

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

КОВАЛЬЧУК ДМИТРО АНДРІЙОВИЧ

УДК 681.5:621.5

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ УТИЛІЗАЦІЄЮ
ТЕПЛА ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ ГАЗОВИХ КОТЕЛЕНЬ
В УМОВАХ ЗАСТОСУВАННЯ ПАРОКОМПРЕСІЙНИХ
ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ**

05.13.07 «Автоматизація процесів керування»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Роботу виконано в Одеській національній академії харчових технологій
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент
Мазур Олександр Васильович,
Одеська національна академія
харчових технологій,
доцент кафедри автоматизації
технологічних процесів
і робототехнічних систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Осадчий Сергій Іванович,
Центральноукраїнський національний
технічний університет,
завідувач кафедри автоматизації
виробничих процесів

кандидат технічних наук
Решетюк Володимир Михайлович,
Національний університет біоресурсів
і природокористування України,
доцент кафедри автоматики
та робототехнічних систем
імені академіка І. І. Мартиненка

Захист відбудеться «11» травня 2021 року о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.07 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано «09» квітня 2021 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

А. В. Петренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. При проєктуванні житлових і промислових будівель спостерігається тенденція до застосування автономних теплогенерувальних установок для систем опалення та гарячого водопостачання. Основна частина таких систем будується на базі газових водогрійних котлів. У таких котлах зазвичай 15–20 % теплової енергії від повної теплотворної здатності палива втрачається з продуктами згоряння. Цю проблему дозволяє частково вирішити застосування конденсаційних економайзерів для відбору тепла від продуктів згоряння. Це дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії котла. Однак, повне використання вищої теплоти згоряння палива обмежується необхідністю наявності низькотемпературного теплоносія температурою 15–25 °С на вході економайзера для забезпечення режиму глибокої конденсації. Температура зворотної води на вході в економайзер у багатьох випадках може бути недостатньо низькою для конденсації значної кількості вологи з димових газів.

Для глибокого охолодження продуктів згоряння, поліпшення режиму конденсації і для більш повного використання теплотворної здатності палива можливе застосування парокомпресійного теплового насоса, який забезпечує додаткове охолодження теплоносія, що циркулює в контурі економайзера. Отриману на конденсаторі теплового насоса додаткову теплову енергію можна використовувати на потреби системи опалення чи гарячого водопостачання.

Енергетична ефективність роботи теплового насоса в складі системи утилізації тепла продуктів згоряння залежить від здатності системи керування з високою точністю підтримувати енергоефективні режими ведення процесу, не допускаючи при цьому аварійних ситуацій. Застосування теплового насоса в таких системах передбачає його роботу в широкому діапазоні координатних та параметричних збурень. Класичні системи керування зазвичай не забезпечують стабільної роботи в таких умовах, оскільки збурення можуть істотно впливати на властивості теплового насоса як об'єкта керування. Таким чином, розроблення системи керування підвищеної динамічної точності процесами глибокої утилізації тепла продуктів згоряння із застосуванням теплових насосів є актуальним завданням, вирішення якого дозволить підвищити енергетичну ефективність та забезпечити безаварійне ведення процесу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи кафедри автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем Одеської національної академії харчових технологій «Автоматичне керування технологічними процесами: розробка алгоритмів з високим рівнем інтелекту, моделювання та оптимізація систем».

Мета та завдання дослідження. Мета дисертаційного дослідження – розробити систему автоматичного керування утилізацією тепла продуктів згоряння газових котелень, алгоритми якої забезпечують енергоефективне ведення процесу в умовах застосування парокомпресійних теплових насосів.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

– провести аналіз основних напрямів підвищення енергетичної ефективності процесу утилізації тепла продуктів згоряння, в тому числі за рахунок вдосконалення його систем автоматичного керування;

– розробити і реалізувати фізичну модель процесу утилізації тепла продуктів згоряння, що включає генератор пароповітряної суміші, який імітує продукти згоряння, контактний утилізатор тепла пароповітряної суміші і тепловий насос;

– забезпечити на базі фізичної моделі можливість проведення автоматизованих експериментів щодо вивчення властивостей процесів утилізації тепла продуктів згоряння як об'єкта керування, для чого оснастити її технічними засобами вимірювання, виконавчими пристроями, керівним контролером та розробити автоматизоване робоче місце дослідника;

– провести в рамках автоматизованого робочого місця необхідні експериментальні дослідження статичних та динамічних властивостей і взаємозв'язків змінних процесу глибокої утилізації тепла продуктів згоряння із застосуванням теплових насосів як об'єкта керування;

– провести ідентифікацію моделей основних каналів процесу утилізації тепла продуктів згоряння як об'єкта керування, реалізувати ці моделі в середовищі імітаційного моделювання, провести їхню перевірку на адекватність;

– провести синтез альтернативних варіантів алгоритмів керування підвищеної динамічної точності та порівняльне моделювання відповідних систем автоматичного керування із оцінкою енергетичної ефективності процесу утилізації тепла продуктів згоряння і забезпечення запобігання аварійних ситуацій у всьому діапазоні збурень;

– провести моніторинг функціонування автономної газової котельної багатоповерхового житлового будинку і на основі отриманих даних розробити імітаційну модель зовнішніх збурень утилізації тепла продуктів згоряння та провести порівняльне моделювання базової та найбільш ефективної систем автоматичного керування серед розглянутих альтернативних варіантів.

Об'єкт дослідження – керований технологічний процес глибокої утилізації тепла продуктів згоряння із застосуванням парокомпресійного теплового насоса.

Предмет дослідження – система автоматичного керування процесом глибокої утилізації тепла продуктів згоряння із застосуванням парокомпресійного теплового насоса.

Методи дослідження. Для виконання роботи використано: фізичне (натурне) моделювання об'єкта керування; методи теорії ідентифікації, включаючи планування та проведення натурних експериментів при побудові математичних моделей, що отримуються на основі експериментальних даних у перехідних та сталих режимах; моделювання матеріального та енергетичного балансів тепломасообмінних процесів утилізації тепла продуктів згоряння; реалізація математичних моделей об'єкта керування у формі імітаційних моделей, як основи для проведення комп'ютерних експериментів,

та підтвердження їхньої адекватності і дослідження альтернативних варіантів систем автоматичного керування; методи теорії автоматичного керування, що розглядають синтез систем автоматичного керування підвищеної динамічної точності (інваріантні, автономні, каскадні) та порівняльний аналіз альтернативних систем автоматичного керування з різними алгоритмами керування в широких умовах їхнього функціонування.

Наукова новизна одержаних результатів. Вперше обґрунтовано в ході спеціальних цілеспрямованих експериментів на фізичній моделі процесу утилізації тепла продуктів згоряння доцільність введення нової регульованої змінної – розрахункового (за математичною моделлю) значення масової витрати холодоагенту у випарнику, що дозволило підвищити ефективність керування витратою холодоагенту до випарника та спростити технічну реалізацію системи автоматичного керування.

На основі рівнянь матеріального і енергетичного балансів процесу утилізації тепла продуктів згоряння і результатів експериментів на його фізичній моделі вперше отримано комплекс математичних моделей, що описує нелінійні статичні і динамічні властивості каналів керування, перехресних каналів та каналів збурень процесу утилізації тепла продуктів згоряння із тепловим насосом як об'єкта керування, та реалізацію імітаційної версії цієї моделі об'єкта керування, що дозволило підтвердити адекватність моделей, створити математичну основу для розроблення алгоритмів керування підвищеної динамічної точності системи автоматичного керування і перевести експерименти з порівняльного дослідження ефективності варіантів систем автоматичного керування з фізичної моделі в середовище імітаційного моделювання, за рахунок чого знизити витрати часу на проведення цих експериментів приблизно в 50 разів та розширити можливості досліджень.

Вперше проведено порівняльні дослідження варіантів систем автоматичного керування процесом утилізації тепла продуктів згоряння з базовим алгоритмом керування та альтернативними варіантами алгоритмів, які підвищують динамічну точність керованих змінних, із оцінкою енерго-ефективності процесу, що дозволило зробити висновок про актуальність вдосконалення системи автоматичного керування в напрямі підвищення динамічної точності керованих змінних як засобу підвищення енерго-ефективності процесу утилізації тепла продуктів згоряння із тепловим насосом та вибрати з досліджених найбільш конкурентоздатний алгоритм.

Вперше на основі даних моніторингу функціонування автономної газової котельні багатопверхового житлового будинку отримано імітаційну модель зовнішніх збурень процесу утилізації тепла продуктів згоряння, із застосуванням якої проведено порівняльне моделювання базової та найбільш конкурентоздатної системи автоматичного керування серед розглянутих альтернативних варіантів, що дозволило підтвердити суттєві переваги розробленої системи автоматичного керування при всіх змінах погодних умов упродовж року, принаймні, для кліматичних умов південно-східних регіонів Європи.

Удосконалено в ході спеціальних цілеспрямованих експериментів на фізичній моделі процесу утилізації тепла продуктів згоряння структуру контуру регулювання температури перегріву пари холодоагенту на виході випарника для запобігання в ньому автоколивань за рахунок застосування мікрокрокового режиму в регулювальному вентилі, що дозволило спростити конструкцію теплового насоса, відмовившись від застосування капілярних або інших балансувальних пристроїв для корекції витратної характеристики вентиля.

Отримало подальший розвиток фізичне моделювання процесу утилізації тепла продуктів згоряння в напрямі застосування теплового насоса, розширення умов моделювання та автоматизації проведення експериментів, включаючи створення автоматизованого робочого місця дослідника, що дозволило провести на моделі основний комплекс із 64 тривалих (по 8 годин і більше) експериментів, результати яких склали основу для розроблення моделей статистики та динаміки процесу як об'єкта керування.

Отримала подальший розвиток концепція підвищення ефективності керованих процесів, зокрема енергоефективності процесу утилізації тепла продуктів згоряння за рахунок цілеспрямованого вдосконалення алгоритмів керування систем автоматичного керування в напрямі підвищення динамічної точності керованих змінних на основі застосування принципів каскадності, інваріантності та автономності, що дозволило розробити варіанти альтернативних конкурентоздатних алгоритмів керування систем автоматичного керування для їхнього порівняльного дослідження за показником енергоефективності процесу утилізації тепла продуктів згоряння.

Практичне значення одержаних результатів. Продемонстровано актуальність підвищення динамічної точності систем автоматичного керування для підвищення енергетичної ефективності, що орієнтує розробників систем автоматичного керування вести роботи в цьому напрямі.

Отримана математична модель об'єкта керування дозволяє звести завдання побудови моделей конкретних процесів утилізації тепла продуктів згоряння до завдання їхньої параметричної ідентифікації, до мінімуму зменшуючи необхідну кількість натурних експериментів.

Створена фізична модель дозволяє проводити натурні експериментальні дослідження процесів утилізації тепла продуктів згоряння, а також проводити тестування систем автоматичного керування цими процесами з новими алгоритмами керування в широкому діапазоні координатних та параметричних збурень.

розроблена імітаційна модель процесу глибокої утилізації тепла продуктів згоряння із використанням теплового насоса досить точно відтворює властивості фізичної моделі, що свідчить про її адекватність. Вона дозволяє проводити випробування різноманітних алгоритмів керування та проводити їхнє порівняння як за динамічною точністю, так і за енергетичною ефективністю.

Створена в результаті теоретичних і експериментальних досліджень систем автоматичного керування процесом глибокої утилізації тепла продуктів

згоряння має високу динамічну точність і робастність та забезпечує підвищену енергетичну ефективність і безаварійне ведення процесу в широкому діапазоні координатних та параметричних збурень. До складу системи автоматичного керування входить каскадна система автоматичного регулювання температури продуктів згоряння на виході теплоутилізатора з використанням у якості проміжної змінної температури води на виході випарника, яка забезпечує запобігання аварійних ситуацій пов'язаних із можливістю охолодження води нижче точки замерзання, що може призвести до виходу випарника з ладу та каскадна система автоматичного регулювання рівня перегріву парів холодоагенту на виході випарника, яка за рахунок лінеаризації витратної характеристики розширювального клапану є інваріантною та автономною, має підвищену динамічну точність та стійкість, що дозволяє вести процес утилізації тепла продуктів згоряння в енергоефективних режимах, запобігаючи виникненню аварійних ситуацій, пов'язаних із потраплянням рідкої фази холодоагенту до компресора.

