

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»**

Букарос Валерія Миколаївна



УДК 629.5.064: 621.565.9

**УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ ЗА
ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ СУДНОВОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ**

Спеціальність 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Одеська морська академія» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: Онищенко Олег Анатолійович,
доктор технічних наук, професор,
Національний університет «Одеська морська академія»,
професор кафедри технічної експлуатації флоту.

Офіційні опоненти: Тимощук Олена Миколаївна,
доктор технічних наук, професор,
Державний університет інфраструктури та технологій,
директор Київського інституту водного транспорту
імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного;

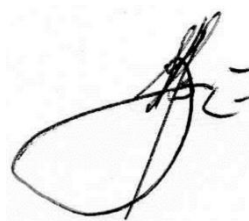
Вичужанін Володимир Вікторович,
доктор технічних наук, професор,
Державний університет «Одеська політехніка»,
завідувач кафедри інформаційних технологій.

Захист відбудеться 22 квітня 2021 р., о 13-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01 у Національному університеті «Одеська морська академія» за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 8, корп. 1, зала засідань вченої ради.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного університету «Одеська морська академія» за адресою: м. Одеса, вул. Дідріхсона, 8, корп. 2 та за електронною адресою: <http://www.onma.edu.ua/zakhist-dissertatsiy>.

Автореферат розісланий 19 березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
д.т.н., професор



В.В. Нікольський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Тенденції розвитку сучасної морської галузі показують, що при експлуатації судових механізмів і установок основна увага приділяється питанням діагностики та своєчасного виявлення несправностей технологічного обладнання.

Суднові холодильні установки (СХУ) є найбільш поширеними допоміжними судовими енергетичними установками і використовуються майже у всіх типах морських і річкових суден – для холодильної обробки і зберігання харчових продуктів, приготування холодної води, льоду, комфортного і технічного кондиціонування повітря, зрідження газів, зберігання зрідженого вуглекислого газу і в інших застосуваннях.

Запит практики сучасного морського флоту України формує досить жорсткі вимоги, що висуваються до СХУ: крім поліпшення споживчих властивостей, затребувані висока точність регулювання температури в холодильних камерах (ХК), мінімальні витрати електроенергії на вироблення холоду, підвищена надійність функціонування при змінних режимах роботи. Дані вимоги до енергетичної ефективності та надійності СХУ викликають необхідність пошуку нових шляхів діагностування і контролю їх технічного стану.

Найбільший ефект діагностування несправностей СХУ досягається використанням підходу «fault detection and diagnostics» (FDD) із застосуванням спеціалізованих мікропроцесорних пристроїв. Такий підхід передбачає використання математичних моделей діагностованих вузлів СХУ, які дозволяють проводити достовірну оцінку їх основних параметрів функціонування.

Однак наявні моделі елементів СХУ найчастіше не враховують коливання теплового навантаження та взаємний вплив елементів один на одного. Крім цього існує технічна складність ідентифікації деяких важливих параметрів технічного стану СХУ таких, як момент опору на валу компресора. Все це, а також недостатня вивченість процесів, що протікають в СХУ при змінному характері роботи, відсутність вітчизняних виробників систем діагностування та контролю технічного стану СХУ, недостатня опрацьованість схемотехнічних рішень перешкоджає впровадженню підходу FDD в СХУ.

Таким чином, вирішення науково-технічної задачі підвищення ефективності експлуатації СХУ, що досягається вдосконаленням засобів діагностики і контролю технічного стану на основі імітаційного моделювання окремих вузлів СХУ, є **актуальним**.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася відповідно до положень Транспортної стратегії України на період до 2030 року (розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.05.2018 року, № 430-р), Стратегії сталого розвитку "Україна-2020" (Указ Президента України від 12.01.2015 року, № 5), а також в рамках планів наукових досліджень:

а) за держбюджетною темою Національного університету "Одеська морська академія" ДР № 0114U000346 "Розвиток сучасної теорії і практики

технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології", у якій здобувачем виконано окремий розділ;

б) наукового семінару "Оптимальне управління й експлуатація електроприводів спеціальних установок" Вченої Ради Національної академії наук України з проблеми "Наукові основи електроенергетики" (Військова академія, м. Одеса), де здобувач є виконавцем окремих етапів досліджень.

Мета й задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження є підвищення надійності, терміну експлуатації та енергетичної ефективності СХУ шляхом використання імітаційних моделей діагностованих вузлів СХУ.

Робоча гіпотеза дослідження полягає у існуванні таких імітаційних моделей діагностованих вузлів СХУ, що дозволять проводити достовірну оцінку їх основних параметрів функціонування в змінних режимах роботи.

Головне завдання дослідження полягає у розробці такої системи діагностування і контролю технічного стану основних вузлів СХУ, яка за умови дії зовнішніх збурень та невизначеності вхідних даних забезпечить її ефективну експлуатацію.

Рішення головного завдання досягається шляхом розв'язання наступних складових задач:

- аналізу існуючих рішень по діагностиці та контролю технічного стану СХУ;
- аналізу теплових, електричних і механічних параметрів функціонування СХУ в змінних режимах роботи;
- розробки імітаційних моделей основних вузлів СХУ: компресора, випарника, конденсатора, ХК з урахуванням їх взаємозв'язків;
- розробки алгоритмів та побудови системи стабілізації, контролю та діагностування основних параметрів функціонування СХУ на основі підходу FDD з урахуванням змінного характеру теплового навантаження.

Об'єктом дослідження є процеси управління, експлуатації, діагностування та контролю технічного стану СХУ.

Предметом дослідження є засоби, спрямовані на підвищення ефективності управління, експлуатації, діагностування та контролю технічного стану СХУ.

