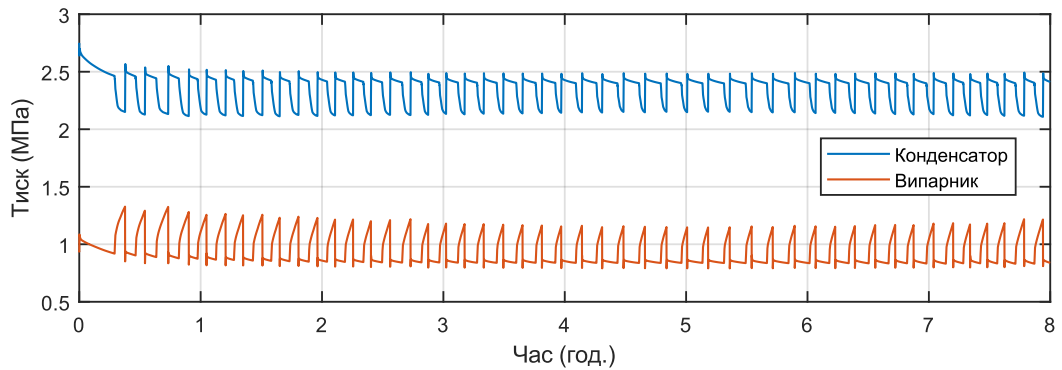


Рисунок 4.34 – Графік зміни тиску в конденсаторі та випарнику

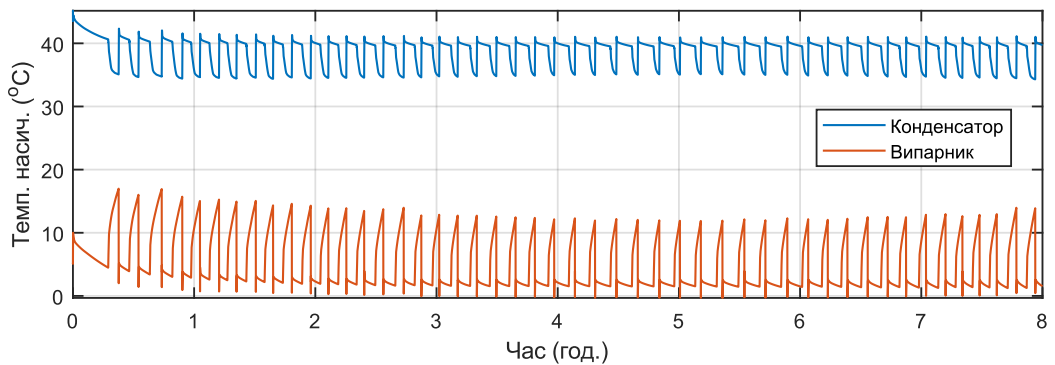


Рисунок 4.35 – Графік зміни температури насичення

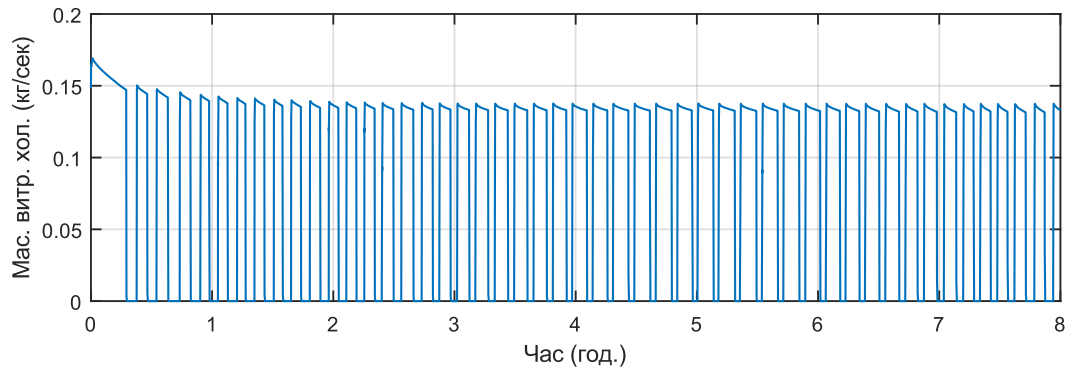


Рисунок 4.36 – Графік зміни масової витрати холодоагенту

Графіки на рисунках 4.37–4.38 показують переохолодження на виході з конденсатора й перегрів на виході з випарника. Термостатичний розширювальний клапан модулює потік у випарник, щоб підтримувати перегрів на рівні 5 градусів.

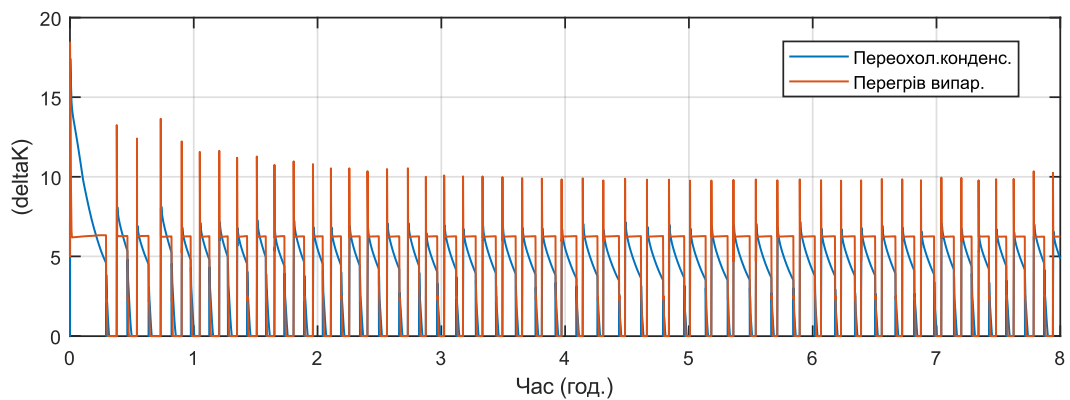


Рисунок 4.37 – Графічна інтерпретація процесу переохолодження на виході з конденсатора й перегрів на виході з випарника

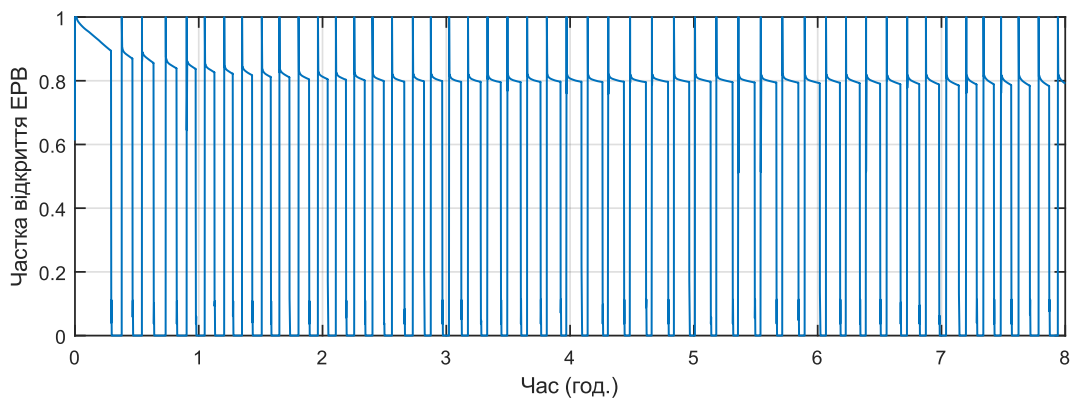


Рисунок 4.38 – Графік зміни частки відкриття клапану

Графіки, які розкривають принцип дії технології з урахуванням процесу відведення тепла з зовнішнього блоку кондиціонера (конденсатора) за допомогою ТА, наведено на рисунках 4.39 – 4.42.

На рисунку 4.39 показано графік зміни температури зовнішнього повітря, значення уставки на бажаний рівень температури в приміщенні, графік усередненого значення температури в будинку, а також температури води в тепловому акумуляторі.

Рисунок 4.39 розділено на 6 проміжків, яким поставлено у відповідність наступні стани (див. рис. 4.28): 1 – Conditioning_with_Heat_Tank; 2 – Conditioning_with_Fan; 3 – Idle; 4 – Conditioning_with_Heat_Tank; 5 – Conditioning_with_Fan; 6 – Idle.

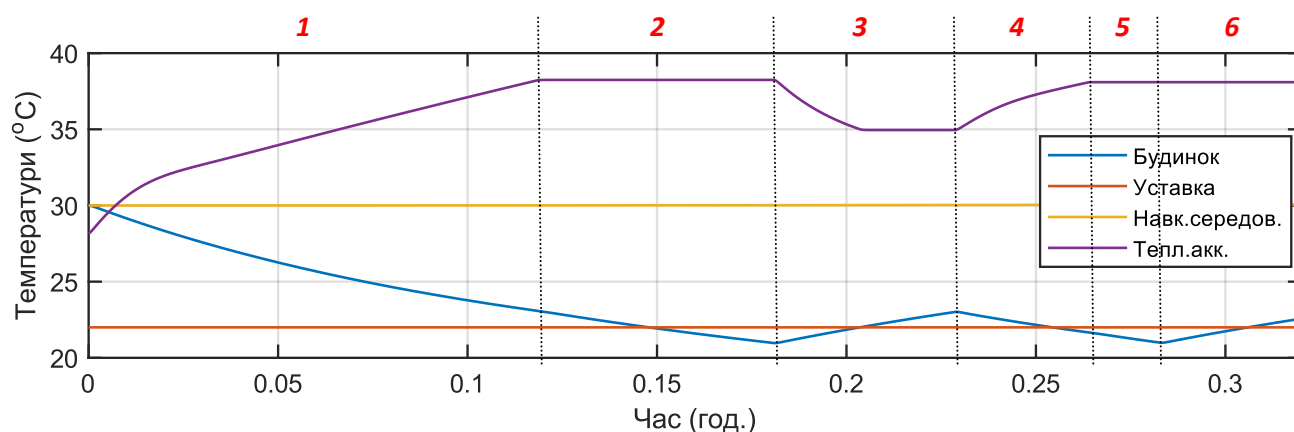


Рисунок 4.39 – Графік зміни температури в будинку та тепловому акумуляторі

Початкова середня температура в будинку складає 30 °C (завдання 22 °C), температура води в ТА – 28 °C (завдання 38 °C). На проміжку 1 (див. рис. 4.39 – 4.42), від 0 год. до 0,12 год., температура в будинку більше ніж задане значення на термостаті, а також температура води в ТА менше ніж задане значення. Тому на проміжку 1 від термостатів (див. рис. 4.20, позначка б) йде запит на охолодження повітряної маси (див. рис. 4.41) та запит на нагрів води в ТА (див. рис. 4.42), при цьому тепло з конденсатора (див. рис. 4.24, позначка б) відводиться до навколишнього середовища не за допомогою вентилятора вбудованого у зовнішній блок системи кондиціонування (див. рис. 4.24, позначки

1, 2), а з використанням циркуляційного насосу в контурі «ТА – конденсатор» (див. рис. 4.24, позначка 4). В момент часу 0,12 год. температура в ТА досягає заданого значення, термостат вимикається та виконується перемикавання на вентилятор (див. рис. 4.24, позначка 1) для відведення тепла з конденсатора (див. рис. 4.40, теплообмін «Конд.-ТА» завершується і починається тепловідведення у навколишнє середовище «Конд.-Навк.серед.»). На проміжку 2, від 0,12 год. до 0,18 год., продовжується процес охолодження повітряної маси в будинку. В момент часу 0,18 год. вимикається термостат (див. рис. 4.41). Далі, на проміжку від 0,18 год. до 0,21 год. виконано симуляцію витрати води (див.рис. 4.21, позначка 5), і в момент часу 0,21 год., як показано на рисунку 4.42, вмикається термостат на нагрів води. Однак, за логікою діаграми (див. рис. 4.28) система знаходиться в стані «Idle» і підігрів води можливий лише при наступному ввімкненні кондиціонера на проміжку 4 (див. рис. 4.39). На проміжках 4, 5, 6 повторюються процеси на проміжках 1, 2 та 3.

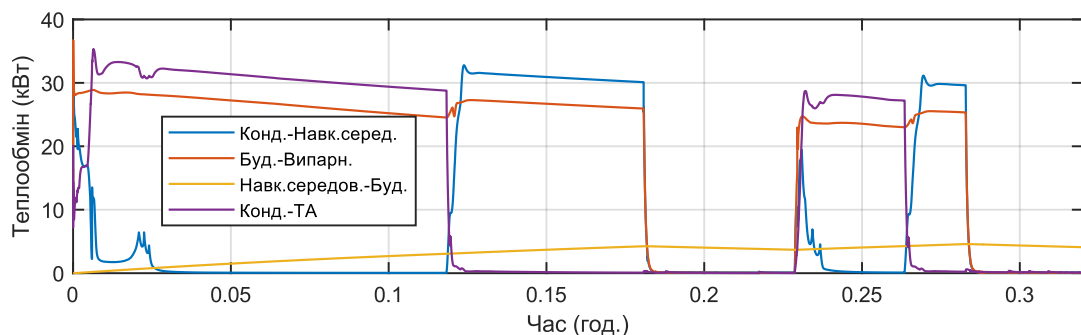


Рисунок 4.40 – Графічна інтерпретація процесу теплообміну через конденсатор, зовнішню середу та випарник

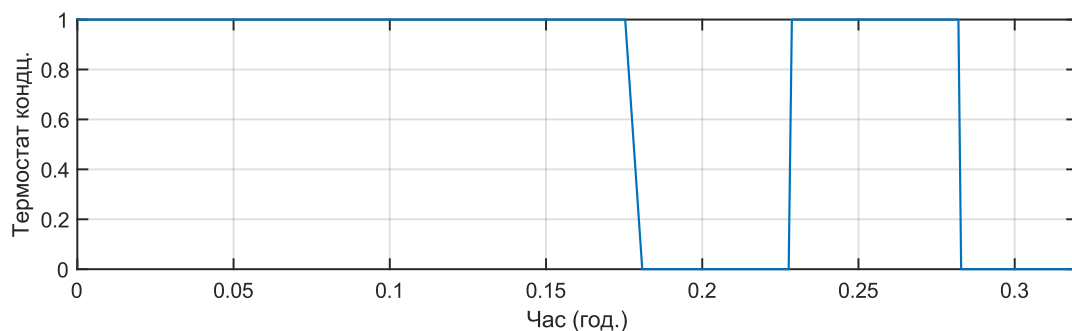


Рисунок 4.41 – Графіки запитів на охолодження повітря

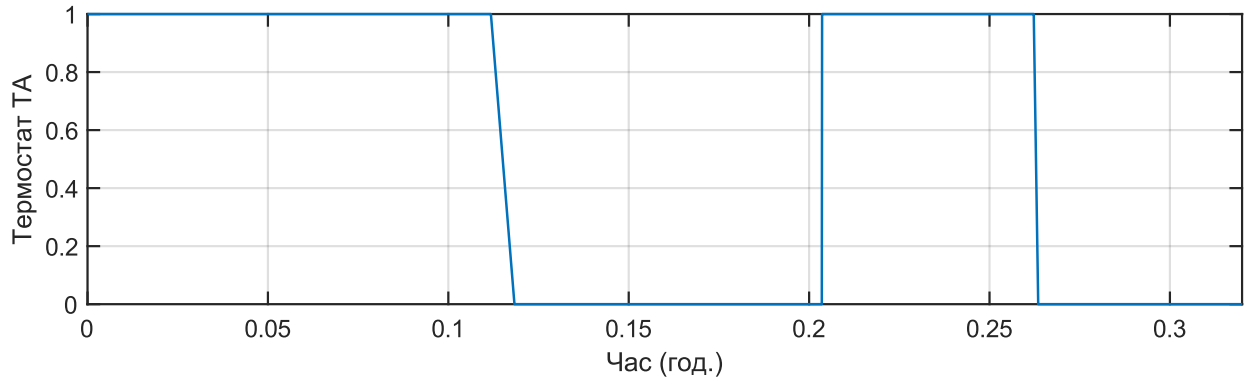


Рисунок 4.42 – Графіки запитів на підігрів води в тепловому акумуляторі

Отримані результати моделювання дозволили оцінити ефективність таких заходів, як: зовнішнє утеплення будівлі, заміна склопакетів, зміна температурного режиму всередині будівлі, зміна допустимого відхилення термостату, конструкція та потужність окремих елементів в системах кондиціонування та опалення. На рисунку 4.43 наведено схему комбінованої комп'ютерної моделі, що може бути використана під час опалення й кондиціонування будівель.