Результати роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем Одеської національної академії харчових технологій. Розроблені алгоритми керування та імітаційна модель використовуються ПП «Теплоенергоналадка» при проектуванні автономних систем теплопостачання багатоповерхових житлових будинків, зокрема системи гарячого водопостачання багатоповерхового будинку ОСББ «Ломоносовець» у м. Одеса.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, результати, висновки і пропозиції, що викладені в дисертації і виносяться на захист, отримано здобувачем особисто. Із наукових праць, опублікованих у співавторстві, використано лише ті ідеї та положення, які є результатом власних досліджень здобувача.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційного дослідження обговорено на міжнародних науково-технічних конференціях «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (м. Вінниця, 2017 р.) та «Інформаційні технології та автоматизація» (м. Одеса, 2017, 2018, 2019 рр.).

Публікації. Основні положення дисертаційного дослідження викладено в 11 наукових працях, з яких монографія, 5 статей у наукових фахових виданнях України, у тому числі включених до міжнародних наукометричних баз даних, стаття у періодичному науковому виданні іншої держави, яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу, 4 тези наукових доповідей.

Обсяг та структура дисертації. Дисертацію викладено на 184 сторінках. Робота складається з анотацій, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертація містить 16 таблиць, 108 рисунків та 3 схеми. Список використаних джерел налічує 125 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертації, показано її зв'язок із науковими програмами і темами, сформульовано мету та завдання дослідження, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети, визначено об'єкт і предмет дослідження, перераховано методи дослідження, які було використано для вирішення завдань, зазначено наукову новизну та практичне значення результатів, що виносяться на захист, відзначено особистий вклад здобувача в публікаціях за темою дисертації, перераховано конференції, на яких було проведено апробацію результатів роботи, надано інформацію про публікації, структуру і обсяг роботи.

У першому розділі «Утилізація тепла продуктів згоряння як шлях підвищення енергетичної ефективності газових котелень» розглянуто основні особливості роботи газових теплогенерувальних агрегатів та аналіз факторів, що впливають на їхню енергетичну ефективність. ККД звичайних газових водогрійних котлів, розрахований від вищої (повної) теплоти згоряння палива, коливається в діапазоні 78–85 %. Найбільше теплової енергії (майже 15 %) втрачається з продуктами згоряння.

Для підвищення ефективності опалювальних систем розроблено і випускаються промисловістю конденсаційні газові водогрійні котли, які оснащуються спеціальним конденсаційним економайзером, що відбирає додаткове тепло від димових газів, охолоджуючи їх і частково конденсуючи. Максимальний ККД таких котлів, що заявлено виробниками досягає 97 %. Однак, він може бути досягнутий не в усіх режимах. Оскільки в конденсаційних газових водогрійних котлах охолодження димових газів здійснюється зворотним теплоносієм, то кількість тепла, що знімається, а також і ефективність всієї установки буде залежати від температури зворотного теплоносія, яка залежно від типу системи опалення, заданого режиму роботи і температури навколишнього середовища може змінюватися в діапазоні від 22 до 60 °С.

Для оцінки енергетичної ефективності роботи конденсаційного котла у складі системи опалення багатопверхового житлового будинку створено і реалізовано імітаційну модель, що складається з моделі системи опалення житлового будинку та моделі конденсаційного котла. Основною вхідною змінною моделі є температура навколишнього середовища. Вихідними змінними, що розраховуються, є температура теплоносія в прямому та зворотному трубопроводі системи опалення житлового будинку, споживана теплова потужність, ККД теплогенерувальної установки, споживання палива.

Для оцінки реальної енергетичної ефективності роботи конденсаційного котла на базі архівних даних з температури повітря в м. Одеса під час опалювальних сезонів було отримано та реалізовано в середовищі імітаційного моделювання моделі зміни умов роботи системи опалення та газового котла (модель зовнішніх збурень). Із використанням отриманих імітаційних моделей системи опалення багатопверхового житлового будинку з газовим котлом та моделей зовнішніх збурень було проведено ряд комп'ютерних експериментів

з оцінки енергетичної ефективності роботи конденсаційного газового котла в умовах м. Одеси. Результати моделювання у вигляді графіка зміни ККД конденсаційного котла упродовж опалювального сезону 2014–2015 рр. представлено на рис. 1.

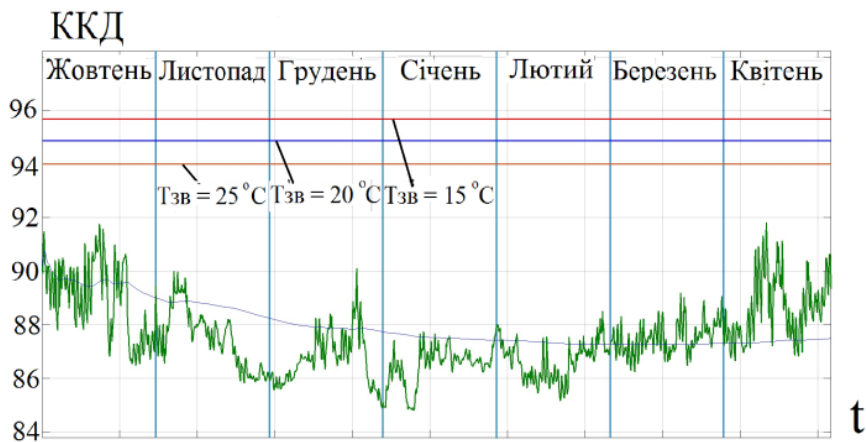


Рис. 1. Результати моделювання ККД конденсаційного котла упродовж опалювального сезону 2014–2015 рр.

З результатів комп'ютерних експериментів випливає, що температура зворотного теплоносія в системі опалення багатоквартирного будинку зависока для глибокої утилізації тепла продуктів згоряння і навіть найбільш ефективний конденсаційний газовий водогрійний котел при роботі в реальних умовах не добирає 7–8 % ККД до максимальних значень, заявлених виробниками.

Одним із варіантів вирішення цієї проблеми є застосування парокомпресійного теплового насоса для охолодження теплоносія на вході конденсаційного газового водогрійного котла. На рис. 2 показано концептуальну схему застосування теплового насоса для утилізації тепла продуктів згоряння у складі теплогенерувальної установки з газовим котлом.

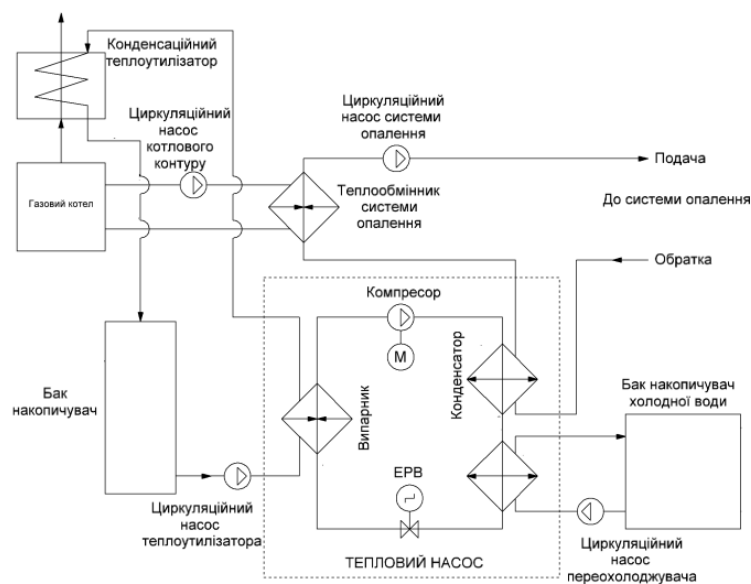


Рис. 2. Застосування теплового насоса у процесі утилізації тепла продуктів згоряння

Енергетична ефективність роботи теплового насоса в складі системи утилізації тепла пароповітряних сумішей багато в чому залежить від якості побудови системи керування ним. Проведено огляд літературних джерел, в яких презентовано сучасні рішення з реалізації систем керування тепловими насосами, проведено їхній порівняльний аналіз, виявлено переваги та недоліки.

Проаналізовано системи керування класичної структури з контурами регулювання перегріву парів холодоагенту на виході випарника та продуктивності з використанням позиційних, П-, ПІ- та ПІД регуляторів, нечітких та нейронних регуляторів, а також системи керування з адаптивним регулятором температури перегріву.

Енергетична ефективність роботи теплового насоса в складі системи утилізації тепла продуктів згоряння багато в чому залежить від здатності системи керування з високою точністю підтримувати енергоефективні режими ведення процесу, не допускаючи при цьому аварійних ситуацій. Застосування теплового насоса в таких системах передбачає його роботу в широкому діапазоні координатних збурень, таких як температури і витрати теплоносіїв, що подаються на випарник і конденсатор теплового насоса. Крім широкого діапазону можливих змін цих параметрів, також можлива досить швидка їхня зміна. Класичні системи керування, зазвичай, не забезпечують стабільної роботи теплового насоса у таких умовах, оскільки вплив збурень у вигляді зміни температур і витрат теплоносіїв на вході у випарник і конденсатор теплового насоса можуть істотно впливати на властивості теплового насоса як об'єкта керування, що призводить до погіршення динамічної точності таких систем, що перешкоджає веденню процесів у енергоефективних режимах. Тому завдання розроблення системи автоматичного керування підвищеної динамічної точності є актуальним, і звідси випливають мета та завдання дослідження сформульовані вище.

У другому розділі **«Розробка фізичної моделі процесів утилізації тепла продуктів згоряння, її автоматизація, перевірка моделі на адекватність»** розглянуто питання загальної концепції проведення натурних експериментальних досліджень, побудови лабораторної дослідної установки – фізичної моделі процесу, розроблення системи автоматизації для планування та проведення автоматизованих експериментальних досліджень процесу утилізації тепла продуктів згоряння як об'єкта керування.

Лабораторна установка включає в себе технологічну систему, вимірювальні пристрої, виконавчі механізми, електронну систему збору даних і керування, та автоматизоване робоче місце дослідника, оснащене персональним комп'ютером.

Схему лабораторної установки показано на рис. 3. Вона складається з таких основних вузлів: генератора пароповітряної суміші, конденсаційного утилізатора тепла, теплового насоса класу «вода-вода» та допоміжного обладнання.

Генератор пароповітряної суміші імітує пароповітряну суміш, теплову енергію якої необхідно утилізувати за температурою та вологістю і дозволяє змінювати їх. До складу генератора пароповітряної суміші входять:

теплообмінник-зволожувач контактного типу (1), який підігріває повітря та зволожує його до 100 % відносної вологості, ємність із гарячою водою (23), що підігрівається електричним нагрівачем, циркуляційний насос (24) зі змінною продуктивністю, електричний перегрівач повітря (3). Вологовміст пароповітряної суміші визначається температурою на виході теплообмінника-зволожувача (1). Необхідна температура пароповітряної суміші досягається за допомогою електричного нагрівача (3). Пароповітряна суміш на виході генератора пароповітряної суміші за своєю температурою та вологовмістом емітує продукти згоряння.