Методи дослідження. У дисертаційному дослідженні для пошуку рішень поставлених задач були застосовані методи: а) системного аналізу і методології наукових досліджень при виборі й обґрунтуванні теми дисертаційної роботи, під час розробки структури і технології наукового дослідження; б) теоретичної термодинаміки, тепломасообміну та теорії холодильної техніки під час синтезу імітаційних моделей окремих вузлів СХУ; в) теорії автоматичного керування та чисельного моделювання при побудові системи стабілізації, контролю та діагностування основних параметрів функціонування СХУ; г) чисельного експерименту при оцінці техніко-економічних показників розробленої системи.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Вперше запропонований алгоритм діагностування обмерзання випарника СХУ, який відрізняється обчисленням інтегрального критерію оцінки коефіцієнта теплопровідності, що дозволяє своєчасно встановлювати факт

обмерзання випарника, автоматизувати запуск процесу відтавання випарника та скоротити час простою СХУ.

2. Отримав подальший розвиток алгоритм оцінки енергетичної ефективності СХУ, який відрізняється застосуванням в складі системи діагностики і контролю технічного стану СХУ адаптивного спостерігача стану компресора, що дозволяє оцінювати енергетичну ефективність та клас енергоспоживання СХУ з використанням мінімально необхідної кількості датчиків.

3. Удосконалена імітаційна модель температурних режимів СХУ, яка відрізняється врахуванням зміни внутрішніх та зовнішніх параметрів функціонування, що дозволяє проводити достовірну оцінку динамічних властивостей СХУ.

4. Удосконалена система стабілізації тиску конденсації СХУ, яка відрізняється застосуванням додаткових зворотних зв'язків за каналами витрати і температури охолоджувальної води та наявністю логічного перемикаючого пристрою в колі регулятора тиску, що надає системі властивостей часткової інваріантності по відношенню до збурюючих дій, покращує її динамічні показники та енергетичну ефективність СХУ в цілому.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення отриманих у роботі результатів полягає в тому, що отримані у дисертації основні результати можуть використатися при концептуальному визначенні архітектури системи діагностики та контролю технічного стану і техніко-економічних показників СХУ при їх експлуатації, а також можуть бути застосовані під час навчання студентів (курсантів) закладів вищої освіти, при підвищенні кваліфікації фахівців морського транспорту, суднових механіків і електромеханіків.

Результати дисертаційної роботи впроваджені: у роботі судноплавної компанії Bourbon Offshore, судно Bourbon Libeccio (акт впровадження від 22.01.2020 р.); у роботі судноплавної компанії Carisbrooke Shipping, судно Johanna C (акт впровадження від 25.06.2020 р.); у роботі судноплавної компанії Zeaborn Ship Management, судно Robert Rickmers (акт впровадження від 14.12.2020 р.); у навчальний процес Військової академії (м. Одеса) під час викладання дисципліни "Основи електротехніки, стандартизації та метрології", "Моделювання та оптимізація процесів в електромеханічних системах озброєння та військової техніки", виконання курсових робіт з дисципліни "Теорія електроприводу" та кваліфікаційних робіт магістрів (акт впровадження від 19.06.2020 р.).

Також, матеріали дисертаційного дослідження використані у наукових дослідженнях наукового семінару "Оптимальне управління й експлуатація електроприводів спеціальних установок" Вченої Ради Національної академії наук України з проблеми "Наукові основи електроенергетики" (Військова академія, м. Одеса) (довідка про використання від 30.06.2020 р.).

Особистий внесок здобувача. У дисертаційну роботу включені теоретичні положення й результати, отримані здобувачем особисто. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать:

побудова імітаційної моделі та моделювання підсистеми визначення моменту опору на валу поршневого компресора СХУ [2, 7]; розробка та дослідження моделі спостерігача стану СХУ, яка дозволяє оцінити значення моменту опору на валу поршневого компресора [1, 5, 8]; удосконалення системи стабілізації тиску конденсації СХУ шляхом застосування додаткових зворотних зв'язків за каналами витрати і температури охолоджувальної води та логічного перемикаючого пристрою в колі регулятора тиску та імітаційне моделювання отриманої системи [3, 9-11]; удосконалення методики визначення температури кипіння та охолоджувального об'єкту з урахуванням внутрішніх та зовнішніх параметрів функціонування СХУ [4]; розробка алгоритму оцінки енергетичної ефективності СХУ [6].

Апробація результатів дисертації. Основні результати і положення роботи доповідались, обговорювались і були схвалені на наступних науково-практичних, науково-технічних і науково-методичних конференціях і наукових заходах: науково-технічній конференції «Морський і річковий флот: експлуатація й ремонт» (17-18 березня 2016 р., Одеса, НУ «ОМА»); annual scientific conference “Technology Transfer: fundamental principles and innovative technical solutions” (23 November 2018, Tallinn, Estonia); науковому семінарі "Оптимальне управління та експлуатація електроприводів спеціальних установок" Наукової Ради Національної академії наук України з проблеми "Наукові основи електроенергетики" (Одеса, Військова академія, 2015 - 2020 роки).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 11 наукових праць. Зокрема, 6 основних публікацій у наукових профільних виданнях (з них 4 публікації, що входять до переліку рекомендованих МОН України і 2 публікації, що входять до наукометричної бази даних Web of Science Core Collection), а також 2 доповіді у збірниках матеріалів науково-технічних і наукових конференцій та 3 патенти на корисну модель України.

Структура й обсяг дисертації.

Дисертація складається з переліку умовних скорочень, анотацій, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг роботи становить 153 сторінки, де крім основного тексту містяться 5 таблиць і 56 рисунків. Список використаних джерел має 101 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** визначено існуючу проблему й обґрунтовано актуальність теми дослідження, охарактеризовано її зв'язок з науковими програмами й темами. Сформульовані мета, задачі й використані методи досліджень, виділені предмет і об'єкт досліджень. Викладено новизну й практичну значущість отриманих наукових результатів. Наведені дані про публікації й апробації роботи, про особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** проведений аналіз існуючих рішень по діагностиці та контролю технічного стану СХУ. Проаналізовані основні проблеми та тенденції розвитку суднової холодильної техніки, що дозволило виділити основні завдання

діагностування і контролю технічного стану основних вузлів СХУ, зокрема: зниження питомого споживання енергії на виробництво одиниці холоду; удосконалення алгоритмів діагностування та упередження основних несправностей СХУ, особливо пов'язаних з викидами озоноруйнівних холодинних агентів (ХА) в атмосферу; контроль технічного стану та класу енергоспоживання СХУ; удосконалення алгоритмів регулювання та автоматизація роботи конденсаторів СХУ; підвищення надійності та терміну служби основних елементів СХУ.