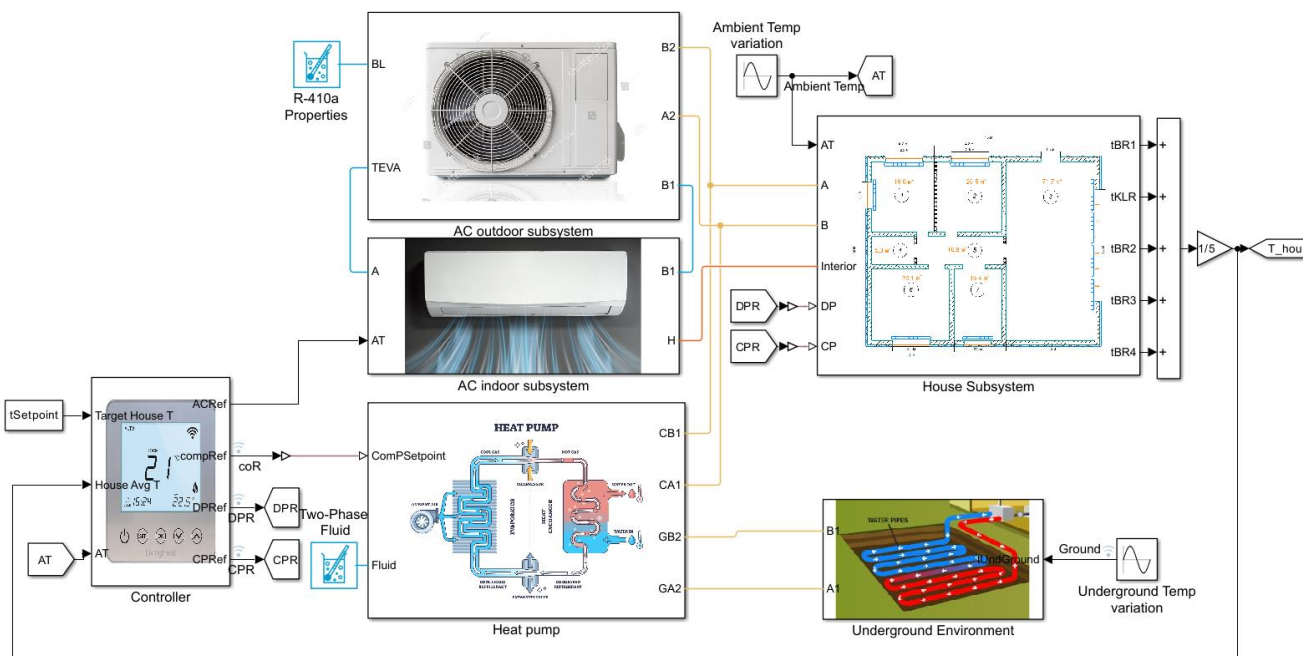


Рисунок 4.43 – Схема комп'ютерної моделі системи опалення та кондиціонування будівлі з інтегрованими засобами автоматизованого керування тепловими процесами

Адекватність розроблених комп'ютерних моделей підтверджується осцилограмами теплових процесів (див. рис. 4.10–4.18 та рис. 4.29–4.42) та розрахунками і дослідженнями за математичними та інформаційними моделями, які наведено в другому та третьому розділах цього дисертаційного дослідження.

4.3 Синтез апаратно-програмного рішення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого енергоефективного керування теплотехнічними системами будинку

У цьому підрозділі наведено результати синтезу та розробки апаратно-програмного забезпечення технології автоматизованого керування системою теплового насосу для опалення в холодний період та гарячого водопостачання, системою кондиціонування з відведенням тепла до теплового акумулятора для потреб гарячого постачання в теплий період, та системою вентиляції будинку.

Запропоноване апаратно-програмне рішення технології комп'ютерно-інтегрованого енергоефективного керування теплотехнічними процесами будинку забезпечує моніторинг та керування параметрами мікроклімату (температура та якість повітря – концентрація вуглекислого газу). У кожному житловому приміщенні будинку планується встановити бездротові мультисенсори для вимірювання температури (для системи опалення та кондиціонування), вологості повітря (як один з параметрів моніторингу) та рівня CO₂ (для системи вентиляції). Структура розробленого апаратно-програмного рішення автоматизованої технології наведена на рисунку 4.44, де: 1 – мультисенсори 7bit AirPoint-Q, що вимірюють концентрацію CO₂, температуру та вологість у приміщенні; 2 – шлюз бездротового зв'язку 7bit AirGate для отримання даних від мультисенсорів; 3 – маршрутизатор/роутер; 4 – хмарний сервер; 5 – віддалений доступ; 6 – інтеграційний контролер WebHMI з вбудованим веб-сервером; 7 – елементи теплового насосу; 8 – керування електронагрівачем теплового акумулятора (коли системи теплового насосу на кондиціонування не активні) та моніторинг температури теплоносія; 9 – система кондиціонування; 10 – система вентиляції.

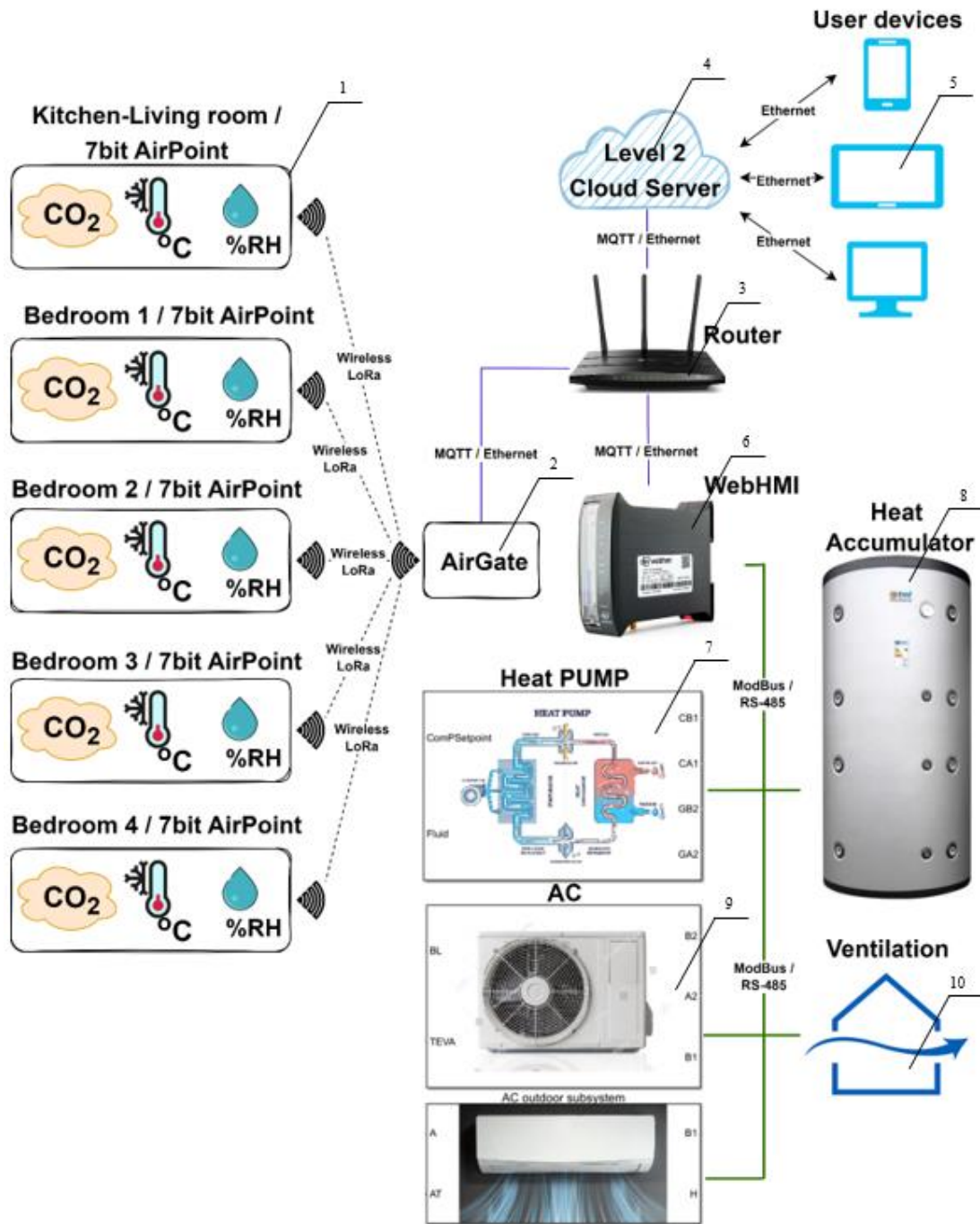


Рисунок 4.44 – Структура синтезованого апаратно-програмного рішення автоматизованої системи комп'ютерно-інтегрованого енергоефективного керування теплонасосними системами будинку

Принцип взаємодії між компонентами системи полягає в наступному. Мультисенсори (див. рис. 4.44, позначка 1), що вимірюють концентрацію CO₂, температуру та вологість у приміщеннях будинку, представлені модулями моніторингу параметрів повітря 7bit AirPoint-Q [224, 225], які передають отримані

дані через радіоканал LoRa на бездротовий комунікаційний шлюз 7bit AirGate [224, 225]. Цей модуль (див. рис. 4.44, позначка 2) приймає та передає дані моніторингу, отримані за радіоканалом, до системи верхнього рівня (див. рис. 4.44, позначка 4), що використовує протокол MQTT, через локальну мережу або Інтернет за допомогою роутера (див. рис. 4.44, позначка 3), в режимі прозорого моста, без проміжного зберігання, візуалізації та аналізу. Всі модулі збору даних та компоненти HVAC (див. рис. 4.44, позначки 7–10) об'єднані в одну систему за допомогою інтеграційного контролера (див. рис. 4.44, позначка 6). Контролер реального часу забезпечує збір даних щодо параметрів моніторингу, їх обробку, візуалізацію та архівування, керування елементами HVAC за протоколом ModBus/RS-485, а також віддалений доступ користувачів до отриманої інформації (див. рис. 4.44, позначка 5). У розробленому рішенні використано апаратний пристрій WebHMI, який є повноцінною SCADA-системою з вбудованим веб-сервером [226–228].

Зібрані дані групуються та конвертуються в необхідний формат за допомогою хмарної системи Level 2 скриптовою мовою Lua, а потім надсилаються за протоколом MQTT до WebHMI, як показано на рисунку 4.45.

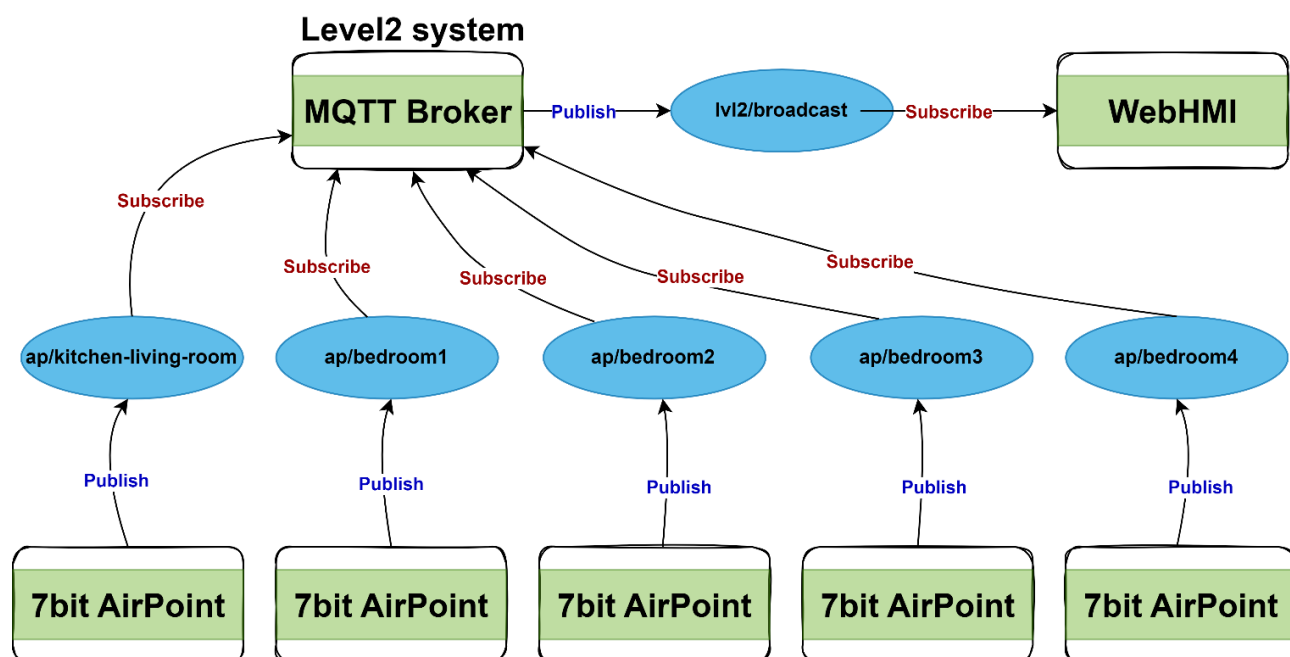


Рисунок 4.45 – Схема комунікації компонент системи за протоколом MQTT

На рисунку 4.45 Level 2 system [229] є брокером MQTT. Потік комунікації між мультисенсорами 7bit AirPoint-Q (клієнти) полегшується за допомогою «тем», показаних на синьому фоні. Стрілка всередину теми означає, що клієнт публікує інформацію за цією темою. Стрілка назовні від теми веде до клієнта, який підписався на тему та отримує опубліковану інформацію.

Взаємодія користувача з автоматизованою комп'ютерно-інтегрованою системою опалення, вентиляції та кондиціонування відбувається через мережу за допомогою веб-інтерфейсу WebHMI (див. рис. 4.44, позначка 6). Це стосується як використання розробленої автоматизованої технології, так і її конфігурації. Для доступу можна використовувати будь-який електронний пристрій з доступом до мережі Інтернет (див. рис. 4.44, позначка 5).

На рисунку 4.46 наведено інтерфейс розробленого особистого кабінету користувача, який відображає загальну схему приміщень будинку зі встановленим обладнанням та показники роботи системи. Зовнішня температура змінюється протягом дня в межах заданого діапазону. Система кондиціонування та опалення підтримує температуру в приміщенні на рівні заданого значення (+21 °C) в холодний період та (+22 °C) в теплий період. Система вентиляції регулює потік повітря, щоб утримувати рівень CO₂ не вище 800 ppm [230–233].