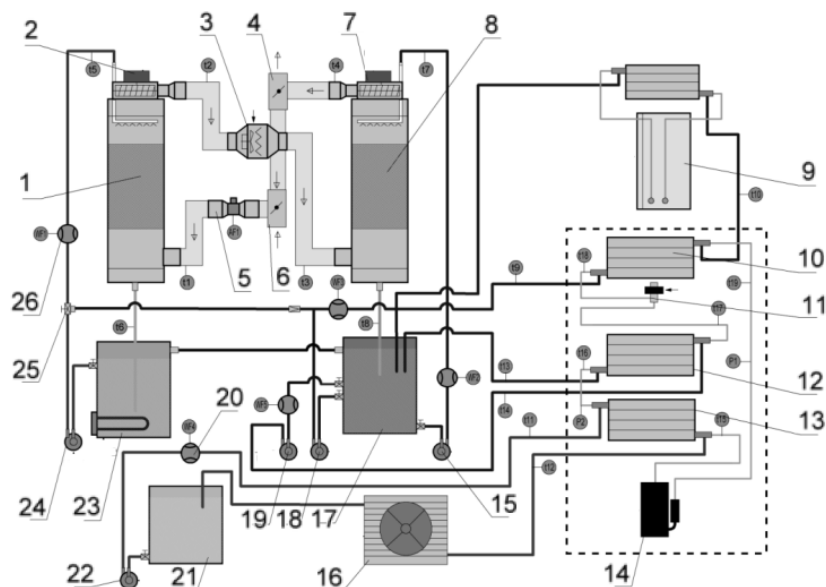


Рис. 3. Схема лабораторної установки для дослідження процесу утилізації тепла продуктів згоряння

У конденсаційному утилізаторі тепла відбувається відбір тепла від пароповітряної суміші. До складу конденсаційного утилізатора тепла входить конденсаційний теплообмінник (8), ємність з водою (17), яка охолоджується тепловим насосом, циркуляційний насос (15).

Тепловий насос забезпечує відбір тепла від конденсаційного утилізатора тепла з метою її утилізації. До складу теплового насосу входять компресор (14), конденсатор (13), переохолоджувач холодоагенту (12), випарник (10), електронний розширювальний вентиль із кроковим електроприводом (11).

Застосування мікрокрокового режиму для керування електронним розширювальним вентилем (до 9600 кроків на діапазон) забезпечило можливість його позиціонування з високою точністю при зміні режиму роботи випарника в широкому діапазоні робочих температур.

Лабораторна установка дозволяє формувати та досліджувати процеси утилізації пароповітряних сумішей із заданими вологовмістом у діапазоні від 5 до 300 г/м³ та температурою в діапазоні від 5 до 150 °С. Можливий діапазон зміни витрат пароповітряної суміші – від 20 до 200 м³/год.

Електронна система збору даних та керування складається з керівного мікроконтролера, 19 сенсорів температури, 2 сенсорів тиску фреону, 5 сенсорів

витрати для вимірювання технологічних параметрів та 10 виконавчих пристроїв.

Для виключення впливів найбільш суттєвих збурень, лабораторна установка включає 10 контурів регулювання, завдяки яким можна стабілізувати умови проведення експерименту. До них відносяться контури стабілізації вмісту вологи пароповітряної суміші на виході секції зволоження генератора пароповітряної суміші; температури пароповітряної суміші на виході генератора пароповітряної суміші; температури охолоджувальної води, яка подається в теплоутилізатор; температури води, що надходить у випарник теплового насосу; температури води, що надходить в конденсатор теплового насосу; перегріву парів холодоагенту у випарнику теплового насосу, для забезпечення максимального завантаження випарника і запобігання попаданню рідкого холодоагенту в компресор; витрати в контурі конденсаційного утилізатора тепла та конденсатора. В ході експериментів один параметр цілеспрямовано змінюється і система збору даних та керування реєструє відгук всіх змінних процесу.

Система збору даних та керування з'єднана з персональним комп'ютером, на якому організовано автоматизоване робоче місце. Програмне забезпечення автоматизованого робочого місця дозволяє реєструвати всі виміряні сигнали, відображати їх у головному вікні автоматизованого робочого місця, переглядати дані експериментів у вигляді графіків і таблиць, зберігати результати експериментів на електронному носії, керувати усіма виконавчими механізмами як в ручному, так і в автоматичному режимі.

Із застосуванням автоматизованого робочого місця виконано комплекс із 64 довготривалих автоматизованих експериментів з дослідження режимів роботи теплового насоса у складі системи утилізації тепла продуктів згоряння. Отримані сімейства квазістатичних залежностей параметрів теплового насоса як об'єкта керування від положення електронного розширювального вентиля та частоти обертання компресора. При цьому інші параметри, такі як температури і витрати води на вході у випарник і конденсатор теплового насосу, температура і витрата продуктів згоряння, були стабілізовані. Швидкість зміни керівних впливів була обрана такою, щоб перехідні процеси себе не проявляли.

На рис. 4 наведено квазістатичні залежності деяких параметрів теплового насоса від положення електронного розширювального вентиля у діапазоні від 350 до 470 кроків (із 2400 можливих), отримані в результаті проведення автоматизованого експерименту. При цьому температури води на вході у випарник і конденсатор були стабілізовані на рівні 25 і 35 °С відповідно, частота обертання компресора на рівні 3000 об/хв, а витрати води через випарник і конденсатор – 300 л/год.

Із поданих на рис. 5 залежностей видно, що при відкритті електронного розширювального вентиля спостерігається підвищення тиску у випарнику, а також збільшення його теплової потужності, що приводить до збільшення енергетичної ефективності теплового насоса, але при цьому також знижується рівень перегріву парів холодоагенту на виході випарника. При зниженні рівня

перегріву нижче $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ збільшується амплітуда його коливань, що може бути пов'язаним із попаданням у зону вимірювання температури холодоагенту на виході випарника крапельної фази у зв'язку з наближенням фронту кипіння.

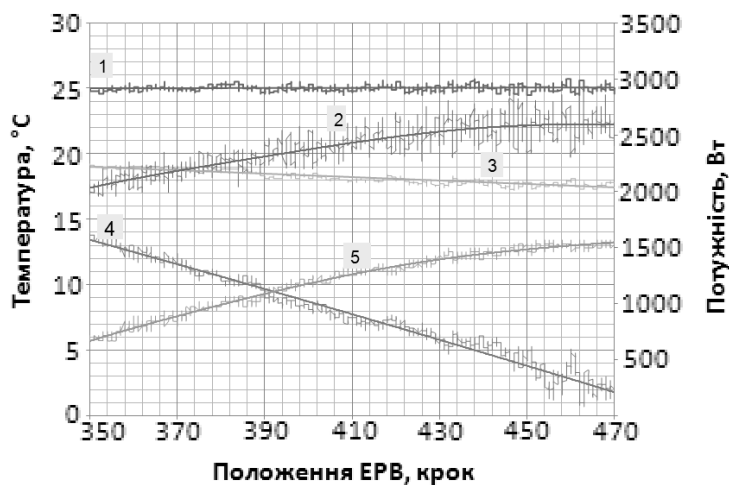


Рис. 4. Кваліфікаційні залежності деяких параметрів теплового насоса по каналу керівного впливу завантаження випарника: 1 – температура води на вході випарника теплового насоса; 2 – потужність випарника теплового насоса; 3 – температура води на виході випарника теплового насоса; 4 – температура перегріву холодоагенту у випарнику теплового насоса; 5 – температура кипіння холодоагенту у випарнику теплового насоса

Попадання рідкого холодоагенту в компресор може призвести до гідроударів і виходу з ладу компресора, іншими словами до аварійної ситуації. Очевидно, що найбільш ефективним режимом роботи теплового насоса є режим із мінімально можливим перегрівом парів холодоагенту на виході випарника, при якому забезпечується відсутність рідкої фази холодоагенту на вході компресора, потрапляння якої на вхід компресора може призвести до аварійної ситуації.

У третьому розділі «Експериментальні дослідження процесів утилізації тепла продуктів згоряння на фізичній моделі, розроблення математичної моделі та її реалізація в середовищі імітаційного моделювання, перевірка її на адекватність» подано аналіз результатів експериментальних досліджень із використанням фізичної моделі.

Експериментальні дослідження процесу глибокої утилізації тепла продуктів згоряння з використанням теплового насоса проводилися у три етапи:

1. дослідження контактного теплоутилізатора як об'єкта керування;
2. дослідження теплового насоса як об'єкта керування;
3. дослідження системи глибокої утилізації тепла продуктів згоряння в цілому як об'єкта керування.

На рис. 5а наведено сімейство статичних характеристик по каналу «Температура води на вході теплоутилізатора – температура продуктів згоряння на виході теплоутилізатора» при сталих витратах води крізь теплоутилізатор (1 – 150 л/год, 2 – 180 л/год, 3 – 230 л/год).

На рис. 5б наведено залежності теплової потужності теплоутилізатора від температура води на вході теплоутилізатора при сталих витратах води крізь теплоутилізатор (1 – 230 л/год, 2 – 180 л/год, 3 – 150 л/год).

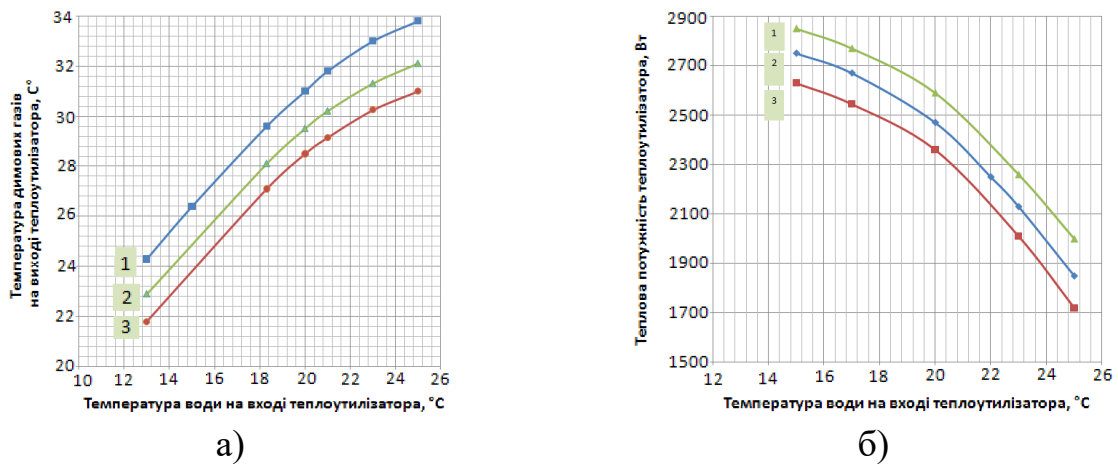


Рис. 5. Статичні залежності температури продуктів згоряння на виході теплоутилізатора (а) та його теплової потужності (б) при зміні температури охолоджувальної води

З джерел наукової літератури відомо, що для забезпечення нормальної роботи теплового насоса в системі керування повинні бути присутні мінімум два контури керування:

1. Контур керування температурою перегріву парів холодоагенту на виході випарника ($T_{ПФ}$) забезпечує, з одного боку, відсутність у складі холодоагенту на вході в компресор крапельної фази, а з іншого боку – максимально можливе завантаження випарника і в свою чергу максимальну ефективність теплового насоса. При цьому величина перегріву вираховується як різниця між температурою парів холодоагенту на виході випарника ($T_{Ф.В.2}$) та кінцевою температурою кипіння холодоагенту ($T_{К.Ф.В.}$), вирахованою за рівнем тиску парів холодоагенту на виході випарника ($P_{Ф.В.}$). Керуючим впливом, зазвичай, є ступінь відкриття електронного розширювального вентиля.

2. Контур керування продуктивністю теплового насоса. Регульованою координатою контуру є температура охолоджувальної води на виході випарника ($T_{В.В.2}$). Керуючим впливом контуру є частота обертання компресора (N_K).

Основними збурювальними змінними для цих контурів регулювання є температури води на вході випарника ($T_{В.В.1}$) та конденсатора ($T_{В.К.1}$).