На підставі аналізу особливостей роботи та технічного стану холодильних компресорів обґрунтований вибір у якості об'єкту досліджень процеси управління, експлуатації, діагностування та контролю технічного стану парокомпресійних СХУ малої холодопродуктивності з герметичними та безсальниковими компресорами.

Порівняльний аналіз літературних джерел показав, що в рамках обраних напрямків досліджень найбільш перспективними є FDD підхід з використанням математичних моделей окремих вузлів СХУ.

У **другому розділі** обґрунтовано вибір теми, технології та методів наукового дослідження. На основі експертного оцінювання проблемних питань пов'язаних з експлуатацією СХУ по факторах: актуальності, наукової новизни, економічної ефективності, відповідності наукової спеціальності, можливості реалізації, обрана тема і сформульовані основні напрямки дисертаційного дослідження.

Виходячи з основних положень системного підходу сформульована мета дисертаційного дослідження, для досягнення якої висунута робоча гіпотеза, яка полягає у існуванні таких імітаційних моделей діагностованих вузлів СХУ, що дозволять проводити достовірну оцінку їх основних параметрів функціонування в змінних режимах роботи. Показано, що найбільш ефективним підходом до діагностування та контролю технічного стану СХУ є метод FDD на основі

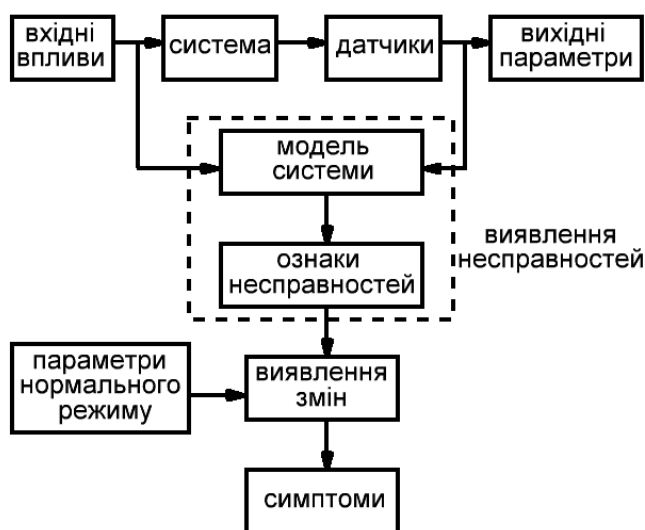


Рис. 1 – Метод FDD на основі моделей системи

моделей системи (рис. 1). Додатково перевагою застосування методу FDD в складі системи керування є можливість регулювання параметрів СХУ у відповідності до алгоритмів усунення несправностей.

На підставі висунутої робочої гіпотези сформульована головна задача дисертаційного дослідження. За допомогою системного аналізу та методології наукових досліджень складена технологічна карта досліджень, яка передбачає декомпозицію

головної задачі на чотири незалежні допоміжні задачі. Визначені наукові результати для кожної із задач, на підставі яких знайдений розв'язок головної задачі дослідження, показана наукова значущість та практична цінність результатів досліджень, сформульовані наукові положення.

У відповідності до технологічної карти розроблена методика проведення досліджень, яка встановлює послідовність виконання основних етапів дисертаційної роботи з використанням відповідних методів.

На першому етапі проводиться аналіз основних напрямків вирішення проблеми недостатньої енергетичної ефективності та надійності СХУ. Така проблема обумовлена суттєвою зміною теплового навантаження в період плавання і недосконалістю існуючих систем керування, діагностики та контролю технічного стану СХУ.

Другий етап має бути направлений на декомпозицію головної задачі на ряд незалежних допоміжних задач. Результатами розв'язання поставлених задач є аналітичні вирази, алгоритми та імітаційні моделі, за допомогою яких можливо контролювати в реальному часі основні параметри функціонування СХУ в залежності від умов зовнішнього середовища та теплового навантаження.

Третім етапом виконання дисертаційного дослідження є створення імітаційних моделей окремих вузлів СХУ: компресора, випарника, конденсатора. Розроблені моделі повинні адекватно відображати процеси, які протікають в СХУ, та враховувати взаємні зв'язки елементів СХУ та дію основних зовнішніх впливів. Результати дослідження імітаційних моделей створюють основу для побудови системи діагностики і контролю технічного стану СХУ.

Заключним етапом дисертаційного дослідження стає розробка системи керування, діагностики та контролю технічного стану СХУ, яка буде включати наступні складові: підсистему контролю та стабілізації тиску конденсації, алгоритм та підсистему оцінки холодильного коефіцієнта, підсистему оцінки навантаження на валу компресора з використанням спостерігачів стану, алгоритм та підсистему діагностики обмерзання випарника, алгоритм та підсистему пошуку та діагностування несправностей з наданням відповідних рекомендацій.

У **третьому** розділі проведений аналіз параметрів функціонування СХУ в змінних режимах роботи.