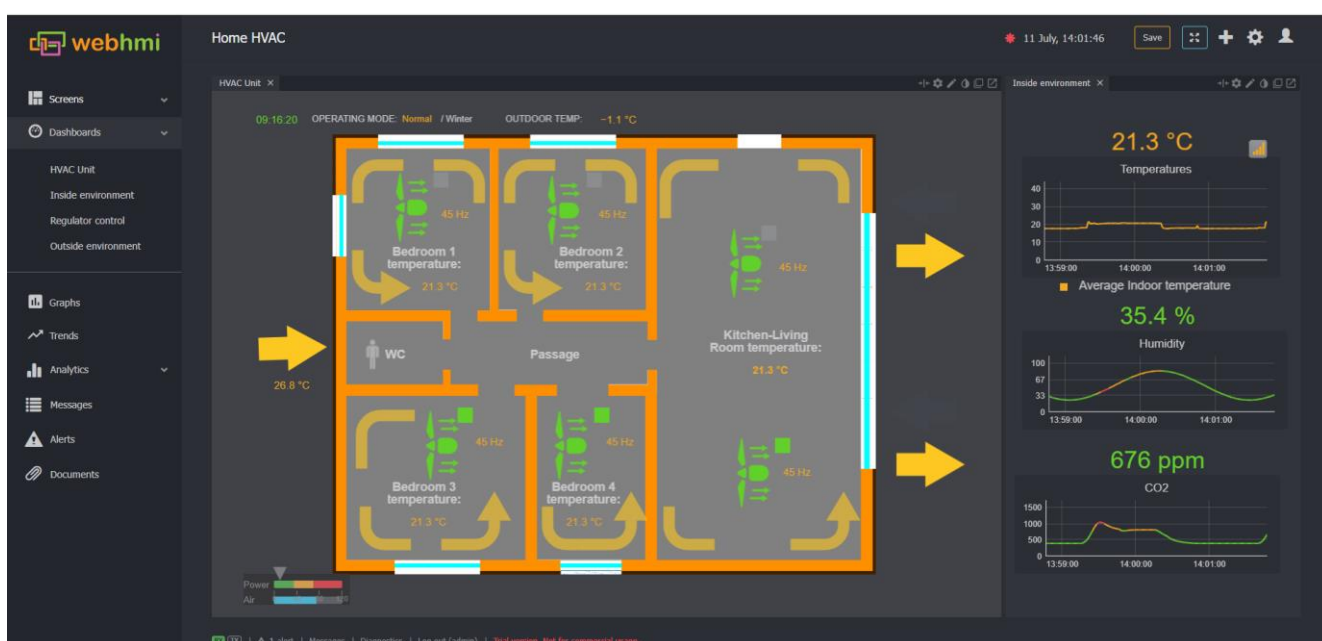


Рисунок 4.46 – Загальний вигляд головного екрану інтерфейсу користувача

Синтезоване апаратно-програмне рішення досліджуваної комп'ютерно-інтегрованої технології працює в автоматизованому режимі. Користувач може змінювати задані значення мікроклімату (температуру, допустимий рівень CO₂) на ПІ-регуляторі (див. рис. 4.2, позначка 1), параметри будинку (матеріал стін, теплоізоляція, розміри й характеристики вікон та інше для теплових моделей) та моніторити поточний стан системи.

В запропонованому інтерфейсі відображається мікроклімат (температура: поточне і попереднє значення) в кожній кімнаті та відображається чи працюють радіатори/кондиціонер і вентиляція за допомогою мнемонічних схем. Крім цього в інтерфейсі відображається поточний режим роботи (зима / літо) та динаміка температури навколишнього середовища. В режимі реального часу відображаються графіки зміни середньої температури, відносної вологості та концентрації CO₂ в будинку. Таким чином, запропоноване апаратно-програмне рішення дозволяє використовувати його у віддаленому режимі з ергономічним користувацьким інтерфейсом.

4.4 Результати використання й упровадження автоматизованої технології та перспективні напрямки її подальших досліджень

Основні результати дисертаційного дослідження є практично-орієнтованими та впроваджені у науково-дослідні розробки, навчальний процес НТУ «Дніпровська політехніка», а також до виробничого процесу практикуючого підприємства в галузі автоматизації теплотехнічних об'єктів, а саме:

– під час виконання держбюджетної науково-дослідної роботи «Дослідження методів підвищення ефективності автоматизованого керування тепловою роботою агрегатів великої потужності промислового та побутового призначення» (№ держреєстрації 0122U002601 від 19.05.2022 р.);

– під час проектування та модернізації систем автоматизованого керування тепловою роботою агрегатів великої потужності виробництва ТОВ «Новел Проджектс Енд Солюшинс» (акт впровадження від 11.04.2024 р.);

– під час викладання лекційного матеріалу та практичних робіт із дисципліни «Адаптивні системи управління» аспірантам спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка (акт впровадження від 15.04.2024 р.).

Перспективними напрямками, що дозволять розвинути та поглибити отримані результати дисертаційного дослідження, є:

– реалізація розроблених комп'ютерних моделей у вигляді вбудованого програмного забезпечення програмованих логічних контролерів різних фірм-виробників із подальшим формулюванням можливості та перспектив їх використання в різних умовах, в тому числі, в умовах критичної інфраструктури;

– екстраполяція отриманих результатів досліджень із розробки та синтезу апаратно-програмного, інформаційного та структурно-функціонального забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування процесами опалення й кондиціонування на масштабні адміністративні та промислові будівлі;

– інтеграція розробленого технічного й комп'ютерного забезпечення до комплексів автоматизації промислових підприємств у вигляді структурно-алгоритмічних компонент та забезпечення їх апаратної, конструктивної й програмної сумісності;

– довготривалі натурні експериментальні випробування розробленої технології автоматизованого керування в реальних умовах експлуатації з подальшим формулюванням напрямків оптимізації техніко-функціональних характеристик розробки;

– комплексна оцінка техніко-економічних показників розробленої технології автоматизованого керування на підставі її впровадження та використання в реальних умовах експлуатації.

Таким чином, проведення подальших перспективних досліджень за вищевказаними напрямками дозволить розширити та поглибити можливість наукового обґрунтування програмно-технічних рішень з підвищення енергоефективності теплотехнічних промислових та побутових об'єктів і процесів.

4.5 Висновки за четвертим розділом

У цьому розділі дисертації було розв'язано дослідницькі задачі, що присвячені створенню та валідації комп'ютерних моделей апаратно-програмного забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого енергоефективного керування теплонасосними системами, а також критичному аналізу отриманих результатів досліджень з формулюванням рекомендацій з практичного використання розробленої автоматизованої технології та обґрунтуванням перспектив її подальшого розвитку. Основні кількісні та якісні результати цього розділу полягають у наступному:

1. Розроблено універсальну комп'ютерну модель автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами з урахуванням критерію енергоефективності, що реалізує автоматизоване регулювання параметрів процесів опалення та кондиціонування. Універсальність полягає в можливості ергономічно змінювати як теплотехнічні параметри будівель, так і інтегрувати до неї системи опалення та кондиціонування інших типів. Такий підхід дозволяє як порівнювати ефективність систем між собою в обраних умовах, так і оцінювати техніко-функціональні параметри однієї системи в різних умовах експлуатації.

2. Оцінено техніко-функціональні характеристики запропонованої та дослідженої технології автоматизованого керування теплонасосними системами шляхом комп'ютерного експерименту. В результаті цього було встановлено, що коефіцієнт перетворення енергії теплового насоса лежить в межах від 2,6 до 6,7 (середнє значення 4,6) та коефіцієнт перетворення енергії для системи кондиціонування з тепловіденням для потреб гарячого водопостачання дорівнює 3,5.

3. Встановлено, що розроблена комп'ютерна модель може бути прийнята за основу під час створення технології автоматизованого керування роботою теплових агрегатів та виконано синтез апаратно-програмного рішення такої

технології на базі WebHMI та 7bit мультидатчиків, що дозволяє реалізувати механізми автоматизованого керування теплонасосними системами у віддаленому режимі.

4. Обґрунтовано практичне значення отриманих результатів досліджень, яке полягає в можливості застосування розроблених комп'ютерно-інтегрованих методів, апаратно-програмних рішень і комп'ютерних моделей під час проектування нових або модернізації існуючих засобів автоматизації теплонасосних систем, які є функціональними складовими систем опалення, кондиціонування, вентиляції та гарячого водопостачання побутових, інфраструктурних і промислових об'єктів.

5. Сформульовано перспективні напрямки подальших досліджень, які дозволять розширити та поглибити можливість наукового обґрунтування програмно-технічних рішень з підвищення енергоефективності теплотехнічних промислових та побутових об'єктів і процесів за рахунок створення й упровадження автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі отриманих теоретичних та експериментальних результатів розв'язано актуальну науково-прикладну задачу створення та дослідження автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування тепловими насосами, що дозволило підвищити енергоефективність систем централізованого тепlopостачання будівель шляхом розробки та використання інформаційного, програмного й технічного забезпечення засобів автоматизації. Основні науково-прикладні результати дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз світового та національного досвіду модернізації та підвищення ефективності теплотехнічних систем. В результаті цього було встановлено, що основним глобальним трендом є збільшення частки відновлювальних джерел енергії в загальному обсязі генерування теплової та електричної енергії, які, в свою чергу, мають реалізовувати адаптивні режими функціонування в залежності від умов їх експлуатації. Адаптація до мінливих умов експлуатації може бути реалізована шляхом розробки та інтеграції автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого керування технологічними процесами генерування, акумулювання та розподілення енергії, що дозволяє значно підвищити загальну енергоефективність теплотехнічних об'єктів і процесів. Проведений аналіз і узагальнення сучасних напрямків і технологій автоматизації теплотехнічними процесами та об'єктами дозволив обґрунтувати необхідність системної інтеграції цифрових і комп'ютерно-інтегрованих технологій, а також апаратно-програмних компонент вбудованої обробки й аналітики даних під час розробки технологій автоматизованого керування теплонасосними системами.

2. Запропоновано та доведено ефективність методів побудови автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого енергоефективного керування теплонасосними системами промислових теплотехнічних об'єктів, а саме: методу автоматизованого керування технологічними процесами в умовах конденсаційних електростанцій завдяки використанню автоматизованого теплового насоса під час утилізації тепла, що дозволило досягти значень

коефіцієнта використання теплоти до 78 % при коефіцієнті корисної дії базового циклу 41 % за умови відсутності впливу процесу генерації теплової енергії на якісні й кількісні показники виробництва електроенергії; методу автоматизованого керування технологічними процесами в умовах гідроелектростанцій завдяки введенню до схеми технологічного процесу утилізації теплоти теплового насоса, що дозволило збільшити коефіцієнт перетворення енергії на 43 % при допустимих навантаженнях на систему опалення та заощадити до 30 % умовного палива на потреби опалення та гарячого водопостачання в порівнянні з теплотехнічними системами на основі котлів.

3. Розроблено та досліджено структурно-функціональне забезпечення методу підвищення енергоефективності теплопостачання на основі багатоступневих теплонасосних систем з інтегрованими засобами автоматизованого керування. На основі аналізу результатів досліджень різних схем багатоступеневого автоматизованого теплонасосного устаткування доведено, що найбільш ефективною за критеріями надійності та капітальних затрат на впровадження та експлуатацію є двоступенева архітектура.

4. Запропоновано та досліджено інформаційно-програмне забезпечення засобів комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами, під час розробки якого комплексно враховано дестабілізуючий вплив температури повітря навколишнього середовища і ґрунту, режимів роботи функціональних елементів системи та зональної температури й концентрації двоокису вуглецю в повітрі будівлі у вигляді вбудованого програмного забезпечення, що дозволило реалізувати механізми автоматизованого керування теплонасосними системами під час опалення, кондиціонування та вентиляції у віддаленому режимі на основі людино-машинного інтерфейсу.

5. Синтезовано та валідовано апаратно-програмне забезпечення автоматизованої технології комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосними системами за критерієм енергоефективності, яке одночасно враховує теплові втрати від покрівлі, стін та вікон будівель, фізико-хімічні властивості холодоагенту, динаміку температури повітря навколишнього

середовища та ґрунту, що дозволяє підтримувати комфортну температуру в будівлі під час опалення та кондиціонування.

6. Розроблено та досліджено комплексну модель процесу комп'ютерно-інтегрованого керування системою кондиціонування методами комп'ютерного експерименту, яка реалізує адаптивну утилізацію тепла для потреб гарячого водопостачання в залежності від температури теплоносія в тепловому акумуляторі, що дозволило досягти значення коефіцієнта перетворення енергії, яке визначається як відношення тепловіддачі випарника до загальної споживаної потужності системи кондиціонування, на рівні 3,5.

7. Обґрунтовано практичне значення отриманих результатів розробок і досліджень, яке інтегрально полягає в застосуванні запропонованих комп'ютерно-інтегрованих методів, апаратно-програмних рішень і комп'ютерних моделей під час проєктування нових або модернізації існуючих засобів автоматизації теплонасосних систем, які є функціональними складовими систем опалення, кондиціонування, вентиляції та гарячого водопостачання побутових, інфраструктурних і промислових об'єктів. Отримані результати дисертаційного дослідження впроваджено до виробничого процесу ТОВ «Новел Проджектс Енд Солюшинс» під час модернізації засобів автоматизації теплотехнічних об'єктів, а також під час виконання науково-дослідних розробок і навчального процесу НТУ «Дніпровська політехніка».

8. Сформульовано перспективні напрямки подальших досліджень, які дозволять розширити та поглибити можливість наукового обґрунтування програмно-технічних рішень з підвищення енергоефективності теплотехнічних промислових та побутових об'єктів і процесів, що на них протікають, за рахунок створення та впровадження автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого керування теплонасосним устаткуванням.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kreider J.F., Curtiss P.S., Rabl A. Heating and Cooling of Buildings: Design for Efficiency: Second ed. NY: CRC Press, 2009. 863 p.
2. Clements-Croome D. Intelligent Buildings: An Introduction. Routledge, 2020. 232 p.
3. Prusak D., Karpiel G., Kułakowski K. The Architecture of a Real-Time Control System for Heating Energy Management in the Intelligent Building. *Energies*. 2021. Vol. 14. P. 1–13.
4. Morkunaite L., Pupeikis D., Jurelionis A., Fokaides P.A., Papadopoulos A. An Analytical Model for the Impact of Building Control and Automation Upgrade on Space Heating Energy Efficiency. *Buildings*. 2022. Vol. 12. P. 1–13.
5. International Energy Agency (IEA): District Heating. URL: <https://www.iea.org/energy-system/buildings/district-heating> (дата звернення: 10.07.2024).
6. Galindo Fernández M., Roger-Lacan C., Gähns U., Aumaitre V. Efficient district heating and cooling systems in the EU Case studies analysis, replicable key success factors and potential policy implications. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016. 146 p.
7. Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action: Renewable Energy. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Dossier/renewable-energy.html> (дата звернення: 04.07.2024).
8. Energy Cities. The European learning community for future-proof cities: Integrated district heating and cooling. URL: <https://energy-cities.eu/best-practice/integrated-district-heating-and-cooling/> (дата звернення: 05.07.2024).
9. IEA: The Future of Heat Pumps in China. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/217e820f-3344-4144-9d2c-cc444e080421/FutureofHeatpumpsinChina.pdf> (дата звернення: 05.07.2024).
10. Johansen K., Werner S. Something is sustainable in the state of Denmark: A review of the Danish district heating sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 158. P. 1–15.
11. UABIO: Denmark's pathway to world leadership in renewable energy. URL:

<https://uabio.org/en/news/9341/> (дата звернення: 05.07.2024).