При дослідженні режимів роботи теплового насоса було отримано сімейства квазістатичних та динамічних характеристик теплового насоса як об'єкта керування за основними каналами керування та контрольованих збурень.

На рис. 6а продемонстровано сімейства статичних залежностей по каналу «Положення електронного розширювального вентиля ($N_{КЛ}$) – тиск на виході випарника ($P_{Ф.В.}$) при різних частотах обертання компресора N_K (1– $N_K=40$ об/с, 2– $N_K=45$ об/с, 3– $N_K=50$ об/с, 4– $N_K=55$ об/с, 5– $N_K=60$ об/с), а на рис. 6б –

при різних температурах води на вході конденсатора $T_{B.K.I}$ (1– $T_{B.K.I}=40$ °С, 2– $T_{B.K.I}=35$ °С, 3– $T_{B.K.I}=30$ °С).

На рис. 6в продемонстровано статичні залежності по каналу «Температура води на вході конденсатора $T_{B.K.I}$ – Тиск на виході випарника $P_{Ф.В}$ » при різних положеннях електронного розширювального вентиля $N_{KЛ}$ (1– $N_{KЛ}=500$ кроків, 2– $N_{KЛ}=450$ кроків, 3– $N_{KЛ}=400$ кроків, 4– $N_{KЛ}=350$ кроків).

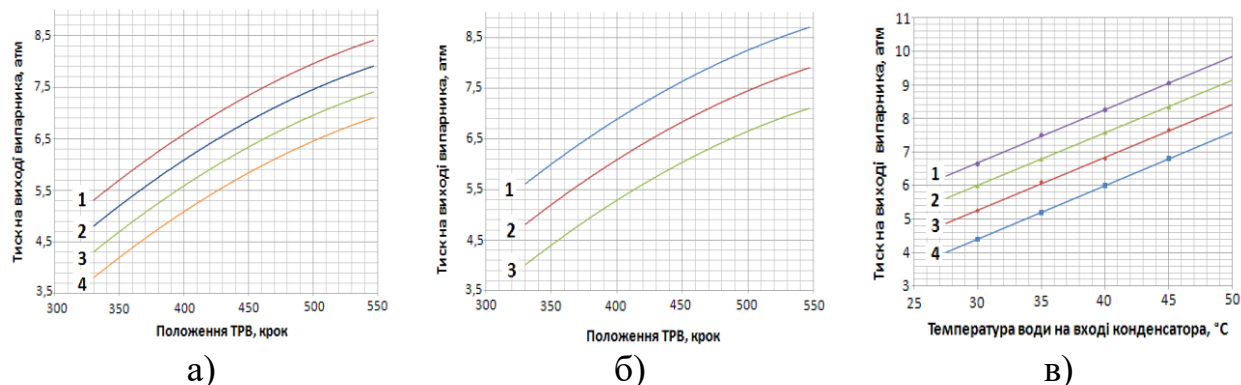


Рис. 6. Статичні характеристики теплового насосу при зміні положення електронного розширювального вентиля $N_{KЛ}$ (а, б) та температури води на вході конденсатора $T_{B.K.I}$ (в)

Отримані залежності демонструють суттєвий вплив режиму роботи конденсатора та компресора на тиск холодоагенту на виході випарника $P_{Ф.В}$. Це свідчить про наявність значного перехресного зв'язку по каналу « $N_{KЛ} - P_{Ф.В}$ » і сильного збурення по каналу « $T_{B.K.I} - P_{Ф.В}$ » та наявну потребу компенсувати ці впливи за рахунок вдосконалення алгоритмів керування.

На рис. 7а продемонстровано сімейство статичних залежностей по каналу « $N_{KЛ} - T_{B.B.2}$ » при різних частотах обертання компресора N_K (1– $N_K=45$ об/с, 2– $N_K=50$ об/с, 3– $N_K=55$ об/с, 4– $N_K=60$ об/с) при $T_{B.K.I}=35$ °С та $T_{B.B.1}=20$ °С. Залежності мають лінійний характер, а вплив частоти обертання компресора носить нелінійний характер.

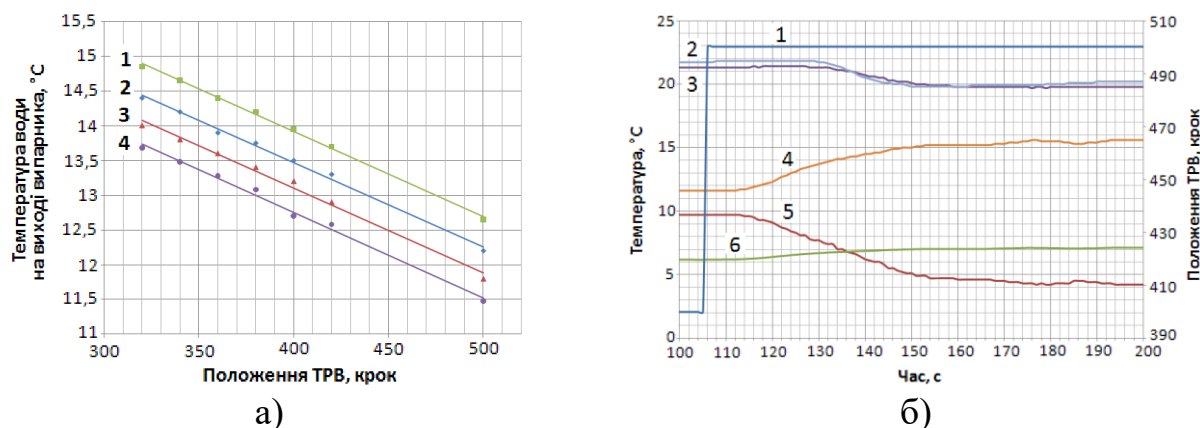


Рис. 7. Статичні характеристики теплового насосу по каналу « $N_{KЛ} - T_{B.B.2}$ » (а) та реакція об'єкту керування на ступінчасту зміну $N_{KЛ}$ (б)

Рис. 7б демонструє реакцію об'єкту керування на ступінчасту зміну положення електронного розширювального вентиля ($N_{KЛ}$) з 400 до 500 кроків.

На рисунку: 1 – положення електронного розширювального вентиля N_{KL} ; 2 – температура води на виході випарника $T_{B.B.2}$; 3 – температура холодоагенту на виході випарника $T_{Ф.В.2}$; 4 – температура холодоагенту на вході випарника $T_{Ф.В.1}$; 5 – температура перегріву парів холодоагенту на виході випарника $T_{ПФ}$; 6 – тиск холодоагенту на виході випарника $P_{Ф.В.}$.

На рис. 8а продемонстровано сімейство статичних характеристик теплового насоса як об'єкта керування по каналу «Частота обертання компресора (N_K) – температура води на виході випарника ($T_{B.B.2}$)» при різних температурах води на вході випарника ($T_{B.B.1}$ (1– $T_{B.B.1}=35$ °С, 2– $T_{B.B.1}=30$ °С, 3– $T_{B.B.1}=25$ °С, 4– $T_{B.B.1}=20$ °С, 5– $T_{B.B.1}=15$ °С), та сталих витратах води через випарник ($G_{B.B.}=250$ л/год) і сталій температурі перегріву парів холодоагенту на виході випарника ($T_{ПФ}=5$ °С). Продемонстровані залежності свідчать про суттєвий вплив температури води на вході в випарник на режим його роботи. При зниженні температури води на вході випарника знижується продуктивність теплового насоса та, відповідно, його енергоефективність.

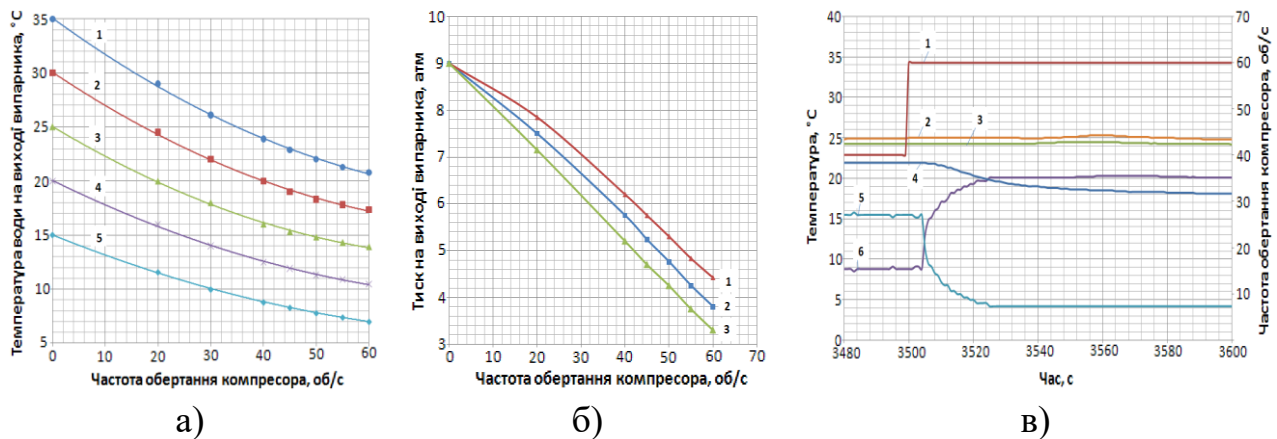


Рис. 8. Статичні характеристики об'єкту керування при зміні частоти обертання компресора (а, б) та його реакція на ступінчасту зміну N_K (в)

На рис. 8б продемонстровано сімейство статичних характеристик по каналу «Частота обертання компресора (N_K) – тиск на виході випарника ($P_{Ф.В.}$)» при різних положеннях електронного розширювального вентиля (1– $N_{KL}=450$ кр., 2– $N_{KL}=400$ кр., $N_{KL}=350$ кр.), при сталій температурі води на вході конденсатора ($T_{B.K.1}=30$ °С) та сталих витратах води крізь випарник ($G_{B.B.}=250$ л/год).

На рис. 8в представлено реакцію об'єкта керування на зміну частоти обертання компресора з 40 до 60 об/с. На рисунку: 1 – частота обертання компресора; 2 – температура води на виході випарника; 3 – температура фреону на виході випарника; 4 – температура фреону на вході випарника; 5 – температура кипіння фреону; 6 – перегрів фреону на виході випарника.

Структурну схему процесу утилізації тепла продуктів згоряння як об'єкта керування отримано в результаті аналізу експериментальних даних, представлено на рис. 9.

Виходячи з фізичної суті теплових процесів, що протікають в об'єкті керування, відомо, що відносно у повній мірі математично ці процеси можуть

бути описані нелінійними диференційними рівняннями. Однак, також відомо, що номінальний режим функціонування об'єкту керування пов'язаний із порівняно вузьким діапазоном змін регульованих координат. А в такому діапазоні процеси можуть бути описані лінійними диференційними рівняннями, тобто припустимою є лінеаризація моделі об'єкту керування.

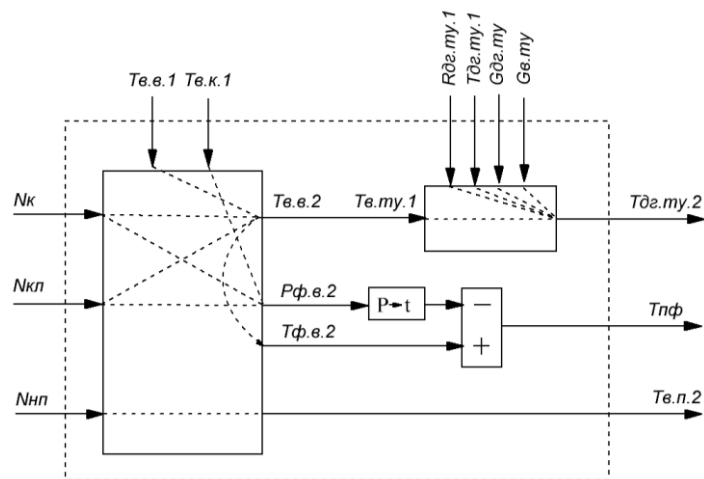


Рис. 9. Структурна схема системи утилізації тепла продуктів згоряння як об'єкту керування

Результати експериментів підтверджують, що основні канали системи утилізації тепла димових газів як об'єкта керування, який відноситься до класу теплових об'єктів, мають властивість самовирівнювання, тому їхні математичні моделі можуть бути описані передатними функціями першого та другого порядку

Отримані експериментальні дані дозволили провести ідентифікацію моделей каналів перетворення координатних дій об'єкту керування. Для параметричної ідентифікації моделей об'єкту керування зі статичними властивостями було використано методику «двох загальних точок». Результати ідентифікації за цією методикою по каналах керівних впливів об'єкту керування подано в табл. 1.