Проведений термодинамічний аналіз циклу роботи СХУ дозволив визначити температурні режими СХУ зі співвідношень:

$$t_0 = t_{об} - \frac{Q_0}{k_г \cdot F_г}; \quad t_к = t_n + \frac{Q_0 + N_c}{k_к \cdot F_к}; \quad t_{об} = t_0 + \Delta h \cdot \frac{m_{ха}}{k_г \cdot F_г}, \quad (1)$$

де: t_0 , $t_к$, $t_{об}$, t_n – температури, відповідно, кипіння та конденсації ХА, охолоджувального об'єкту та навколишнього середовища, °С; Q_0 – кількість тепла, яке відводиться від охолоджуваного об'єкта в ХК, Вт; $N_c = w_c \cdot m_{ха}$ – потужність стиснення компресора, Вт; w_c – питома робота стиснення, Дж/кг; $m_{ха}$ – масова витрата ХА, кг/с; $k_г \cdot F_г$, $k_к \cdot F_к$ – відповідно, коефіцієнти теплопровідності випарника і конденсатора, Вт/°С.

З аналізу залежностей (1) встановлено, що одним з основних параметрів

функціонування СХУ є температура охолоджуваного об'єкта та пов'язана з нею температура кипіння ХА. На вказані температури суттєво впливає низка параметрів, зокрема, температура навколишнього середовища та пов'язана з нею температура конденсації ХА, коефіцієнт теплопровідності випарника тощо. Отримані статичні залежності, а також аперіодичний характер зміни температури кипіння та охолоджувального об'єкту створюють основу для побудови моделі температурних режимів в СХУ з метою виявлення можливих симптомів порушення нормальної роботи.

Проведений енергетичний аналіз дійсного холодильного циклу СХУ

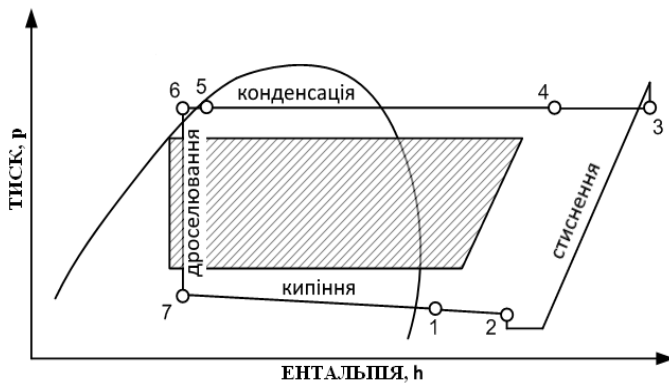


Рис. 2 – Дійсний холодильний цикл СХУ

(рис. 2), за допомогою якого визначені показники досконалості холодильного циклу: загальний коефіцієнт холодопродуктивності $TCOP$ та загальний коефіцієнт енергетичної ефективності $TEPF$. Вказані коефіцієнти запропоновано використовувати у якості показників енергетичної ефективності СХУ при визначенні її поточного технічного стану:

$$TCOP = \frac{P_0}{\sum P_e}; \quad TEPF = \frac{Q_0}{\sum W_e}; \quad (2)$$

де: P_0 – кількість виробленого холоду в одиницю часу, Вт; $\sum P_e$ – загальна споживана електрична потужність всіма елементами СХУ, Вт; Q_0 – кількість виробленого холоду, Дж; $\sum W_e$ – загальна споживана електрична енергія всіма елементами СХУ, Дж.

Очевидно, що чисельники виразів (2) залежать від масової витрати ХА m_{xa} , яка в свою чергу визначається потужністю стиснення компресора N_c . Таким чином, визначення показників енергетичної ефективності СХУ передбачає проведення аналізу динаміки роботи компресора.

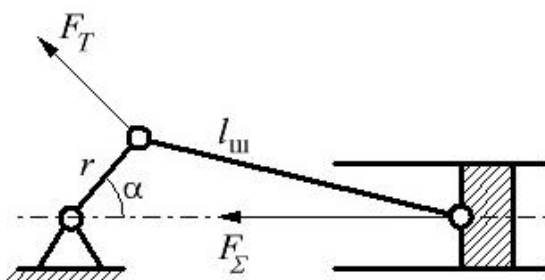


Рис. 3 – Кінематична схема КШМ компресора

Проаналізована динаміка кривошипного механізму (КШМ) компресора, показана на рис. 3. При аналізі були прийняті наступні припущення: тиск парів ХА з боку КШМ компресора приймався незмінним і залежним тільки від конструкції компресора та витоків ХА з циліндру, зневажаючи втратами у нагнітальній та всмоктувальній лініях,

процес стиснення в компресорі адіабатний. Виходячи із зроблених припущень отримана залежність моменту опору M_c компресора від кута повороту α вала приводного двигуна:

$$M_c(\alpha) = F_\Sigma(\alpha) \cdot \left(\sin \alpha + \frac{\lambda_r}{2} \sin 2\alpha \right) \cdot r + M_{mp.ob}, \quad (3)$$

де: F_Σ – сумарна сила, що діє на поршень; r – радіус кривошипа; $\lambda_r = r/l_{ш}$ – відношення радіуса кривошипа до довжини шатуна; $M_{mp.ob}$ – момент опору тертя обертових мас КШМ в парах ХА.

Потужність стиснення N_c визначається рівнянням потужності обертового руху валу компресора:

$$N_c = N_{km} \cdot \eta_{km} = M_c(\alpha) \cdot \Omega \cdot \eta_{km}, \quad (4)$$

де η_{km} – ККД компресора СХУ; Ω – кутова частота обертання ротора двигуна компресора.

Отримані рівняння (3), (4) з урахуванням зроблених припущень можуть слугувати основою для моделювання динаміки поршневого компресора СХУ з метою визначення параметрів функціонування таких, як потужність стиснення, момент опору на валу приводного двигуна, питома маса ХА тощо і виявлення можливих симптомів несправностей в роботі компресора.

У **четвертому** розділі вирішена задача розробки імітаційних моделей основних вузлів СХУ: компресора, випарника, конденсатора, ХК з урахуванням їх взаємозв'язків.