12. Martin N., Thellufsen J.Z., Chang M., Talens-Peiró L., Madrid-López C. The many faces of heating transitions. Deeper understandings of future systems in Sweden and beyond. *Energy*. 2024. Vol. 290. P. 1–12.

13. Ericsson K., Werner S. The introduction and expansion of biomass use in Swedish district heating systems. *Biomass and Bioenergy*. 2016. Vol. 94. P. 57–65.

14. Wrzalik A. Innovative Solutions in the Process of Heat Supply. *Quality Production Improvement*. 2019. Vol. 1 (1). P. 155–161.

15. Khujaev P., Abdulkhaev Z., Numonjonov Sh., Karimov N., Akhunov K. Modernization of existing infrastructure, heat supply systems. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 538. P. 1–11.

16. Werner S. International review of district heating and cooling. *Energy*. 2017. Vol. 137. P. 617–631.

17. Veerapen J.P. The International District Energy Climate Awards 2011: Very-Low-Temperature District Heating for LowEnergy Buildings in Small Communities Showcase Larch Garden II, Lystrup, DENMARK. Aarhus, 2011. 12 p.

18. EDGE Stadium Amsterdam. URL: <https://edge.tech/buildings/edge-stadium-amsterdam> (дата звернення: 02.07.2024).

19. E-On: Application Global District Energy Award District Heating and Cooling System in Malmö, Sweden. URL: https://www.districtenergyaward.org/wp-content/uploads/2012/10/Malmo_Sweden-District_Energy_Climate_Award.pdf (дата звернення: 02.07.2024).

20. Bullitt Center: Building Features. URL: <https://bullittcenter.org/building/building-features/> (дата звернення: 01.07.2024).

21. The Atlas of Urban Tech: Fujisawa Sustainable Smart Town. URL: <https://atlasofurbantech.org/cases/fujisawa-smart-town-jpn/> (дата звернення: 03.07.2024).

22. Long-term renovation strategy 2020–2050 FINLAND. Report according to Article 2a of Directive (2010/31/EU) on the energy performance of buildings, as amended by Directive 2018/844/EU. Helsinki, 2020. 81 p.

23. Про альтернативні джерела енергії: Закон України від 20.02.2003 р. № 555-IV. Дата оновлення: 21.11.2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text> (дата звернення: 25.05.2024).

24. Про теплопостачання: Закон України від 02.06.2005 р. № 2633-IV. Дата оновлення: 04.06.2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2633-15#Text> (дата звернення: 27.06.2024).

25. ДСТУ ISO 50001: 2020 (ISO 50001:2018, IDT). Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання. [Чинний від 2020-09-15]. Вид. офіц. Київ, 2020. 25 с.

26. Демченко В. Г. Дослідження непродуктивних втрат теплоти в теплових мережах та обґрунтування нового способу транспортування теплоносія [Ел. ресурс]. Київ: Інститут технічної теплофізики НАН України, 2018. 22 с. URL: https://www.researchgate.net/publication/325260308_Doslidzenna_neproduktivnih_vtratt_teplosti_v_teplovih_merezah_ta_obgruntuvanna_novogo_sposobu_transportuvanna_teplososia.

27. Energy Map: Обсяг втрат теплової енергії у теплових мережах. URL: <https://map.ua-energy.org/uk/resources/67a172e1-f5f5-4605-9f69-4aeb7544d7b5/> (дата звернення: 25.06.2024).

28. Завгородня С.П. Пріоритетні енергоефективні заходи у сферах транспортування і постачання енергетичних ресурсів населенню [Ел. ресурс]. Київ: Національний інститут стратегічних досліджень, 2021. 5 с. URL: <https://niss.gov.ua/sites/default/files/2021-12/az-transportuvannya-i-postachannya-energii.pdf>

29. Демченко В. Г. Технології зберігання теплоти в системі центрального опалення. *Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики: XXXI Міжнародна конференція м. Одеса, 17-18 червня 2021 р. Одеса, 2021. С. 1–4.*

30. Іваницький Г., Коник А., Степанюк А., Демченко В. Моделювання процесів теплообміну в «тепловому ядрі», заповненому теплоаккумуляційним матеріалом. *Енерготехнології та ресурсозбереження. № 76 (3). С. 52–70.*

31. ISSUU: UNHRA: Теплові насоси в Україні. Інформаційний бюлетень.

Випуск 1, 2018. URL: https://issuu.com/esco-ecosys/docs/_____2018 (дата звернення: 25.11.2023).

32. Kharchenko V.S. (ed.) Internet of Things for Industry and Human Application. In Volumes 1–3. Vol. 1. Fundamentals and Technologies. Ministry of Education and Science of Ukraine, National Aerospace University KhAI, 2019. 605 p.

33. Kharchenko V.S. (ed.). Internet of Things for Industry and Human Application. In Volumes 1–3. Vol. 2. Modelling and Development. Ministry of Education and Science of Ukraine, National Aerospace University KhAI, 2019. 547 p.

34. Kharchenko V.S. Internet of Things for Industry and Human Application. In Volumes 1–3. Vol. 3. Assessment and Implementation. Ministry of Education and Science of Ukraine, National Aerospace University KhAI, 2019. 918 p.

35. IT Enterprise: Industry 4.0. URL: <https://www.it.ua/knowledge-base/technology-innovation/industry-4> (дата звернення: 05.12.2023).

36. Ma S., Ding W., Liu Y., Zhang Y., Ren Sh., Kong X., Leng J. Industry 4.0 and cleaner production: A comprehensive review of sustainable and intelligent manufacturing for energy-intensive manufacturing industries. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 467. P. 1–20.

37. Alcácer V., Cruz-Machado V. Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2019. Vol. 22 (3). P. 899–919.

38. АППАУ: Стратегія розвитку «Індустрія 4.0». URL: <https://mautic.appau.org.ua/asset/42:strategia-rozvitku-4-0-v3.pdf> (дата звернення: 05.06.2024)

39. Buratto W.G., Muniz R.N., Nied A., Barros C.F.d.O., Cardoso R., Gonzalez G.V. A Review of Automation and Sensors: Parameter Control of Thermal Treatments for Electrical Power Generation. *Sensors*. 2024. Vol. 24. P. 1–23.

40. Ismail M., Yebiyi M., Chaer I. A Review of Recent Advances in Emerging Alternative Heating and Cooling Technologies. *Energies*. 2021. Vol. 14. P. 1–24.

41. Montalbán Pozas B., Lucas Bonilla M., Serrano Candela F., Bustos García de

Castro P. A Methodology for Designing an Automated System to Improve the Thermal Performance of a Large Building in Operation. *Buildings*. 2023. Vol. 13. P. 1–25.

42. Uckelmann D., Kutzner K., Kreber S.. Energy Efficiency Through Intelligent Electricity Data Acquisition. *Industry 4.0 Science*. Vol. 40 (2). P. 87–93.

43. Krutz R.L. Industrial Automation and Control System Security Principles: 2nd Edition. Pittsburgh: International Society of Automation, 2016. 577 p.

44. Cano-Suñén E., Martínez I., Fernández Á., Zalba B., Casas R. Internet of Things (IoT) in Buildings: A Learning Factory. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. P. 1–26.

45. Sureshkumar M.S., Rahul R., Joshika S., Suraj S. Internet-of-Things-Based Smart Home Energy Management System with Multi-Sensor Data Fusion. *Engineering Proceedings*. 2024. Vol. 66. P. 1–4.

46. Polyvianchuk A., Semenenko R., Kapustenko P., Klemeš J.J., Arsenyeva O. The efficiency of innovative technologies for transition to 4th generation of district heating systems in Ukraine. *Energy*. 2023. Vol. 263, Part D. P. 1–11.

47. Bendea G., Felea I., Hora C., Bendea C., Felea A., Blaga A. Energy Performance Analysis of a Heat Supply System of a University Campus. *Energies*. 2023. Vol. 16. P. 1–31.

48. Fantozzi F., Hamdi H., Rocca M., Vegnuti S. Use of Automated Control Systems and Advanced Energy Simulations in the Design of Climate Responsive Educational Building for Mediterranean Area. *Sustainability*. 2019. Vol. 11. P. 1–22.

49. Woroniak G., Piotrowska-Woroniak J., Woroniak A., Owczarek E., Giza K. Analysis of the Hybrid Power-Heating System in a Single-Family Building, along with Ecological Aspects of the Operation. *Energies*. 2024. Vol. 17. P. 1–24.

50. Системи централізованого тепlopостачання з інтеграцією відновлювальних джерел енергії: монографія / О.П. Арсеньєва та ін.; за заг. ред. О.П. Арсеньєвої. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. 217 с.

51. Ковалко О.М., Новосельцев О.В., Євтухова Т.О. Вертикально-інтегровані структури управління ефективністю функціонування систем комунальної теплоенергетики: монографія. Київ: Інститут технічної теплофізики НАН України, 2017. 258 с.

52. Steingrube A., Bao K., Wieland S., Lalama A., Kabiro P.M., Coors V., Schröter B. A Method for Optimizing and Spatially Distributing Heating Systems by Coupling an Urban Energy Simulation Platform and an Energy System Model. *Resources*. 2021. Vol. 10. P. 1–19.

53. Wang F., Zhao R., Xu W., Huang D., Qu Z. A Heater-Assisted Air Source Heat Pump Air Conditioner to Improve Thermal Comfort with Frost-Retarded Heating and Heat-Uninterrupted Defrosting. *Energies*. 2021. Vol. 14. P. 1–13.

54. Liang H., Xie X., Liu M., Niu S., Su H. Research on Strategies for Air-Source Heat Pump Load Aggregation to Participate in Multi-Scenario Demand Response. *Energies*. 2024. Vol. 17. P. 1–16.

55. Ołtarzewska A., Krawczyk D.A. Simulation and Performance Analysis of an Air-Source Heat Pump and Photovoltaic Panels Integrated with Service Building in Different Climate Zones of Poland. *Energies*. 2024. Vol. 17. P. 1–17.

56. Rapucha A., Narayanan R., Jha M. Heat Pumps with Smart Control in Managing Australian Residential Electrical Load during Transition to Net Zero Emissions. *Energies*. 2024. Vol. 17. P. 1–18.

57. Frik A., Bielskus J., Džiugaitė-Tumėnienė R., Motuzienė V. Experimental Studies and Performance Characteristics Analysis of a Variable-Volume Heat Pump in a Ventilation System. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. P. 1–23.

58. Tomczuk K., Obstawski P. Analysis of the Cooperation of a Compressor Heat Pump with a PV System. *Sustainability*. 2024. Vol. 16. P. 1–29.

59. Byrne P. Modelling and Simulation of Heat Pumps for Simultaneous Heating and Cooling, a Special Issue. *Energies*. 2022. Vol. 15. P. 1–2.

60. Zhuang Z., Zhao J., Mi F., Zhang T., Hao Y., Li S. Application and Analysis of a Heat Pump System for Building Heating and Cooling Using Extracting Heat Energy from Untreated Sewage. *Buildings*. 2023. Vol. 13. P. 1–19.

61. Olishevskiy I., Gusev O., Isakova M. Automated heat pump heating system using non-traditional energy sources. *Widening our Horizons: The 16th International Forum for Students and Young Researchers*. м. Дніпро, 21–22 квіт. 2021 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2024. С. 215–216.

62. Olishevskiy I., Isakova M. Automated heat recovery technology in ventilation systems of buildings. *Eurolanguages – 2020: innovations and development: XVIII міжнар. студентська конф.* м. Дніпро, 04 груд. 2020 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2020. С. 209–211.

63. Olishevskiy I., Nikolskaya A., Lapina V. Automated technology to control high-power thermal units. *Євромови-2019: 17-та міжн. наук.-практ. конф. студ. та мол. уч.* м. Дніпро, груд. 2019 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2019. С. 95.

64. Olishevskiy I., Kandziuba S., Grytsenko E. Automation Determination of Heating Thermal Loading for Residential Buildings and Rational Thickness of Building Insulation. *Widening our Horizons: The 9th International Forum for Students and Young Researchers.* м. Дніпро, 3–4 квіт. 2014 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2014. С. 51.

65. Dreshpak N., Vypanasenko S., Olishevsky I. Algorithm for forecasting energy efficiency of steel production. *Гірнича електромеханіка та автоматика.* 2016. № 97. P. 108–112.

66. Grishyn M.V., Matiko F.D., Tarakhtij O.S., Zhanko K.O., Vereskun S.O. Automated solid fuel quality control and monitoring system. *Herald of Advanced Information Technology.* 2023. Vol. 6 (3). P. 215–226.

67. Grishyn M.V., Matiko F.D., Tarakhtij O.S., Zhanko K.O., Shynder A.A. Mathematical Model of a Steam Boiler As a Control Plant. *Applied Aspects of Information Technology.* 2023. Vol. 6 (3). P. 254–257.

68. Jin T. Improving Korean Energy Efficiency Resource Standards to Vitalize Energy Efficiency Investment. *Journal of Energy Engineering.* 2022. Vol. 31 (2). P. 87–97.

69. Olishevskiy I., Gusev O., Nikolskaya A., Lapina V. Constructing and researching a simulation model of heating and air conditioning system for residential building. *Widening our Horizons: The 15th International Forum for Students and Young Researchers.* м. Дніпро, квіт. 2020 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2020. С. 182.

70. Olishevskiy I., Gusev O., Zaika L. Efficient way to utilize the heat of turbocharger stations. *Європейські мови – 2018: інновації та розвиток: XVI міжнар. студентська конф.* м. Дніпро, 30 лист. 2018 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2018. С. 64.

71. Olishevskiy I., Olishevskiy G., Shvets O. Evaluation of Using Thermal Losses of Strong Power Transformers. *Widening our Horizons: The 11th Int. Forum for Stud. and Young Resear.* м. Дніпро, квітн. 2016 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2016. С. 2.

72. Olishevskiy I., Olishevskiy G., Grytsenko E. Justification for the Use of Heat Pumps for Heating Mode of Condensing Power Plants. *Widening our Horizons: The 10th Int. Forum for Students and Young Researchers.* м. Дніпро, 23-24 квіт. 2015 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2015. С. 40.

73. Olishevskiy I., Olishevskiy G., Zaika L. Justification of the use of a heat accumulator for energy saving in buildings. *Європейські мови – 2017: інновації та розвиток: XV міжнар. студентська конф.* м. Дніпро, 24 лист. 2017 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2017. С. 206–208.

74. Olishevskiy I., Olishevskiy G., Tokar L. Rational scheme of staged heat-pump heating system. *Widening our Horizons: The 12th Int. Forum for Students and Young Researchers.* м. Дніпро, 20-21 квіт. 2017 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2017. Р. 52.

75. Olishevskiy I., Gusev O. Simulation Modeling of Automated Control System by Complex Heating and Air Conditioning Systems. *Євромови-2021: інновації та розвиток: 19-та міжнародної науково-практичної конференції студентів та молодих учених.* м. Дніпро, 9 груд. 2021 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2021. С. 213–214.

76. Olishevskiy I., Olishevskiy G., Gusev O., Zaika L. The method of utilization of heat of the air conditioning system that ensures the operation of hot water. *Widening our Horizons: The 14th International Forum for Students and Young Researchers.* м. Дніпро, 11–12 квіт. 2019 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2019. Р. 93.

77. Olishevskiy I., Olishevskiy G., Shvets O. Rationale for Using Heat Pumps for Heating Buildings. *Widening our Horizons: The 8th Int. Forum for Students and Young Researchers.* м. Дніпро, 11–12 квіт. 2013 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2013. С. 62.