Таблиця 1

Моделі каналів керівних впливів

Канал	Перший порядок	Другий порядок
$N_{кл} - P_{ф.в}$	$W_0(p) = \frac{0,0455 \cdot e^{-9,25p}}{18,13p + 1}$	$W_0(p) = \frac{0,0455 \cdot e^{-3,7p}}{(11,38p + 1)^2}$
$N_{кл} - T_{ф.в.2}$	$W_0(p) = \frac{-0,08 \cdot e^{-28p}}{10p + 1}$	$W_0(p) = \frac{-0,08 \cdot e^{-23,5p}}{(6,88p + 1)^2}$
$N_{к} - T_{в.в.2}$	$W_0(p) = \frac{-0,112 \cdot e^{-24,2p}}{16,5p + 1}$	$W_0(p) = \frac{-0,112 \cdot e^{-15,05p}}{(12,06p + 1)^2}$
$N_{к} - T_{д.г.2}$	$W_0(p) = \frac{-0,077 \cdot e^{-54,5p}}{58,75p + 1}$	$W_0(p) = \frac{-0,077 \cdot e^{-36,5p}}{(36,88p + 1)^2}$
$N_{п} - T_{в.п.2}$	$W_0(p) = \frac{-0,135 \cdot e^{-63,2p}}{256p + 1}$	$W_0(p) = \frac{-0,077 \cdot e^{-42,5p}}{(192,3p + 1)^2}$

У табл. 2 подано результати ідентифікації перехресних впливів з каналу на канал, у табл. 3 – результати ідентифікації каналів контрольованих збурень.

Моделі каналів перехресних зв'язків

Канал	Перший порядок	Другий порядок
$N_{К} - P_{ф.в}$	$W_0(p) = \frac{-0,034 \cdot e^{-0,22p}}{0,375p + 1}$	$W_0(p) = \frac{-0,034 \cdot e^{-0,01p}}{(0,275p + 1)^2}$
$N_{КЛ} - T_{в.в.2}$	$W_0(p) = \frac{-0,08 \cdot e^{-23p}}{8p + 1}$	$W_0(p) = \frac{-0,08 \cdot e^{-18p}}{(5,8p + 1)^2}$

Таблиця 3

Моделі каналів контрольованих збурень

Канал	Перший порядок	Другий порядок
$T_{в.в.1} - T_{в.в.2}$	$W_0(p) = \frac{1 \cdot e^{-10,2p}}{18,1p + 1}$	$W_0(p) = \frac{1 \cdot e^{-7,1p}}{(14,2p + 1)^2}$
$T_{в.к.1} - P_{ф.в}$	$W_0(p) = \frac{0,16 \cdot e^{-12,5p}}{25,1p + 1}$	$W_0(p) = \frac{0,16 \cdot e^{-6,2p}}{(15,3p + 1)^2}$

Структурну схему комплексу математичних моделей процесу утилізації тепла продуктів згорання як об'єкту керування отриманих в результаті аналізу експериментальних даних подано на рис. 10. Структура комплексу математичних моделей обрана відповідно до структури фізичної моделі процесу утилізації тепла продуктів згорання. Взаємозв'язки між елементами моделі також відповідають фізичним параметрам.

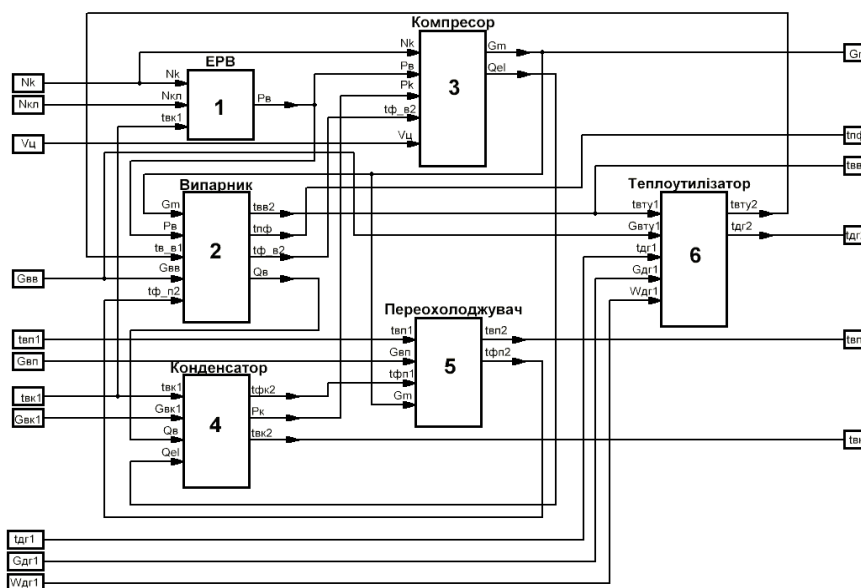


Рис. 10. Структурна схема моделі теплонасосного утилізатора тепла продуктів згорання

До його складу входять моделі: електронного розширювального вентиля (1), випарника (2), компресора (3), конденсатора (4), переохолоджувача (5) і контактного теплообмінника-утилізатора (6). Взаємозв'язки між ними відображають основні матеріальні та енергетичні потоки процесу. В моделі присутні два основних контури, в яких зберігається матеріальний і енергетичний баланси. Контур холодоагенту парокompресійного теплового насоса «Вода – вода» і водяний контур теплоутилізатора. Контур холодоагенту

включає в себе компресор, конденсатор, електронний розширювальний вентиль, переохолоджувач і випарник. Умова матеріального балансу (нерозривності) визначає те, що масова витрата холодоагенту G_M через всі елементи цього контуру однакова.

$$G_M = G_{M_{КП}} = G_{M_{КД}} = G_{M_{П}} = G_{M_{ЕРВ}} = G_{M_{В}}, \quad (1)$$

де $G_{M_{КП}}$ – масова витрата холодоагенту через компресор; $G_{M_{КД}}$ – масова витрата холодоагенту через конденсатор; $G_{M_{П}}$ – масова витрата рідкого холодоагенту через переохолоджувач; $G_{M_{ЕРВ}}$ – масова витрата холодоагенту через електронний розширювальний вентиль; $G_{M_{В}}$ – масова витрата холодоагенту через випарник.

Водяний контур включає в себе контактний теплообмінник повітря-вода, в якому відбувається конденсація частини вологи з пароповітряної суміші і випарник.

Енергетичний (тепловий) баланс процесу утилізації тепла пароводяних сумішей без урахування втрат у навколишнє середовище описується рівністю теплових потужностей (2):

$$P_{ТУ} = P_{В} = (P_{КД} + P_{П} - P_{КП}), \quad (2)$$

де $P_{ТУ}$ – потужність контактного теплообмінника; $P_{В}$ – потужність випарника; $P_{КД}$ – потужність конденсатора; $P_{П}$ – потужність переохолоджувача; $P_{КП}$ – потужність компресора.

При розробленні моделей статичних властивостей процесу утилізації тепла продуктів згоряння як об'єкту керування були використані деякі залежності, отримані експериментально.

Тиск на виході випарника (3):

$$P_{ФВ2}(N_{КЛ}, N_{К}) = \left(\frac{1500}{88 + N_{К}} \right) - 0.03 \cdot N_{КЛ} \cdot N_{К} \cdot \left(1 - e^{\frac{N_{КЛ}}{50}} \right), \quad (3)$$

де $P_{ФВ2}$ – тиск холодоагенту на виході випарника; $N_{КЛ}$ – положення клапана електронного розширювального вентиля; $N_{К}$ – частота обертання компресора.

Перепад температур кипіння холодоагенту (тиску) у випарнику (4):

$$\Delta t_{В} = \left(\frac{G_E}{G_{МАХ}} \cdot G_E^2 \cdot K_3 \right) + \left(\left(1 - \frac{G_E}{G_{МАХ}} \right) \cdot (G_M \cdot K_P)^2 \cdot K_4 \right), \quad (4)$$

де $G_{МАХ}$ – максимально можлива витрата холодоагенту в даних умовах при $T_{ПФ}=0$; K_P – коефіцієнт розширення холодоагенту при випаровуванні; K_3, K_4 – емпіричні коефіцієнти, які характеризують питомий опір каналу випарника для газу та рідини відповідно.

Температура продуктів згоряння на виході теплоутилізатора (5):

$$t_{ППС2} = t_{ВТУ1} \cdot K_8 + b, \quad (5)$$

де $t_{ВТУ1}$ – температура води на вході в теплоутилізатор; K_8, b – емпіричні коефіцієнти, які залежать від конструкції теплоутилізатора.

Максимально можлива витрата холодоагенту через прямотоковий коаксіальний випарник (6):

$$G_{МАХ} = 7.24 \cdot (T_{В.В.1} - T_{К.Ф.}) + 8.77, \quad (6)$$

де $T_{В.В.1}$ – температура води на вході у випарник; $T_{К.Ф.}$ – температура кипіння холодоагенту на виході випарника.

Моделі інших елементів процесу були побудовані як моделі з зосередженими параметрами на основі рівнянь теплового та матеріального балансів.

При розробленні моделей було зроблено деякі припущення. Умовою безаварійного ведення технологічного процесу утилізації тепла продуктів згоряння є газоподібний стан холодоагенту на вході компресора. Рушійною силою, що забезпечує циркуляцію холодоагенту, є перепад тисків, який створюється компресором. Рівень тиску парів холодоагенту на вході компресора забезпечує виконання умови матеріального балансу – рівності масової витрати холодоагенту через електронний розширювальний вентиль і компресор. Рівень тиску парів холодоагенту на виході компресора визначається режимом роботи конденсатора.

Для перевірки моделі на адекватність було проведено ряд комп'ютерних експериментів та отримано квазістатичні та динамічні залежності по основних каналах перетворення.

На рис. 11а продемонстровано сімейство отриманих у результаті проведення експерименту та при моделюванні квазістатичних залежностей тиску у випарнику від положення електронного розширювального вентиля при різних частотах обертання компресора (1 – 45 об/с, 2 – 50 об/с, 3 – 55 об/с, 4 – 60 об/с), а на рис. 11б – при різних температурах води на вході конденсатора (1 – 45 °С, 2 – 40 °С, 3 – 35 °С, 4 – 30 °С).