На підставі проведеного в попередньому розділі термодинамічного аналізу циклу роботи СХУ отримані диференційні рівняння, що описують динаміку температури кипіння ХА у випарнику

$$T_{вр} \frac{dt_0(\tau)}{d\tau_p} + t_0(\tau) = t_{0вст}, \quad T_{внр} \frac{dt_0(\tau)}{d\tau_{нр}} + t_0(\tau) = t_{об} \quad (5)$$

та температури охолоджувального об'єкту

$$T_{обр} \frac{dt_{об}(\tau)}{d\tau_p} + t_{об}(\tau) = t_{обвст}, \quad T_{обнр} \frac{dt_{об}(\tau)}{d\tau_{нр}} + t_{об}(\tau) = t_n \quad (6)$$

під час роботи τ_p та зупинки $\tau_{нр}$ компресора. У виразах (5) та (6) постійні часу $T_{вр}$, $T_{внр}$, $T_{обр}$, $T_{обнр}$ залежать від теплоємності та теплопрохідності випарника та охолоджувального об'єкту і суттєво (у 2 – 3 рази) відрізняються за значенням при роботі та зупинки компресора.

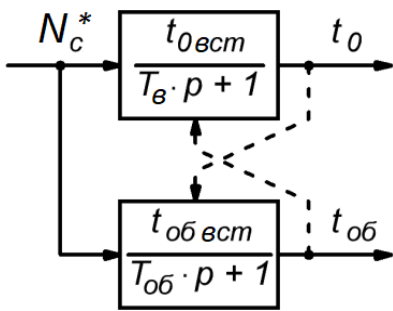


Рис. 4 – Структурна модель випарника та ХК СХУ

Аналіз рівнянь (5) та (6) дозволяє стверджувати, що в СХУ одночасно йдуть два взаємозалежні процеси зміни температури кипіння й охолоджуваного об'єкта, які досить точно можна описати аперіодичними законами. На рис. 4 передатні функції випарника й охолоджуваного об'єкта мають змінні коефіцієнти передачі й постійні часу. Постійна часу $T_{вр}$ може приймати значення $T_{вр}$ або $T_{внр}$, а постійна часу $T_{об}$ – $T_{обр}$ або $T_{обнр}$ залежно від відносної потужності стиснення компресора N_c^* , яка може приймати значення $N_c^* > 0$ (компресор включений) і $N_c^* = 0$ (компресор виключений). Значення N_c^* пропонується визначати

як відношення поточного значення потужності стиснення N_c до номінального $N_{сн}$. Слід зауважити, що номінальна потужність стискування компресора суттєво залежить від температурних режимів роботи СХУ, тобто від значень температур t_0 та t_k і тисків всмоктування p_v та нагнітання p_n , і повинна визначатися перед запуском СХУ по даним побудованого холодильного циклу (рис. 2).

На основі отриманої структури (рис. 4) в середовищі Matlab/Simulink була розроблена імітаційна модель та проведена її дослідження та верифікація на прикладі СХУ холодопродуктивністю 14 кВт рефрижераторного судна, призначеного для перевезення цитрусових з паспортними даними: теплоємність випарника 220 кДж/°С; теплоємність завантаженої холодильної камери 250 кДж/°С; коефіцієнти теплопровідності випарника: на робочій ділянці циклу 580 Вт/°С, на неробочій ділянці циклу 290 Вт/°С; коефіцієнт теплопровідності огорожень ХК 250 Вт/°С; температура зберігання мандарин $t_{об} = 4...7$ °С; початкова температура випарника й охолоджуваного об'єкта прийнята рівній температурі навколишнього середовища.

На рис. 5 а, б наведені отримані часові залежності температури кипіння й охолоджуваного об'єкта при температурі навколишнього середовища 20 °С при двохпозиційному та плавному регулюванні продуктивності компресора. Аналіз рис. 5, а показує, що при температурі навколишнього середовища 20 °С коефіцієнт робочого часу компресора становить 0,23, що добре узгоджується з відомими експериментальними та розрахунковими даними. Аналіз рис. 5, б показує, що при заданих налаштуваннях регулятора температури процеси зміни температури кипіння ХА та охолоджуваного об'єкту відбуваються аперіодично без перерегулювань. Встановлені значення температур $t_{об}$ та t_0 відповідають середнім значенням при двохпозиційному регулюванні, відносна потужність стискування компресора становить 0,24, що добре узгоджується з отриманими раніше даними та свідчить про адекватність отриманої моделі реальним температурним процесам.

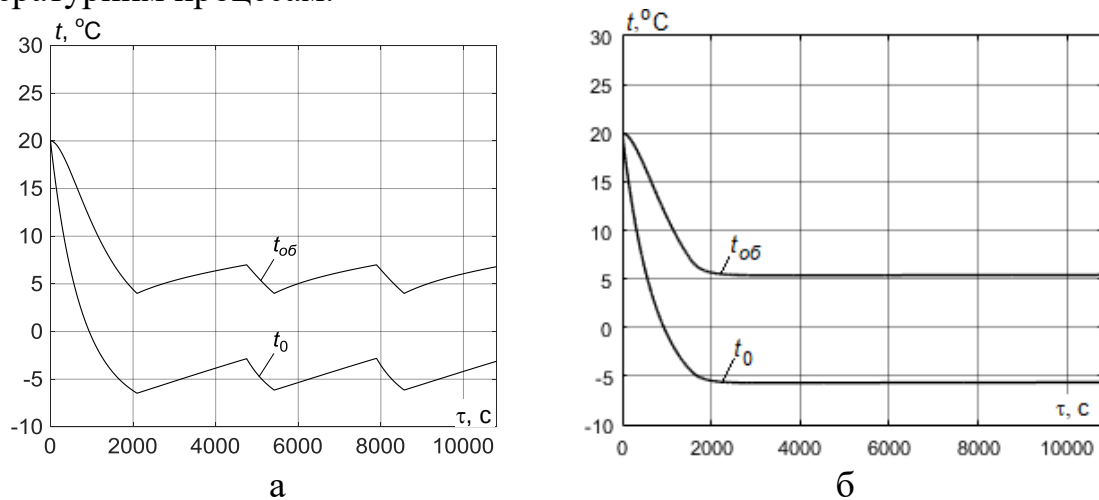


Рис. 5 – Перехідні процеси в СХУ

На підставі проведеного в третьому розділі аналізу динаміки КШМ компресора в середовищі Matlab/Simulink розроблена імітаційна модель з

використанням рівнянь (3), (4). Верифікація отриманої моделі проводилася на прикладі компресора ХКВ-6 у двох режимах роботи: номінальному при роботі компресора на фреоні R600a у складі холодильної установки з використанням паспортних даних компресора й при роботі компресора на повітрі із проведенням експерименту. У результаті дослідження моделі були отримані залежності моменту опору компресора від кута повороту вала приводного електродвигуна, показані на рис. 6.