78. Остапенко О.П., Леценко В.В., Тіхоненко Р.О. Енергетична ефективність парокompресійних теплових насосів з електричним і когенераційним приводами. *Наукові Праці ВНТУ.* 2014. Вип. 4. С. 1–9.

79. Papika Yu.A., Lysenko O.H., Koshelenko Ye.V., Olishevskiy I.H. Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality. *Naukovyi*

Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2021. № 2. P. 97–103.

80. Bien Z., Xu J.-X. *Iterative Learning Control: Analysis, Design, Integration and Application*. NY, 1998. 373 p.

81. Chiou C.B., Chiou C.H., Cni C.M., Lin S.L. The study of energy-saving strategy for direct expansion air conditioning system. *Energy and Buildings*. 2008. Vol. 40 (9). P. 1660–1665.

82. Cho E., Ha M., Chang S., Hwang Y. Variable fuzzy control for heat pump operation. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2011. Vol. 25 (1). P. 201–208.

83. Човнюк Ю., Чередніченко П., Москвітіна А., Шишина М. Розрахунок конструктивних елементів акумулятору теплоти з рідким та твердим теплоакumuлюючим матеріалом. *Містобудування та територіальне планування*. 2021. Вип. 77. С. 475–486.

84. Demchenko V.G., Gron S.S., Pogorelova N.D. Construction Calculation of Mobile Heat Storage. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2019. Vol. 41 (4). P. 35–43.

85. Dai Y.D., Yu N. Experimental Study on Solar Assisted Heat-Pump Water Heating System. *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vols. 178-181. P. 151–154.

86. De Santoli L., Lo Basso G., Astiaso Garcia D., Piras G., Spiridigliozzi G. Dynamic Simulation Model of Trans-Critical Carbon Dioxide Heat Pump Application for Boosting Low Temperature Distribution Networks in Dwellings. *Energies*. 2019. Vol. 12 (3). P. 1–20.

87. Deng J., Wei Q., He S., Liang M., Zhang H. What Is the Main Difference between Medium-Depth Geothermal Heat Pump Systems and Conventional Shallow-Depth Geothermal Heat Pump Systems? Field Tests and Comparative Study. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9 (23). P. 1–20.

88. Ding D.F., Chai J.H., Wang L.F., Chen W. An Experimental Research on a Phase Change Heat-Storage-Type Heat Pump Water Heater. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vols. 448-453. P. 3413–3416.

89. Dzierwa P., Taler J., Peret P., Taler D., Trojan M. Transient numerical analysis

of charging a heat accumulator in a combined heat and power plant. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 323. P. 1–6.

90. Egamberdiyevich K.B., Khamudillayevich E.S. Accumulation Of Heat In The Substrate-Soil Cover Around The Heat Accumulator Of Heliogreenhouse-Livestock Building. *The American Journal of Engineering And Techonology*. 2020. Vol. 02 (07). P. 30–34.

91. Олішевський І.Г., Олішевський Г.С. Автоматизована методика розрахунку параметрів для нетрадиційних технологій опалення та кондиціонування будівель. *Електротехніка та електроенергетика*. Запоріжжя, 2021. № 3. С. 40–47.

92. Фіалко Н.М., Степанова А.І., Навродська Р.О., Гнедаш Г.О., Шевчук С.І. Комплексні методики аналізу ефективності та оптимізації теплоутилізаційних систем. *Science and Innovation*. 2021. Вип. 17 (4). С. 11–18.

93. Чен Г.М., Морозюк Л.І., Єрін В.О., Соколовська-Єфименко В.В., Воловик О.С. Термодинамічний аналіз комбінованої компресорно-ежекторної холодильної машини. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2021. Вип. 57 (3). С. 165–175.

94. Кочан О.В. Нейромережевий метод керування для термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2012. Вип. 2 (21). С. 35–45.

95. Лего К.В., Козій І.С. Вимога сучасності - теплові насоси як елемент енерго- і ресурсозбереження. *Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студ. фак-ту технічних систем та енергоефективних технологій*. м. Суми, 14-17 квіт. 2015 р. Суми: СумДУ, 2015. С. 132–133.

96. Олішевський Г.С., Олішевський І.Г. Раціональні технології утилізації теплоти системи вентиляції для теплотехнічних систем будівлі. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Ракетно-космічна техніка*. 2020. № 4, Т. 28, Вип. 23. С. 164–174.

97. Олішевський І.Г., Гусєв О.Ю. Розробка інформаційно-вимірювальної

системи для керування роботою комплексної системи опалення та кондиціонування. *Молодь: наука та інновації*: Матеріали X Міжн. наук.-техн. конф. студ., асп. та мол. вчених. м. Дніпро, 23–25 лист. 2022 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2022. С. 369–370.

98. Олішевський І.Г., Кандзюба С.П. Автоматизація визначення теплового навантаження опалення житлових будівель. *Молодь: наука та інновації*: перша всеукр. наук.-техн. конф. студ., асп. і мол. уч. м. Дніпро, 3–4 груд. 2013 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2013. С. 475.

99. Olishevskiy I.H., Gusev O.Yu., Olishevskiy H.S. Automated methodology of calculating parameters for non-traditional technology of heating mode of hydro-storage power plant station. *Electrical Engineering and Power Engineering. Zaporizhzhia*, 2023. № 1. P. 36–42.

100. Olishevskiy I. Automated methodology of calculating parameters for heating mode of hydro storage power plant station. *Молодь: наука та інновації*: Матеріали XI Міжн. наук.-техн. конф. студ., асп. та мол. вчених. м. Дніпро, 22–24 лист. 2023 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2023. С. 42–44.

101. Olishevskiy I.H., Gusev O.Yu., Mamuzić I. (2024). Automated method of calculating parameters for a heating system based on heat pumps. *17th Symposium „Materials and metallurgy“*. Zagreb, 25 Mar. 2024. Zagreb, 2024. P. 488.

102. Olishevskiy G. S., Olishevskiy I.G. Ground of Rational Technology of Utilization of Warmth of the System of Conditioning for the Hot Watersupply. *Journal of Rocket-Space Technology*. 2019. Vol. 27 (4). P. 35–41.

103. Ommen T., Markussen W.B., Elmegaard B. Heat pumps in combined heat and power systems. *Energy*. 2014. Vol. 76. P. 989–1000.

104. Тарасенко О.М., Угольніков С.В. Використання математичного моделювання для підвищення ефективності роботи трубчатих повітропідігрівників. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD–2016)*: тези доп. 24-ї міжнар. наук.-практ. конф. м. Харків, 18–20 трав. 2016 р. Харків: НТУ "ХПІ", 2016. С. 292.

105. Serey N., Ahmad D., Jouhara H. Air-to-air heat pump: review of recent

advances and future potential. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 116. P. 1–6.

106. Sit M., Juravliov A. Hybrid Carbon Dioxide Heat Pump for the Multifamily Residential Buildings in the Heat Supply System Based on CHP. *Problems of the Regional Energetics*. 2021. Vol. 3(51). P. 91–98.

107. Heat Pumps – The Basics. URL: <https://ior.org.uk/public/downloads/wTcрw/HeatPumpsTheBasics.pdf> (дата звернення: 12.02.2023).

108. Босий М.В. Теплові насоси для теплопостачання та гарячого водопостачання агропромислових підприємств. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The series: Mechanization and Automation of Production Processes*. 2022. Vol. 2(48). С. 3–8.

109. Олішевський Г.С., Олішевський І.Г. Обґрунтування методу утилізації теплоти системи кондиціонування для теплонасосної системи опалення. *Інформаційні системи, механіка та керування*. 2017. № 17. С. 86–94.

110. Дубровська В.В., Шкляр В.І. Термодинаміка та теплообмін: навч. посіб. Київ, 2016. 152 с.

111. Starke A.R., Cardemil J.M., Escobar R., Colle S. Thermal analysis of solar-assisted heat pumps for swimming pool heating. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2016. Vol. 39 (6). P. 2289–2306.

112. Суртаєв В.В. Ефективність теплоенергетичних установок, теплових схем систем, пристроїв, установок утилізації тепла (α -модель). *Вісник Криворізького національного університету*. 2020. Вип. 51. С. 75–83.

113. Суртаєв В.В. Підвищення загальної ефективності теплоенергетичних установок, теплових схем систем, пристроїв, установок утилізації тепла. *Вісник Криворізького національного університету*. 2021. Вип. 52. С. 110–119.

114. Szczerbak K. Impact of location characteristics on renewable energy production for a group of buildings. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 116. P. 1–8.

115. Temori M.O., Vranay F. Heat pump systems: A mini review. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*. 2021. Vol. 4 (2). P. 73–81

116. Ткаченко С.Й., Остапенко О.П. Парокомпресійні теплонасосні

- установки в системах теплопостачання: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2009. 176 с.
117. Ткачук К.К. Перспективи застосування теплових насосів в Україні. *Вісник НТУУ. «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2015. Вип. 27. С. 144–153.
118. Valancius R., Singh R.M., Jurelionis A., Vaiciunas J. A Review of Heat Pump Systems and Applications in Cold Climates: Evidence from Lithuania. *Energies*. 2019. Vol. 12 (22). P. 1–18.
119. Olishevskiy I.H. Substantiation of the energy efficiency of automated heating technology at HPS. *Electrical Engineering and Power Engineering. Zaporizhzhia*, 2024. № 2. P. 36–43
120. Олішевський І.Г., Олішевський Г.С. Обґрунтування можливості функціонування гідроелектростанції в теплофікаційному режимі. *Людина і космос: XXV Ювілейна Міжнар. молодіжна наук.-практ. конф. м. Дніпро, 12 квітн. 2023 р. Дніпро: ДНУ ім. Олесея Гончара, 2023.*
121. Олішевський І.Г., Олішевський Г.С. Обґрунтування нетрадиційної технології теплофікаційного режиму гідроакумуючої станції. *Людина і космос: XXIV Міжнар. молодіжна наук.-практ. конф. м. Дніпро, трав. 2022 р. Дніпро: ДНУ ім. Олесея Гончара, 2022. С. 109.*
122. Aikins K.A., Lee S.-H., Choi J.M. Technology Review of Two-Stage Vapor Compression Heat Pump System. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*. 2013. Vol. 21(03). P. 1330002.
123. Арсеньєв В.М., Мелейчук С.С. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку: навч. посіб. Суми: СумДУ, 2018. 364 с.
124. Zhao Z., Zhang Y., Mi H., Zhou Y., Zhang Y. Experimental Research of a Water-Source Heat Pump Water Heater System. *Energies*. 2018. Vol. 11 (5). P. 1–13.
125. Zhou W., Pei P., Mao R., Qian H., Hu Y., Zhang J. Selection and techno-economic analysis of hybrid ground source heat pumps used in karst regions. *Science Progress*. 2020. Vol. 103 (2). P. 1–17.
126. Zhou Z.X. Statistical Analyses on Usage of Water Heater in Urban Residential Buildings. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 521. P. 748–751.
127. Арсеньєв В.М., Путро Е.В. Утилізація теплоти продуктів згорання для

цілей тепло-холодозабезпечення. *Сучасні технології в промисловому виробництві: матеріали наук.-техн. конф. викл., співр., асп. і студ. ф-ту технічних систем та енергоефективних техн. м. Суми, 18–22 квітня 2011 р. Суми: СумДУ, 2011. С. 32.*

128. Olishevskiy I., Titov M., Isakova M. Heat Pump Control System for Hot Water Supply And Air Conditioning. *Widening our Horizons: The 19th International Forum for Students and Young Researchers*, м. Дніпро, 8–12 квіт. 2024 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2024. С. 144–145.

129. Olishevskiy I., Gusev O. Outdoor air influence task unit for simulation modeling of automated control of heating and conditioning systems. *«Наукова весна» 2022: матер. XII Всеукр. наук.-техн. конф. студ., асп. та мол. вчених. м. Дніпро, 23–24 травн. 2022 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2022. С. 174–176.*

130. Олішевський І.Г., Гусев О.Ю. Імітаційне моделювання системи автоматизованого керування комплексними системами опалення та кондиціонування. *Молодь: наука та інновації: Матеріали ІХ Міжн. наук.-техн. конф. студ., асп. та мол. вчених. м. Дніпро, 11–12 лист. 2021 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2021. С. 315–316.*

131. You Z., Zade M., Kumaran Nalini B., Tzscheutschler P. Flexibility Estimation of Residential Heat Pumps under Heat Demand Uncertainty. *Energies*. 2021. Vol. 14 (18). P. 1–19.

132. Zaheeruddin M., Gourishankar V.G., Rink R.E. Dynamic suboptimal control of a heat pump/heat storage system. *Optimal Control Applications and Methods*. 2007. Vol. 9 (4). P. 341–355.

133. Про теплопостачання: щодо стимулювання виробництва теплової енергії з альтернативних джерел енергії: Закон України від 21.03.2017 р. № 1959-VIII. Дата оновлення: 21.03.2017 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1959-19#Text>.

134. Замницький О.В., Гладун Є.Р. Аналіз методів охолодження та утилізації тепла шахтних компресорних установок. *Гірничий вісник*. 2017. Вип. 102. С. 143–148.

135. Zhang J., Wang H.Y., Zhang J. Study on Principle and Application of Heat

Pump Technology. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 525. P. 607–610.

136. Li Y., Nord N., Rekstad I.H., Skånøy S.K., Sørensen L.K. Study of a water-source CO₂ heat pump for residential use: experimental discharge pressure control and performance analysis. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 246. P. 1–6.

137. Lindenberger D., Bruckner T., Groscurth H.M., Kümmel R. Optimization of solar district heating systems: seasonal storage, heat pumps, and cogeneration. *Energy*. 2000. Vol. 25 (7). P. 591–608.

138. Liu M., Ooka R., Hino T., Wen K., Choi W., Lee D., Ikeda S., Reza Palasz D. Experimental performance analysis of a multiple-source and multiple-use heat pump system: winter field experiment and heating operation performance evaluation. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 111. P. 1–8.

139. Liu Y., Zhou G.H., Ma J. Experimental Study of a Solar Assisted Air Source Heat Pump in Heating Condition. *Advanced Materials Research*. 2011. Vols. 243–249. P. 4909–4912.

140. Luca C., Dragomir-Stanciu D., Crismaru I., Namat A.R.J. Study of the Heat Transfer in a Heat Exchanger with Latent Heat Storage. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 659. P. 401–404.

141. Lunyaka K., Kliuiev O., Rusanov S., Kliuieva O. The Research of the Work of the Heat Accumulator of the Pre-Starting System of Warming Up of the Internal Combustion Engine. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2020. Vol. 42 (3). P. 76–83.

142. Luo X., Zhang Z. Leakage Failure Analysis in a Power Plant Boiler. *IERI Procedia*. 2013. Vol. 5. P. 107–111.

143. Madani H., Claesson J., Lundqvist P. Capacity control in ground source heat pump systems. *International Journal of Refrigeration*. 2011. Vol. 34 (6). P. 1338–1347.

144. Marcic S., Kovacic-Lukman R., Virtic P. Hybrid system solar collectors - heat pumps for domestic water heating. *Thermal Science*. 2019. Vol. 23 (6 Part A). P. 3675–3685.

145. Amoabeng K., Choi J. Performance Analysis on the Optimum Control of a Calorimeter with a Heat Recovery Unit for a Heat Pump. *Energies*. 2018. Vol. 11 (9). P.

1–20.