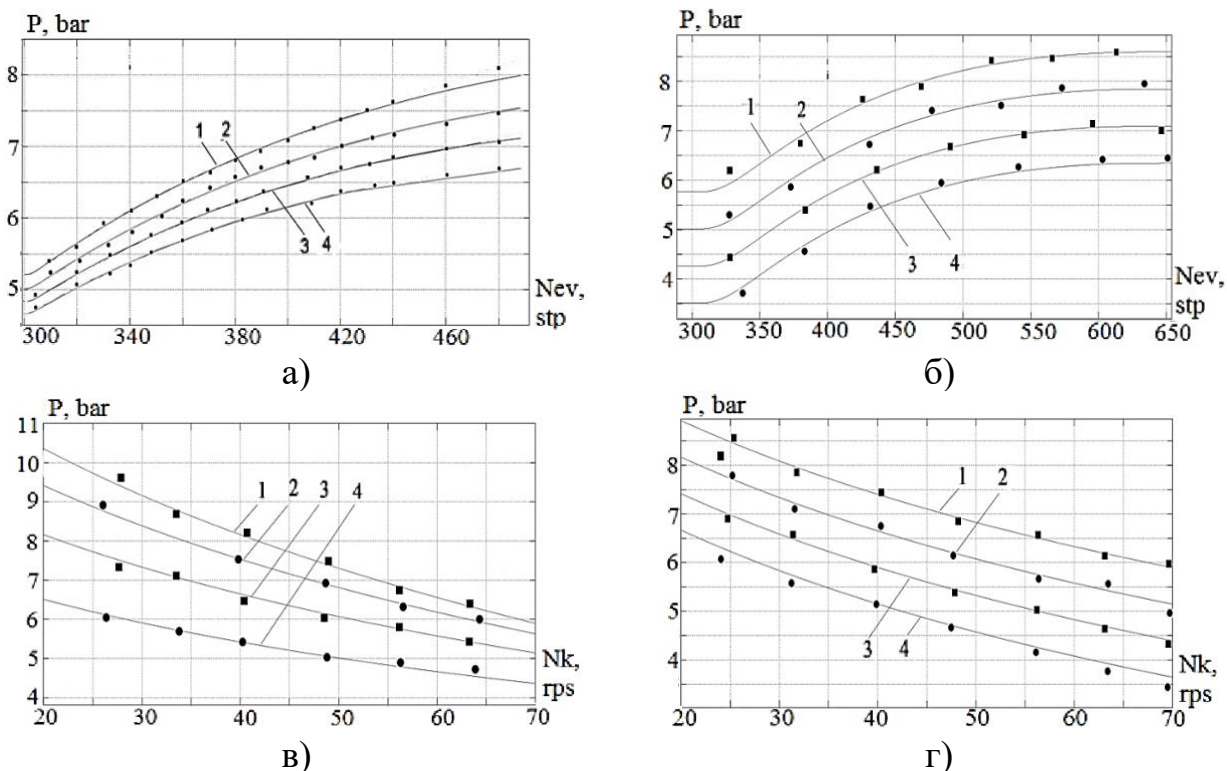


Рис. 11. Порівняння експериментальних даних та результатів моделювання статичних характеристик

На рис. 11 продемонстровано сімейство отриманих в результаті проведення експерименту та при моделюванні квазістатичних залежностей

тиску у випарнику від частоти обертання компресора при різних положеннях електронного розширювального вентиля (1 – 300 кр, 2 – 350 кр, 3 – 400 кр, 4 – 450 кр), а на рис. 11г – при різних температурах води на вході конденсатора (1 – 45 °С, 2 – 40 °С, 3 – 35 °С, 4 – 30 °С).

Подані результати досліджень свідчать про те, що розроблену імітаційну модель можна вважати адекватною, оскільки вона досить точно відтворює процеси, які протікають у реальній системі утилізації тепла продуктів згоряння з використанням теплового насоса.

У четвертому розділі «**Структурний і параметричний синтез альтернативних варіантів системи автоматичного керування, їх порівняльний аналіз**» проведено структурний та параметричний синтез альтернативних варіантів системи автоматичного керування підвищеної динамічної точності, та проведено їхній порівняльний аналіз.

На рис. 12 продемонстровано структурну схему двовимірної системи автоматичного керування найпростішої структури, яка була взята в якості базової. Вона містить два контури регулювання – рівня перегріву парів холодоагенту на виході випарника над температурою кипіння ($T_{ПФ}$) і температури пароповітряної суміші на виході теплоутилізатора ($T_{ДГ.ТУ.2}$).

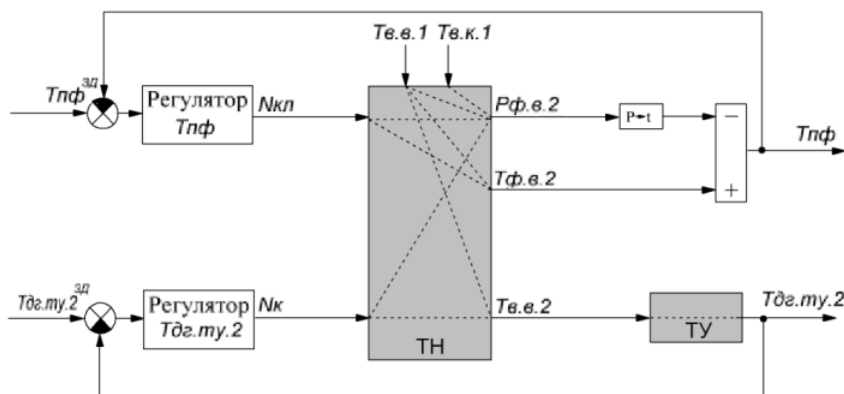


Рис. 12. Структурна схема базової системи автоматичного керування

Розглянуті варіанти систем автоматичного керування рівня перегріву парів холодоагенту на виході випарника, підвищеної динамічної точності, інваріантні до збурень. Вони реалізували розімкнений принцип керування за збуренням у вигляді зміни температури води на вході в конденсатор або частоти обертання компресора за моделлю, без зворотного зв'язку. Суттєвим недоліком такого підходу є те, що не завжди і не при всіх умовах модель точно описує об'єкт керування, оскільки він є суттєво нелінійним, а параметри коригувальних ланок оптимізовані в якійсь певній робочій точці.

Ліанеризація статичної характеристики каналу керування рівня перегріву можлива при застосуванні каскадної системи керування, внутрішній (швидкий) контур якої стабілізує витрати холодоагенту, а зовнішній – рівень перегріву парів холодоагенту на виході випарника. Однак, у зв'язку зі складністю технічної реалізації системи вимірювання витрат холодоагенту внутрішній контур каскадної системи автоматичного керування за звичай стабілізує тиск

на виході випарника. Така каскадна система за рахунок зворотного зв'язку внутрішнього контуру є лінійною відносно керівного впливу та інваріантною до тиску в конденсаторі. Однак, це є справедливим лише для систем зі сталою частотою обертання компресора (його об'ємною продуктивністю)

Дослідження показали, що в якості змінної, що стабілізується внутрішнім контуром каскадної системи автоматичного керування, може виступати не фактична витрата холодоагенту, виміряна витратоміром, а віртуальна змінна, розрахована за математичною моделлю, яка корелює з фізичною масовою витратою холодоагенту (7).

$$G_M = \frac{N_k \cdot V_{cyl} \cdot N_{cyl} \cdot K_p \cdot P_B \cdot M_{fr}}{R \cdot T} \cdot K_K, \quad (7)$$

де N_k – частота обертання двигуна компресора; V_{cyl} – об'єм одного циліндра компресора; N_{cyl} – кількість циліндрів компресора; K_p – коефіцієнт подачі компресора; P_B – тиск холодоагенту на вході компресора; M_{fr} – молярна маса холодоагенту;

У роботі було проведено синтез семи варіантів альтернативних систем автоматичного керування, які певною мірою забезпечували підвищення динамічної точності, інваріантність до збурень. Можна відзначити такі етапи розвитку системи автоматичного керування процесом утилізації тепла продуктів згоряння із застосуванням теплового насоса: Базова система автоматичного керування; система автоматичного керування із каскадним регулятором температури продуктів згоряння на виході теплоутилізатора, із використанням температури води на виході випарника в якості проміжної змінної; система автоматичного керування рівня перегріву парів холодоагенту на виході випарника, інваріантна до зміни температури води на вході в конденсатор, за рахунок введення коригувального зв'язку; система автоматичного керування рівня перегріву парів холодоагенту на виході випарника, інваріантна до зміни частоти обертання компресора, за рахунок введення між регуляторного перехресного зв'язку; система автоматичного керування рівня перегріву парів холодоагенту на виході випарника адаптивна до зміни параметрів об'єкта керування; система автоматичного керування із каскадним регулятором перегріву парів холодоагенту, із використанням розрахункової витрати холодоагенту в якості проміжної змінної; система автоматичного керування із каскадним регулятором перегріву парів холодоагенту, інваріантна до зміни температури води на вході в випарник.

На рис. 13 наведено структурну схему системи автоматичного керування з каскадним регулятором перегріву парів холодоагенту, інваріантна до зміни температури води на вході в випарник.

Ця система автоматичного керування є найбільш конкурентоспроможною серед розглянутих. Інваріантність досягається за рахунок введення коригувального зв'язку між температурою теплоносія на вході в випарник $T_{B.V.1}$ та входом регулятора витрати холодоагенту G_M , що реалізує принцип Петрова та формує розімкнуту складову регулювання $T_{ПФ}$. Вона забезпечує найбільшу динамічну точність та є інваріантною до всіх основних збурень.

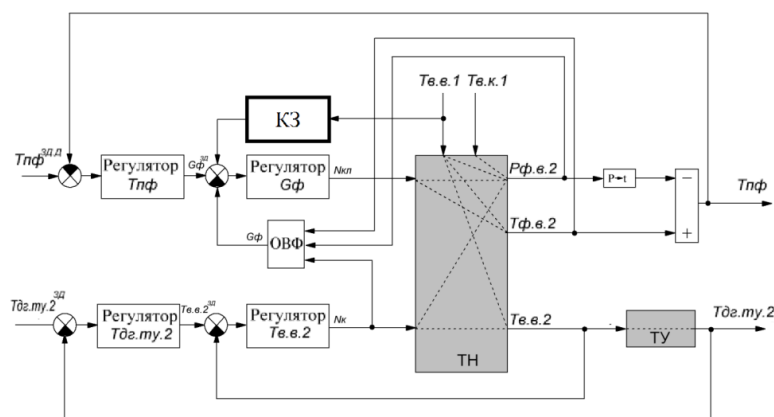


Рис. 13. Структурна схема системи автоматичного керування із каскадним регулятором перегріву парів холодоагенту, інваріантна до зміни температури води на вході в випарник

На рис. 14 продемонстровано графіки перехідних процесів у системі автоматичного керування різних структур, при впливі збурень у вигляді зміни температури води на вході у випарник (а) та конденсатор (б).

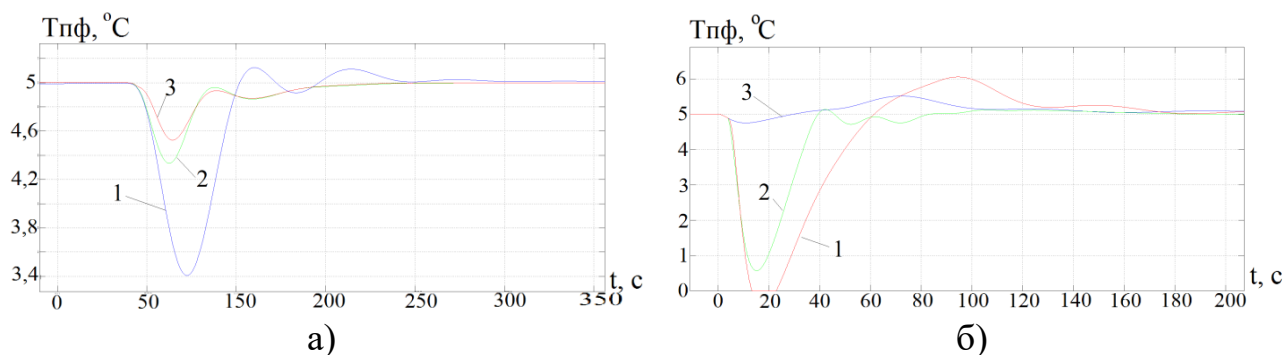


Рис. 14. Порівняння перехідних процесів у системі автоматичного керування різних структур: 1 – базова система автоматичного керування; 2 – система автоматичного керування інваріантна до збурень за каналами « $T_{в.к.1} - T_{пф}$ » та « $N_K - T_{пф}$ »; 3 – система автоматичного керування з каскадним регулятором перегріву парів холодоагенту, інваріантна до зміни температури води на вході в випарник

Для найбільш конкурентоспроможної системи автоматичного керування проведено моделювання її роботи на інтервалі часу, рівному одній добі, при впливі збурень, що відповідають реальним умовам експлуатації. На рис. 15 продемонстровано отримані в результаті імітаційного моделювання добові графіки зміни рівня перегріву парів холодоагенту на виході випарника при роботі системи автоматичного керування базової структури (1) та систему автоматичного керування із каскадним регулятором перегріву парів холодоагенту, інваріантну до зміни температури води на вході в випарник (2).