Середнє за один оборот вала значення моменту опору M_{cp} , отримане шляхом інтегрування, наведеної на рис. 6, а, кривій становить 0,31 Н·м, що відповідає паспортному значенню 0,3 Н·м. Інтегрування кривої моменту опору, наведеної на рис. 6, б, дало середнє значення $M_{cp} = 0,18$ Н·м, що відповідає експериментально отриманому значенню 0,17 Н·м при номінальній подачі компресора 0,0028 м³/с. Як бачимо, розбіжність експериментальних даних і результатів моделювання не перевищує 6 %, що цілком припустиме.

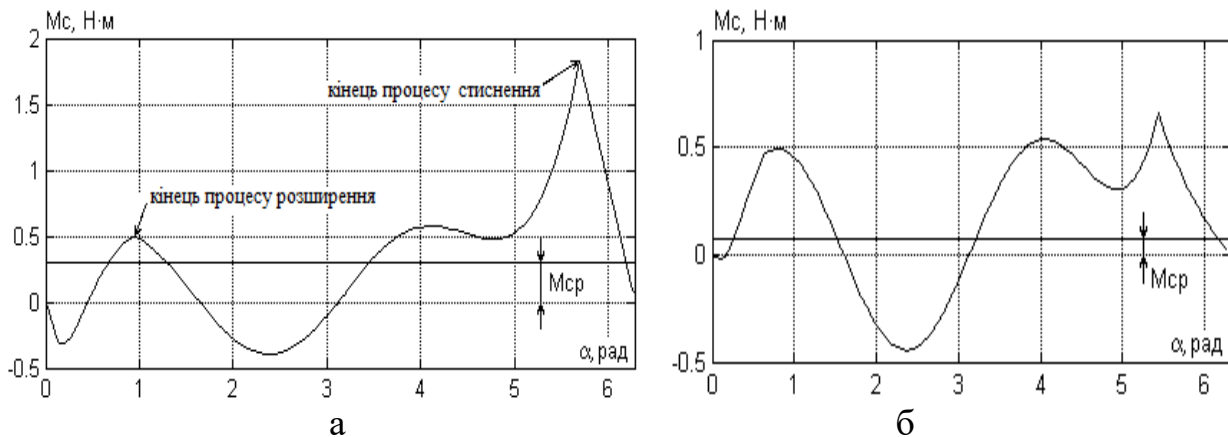


Рис. 6 – Момент опору компресора ХКВ-6

Отриманій моделі притаманний один суттєвий недолік – необхідність визначення частоти обертання приводного електродвигуна Ω , що технічно досить складно, особливо в герметичних та безсальникових компресорах.

Виходячи з цього запропоновано для визначення моменту опору скористатися можливостями адаптивних спостерігачів стану (СС).

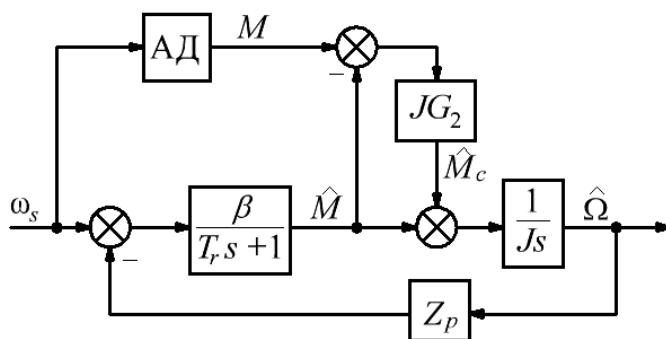


Рис. 7 – Спостерігач стану АД компресора СХУ

частота струму статора АД; T_r – електромагнітна стала часу ротора АД; β –

При використанні СС в систему діагностики та контролю технічного стану вводять математичну модель приводного асинхронного двигуна (АД) компресора, яка виконує оцінку поточного значення частоти обертання ротора та моменту опору на валу. Запропонована структура СС повного порядку наведена на рис. 7, де прийняті наступні позначення: ω_s –

жорсткість механічної характеристики; J – сумарний момент інерції ротора АД та КШМ компресора; z_p – число пар полюсів АД компресора. Розрахунок коефіцієнту матриці СС G_2 був проведений модальним методом з розподілом коренів характеристичного полінома за стандартною лінійною формою Бесселя зі значенням середньгеометричного кореня $\Omega' = 1/(1,73 \cdot T_r)$.

Отримана топологія СС дозволяє побудувати його імітаційну модель на основі повної математичної моделі АД компресора:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{I}_s \\ \hat{\Psi}_r \end{bmatrix} = [A] \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_s \\ \hat{\Psi}_r \end{bmatrix} + [B] \cdot [U_s] \quad (7)$$

$$\hat{M}_o = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot k_r \cdot (\hat{I}_s \times \hat{\Psi}_r) \quad \frac{d}{dt} \hat{\Omega} = \frac{1}{J} \hat{M}_o + G_2 (M_o - \hat{M}_o),$$

де k_r – коефіцієнт електромагнітного зв'язку ротора; I_s – вектор струмів статора; Ψ_r – вектор потокозчеплень ротора; U_s – вектор напруг статора; A – власна матриця АД; B – матриця керування. Елементи матриць A і B визначаються виключно параметрами схеми заміщення АД.