146. Amoabeng K., Lee K., Choi J. Modeling and Simulation Performance Evaluation of a Proposed Calorimeter for Testing a Heat Pump System. *Energies*. 2019. Vol. 12 (23). P. 1–22.

147. Atmaca I., Kocak S. Theoretical energy and exergy analyses of solar assisted heat pump space heating system. *Thermal Science*. 2014. Vol. 18 (suppl. 2). P. 417–427.

148. Eswiasi A., Mukhopadhyaya S. Critical Review on Efficiency of Ground Heat Exchangers in Heat Pump Systems. *Clean Technologies*. 2020. Vol. 2 (2). P. 204–224.

149. Fahlén P., Voll H., Naumov J. Efficiency of Pump Operation in Hydronic Heating and Cooling Systems. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2006. Vol. 12 (1). P. 57–62.

150. Fan J., Sun F.Z., Gao M. Experimental Research on a Heat Pump Water Heater Using Low Pressure Steam as Heat Source. *Advanced Materials Research*. 2013. Vols. 805–806. P. 637–644.

151. Figaj R., Żołądek M. Operation and Performance Assessment of a Hybrid Solar Heating and Cooling System for Different Configurations and Climatic Conditions. *Energies*. 2021. Vol. 14 (4). P. 1–23.

152. Frik A., Bielskus J. Experimental Test Stand of a Heat Pump Integrated in Air Handling Unit. *Mokslas - Lietuvos ateitis*. 2020. Vol. 12. P. 1–6.

153. Gao Y., Sun Z., Lin X., Wang C., Sun Z., Chen Y. Designing and Optimizing Heat Storage of a Solar-Assisted Ground Source Heat Pump System in China. *International Journal of Photoenergy*. 2020. Vol. 2020 (1). P. 1–18.

154. Kalder J., Annuk A., Allik A., Kokin E. Increasing Solar Energy Usage for Dwelling Heating, Using Solar Collectors and Medium Sized Vacuum Insulated Storage Tank. *Energies*. 2018. Vol. 11 (7). P. 1–9.

155. Taler D., Taler J., Sobota T., Tokarczyk J. Cooling Modelling of an Electrically Heated Ceramic Heat Accumulator. *Energies*. 2022. Vol. 15. P. 1–26.

156. Dongellini M., Natale C., Naldi C., Rossi di Schio E., Valdiserri P., Morini G.L. Energy and Environmental Performance Comparison of Heat Pump Systems Working with Alternative Refrigerants. *Appl. Sci*. 2023. Vol. 13. P. 1–17.

157. Kropas T., Streckienė G., Bielskus J. Experimental Investigation of Frost Formation Influence on an Air Source Heat Pump Evaporator. *Energies*. 2021. Vol. 14 (18). P. 1–15.

158. Крих Г.Б., Матіко Г.Ф., Криль Б.А. Моделювання системи керування з регулятором на підставі внутрішньої моделі. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т. 29, № 9. С. 161–168.

159. Kucybała P. Hydro-Pneumatic Accumulator Study with the Use of Thermodynamic Model Simulation. *Key Engineering Materials*. 2013. Vol. 542. P. 97–104.

160. Moon K.-A., Kim S.-B., Choi H.-U., Choi K.-H. Experimental Study on the Heat Pump Performance Combined with Dual-Purpose Solar Collector. *Energies*. 2024. Vol. 17. P. 1–15.

161. Kurpaska S., Knaga J., Latała H., Cupiał M., Konopacki P., Hołownicki R. The Comparison of Different Types of Heat Accumulators and Benefits of Their Use in Horticulture. *Sensors*. 2020. Vol. 20 (5). P. 1–27.

162. Kutniy B., Novakh B. Calculation of phase change heat accumulator in complex of energy efficient ventilation system. *ACADEMIC JOURNAL Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2019. Vol. 1 (52). P. 191–196.

163. Li Y., Huang G. Development of an integrated low-carbon heating system for outdoor swimming pools for winter application. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 111. P. 1–6.

164. Gorobets V., Antypov I., Trokhaniak V., Bohdan Y. Experimental and numerical studies of heat and mass transfer in low-temperature heat accumulator with phase transformations of accumulating material. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 240. P. 1–4.

165. Huang L., Zheng R., Piontek U. Installation and Operation of a Solar Cooling and Heating System Incorporated with Air-Source Heat Pumps. *Energies*. 2019. Vol. 12 (6). P. 1–17.

166. Jung H., Hwang J., Jeon C. An Experimental Study on Performance Improvement for An Air Source Heat Pump by Alternate Defrosting of Outdoor Heat

Exchanger. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*. 2014. Vol. 22 (03). P. 1450017.

167. Milewski J., Bujalski W. STES—Typical Scenarios for Heat Accumulator Cooperation. *Energy Procedia*. 2014. Vol. 50. P. 414–420.

168. Mustafa Omer A. Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008. Vol. 12 (2). P. 344–371.

169. Nikolaenko Yu.E., Baranyuk A.V., Reva S.A., Pis'mennyi E.N., Dubrovka F.F. Numerical simulation of the thermal and hydraulic characteristics of the liquid heat exchanger of the APAA transmitter-receiver module. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2020. Vol. 17. P. 1–11.

170. Nikolaenko Y.E., Baranyuk O.V., Reva S.A. Thermal characteristics of the liquid heat exchanger for the transmitter/reciever module of APAA. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*. 2020. Vols. 1–2. P. 37–44.

171. Система опалення будівлі: пат. на винахід № 123931 Україна: МПК (2021.01), F24D 3/10 (2006.01), F24D 3/18 (2006.01), F24/D 15/00, F24D 4/04 (2006.01), F24S 90/00, F25B 29/00. № а 2019 11504; заявл. 28.11.2019; опубл. 23.06.2021. Бюл. № 25. 8 с.

172. Система опалення та кондиціонування будівлі: пат. на КМ № 140657 Україна: МПК (2006), F24D 3/00, F24D 3/18 (2006.01), F24D 17/02 (2006.01). № u 201907962; заявл. 11.07.2019; опубл. 10.03.2020. Бюл. № 5. 7 с.

173. Система опалення будівлі: пат. на КМ № 143933 Україна: МПК (2006), F24D 3/10 (2006.01), F24D 3/18 (2006.01), F24/D 15/00, F24D 17/02 (2006.01). № u 201911911; заявл. 16.12.2019; опубл. 25.08.2020. Бюл. № 16. 8 с.

174. Олішевський І.Г., Олішевський Г.С. Моделювання системи автоматизованого керування системою опалення із застосуванням теплового аккумулятору та сонячних колекторів. Молодь: наука та інновації: Матеріали ІХ Міжн. наук.-техн. конф. студ., асп. та мол. вчених. м. Дніпро, 11–12 лист. 2021 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2021. С. 259–260.

175. Dong B., Lam K.P. A real-time model predictive control for building heating and cooling systems based on the occupancy behavior pattern detection and local weather

forecasting. *Building Simulation*. 2014. Vol. 7 (1). P. 89–106.

176. Wang S., Xu X. Parameter estimation of internal thermal mass of building dynamic models using genetic algorithm. *Energy Conversion and Management*. 2006. Vol. 47 (13–14). P. 1927–1941

177. Crawley D.B., Hand J.W., Kummert M., Griffith B.T. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*. 2008. Vol. 43 (4). P. 661–673.

178. Clarke J.A. *Energy Simulation in Building Design: Second Edition*. Routledge, 2001. 362 p.

179. Olishkevskyi I. Dataware and software of the automated technology for computer-integrated control of heat pump systems. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. 2024. Vol. 2. P. 205–212.

180. Schuetz P., Melillo A., Businger F., Durrer R., Frehner S., Gwerder D., Worlitschek J. Automated modelling of residential buildings and heating systems based on smart grid monitoring data. *Energy and Buildings*. 2020. Vol. 229. P. 1–9.

181. Montalbán Pozas B., Lucas Bonilla M., Serrano Candela F., Bustos García de Castro P. A Methodology for Designing an Automated System to Improve the Thermal Performance of a Large Building in Operation. *Buildings*. 2023. Vol. 13. P. 1–25.

182. Holman J.P. *Heat Transfer: Tenth Edition*. New York: McGraw-Hill, 2010. 758 p.

183. Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York: John Wiley & Sons, 2007. 1070 p.

184. Aström K.J., Hägglund T. *Advanced PID Control*. Pittsburg: ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. 343 p.

185. Bai J., Zhang X. A new adaptive PI controller and its application in HVAC systems. *Energy Conversion and Management*. Vol. 48 (4). 2007. P. 1043–1054.

186. Seborg D.E., Edgar T.F., Mellichamp D.A. *Process Dynamics and Control*. New York: Wiley, 2004. 515 p.

187. Python for Data Analysis, 3E. URL: <https://wesmckinney.com/book/> (дата звернення: 12.02.2024).

188. Ramalho L. *Fluent Python: Clear, Concise, and Effective Programming* 1st Edition. Sebastopol: O'Reilly, 2015. 792 p.

189. Foda E., Siren K., Hirvonen J. Heat recovery-heat pump system with a thermal storage: A case study from an industrial application. *InnoStock 2012 – 12th international conference on thermal energy storage*, Lleida, 16–18 May 2012. P. 1–9.

190. Kowalski P., Szałański P., Capiński W. Waste Heat Recovery by Air-to-Water Heat Pump from Exhausted Ventilating Air for Heating of Multi-Family Residential Buildings. *Energies*. 2021. Vol. 14. P. 1–17.

191. Hietaharju P., Ruusunen M., Leiviskä K. A Dynamic Model for Indoor Temperature Prediction in Buildings. *Energies*. 2018. Vol. 11. P. 1–20.

192. Lee T., Sato R., Asawa T., Yoon S. Indoor Air Temperature Distribution and Heat Transfer Coefficient for Evaluating Cold Storage of Phase-Change Materials during Night Ventilation. *Buildings*. 2024. Vol. 14. P. 1–15.

193. Chen Y., Norford L.K., Samuelson H.W., Malkawi A. Optimal Control of HVAC and Window Systems for Natural Ventilation Through Reinforcement Learning. *Energy & Buildings*. 2018. Vol. 169. P. 1–23.

194. McQuiston F.C., Parker J.D., Spitler J.D. *Heating, Ventilation, and Air Conditioning: Analysis and Design*: 7th ed. New York: Wiley, 2023. 640 p.

195. ASHRAE Handbook—Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. URL: <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook/description-2021-ashrae-handbook-fundamentals> (дата звернення: 11.05.2024).

196. Olishevskiy I. Results of development and research of the technology for automated energy-efficient control of heat pump systems by means of computer experiment. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. Khmelnytskyi, 2024. Vol. 335 (3(1)). P. 419–428.

197. The MathWorks, Inc., Simscape Fluids: Pipe (TL). URL: https://www.mathworks.com/help/hydro/ref/pipetl.html?s_tid=doc_ta (дата звернення: 02.04.2024).

198. The MathWorks, Inc., Simscape: Thermal Mass. URL:

https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/thermalmass.html?searchHighlight=Thermal%20Mass&s_tid=srchtitle_support_results_1_Thermal%20Mass (дата звернення: 23.03.2024).

199. The MathWorks, Inc., Simscape: Convective Heat Transfer. URL: https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/convectiveheattransfer.html?s_tid=doc_ta (дата звернення: 25.03.2024).

200. Dostál M., Petera K., Solnar S. Gnielinski's Correlation and a Modern Temperature-Oscillation Method for Measuring Heat Transfer Coefficients. *EPJ Web of Conferences*. 2022. Vol. 269. P. 1–12.

201. The MathWorks, Inc., Simscape: Conductive Heat Transfer. URL: https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/conductiveheattransfer.html?s_tid=doc_ta (дата звернення: 25.03.2024).

202. The MathWorks, Inc., Simscape: Pipe Bend (TL). URL: https://www.mathworks.com/help/hydro/ref/pipebendtl.html?s_tid=doc_ta (дата звернення: 27.03.2024).

203. Crane Co. Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe TP-410. NY: Crane Co., 1981. 133 p.

204. The MathWorks, Inc., Simscape: Gas-Charged Accumulator (TL). URL: https://www.mathworks.com/help/hydro/ref/gaschargedaccumulatortl.html?s_tid=doc_ta (дата звернення: 27.03.2024).

205. Yoshida F., Iio S., Ito K., Kitagawa A. Experimental and Theoretical Analysis of Active Charge Accumulator for Water Hydraulics System. *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. P. 881–890.

206. The MathWorks, Inc., Simscape Fluids: Condenser Evaporator (TL-2P). URL: https://www.mathworks.com/help/hydro/ref/condenserevaporator2p.html?s_tid=doc_ta (дата звернення: 28.03.2024).

207. Çengel Y.A. Heat and Mass Transfer: A Practical Approach. 3rd ed. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering. Boston: McGraw-Hill, 2007. 901 p.

208. Shah R.K., Sekulić D.P. Fundamentals of Heat Exchanger Design. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2003. 941 p.

209. White F.M. Fluid Mechanics: 6th ed. NY: McGraw-Hill, 2009. 952 p.
210. The MathWorks, Inc., Simscape Fluids: Receiver Accumulator (2P). URL: https://www.mathworks.com/help/hydro/ref/receiveraccumulator2p.html?s_tid=doc_ta (дата звернення: 28.03.2024).
211. The MathWorks, Inc., Simscape Fluids: Thermostatic Expansion Valve (2P). URL: https://www.mathworks.com/help/hydro/ref/thermostaticexpansionvalve2p.html?s_tid=doc_ta (дата звернення: 30.03.2024).
212. Eames I.W., Milazzo A., Maidment G.G. Modelling Thermostatic Expansion Valves. *International Journal of Refrigeration*. 2014. Vol. 38. P. 189–197.
213. The MathWorks, Inc., Simscape Fluids: Two-Phase Fluid Predefined Properties (2P). URL: https://www.mathworks.com/help/hydro/ref/twophasefluidpredefinedproperties2p.html?s_tid=doc_ta (дата звернення: 30.03.2024).
214. The MathWorks, Inc., Simscape Fluids: Fan (MA). URL: https://www.mathworks.com/help/hydro/ref/fanma.html?s_tid=doc_ta (дата звернення: 02.04.2024).
215. The MathWorks, Inc., Simscape Foundation Library: Ideal Angular Velocity Source. URL: https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/idealangularvelocitysource.html?s_tid=doc_ta (дата звернення: 02.04.2024).
216. The MathWorks, Inc., Simscape Foundation Library: PS Gain. URL: https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/psgain.html?s_tid=doc_ta (дата звернення: 03.04.2024).
217. The MathWorks, Inc., Simscape Fluids: System-Level Condenser Evaporator (2P-MA). URL: https://www.mathworks.com/help/hydro/ref/systemlevelcondenserevaporator2pma.html?s_tid=doc_ta (дата звернення: 03.04.2024).
218. The MathWorks, Inc., Documentation: Considerations for Microchannel Heat Exchangers. URL: <https://www.mathworks.com/help/hydro/ug/considerations-for-microchannel-heat-exchangers.html> (дата звернення: 03.04.2024).
219. The MathWorks, Inc., Simscape Foundation Library: Local Restriction (2P). URL: https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/localrestriction2p.html?s_tid=doc_ta (дата звернення: 04.04.2024).

220. The MathWorks, Inc., Simscape Fluids: System-Level Condenser Evaporator (2P-TL). URL: https://www.mathworks.com/help/hydro/ref/systemlevelcondenserevaporator2ptl.html?s_tid=doc_ta (дата звернення: 04.04.2024).

221. Mitchell J.W., Braun J.E. Principles of Heating, Ventilation, and Air Conditioning in Buildings. NJ: Wiley, 2013. 624 p.