Результати експерименту свідчать про те, що система автоматичного керування із каскадним регулятором перегріву парів холодоагенту, інваріантна до зміни температури води на вході в випарник, забезпечує більшу динамічну точність при впливі збурень, що дозволило знизити заданий рівень перегріву

парів холодоагенту з 6 до 2 °С, виключивши при цьому можливість аварійної ситуації, що може виникнути при падінні рівня перегріву парів холодоагенту до нуля, через неповне википання холодоагенту та потрапляння рідкої фази до компресора. Завдяки зниженню рівня перегріву парів холодоагенту та підвищення внаслідок цього, при інших рівних умовах, температури кипіння та густини парів холодоагенту на виході випарника підвищується масова продуктивність компресора. Підвищення температури кипіння у випарнику на 1 °С при незмінних теплових потужностях конденсатора та теплоутилізатора знижує споживану електричну потужність компресора та підвищує коефіцієнт перетворення теплового насоса майже на 2 %.

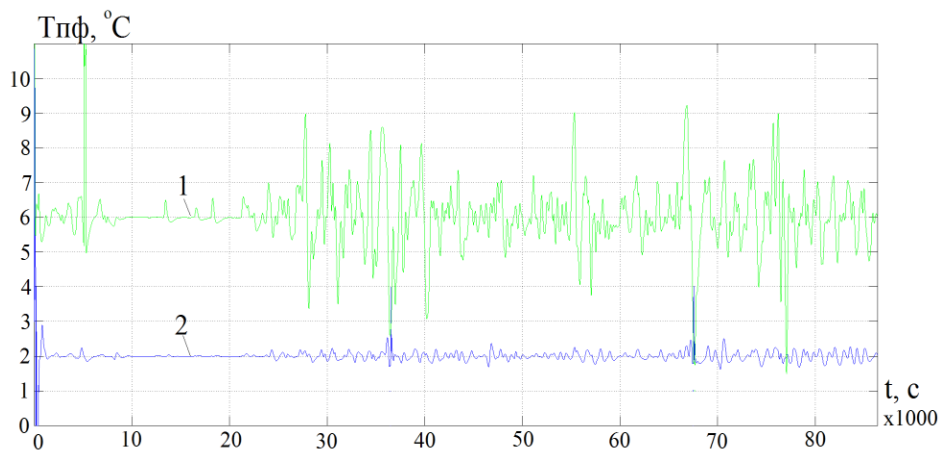


Рис. 15. Добові графіки зміни рівня перегріву на виході випарника при роботі базової (1) та системи автоматичного керування із каскадним регулятором перегріву парів холодоагенту, інваріантна до зміни температури води на вході в випарник (2)

Таблиця 4

Основні результати порівняльного моделювання базової системи автоматичного регулювання та найбільш ефективної з альтернативних

Структура системи автоматичного керування	Базова	З каскадним регулятором $T_{пф}$ інваріантна до зміни $T_{в.в.1}$	Різниця, %
Інтегрально-модульний показник	11730	7023	41
Максимальне динамічне відхилення	4,2	1,3	70
Споживана електроенергія, кВт·ч	16,7	15,43	7,6
Енергія, отримана на конденсаторі, кВт·ч	112,8	114	1,7
Енергія, утилізована в теплоутилізаторі, кВт·ч	82,8	82,9	1,2
Середній коефіцієнт перетворення	4,95	5,37	7,8

У табл. 4 зведено показники якості регулювання та енергетичної ефективності базової та найбільш конкурентоспроможної з альтернативних систем автоматичного керування.

ВИСНОВКИ

У дисертації подано обґрунтування та вирішення нового науково-технічного завдання – розроблення системи автоматичного керування утилізацією тепла продуктів згоряння газових котелень в умовах застосування парокompресійних теплових насосів, алгоритми якої підвищують енергетичну ефективність утилізації та забезпечують безаварійне ведення процесу в широкому діапазоні кліматичних умов. Вирішення цього завдання вимагало розроблення фізичної, математичної та імітаційної моделей процесу утилізації тепла продуктів згоряння як об'єкта керування та проведення на їхній основі значної кількості експериментів, включаючи імітаційні експерименти з порівняльного дослідження ефективності системи автоматичного керування з альтернативними алгоритмами, в тому числі з відомими.

1. Розроблена та виготовлена фізична модель процесу утилізації тепла продуктів згоряння з еквівалентною потужністю 5 кВт (що відповідає котлу, потужністю 30 кВт) з застосуванням теплового насосу електричною потужністю 1,5 кВт, яка обладнана автоматизованим робочим місцем дослідника, що дозволяє проводити експериментальні дослідження в автоматичному режимі за заздалегідь розробленим планом експерименту.

2. Обґрунтовано в ході спеціальних цілеспрямованих експериментів на фізичній моделі процесу утилізації тепла продуктів згоряння доцільність введення нової регульованої змінної – значення масової витрати холодоагенту у випарнику розраховане за математичною моделлю.

3. Удосконалено структуру контуру регулювання температури перегріву пари холодоагенту на виході випарника для запобігання в ньому автоколивань за рахунок застосування мікрокрокового режиму електропривода регулювального вентиля, що до 16 разів збільшує точність відтворення керуючого впливу.

4. Розроблено комплекс математичних моделей процесу утилізації тепла продуктів згоряння як об'єкта керування, що описує нелінійні статичні і динамічні властивості каналів керування, перехресних каналів та каналів збурень процесу утилізації тепла продуктів згоряння в умовах використання теплового насоса.

5. Обґрунтовано концепцію підвищення ефективності керованих процесів, зокрема енергоефективності процесу утилізації тепла продуктів згоряння, на основі розгляду об'єкта керування як цілісного об'єкта, інтегруючого усі виявлені та математично описані канали взаємозв'язків між його змінними, за рахунок цілеспрямованого вдосконалення алгоритмів керування системи автоматичного керування у напрямі підвищення динамічної точності керованих змінних на основі застосування принципів каскадності, інваріантності та автономності.

6. Проведені порівняльні дослідження варіантів системи автоматичного керування процесом утилізації тепла продуктів згоряння із базовим алгоритмом керування та альтернативними варіантами алгоритмів, що підвищують динамічну точність керованих змінних, з оцінкою енергоефективності процесу.

За рахунок застосування розробленого алгоритму керування вдалося зменшити споживану електричну потужність на 7,6 % та збільшити середній коефіцієнт перетворення теплового насоса на 7,8 %. При цьому динамічні відхилення в перехідних режимах зменшено на 70 % та на 41 % – інтегрально-модульний показник якості регулювання.

7. Отримано імітаційну модель зовнішніх збурень процесу утилізації тепла продуктів згоряння на основі даних моніторингу функціонування автономної газової котельної багатопверхового житлового будинку, із застосуванням якої проведено порівняльне моделювання базової та найбільш конкурентоздатної системи автоматичного керування серед розглянутих альтернативних варіантів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія

1. Бондаренко З. В., Ковальчук Д. А., Мазур О. В. та ін. Інформаційні технології та автоматизація: монографія. Одеса, 2020. 247 с. *(Здобувачем представлено опис лабораторної установки щодо дослідження процесів утилізації тепла продуктів згоряння, наведено деякі результати експериментальних досліджень, проведено ідентифікацію статичних та динамічних властивостей процесу та синтезовано комплекс математичних моделей, що описують властивості процесу).*

Статті у наукових фахових виданнях України,

у тому числі включених до міжнародних наукометричних баз даних

2. Ковальчук Д. А., Мазур О. В., Гудзь С. С. Оценка энергетической эффективности газового конденсационного водогрейного котла, как объекта управления. Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. 2017. № 2. Т. 80. С. 95–98. *(Здобувачем розроблено та реалізовано у середовищі імітаційного моделювання математичну модель розрахунку ефективності економайзера газового котла).*

3. Kovalchuk D., Mazur A. The model for power efficiency assessment of condensation heating installations. Автоматизація технологічних та бізнес процесів. 2017. № 9. Т. 3. С. 13–19. *(Здобувачем розроблено імітаційну модель системи опалення житлового будинку та проведено дослідження зі зміни режимів її роботи упродовж опалювального сезону).*

4. Ковальчук Д. А., Мазур О. В., Гудзь С. С. Дослідження процесів утилізації тепла пароповітряних сумішей: лабораторна установка, вимірювані змінні, автоматизація експериментів. Автоматизація технологічних та бізнес процесів. 2018. № 2. Т. 10. С. 64–72. *(Здобувачем досліджено процеси утилізації тепла пароповітряних сумішей).*

5. Ковальчук Д. А., Мазур О. В., Хобін В. А. Дослідження процесів утилізації тепла пароповітряних сумішей: результати експериментів, структурна та параметрична ідентифікація основних каналів об'єкту. Автоматизація технологічних та бізнес процесів. 2019. № 11. Т. 1. С. 32–42. *(Здобувачем проведено аналіз результатів експериментальних досліджень,*

побудовано структурну схему процесу утилізації тепла продуктів згорання як об'єкта керування, проведено ідентифікацію основних каналів керування, збурень та перехресних зв'язків, та отримано їхні математичні моделі).

6. Ковальчук Д. А., Мазур О. В. Дослідження процесів утилізації тепла пароповітряних сумішей: імітаційне моделювання. Автоматизація технологічних та бізнес процесів. 2020. № 4. Т. 11. С. 68–82. *(Здобувачем виконано реалізацію моделей усіх складових процесу утилізації тепла продуктів згорання у середовищі імітаційного моделювання та проведено комп'ютерні експериментальні дослідження з перевірки отриманих моделей на адекватність).*

**Стаття у періодичному науковому виданні іншої держави,
яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку
та/або Європейського Союзу**

7. Kovalchuk D., Mazur A. Synthesis and comparative analysis of alternative variants of automatic control systems for the process of heat recovery from combustion products using heat pumps. Polish journal of science. 2020. № 34. Т. 1. С. 51–60. *(Здобувачем виконано синтез та порівняльне моделювання шести альтернативних варіантів систем автоматичного керування та обрано серед них найбільш ефективну).*

Тези наукових доповідей

8. Ковальчук Д. А., Мазур О. В. Лабораторна установка для дослідження систем утилізації тепла димових газів як об'єктів керування. Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2017): IV Міжнародна наукова конференція, м. Вінниця, 31 жовтня – 02 листопада 2017 року: тези доповіді. Вінниця, 2017. С. 86–87. *(Здобувачем представлено опис розробленої автоматизованої лабораторної установки щодо дослідження процесів утилізації тепла продуктів згорання, її технологічної схеми, технічних засобів автоматизації, контурів регулювання, програмного забезпечення, представлено деякі результати експериментальних досліджень).*

9. Kovalchuk D. A., Mazur A. V. The workstation for the flue gas heat utilization process research. Інформаційні технології та автоматизація 2017: Міжнародна наукова конференція, м. Одеса, 2017 року: тези доповіді. Одеса, 2017. С. 31–35. *(Здобувачем представлено опис розробленої автоматизованої лабораторної установки щодо дослідження процесів утилізації тепла продуктів згорання її технологічної схеми, технічних засобів автоматизації, контурів регулювання, програмного забезпечення, представлено деякі результати експериментальних досліджень).*

10. Ковальчук Д. А., Мазур О. В. Експериментальні дослідження теплонасосного утилізатора тепла пароповітряних сумішей як об'єкта керування. Інформаційні технології та автоматизація 2018: Міжнародна наукова конференція, м. Одеса, 2018 року: тези доповіді. Одеса, 2018. С. 40–42. *(Здобувачем представлено результати та аналіз експериментальних досліджень процесу утилізації тепла продуктів згорання на лабораторній*

установці, побудовано структурну схему процесу утилізації як об'єкта керування, проведено ідентифікацію статичних та динамічних властивостей основних каналів керування, збурень та перекресних зв'язків та отримано їх математичні моделі).