В результаті дослідження імітаційної моделі АД компресора ХКВ-6 СХУ та СС при сигналі завдання напруги статора $U_s = 220$ В, і номінальному компресорному навантаженні, середнє значення якого становило 0,3 Н·м, були отримані графіки зміни частоти обертання Ω (рис. 8, а) і моменту опору M_c (рис. 8, б) на валу досліджуваного компресора (показані суцільними лініями), а також їх оцінки (показані точками) на виході СС. З рис. 8 можна побачити, що оцінені координати стану АД компресора досить близькі до їх реальних значень, а похибка СС не перевищує 1,6 % по частоті обертання і 5,3 % по моменту опору, що свідчить про працездатність запропонованої методики з урахуванням прийнятих припущень.

Таким чином, застосування в складі системи діагностики та контролю технічного стану СХУ адаптивного СС повного порядку дозволяє проводити достовірну оцінку експлуатаційних характеристик компресора, які практично не піддаються прямим вимірюванням. Зокрема, система спроможна визначати в реальному часі механічне навантаження та частоту обертання вала для оцінки можливих несправностей механічної частини компресора.

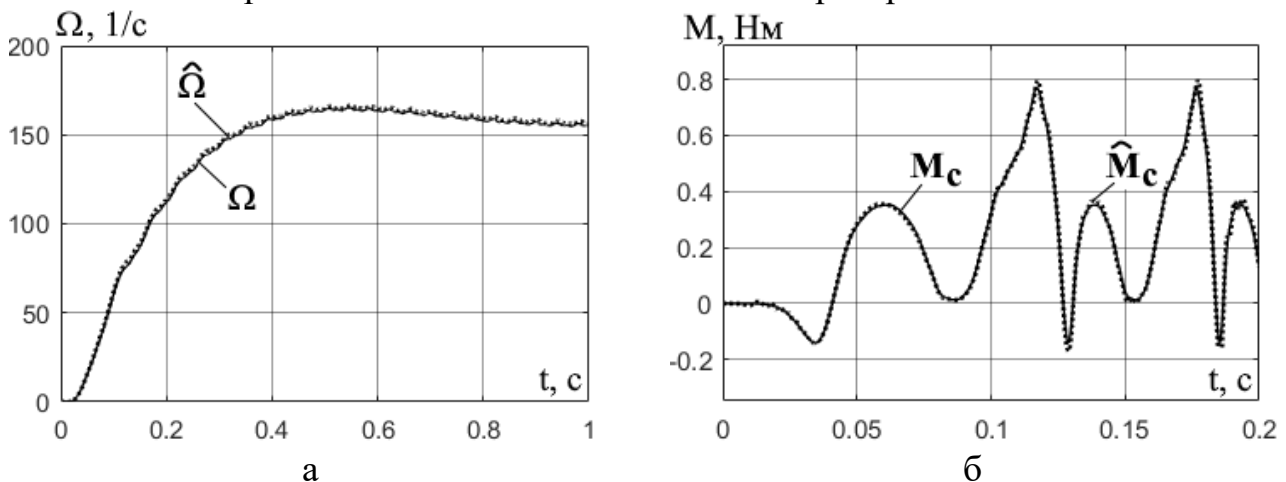


Рис. 8 – Графіки зміни частоти обертання та моменту опору компресора

На підставі проведеного аналізу типових схемних рішень по стабілізації

тиску (температури) конденсації СХУ встановлений один істотний недолік існуючих систем керування продуктивністю конденсаторів з водяним охолодженням, а саме, неможливість роботи конденсатора при зниженому тиску (температурі) конденсації, що в окремих випадках спричиняє підвищення енергетичної ефективності СХУ в цілому.

Для позбавлення цього недоліку запропоновані наступні два схемних рішення. Перше рішення базується на введенні додаткових зворотних зв'язків за витратою G й температурою t охолодної води. Структурна схема такої системи регулювання тиску конденсації з додатковими зворотними зв'язками наведена на рис. 9.