222. Cavallini A., Zecchin R. A dimensionless correlation for heat transfer in forced convection condensation. *Proceeding of International Heat Transfer Conference*. 1974. Vol. 5. P. 309–313.

223. The MathWorks, Inc., Simscape Fluids: Positive-Displacement Compressor (2P). URL: <https://www.mathworks.com/help/hydro/ref/positivedisplacementcompressor2p.html> (дата звернення: 04.04.2024).

224. 7bit Products: WebHMI. URL: <https://webhmi.com.ua/en/7bit-products/> (дата звернення: 14.04.2024).

225. 7Bit Airgate Airpoint: WebHMI. URL: https://docs.webhmi.com.ua/_media/network:7bit_airgate-airpoint_eng.pdf (дата звернення: 15.04.2024).

226. WebHMI Technical Specifications: WebHMI. URL: <https://webhmi.com.ua/en/specifications-en/> (дата звернення: 15.04.2024).

227. Savytskyi O., Spyrydonenkov O., Tsyhankova S., Babenko M. Implementation of smart building management systems for residential complex “PANORAMA”. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 534. P. 1–8.

228. Savytskyi M., Shekhorkina S., Bordun M., Babenko M., Tsyhankova S., Spyrydonenkov V., Savytskyi O., Rabenseifer R. Design of proactive management system for residential buildings by using smart equipment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 2 (8 (128)). P. 16–25.

229. Level 2: WebHMI. URL: <https://webhmi.com.ua/uk/level2/> (дата звернення: 15.04.2024).

230. EN 15251:2007 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics [Publication date 2007-05-16]. European

Standardnorme, 2007. 52 p.

231. ДБН В.2.2-15:2019. Житлові будинки. Основні положення. [Чинний від 2019-12-01]. Вид. офіц. ПАТ “КиївЗНДІЕП”, 2019. 39 с.

232. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. [Чинний від 2022-09-01]. Вид. офіц. ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК), 2022. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98037

233. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. Інститут «УкрНДІспецбуд», 2014. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=50154

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. Олішевський І.Г., Олішевський Г.С. Автоматизована методика розрахунку параметрів для нетрадиційних технологій опалення та кондиціонування будівель. *Електротехніка та електроенергетика*. Запоріжжя, 2021. № 3. С. 40–47. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-3-4> (Стаття в науковому фаховому

виданні України категорії Б. Особистий внесок здобувача: аналіз апріорної інформації про об'єкт дослідження, формалізований опис автоматизованої методики та аналіз отриманих результатів).

2. Olishevskiy I.H., Gusev O.Yu., Olishevskiy H.S. Automated methodology of calculating parameters for non-traditional technology of heating mode of hydro-storage power plant station. *Electrical Engineering and Power Engineering*. Zaporizhzhia, 2023. № 1. P. 36–42. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2023-1-4> (Стаття в науковому фаховому виданні України категорії Б. Особистий внесок здобувача: постановка дослідного завдання, обґрунтування методології досліджень, математичні розрахунки та формулювання висновків).

3. Olishevskiy I.H. Substantiation of the energy efficiency of automated heating technology at HPS. *Electrical Engineering and Power Engineering*. Zaporizhzhia, 2024. № 2. P. 36–43. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-2-4> (Стаття в науковому фаховому виданні України категорії Б).

4. Olishevskiy I. Dataware and software of the automated technology for computer-integrated control of heat pump systems. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. Khmelnytskyi, 2024. Vol. 2. P. 205–212. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-23> (Стаття в науковому фаховому виданні України категорії Б).

5. Olishevskiy I. Results of development and research of the technology for automated energy-efficient control of heat pump systems by means of computer experiment. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. Khmelnytskyi, 2024. Vol. 335 (3(1)). P. 419–428. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-335-3-58> (Стаття в науковому фаховому виданні України категорії Б).

6. Papika Yu.A., Lysenko O.H., Koshelenko Ye.V., Olishevskiy I.H. Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality. *Naukovyj Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. Dnipro, 2021. № 2. P. 97–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097> (Стаття в періодичному науковому виданні Scopus, квартал Q3. Особистий внесок здобувача: виконання розрахунків, обґрунтування можливості використання результатів під час автоматизації

мехатронних промислових об'єктів).

7. Система опалення будівлі: пат. на винахід № 123931 Україна: МПК (2021.01), F24D 3/10 (2006.01), F24D 3/18 (2006.01), F24/D 15/00, F24D 4/04 (2006.01), F24S 90/00, F25B 29/00. № а 2019 11504; заявл. 28.11.2019; опубл. 23.06.2021. Бюл. № 25. 8 с. Винахідники: Олішевський І.Г., Олішевський Г.С., Гусев О.Ю. URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=276703> (Патент України на винахід. Особистий внесок здобувача: патентний пошук, обґрунтування підходів до реалізації способу та опис формули способу).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

8. Olishevskiy I., Titov M., Isakova M. Heat Pump Control System for Hot Water Supply And Air Conditioning. *Widening our Horizons: The 19th Int. Forum for Stud. and Young Resear.*, м. Дніпро, 8–12 квіт. 2024 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2024. С. 144–145. URL: <https://im.nmu.org.ua/ua/forum/FORUM2024FINAL.pdf> (Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: постановка задачі досліджень, математичний опис об'єкту автоматизованого керування та критичний аналіз результатів).

9. Olishevskiy I.H., Gusev O.Yu., Mamuzić I. (2024). Automated method of calculating parameters for a heating system based on heat pumps. *17th Symposium „Materials and metallurgy“*: supplement «Book of Abstracts». Zagreb, 25 Mar. 2024. Zagreb, 2024. P. 488. URL: <https://www.croris.hr/crosbi/publikacija/prilog-skup/825203> (Тези доповіді, Scopus. Особистий внесок здобувача: постановка задачі досліджень, математичний опис об'єкту автоматизованого керування та критичний аналіз отриманих результатів).

10. Olishevskiy I. Automated methodology of calculating parameters for heating mode of hydro storage power plant station. *Молодь: наука та інновації*: Матеріали XI Міжн. наук.-техн. конф. студ., асп. та мол. вчених. м. Дніпро, 22–24 лист. 2023 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2023. С. 42–44. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2023/molod-2023-vol2.pdf>. (Тези доповіді).

11. Олішевський І.Г., Олішевський Г.С. Обґрунтування можливості функціонування гідроелектростанції в теплофікаційному режимі. *Людина і космос*:

XXV Юв. Міжнар. молод. наук.-практ. конф. м. Дніпро, 12 квітн. 2023 р. Дніпро: ДНУ ім. О. Гончара, 2023. С. 170. URL: <https://spacehuman.org/uploads/source/doc/sbornik2023.pdf>. (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: обґрунтування алгоритму функціонування об'єкту дослідження*).

12. Олішевський І.Г., Гусев О.Ю. Розробка інформаційно-вимірювальної системи для керування роботою комплексної системи опалення та кондиціонування. *Молодь: наука та інновації*: Матеріали X Міжн. наук.-техн. конф. студ., асп. та мол. вчених. м. Дніпро, 23–25 лист. 2022 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2022. С. 369–370. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2022/molod-2022.pdf>. (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: обґрунтування переліку інформативних параметрів та моделювання досліджуваного об'єкту*).

13. Олішевський І.Г., Олішевський Г.С. Обґрунтування нетрадиційної технології теплофікаційного режиму гідроакумуючої станції. *Людина і космос*: XXIV Міжнар. молодіжна наук.-практ. конф. м. Дніпро, трав. 2022 р. Дніпро: ДНУ ім. Олеся Гончара, 2022. С. 109. URL: https://spacehuman.org/_files/doc/sbornik2022.pdf. (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: обґрунтування режиму функціонування об'єкту автоматизованого керування*).

14. Olishevskyi I., Gusev O. Outdoor air influence task unit for simulation modeling of automated control of heating and conditioning systems. *«Наукова весна» 2022*: матер. XII Всеукр. наук.-техн. конф. студ., асп. та мол. вчених. м. Дніпро, 23–24 травн. 2022 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2022. С. 174–176. URL: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2022/Scientific_Spring_2022.pdf. (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: розробка комп'ютерних моделей та аналіз отриманих результатів*).

15. Olishevskyi I., Gusev O. Simulation Modeling of Automated Control System by Complex Heating and Air Conditioning Systems. *Євромови-2021: інновації та розвиток*: 19-та Міжн. наук.-практ. конф. студ. та мол. уч. м. Дніпро, 9 груд. 2021 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2021. С. 213–214. URL: https://pereklad.nmu.org.ua/ua/%D0%84%D0%92%D0%A0%D0%9E%D0%9C%D0%9E%D0%92%D0%98_2021.pdf.

(Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: розробка комп'ютерних моделей та аналіз отриманих результатів).

16. Олішевський І.Г., Олішевський Г.С. Моделювання системи автоматизованого керування системою опалення із застосуванням теплового акумулятору та сонячних колекторів. *Молодь: наука та інновації*: Матеріали ІХ Міжн. наук.-техн. конф. студ., асп. та мол. вчених. м. Дніпро, 11–12 лист. 2021 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2021. С. 259–260. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2021/molod-2021.pdf>. (Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: постановка задачі досліджень, розробка схем досліджуваної системи та аналіз отриманих результатів).

17. Олішевський І.Г., Гусев О.Ю. Імітаційне моделювання системи автоматизованого керування комплексними системами опалення та кондиціонування. *Молодь: наука та інновації*: Матеріали ІХ Міжн. наук.-техн. конф. студ., асп. та мол. вчених. м. Дніпро, 11–12 лист. 2021 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2021. С. 315–316. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2021/molod-2021.pdf>. (Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: розробка комп'ютерних моделей та аналіз отриманих результатів).

18. Olishevskiy I., Gusev O., Isakova M. Automated heat pump heating system using non-traditional energy sources. *Widening our Horizons: The 16th International Forum for Students and Young Researchers*. м. Дніпро, квіт. 2021 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2021. С. 215–216. URL: <https://im.nmu.org.ua/ua/forum/%D0%A4%D0%9E%D0%A0%D0%A3%D0%9C%20%D0%A0%D0%BE%D0%B7%D1%88%D0%B8%D1%80%D1%8E%D1%8E%D1%87%D0%B8%20%D0%9E%D0%B1%D1%80%D1%96%D1%96%CC%88%202021.pdf> (Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: постановка задачі, розробка схем системи і аналіз результатів).

19. Olishevskiy I., Gusev O., Nikolskaya A., Lapina V. Constructing and researching a simulation model of heating and air conditioning system for residential building. *Widening our Horizons: The 15th International Forum for Students and Young Researchers*. м. Дніпро, квіт. 2020 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2020. С. 182. URL: <https://im.nmu.org.ua/ua/forum/Розширюючи%20Обрії%202020%20FINAL.pdf> (Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: постановка задачі, розробка схем системи і аналіз результатів).

доповіді. Особистий внесок здобувача: розробка методики досліджень, реалізація комп'ютерних моделей та критичний аналіз отриманих результатів).

20. Olishevskiy I., Nikolskaya A., Lapina V. Automated technology to control high-power thermal units. *Євромови-2019: інновації та розвиток: 17-та міжнародної науково-практичної конференції студентів та молодих учених.* м. Дніпро, груд. 2019 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2019. С. 95. URL: [https://pereklad.nmu.org.ua/ua/%D0%A1%D0%91%D0%9E%D0%A0%D0%9D%D0%98%D0%9A-2019-1%20\(1\).pdf](https://pereklad.nmu.org.ua/ua/%D0%A1%D0%91%D0%9E%D0%A0%D0%9D%D0%98%D0%9A-2019-1%20(1).pdf). *(Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: розробка методики досліджень, реалізація комп'ютерних моделей і критичний аналіз результатів).*

21. Система опалення та кондиціонування будівлі: пат. на КМ № 140657 Україна: МПК (2006), F24D 3/00, F24D 3/18 (2006.01), F24D 17/02 (2006.01). № u 201907962; заявл. 11.07.2019; опубл. 10.03.2020. Бюл. № 5. 7 с. Винахідники: Олішевський І.Г., Олішевський Г.С., Гусєв О.Ю. URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=266527> *(Патент України на корисну модель. Особистий внесок здобувача: патентний пошук, обґрунтування підходів до реалізації способу та опис формули способу).*

22. Система опалення будівлі: пат. на КМ № 143933 Україна: МПК (2006), F24D 3/10 (2006.01), F24D 3/18 (2006.01), F24/D 15/00, F24D 17/02 (2006.01). № u 201911911; заявл. 16.12.2019; опубл. 25.08.2020. Бюл. № 16. 8 с. Винахідники: Олішевський І.Г., Олішевський Г.С., Гусєв О.Ю. URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=270832> *(Патент України на корисну модель. Особистий внесок здобувача: патентний пошук, обґрунтування підходів до реалізації способу та опис формули способу).*

ДОДАТОК Б

Акти впровадження та використання результатів дисертаційного дослідження

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор НГУ,
професор



Павличенко А.В.

2024 р.

АКТ

впровадження у навчальний процес результатів дисертації на здобуття ступеня доктора філософії Олішевського Іллі Геннадійовича

Комісія за спеціальністю 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, у складі голови: Бублікова А.В. – завідувача кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем, д.т.н., професора та членів комісії: Новицького І.В., д.т.н., професора, Трипутеня М.М., к.т.н, доцента, складала цей акт щодо впровадження в навчальний процес результатів дисертації на здобуття ступеня доктора філософії Олішевського І. Г. через викладання лекційного матеріалу та практичних робіт дисципліни «Адаптивні системи управління» аспірантам спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. При цьому використовуються наступні результати дисертаційної роботи:

- методика оцінки стану і контролю систем автоматизованого керування тепловою роботою агрегатів промислового та побутового призначення;
- методи утилізації теплоти систем теплонасосного опалення;

- методи моделювання фізичних процесів, що протікають в складних багатозв'язкових об'єктах управління. Застосування моделей процесів в системах управління.

Це дозволяє надати здобувачам знання та навички застосування сучасних методів управління й інструментарію аналітичної обробки в сучасному середовищі, та використання їх для практичної реалізації у власних дисертаційних роботах, де вирішуються питання ідентифікації, прогнозування та керування в автоматизованих системах управління.

Голова комісії



А.В. Бубліков

Члени комісії:



І.В. Новицький



М.М. Трипутень

NPS

Novel Projects and Solutions

ТОВ "Новел Проджектс Енд Солюшинс"

вул. Панікахі, 2, корп. А, оф. 210,

м. Дніпро, Україна, 49040

тел.: (056) 767-24-18

E-mail: info@nps.co.ua, www.nps.co.ua

Вих. № _____ від 11.04.2024 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ "Новел Проджектс Енд

Солюшинс"



Вадим Сербин

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертації на здобуття ступеня доктора філософії

Олішевського Іллі Геннадійовича

ТОВ "Новел Проджектс Енд Солюшинс" підтверджує, що разом з Національним технічним університетом "Дніпровська політехніка" у рамках господарчо-договірних робіт здійснює співпрацю, зокрема, у галузі дослідження процесів управління при розробці та проектування агрегатів промислового та побутового призначення великої потужності.

Виконання робіт здійснюється за безпосередньою участю аспіранта кафедри безпеки інформації та телекомунікацій Національного технічного університету "Дніпровська політехніка" Олішевського І.Г., який є відповідальним виконавцем робіт, із використанням результатів досліджень його дисертаційної роботи.

При дослідженні, проектуванні та модернізації систем керування тепловою роботою агрегатів великої потужності використовуються наступні результати кандидатської дисертації Олішевського І.Г.:

1. Методика підвищення енергоефективності теплової роботи агрегатів промислового та побутового призначення на основі теплових насосів.