11. **Ковальчук Д. А.,** Мазур О. В., Гудан В. В. Автоматизація досліджень процесів утилізації тепла пароповітряних сумішей. Інформаційні технології та автоматизація 2019: Міжнародна наукова конференція, м. Одеса, 2019 року: тези доповіді. Одеса, 2019. С. 53–56. *(Здобувачем виконано реалізацію моделей усіх складових процесу утилізації тепла продуктів згоряння у середовищі імітаційного моделювання та проведено комп'ютерні експериментальні дослідження щодо перевірки отриманих моделей на адекватність).*

АНОТАЦІЯ

Ковальчук Д. А. Енергоефективне автоматичне керування утилізацією тепла продуктів згоряння газових котелень в умовах застосування парокompресійних теплових насосів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.13.07 «Автоматизація процесів керування». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2021.

Дисертацію присвячено вирішенню актуального науково-технічного завдання підвищення енергетичної ефективності процесу утилізації тепла продуктів згоряння газових котелень за рахунок удосконалення алгоритмів його системи автоматичного керування.

Розроблено та реалізовано фізичну модель процесу утилізації тепла продуктів згоряння із використанням теплового насоса. Розширенні умови моделювання та автоматизації проведення експериментів, включаючи створення автоматизованого робочого місця дослідника. На фізичній моделі проведено основний комплекс із 64 тривалих експериментів у автоматичному режимі, результати яких склали основу для розроблення моделей статички та динаміки процесу як об'єкта керування.

У ході спеціальних цілеспрямованих експериментів на фізичній моделі обґрунтовано доцільність введення нової регульованої змінної – розрахункового (за математичною моделлю) значення масової витрати холодоагенту у випарнику, що в подальшому дозволило підвищити ефективність керування витратою холодоагенту до випарника та спростити технічну реалізацію системи автоматичного керування.

Удосконалено структуру контуру регулювання температури перегріву пари холодоагенту на виході випарника для запобігання в ньому автоколивань за рахунок застосування мікрокрокового режиму електроприводу регульовального вентиля, що дозволило спростити конструкцію теплового насоса, відмовившись від застосування капілярних або інших балансувальних пристроїв для корекції витратної характеристики вентиля.

На основі рівнянь матеріального і енергетичного балансів процесу утилізації тепла продуктів згоряння із результатів експериментів на його фізичній моделі отримано комплекс математичних моделей, що описує нелінійні статичні і динамічні властивості каналів керування, перехресних каналів та каналів збурень процесу утилізації тепла продуктів згоряння з тепловим насосом як об'єктом керування, реалізовано імітаційну версію цієї моделі об'єкту керування. Підтверджено адекватність моделей, створено математичну основу для розроблення алгоритмів керування підвищеної динамічної точності системи автоматичного керування і переведено експерименти з порівняльного дослідження ефективності варіантів системи автоматичного керування з фізичної моделі в середовище імітаційного моделювання, за рахунок чого знизити витрати часу на проведення цих експериментів приблизно в 50 разів та розширити можливості досліджень.

Проведено синтез та порівняльні дослідження варіантів системи автоматичного керування процесом утилізації тепла продуктів згоряння з базовим алгоритмом керування та альтернативними варіантами алгоритмів, що підвищують динамічну точність керованих змінних, із оцінкою енергоефективності процесу, зроблено висновок про актуальність вдосконалення системи автоматичного керування у напрямі підвищення динамічної точності керованих змінних як засобу підвищення енергоефективності процесу утилізації тепла продуктів згоряння із тепловим насосом та обрано, з досліджених, найбільш конкурентоздатний алгоритм.

Отримано імітаційну модель зовнішніх збурень процесу утилізації тепла продуктів згоряння на основі даних моніторингу функціонування автономної газової котельні багатоповерхового житлового будинку із застосуванням якої проведено порівняльне моделювання базової та системи автоматичного керування із каскадним регулятором перегріву парів холодоагенту, інваріантна до зміни температури води на вході в випарник та підтверджено суттєві переваги роботи розробленої системи автоматичного керування в умовах реальних збурень.

Ключові слова: утилізація, продукти згоряння, тепловий насос, система автоматичного керування, енергоефективність.

АННОТАЦИЯ

Ковальчук Д. А. Энергоэффективное автоматическое управление утилизацией тепла продуктов сгорания газовой котельной в условиях применения парокompрессионных тепловых насосов. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 «Автоматизация процессов управления». Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Киев, 2021.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-технической задачи повышения энергетической эффективности процесса утилизации тепла

продуктов сгорания газовых котельных за счет совершенствования алгоритмов системы автоматического управления. Разработана и реализована физическая модель процесса утилизации тепла продуктов сгорания с использованием теплового насоса.

Энергетическая эффективность работы теплового насоса в составе системы утилизации тепла продуктов сгорания зависит от способности системы управления с высокой точностью поддерживать энергоэффективные режимы ведения процесса, не допуская при этом аварийных ситуаций. Применение теплового насоса в таких системах предусматривает его работу в широком диапазоне координатных и параметрических возмущений. Классические системы управления обычно не обеспечивают стабильную работу в таких условиях, поскольку возмущения могут существенно влиять на свойства теплового насоса как объекта управления. Поэтому разработка системы управления повышенной динамической точности процессами глубокой утилизации тепла продуктов сгорания с применением тепловых насосов является актуальной задачей, решение которой позволит повысить энергетическую эффективность и обеспечить безаварийное ведение процесса.

Расширены условия моделирования и автоматизации проведения экспериментов, включая создание автоматизированного рабочего места исследователя. На физической модели проведен основной комплекс из 64 длительных экспериментов в автоматическом режиме, результаты которых легли в основу для разработки моделей статики и динамики процесса как объекта управления.

В ходе специальных целенаправленных экспериментов на физической модели обоснована целесообразность введения новой регулируемой переменной – расчетного (по математической модели) значения массового расхода хладагента в испарителе, что в дальнейшем позволило повысить эффективность управления расходом хладагента в испарителе и упростить техническую реализацию системы автоматизированного управления.

Усовершенствована структура контура регулирования температуры перегрева паров хладагента на выходе испарителя для предотвращения в нем автоколебаний за счет применения микрошагового режима электропривода регулирующего вентиля, что позволило упростить конструкцию теплового насоса, отказавшись от применения капиллярных или других балансирующих устройств для коррекции расходной характеристики вентиля.

На основе уравнений материального и энергетического балансов процесса утилизации тепла продуктов сгорания и результатов экспериментов на его физической модели получено комплекс математических моделей, описывающих нелинейные статические и динамические свойства каналов управления, перекрестных каналов, и каналов возмущений процесса утилизации тепла продуктов сгорания с тепловым насосом как объектом управления, и реализовано имитационную версию этой модели объекта управления. Подтверждена адекватность моделей, создана математическая основа для разработки алгоритмов управления повышенной динамической точности системы автоматизированного управления и переведено

эксперименты по сравнительному исследованию эффективности вариантов системы автоматизированного управления с физической модели в среде имитационного моделирования, за счет чего снижены затраты времени на проведение экспериментов до 50 раз и расширены возможности исследований.

Получила дальнейшее развитие концепция повышения эффективности управляемых процессов, в частности энергоэффективности процесса утилизации тепла продуктов сгорания, на основе рассмотрения объекта управления как целостного объекта, интегрирующего все выявленные и математически описаны каналы взаимосвязей между его переменными, за счет целенаправленного совершенствования алгоритмов управления системы автоматизированного управления в направлении повышения динамической точности управляемых переменных, на основе применения принципов каскадности, инвариантности и автономности. Разработаны варианты альтернативных, конкурентоспособных алгоритмов управления системы автоматизированного управления, для их сравнительного исследования по показателю энергоэффективности процесса утилизации тепла продуктов сгорания.

Проведен синтез и сравнительные исследования вариантов системы автоматизированного управления процессом утилизации тепла продуктов сгорания с базовым алгоритмом управления и альтернативными вариантами алгоритмов, повышающих динамическую точность управляемых переменных, с оценкой энергоэффективности процесса. Сделан вывод об актуальности совершенствования системы автоматизированного управления в направлении повышения динамической точности управляемых переменных как средства повышения энергоэффективности процесса утилизации тепла продуктов сгорания с тепловым насосом и избран, из исследованных, наиболее конкурентоспособный алгоритм.

Получена имитационная модель внешних возмущений процесса утилизации тепла продуктов сгорания на интервале времени равном одному году, на основе данных мониторинга функционирования автономной газовой котельной многоэтажного жилого дома с применением которой проведено сравнительное моделирование базовой и системы автоматизированного управления с каскадным регулятором перегрева паров хладагента, инвариантного к изменению температуры воды на входе в испаритель и подтверждены существенные преимущества работы разработанной системы автоматизированного управления в условиях реальных возмущений.

ANNOTATION

Kovalchuk D. A. Energy-Efficient Automatic Control of the Heat Utilization from Gas Boiler Combustion Products in the Conditions of Steam-Compression Heat Pumps Application. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of the candidate of technical sciences on the specialty 05.13.07 «Automation of Control Processes». National University of Life and Environmental Science of Ukraine. Kyiv, 2021.

The new solution of the actual scientific and technical problem of increasing the energy efficiency of combustion products heat recovery process of gas boilers by improving the algorithms of its automatic control system is presented.

A physical model of the combustion products heat recovery process, using a heat pump was developed and implemented. The main set of 64 long experiments in the automatic mode was carried out on the physical model, the results of which formed the basis for the development of the statics and dynamics models of the process as a control object. In result of special experiments on the physical model, the expediency of introducing a new adjustable variable – the calculated value of the refrigerant mass flow in the evaporator, which further increase the efficiency of refrigerant flow control to the evaporator and simplify the technical implementation of control system. The structure of the refrigerant vapor superheat temperature control circuit at the evaporator outlet has been improved to prevent self-oscillations by applying a microstep mode in the control valve. Based on the equations of material and energy balances of the combustion products heat recovery process and the results of experiments on its physical model, a set of mathematical models describing nonlinear static and dynamic properties of control channels, cross channels, and perturbation channels of the combustion products heat recovery process with a heat pump as control object is obtained, and a simulation version is implemented. The adequacy of models is confirmed, the mathematical basis for development of algorithms with increased dynamic accuracy of control system is created. The concept of increasing the efficiency of controlled processes, in the energy efficiency of the combustion products heat recovery process, based on the consideration of control object as an integral object, integrating all identified and mathematically described channels of relationships between its variables, by purposefully improving the control algorithms to increase dynamic accuracy based on the application of the principles of cascade, invariance and autonomy. Synthesis and comparative researches of control systems variants with basic control algorithm and alternative variants of algorithms increasing dynamic accuracy of controlled variables with estimation of energy efficiency of process are carried out. A simulation model of external perturbations of the combustion products heat recovery process at a time interval equal to one year was obtained, based on the monitoring data of the autonomous gas boiler house of a residential building.

Key words: utilization, combustion products, heat pump, automatic control system, energy efficiency.

Підписано до друку 07.04.21
Ум. друк. арк. 1,9
Наклад 100 прим.

Формат 60x84\16
Зам. № 210210

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі НУБіП України
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041
тел.: 527-81-55