2. Методика розробки ефективних методів управління тепловою роботою агрегатів промислового та побутового призначення.

3. Розробка автоматизованої методики розрахунку параметрів для нетрадиційних технологій опалення та кондиціонування будівель.

Використання результатів дисертації дозволило розробляти інтелектуальні алгоритми ідентифікації, прогнозу та управління при створенні систем управління тепловою роботою агрегатів промислового та побутового призначення, які суттєво підвищують енергоефективність функціонування цих систем.

Технічний директор



Олександр Козяшев

ДОДАТОК В

Програмне забезпечення розробленої та дослідженої автоматизованої технології
комп'ютерно-інтегрованого енергоефективного керування теплонасосними
системами

V.1. Програмний код мовою Python для підсистеми опалення.

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Setting the initial parameters of the model
t_targ = 21
t_amb = np.arange(-3, 10, 3)
t_gr = 8
area_total = 450
t_init = 12

# Model parameters
time_step = 1
total_time = 24

# Heat loss coefficients
hl_floor = 0.05
hl_walls = 0.05
hl_windows = 0.05
hl_ceiling = 0.05

# Total heat loss of the building
heat_loss_coeffs = np.arange(0.2, 0.6, 0.1)

# Setting the parameters of the PI controller
Kp = 0.1
Ki = 0.01

def pi_controller(err, integral, prev_power):
    control_signal = Kp * err + Ki * integral
    new_power = prev_power + 0.1 * (control_signal - prev_power)
    return max(0, new_power)

def simulate_heat_pump_power(initial_temp, ambient_temp, heat_loss_coeff, t_gr):
    room_temp = initial_temp
    integral = 0
    prev_power = 0
    heat_pump_powers = []

    for t in range(total_time):
        err = t_targ - room_temp
        integral += err * time_step

        power_heater = pi_controller(err, integral, prev_power)
        prev_power = power_heater
        heat_pump_powers.append(power_heater)

        heat_loss = (hl_floor * (room_temp - t_gr) +
                    hl_walls * (room_temp - ambient_temp) +
                    hl_windows * (room_temp - ambient_temp) +
                    hl_ceiling * (room_temp - ambient_temp))

        room_temp += (power_heater - heat_loss_coeff * heat_loss) * time_step

    return heat_pump_powers

fig, axes = plt.subplots(len(heat_loss_coeffs), 1, figsize=(10, 20), sharex=True)
fig.suptitle('Динаміка потужності теплового насосу для підтримання внутрішньої температури на рівні 21°C ')

for i, heat_loss_coeff in enumerate(heat_loss_coeffs):

```



```

ax = axes[i]
for ambient_temp in t_amb:
    heat_pump_powers = simulate_heat_pump_power(t_init, ambient_temp, heat_loss_coeff,
t_gr)
    ax.plot(range(total_time), heat_pump_powers, label=f'Температура повітря
навколишнього середовища = {ambient_temp}°C')
    ax.set_title(f'Сумарний коефіцієнт тепловтрат = {heat_loss_coeff}°C/год')
    ax.set_xlabel('Час (год.)')
    ax.set_ylabel('Теплова потужність теплового насосу (°C/год.)')
    ax.legend()
    ax.grid(True)
plt.tight_layout(rect=[0, 0, 1, 0.96])
plt.show()

```

В.2. Програмний код мовою Python для підсистеми кондиціонування.

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Setting the initial parameters of the model
area = 450
initial_temp_indoor = 30.0
target_temp_indoor = 21.0
min_outdoor_temp = 30.0
max_outdoor_temp = 36.0

# Setting the parameters of the PI controller
Kp = 0.1
Ki = 0.01

# Time intervals for modelling
hours_per_day = 24
time_intervals = np.arange(0, hours_per_day, 1)

# Declaring the PI controller class
class PIController:
    def __init__(self, Kp, Ki):
        self.Kp = Kp
        self.Ki = Ki
        self.integral = 0

    def control(self, err_temp):
        self.integral += err_temp
        return self.Kp * err_temp + self.Ki * self.integral

# Variation of heat transfer coefficients
heat_exchange_coefficients = np.arange(1, 5, 1)

# Initialising plots
num_rows = len(heat_exchange_coefficients)
fig, axes = plt.subplots(num_rows, 2, figsize=(12, 5*num_rows))

# Modelling the dynamics of the outside temperature
outdoor_temperatures = (max_outdoor_temp - min_outdoor_temp) / 2 * np.sin(2 * np.pi *
time_intervals / hours_per_day) + (max_outdoor_temp + min_outdoor_temp) / 2

# Modelling the dynamics of the inside temperature
initial_temperatures_indoor = np.linspace(initial_temp_indoor, target_temp_indoor,
hours_per_day)

# Main function of the cooling temperature simulation

```

```

for i, heat_exchange_coeff in enumerate(heat_exchange_coefficients):
    temperature_controller = PIController(Kp, Ki)
    heat_powers = []
    indoor_temperatures = []

    current_indoor_temp = initial_temp_indooreratures[0]
    for t in time_intervals:
        outdoor_temp = outdoor_temperatures[t]
        err_temp = target_temp_indoor - current_indoor_temp

        control_signal = temperature_controller.control(err_temp)

        # Thermal model of the building
        delta_t = outdoor_temp - current_indoor_temp
        heat_gain = area * 0.1 * delta_t
        heat_loss = heat_exchange_coeff * (current_indoor_temp - outdoor_temp)

        # Calculation of current power
        heat_power = np.abs(control_signal) * area / 1000
        heat_powers.append(heat_power)

        current_indoor_temp += (heat_gain - heat_loss + control_signal) / area

        # Accumulation of temperature values
        indoor_temperatures.append(current_indoor_temp)

    # Graphical visualisation of simulation results
    axes[i, 0].plot(time_intervals, outdoor_temperatures, label='Температура повітря
навколишнього середовища')
    axes[i, 0].axhline(y=target_temp_indoor, color='r', linestyle='--', label='Цільова
температура повітря в будівлі')
    axes[i, 0].set_title(f'Динаміка температури (Коефіцієнт теплообміну =
{heat_exchange_coeff} °C/год.)')
    axes[i, 0].set_xlabel('Час, год.')
    axes[i, 0].set_ylabel('Температура, °C')
    axes[i, 0].legend()
    axes[i, 0].grid(True)

    cooling_power = [-hp for hp in heat_powers]
    axes[i, 1].bar(time_intervals, cooling_power, label='Потужність охолодження',
color='cyan', width=1.0)
    axes[i, 1].set_title('Теплова потужність охолодження кондиціонера, кВт')
    axes[i, 1].set_xlabel('Час, год.')
    axes[i, 1].set_ylabel('Потужність охолодження, кВт')
    axes[i, 1].legend()
    axes[i, 1].grid(True)

plt.tight_layout()
plt.show()

```

В.3. Програмний код налаштування і тестування автоматизованої технології в середовищі Matlab Simscape.

```

%% House parameters
% Rooms areas
areaKLR = 71.7;           % area of Kitchen-Living room [m^2]
areaBedRoom1 = 19.8;     % area of bedroom 1 [m^2]
areaBedRoom2 = 20.5;     % area of bedroom 2 [m^2]
areaBedRoom3 = 25.1;     % area of bedroom 3 [m^2]

```

```

areaBedRoom4 = 15.4; % area of bedroom 4 [m^2]
areaFullHouse = 180; % area of fullhouse [m^2]
% Walls
lenHouse = 15; % House length [m]
widHouse = 12; % House width [m]
htHouse = 2.5; % House height [m]
thkWall = 0.3; % Wall thickness [m]
thkIsol = 0.1; % Wall isolation thickness [m]
wallDensity = 1800; % Density (Lightweight concrete) [kg/m^3]
cWall = 920; % Specific heat [J/kg/K]
kWall = 0.1; % Thermal conductivity [W/m/K]
isolDensity = 50; % Isolation density (Glass fiber) [kg/m^3]
cIsol = 840; % Isolation specific heat [J/kg/K]
kIsol = 0.03; % Isolation thermal conductivity [W/m/K]

% Windows
nKLRWindow = 1; % Number of windows in Kitchen-living room (Panoramic window)
n1Window = 2; % Number of windows in bedroom 1
n2Window = 1; % Number of windows in bedroom 2
n3Window = 1; % Number of windows in bedroom 3
n4Window = 1; % Number of windows in bedroom 4
htKLRWindows = 2; % Height of windows in Kitchen-living room [m]
widKLRWindows = 7.5; % Width of windows [m]
htType1Windows = 1.2; % Height of windows type 1 [m]
widType1Windows = 2.5; % Width of windows type 1 [m]
htType2Windows = 1.2; % Height of windows type 1 [m]
widType2Windows = 1.8; % Width of windows type 1 [m]
thkWindow = 0.01; % Thickness of windows [m]
windowDensity = 2700; % Density [kg/m^3]
cWindow = 840; % Specific heat [J/kg/K]
kWindow = 0.78; % Thermal conductivity [W/m/K]

% Roof
pitRoof = 35/180/pi; % Roof pitch (35 deg)
thkRoof = 0.2; % Roof thickness [m]
roofDensity = 35; % Roof density (Glass fiber) [kg/m^3]
cRoof = 840; % Specific heat [J/kg/K]
kRoof = 0.03; % Thermal conductivity [W/m/K]

% Convective heat transfer coefficients [W/M^2/K]
hAirWall = 25; % Indoor air->walls
hWallIsol = 5; % Walls -> isolation
hWallAtm = 34; % Walls -> atmosphere
hIsolAtm = 32; % Isolation -> atmosphere
hAirWindow = 25; % Indoor air -> windows
hWindowAtm = 32; % Windows -> atmosphere
hAirRoof = 11; % Indoor air -> roof
hRoofAtm = 36; % Roof -> atmosphere

%Air
cAir = 1005.4; % cp of air at 273 K [J/(kg*K)]
pAir = 1.2255; % air density [kg*m^3]

% Leakage fraction
leakRoofPercent = 0.09; % Leakage through roof
leakWallPercent = 0.14; % Leakage through walls
leakWinPercent = 0.18; % Leakage through windows

% Roof
roofArea = 2* (widHouse/(2*cos(pitRoof))*lenHouse);

```

```

% Room air temperature setpoint
tSetpoint = 21; % degC
% Room air initial temperature
tRoom = 12; % deg C

%Rooms
%% Kitchen-Living room
areaWindowKLR = nKLRWindow * htKLRWindows * widKLRWindows;
areaWallRoomKLR = (6 * 2 * htHouse + widHouse * htHouse) - areaWindowKLR;
areaRoofRoomKLR = roofArea * areaKLR / areaFullHouse;
ATMRoomKLR = htHouse * areaKLR * pAir; % air mass [kg]
%% BedRoom 1
areaWindowBedRoom1 = htType1Windows * widType1Windows + htType2Windows * widType2Windows;
areaWallBedRoom1 = (4.2 + 4.7) * htHouse - areaWindowBedRoom1;
areaRoofBedRoom1 = roofArea * areaBedRoom1 / (lenHouse * widHouse);
ATMBedroom1 = htHouse * areaBedRoom1 * pAir; % air mass [kg]
%% BedRoom 2
areaWindowBedRoom2 = htType1Windows * widType1Windows;
areaWallBedRoom2 = (4.3) * htHouse - areaWindowBedRoom2;
areaRoofBedRoom2 = roofArea * areaBedRoom2 / (lenHouse * widHouse);
ATMBedroom2 = htHouse * areaBedRoom2 * pAir; % air mass [kg]
%% BedRoom 3
areaWindowBedRoom3 = htType1Windows * widType1Windows;
areaWallBedRoom3 = (4.8 + 5.2) * htHouse - areaWindowBedRoom3;
areaRoofBedRoom3 = roofArea * areaBedRoom3 / (lenHouse * widHouse);
ATMBedroom3 = htHouse * areaBedRoom3 * pAir; % air mass [kg]
%% BedRoom 4
areaWindowBedRoom4 = htType2Windows * widType2Windows;
areaWallBedRoom4 = (3.2) * htHouse - areaWindowBedRoom4;
areaRoofBedRoom4 = roofArea * areaBedRoom4 / (lenHouse * widHouse);
ATMBedroom4 = htHouse * areaBedRoom4 * pAir; % air mass [kg]
%% Radiator parameters

% Radiator pipe geometry
lenRadiatorPipeKLR = 12; % [m]
diaRadiatorPipe = 0.0125; % [m]
lenRadiatorPipe1 = 3; % [m]
lenRadiatorPipe2 = 2; % [m]
lenRadiatorPipe3 = 3; % [m]
lenRadiatorPipe4 = 1.2; % [m]

% Exchange area with air
areaRadiatorKLR = 40; % [m^2]
areaRadiator1 = 10; % [m^2]
areaRadiator2 = 6; % [m^2]
areaRadiator3 = 10; % [m^2]
areaRadiator4 = 4; % [m^2]

% Convective heat transfer coefficient radiator -> room
hRadiatorKLR = 120; % [W/(m^2 * K)]
hRadiator1 = 100; % [W/(m^2 * K)]
hRadiator2 = 100; % [W/(m^2 * K)]
hRadiator3 = 100; % [W/(m^2 * K)]
hRadiator4 = 100; % [W/(m^2 * K)]

%% Heat pump parameters
% Condenser tube dimensions
diaCond = 0.0182; % m
diaOuterCond = 0.0205; % m
longPitchCond = 0.0273; % m

```

```

transPitchCond      = 0.0273; % m
numTubeRowsCond     = 80;    % 1
numTubesPerRowCond  = 10;    % 1

% Condenser air duct dimensions
wCondDuct           = 0.4;    % m
htCondDuct          = 0.3;    % m
lenCondDuct         = 0.2;    % m

% Evaporator tube dimensions
diaEvap             = 0.131;  % m
diaOuterEvap        = 0.1344; % m
longPitchEvap       = 0.63;   % m
transPitchEvap      = 0.378;  % m
numTubeRowsEvap     = 800;    % 1
numTubesPerRowEvap  = 20;     % 1
numFinsEvap         = 90;     % 1
areaFinEvap         = 0.05;   % m^2

% Evaporator air duct dimensions
wEvapDuct           = 0.96;   % m
htEvapDuct          = 2.5;    % m
lenEvapDuct         = 0.4;    % m

% Thermostatic Expansion Valve parameters
nomQEvp             = 25;     % kW
maxQEvp             = 45;     % kW
tEvap               = -30;    % degC
tSuperheatStatic    = 5;     % degC
tSuperheatNom       = 10;    % degC
tCond               = 6.85;   % degC
tSubcool            = 3;     % degC

% Copper tubes
kTube = 400;        % W/(m*K)

%% Ground loop parameters

lenGroundPipeEach   = 50;    % m
diaGroundLoop       = 0.032; % m
lenHeaderPipe1      = 5;     % m
lenHeaderPipe2      = 8;     % m
spacingGroundPipes  = 2;     % m
qGroundLoopPump     = 39.6;  % lpm

%% Ground conditions
pGround = 0.1115;   % MPa
% Ground initial temperature
tInitGround = 8;   % degC

%% Refrigerant initial conditions
% To start the system near equilibrium
pInitCond      = 3.5;    % MPa
enthalpyInitCond = [486 307]; % kJ/kg
pInitEvap      = 0.67;  % MPa
enthalpyInitEvap = [307 431]; % kJ/kg

%% Heating water initial conditions
% To start the system near equilibrium
pInitHW = 0.1091; % MPa
tInitHW = 50;    % degC

```