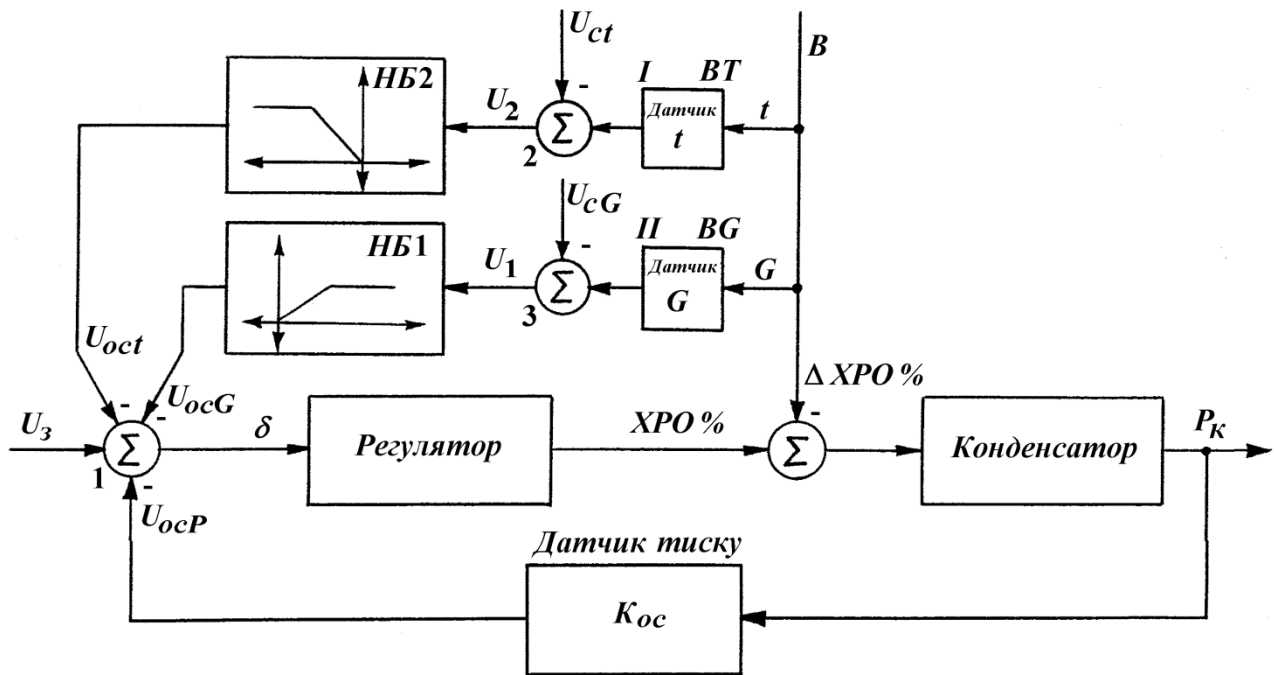


Рис. 9 – Структурна схема системи регулювання тиску конденсації с датчиками витрати BG й температури BT охолоджувальної води

Для побудови імітаційної моделі наведеної системи використовувалися дані кожухотрубного конденсатору КТР-300 СХУ риболовецького траулера, який моделювався у вигляді аперіодичної ланки із запізнюванням:

$$W_K(p) = \frac{K_K}{T_K + 1} \cdot e^{-p \cdot \tau_{K3}}, \quad (8)$$

а регулятор налаштовувався на пропорційно-інтегральний закон керування. Параметри налаштування системи взяті безпосередньо з паспорту регулятора РІС-6800 СХУ: $C_0 = 110\% \text{ XPO} / (\text{МПа} \cdot \text{хв})$, $C_1 = 430\% \text{ XPO} / \text{МПа}$, де XPO – хід регулювального органу. Динамічні параметри конденсатора були визначені розрахунковим методом й мають наступні значення: $\tau_3 = 0,98 \text{ хв}$, $T_K = 3,9 \text{ хв}$, $K_K = 0,014 \text{ МПа на } 1\% \text{ XPO}$.

В результаті дослідження імітаційної моделі системи регулювання тиску конденсації з додатковими зворотними зв'язками та без них були отримані графіки перехідних процесів при дії збурення у системі (рис. 10).

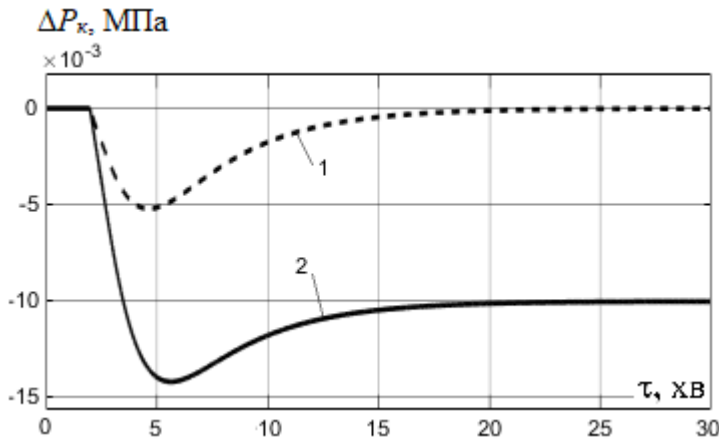


Рис. 10 – Процеси стабілізації тиску конденсації

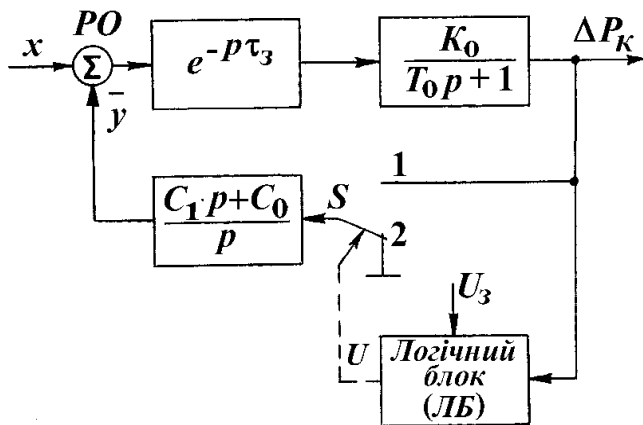


Рис. 11 – Структурна схема системи регулювання тиску конденсації з логічним блоком

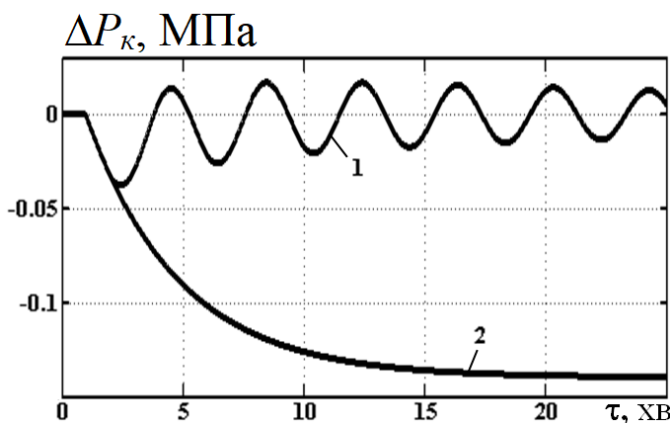


Рис. 12 – Процеси стабілізації тиску конденсації

Крива 1 показує, що при відсутності додаткових зворотних зв'язків за збуренням регулятор стабілізує тиск конденсації на заданому значенні навіть при збільшенні витрати охолоджувальної води. При переході на пропоновану схему (крива 2) регулятор зменшує тиск конденсації, знижуючи навантаження на компресор та енергетичні витрати СХУ в цілому.

Друге рішення базується на відключенні кола зворотного зв'язку за тиском конденсації p_k . При такому включенні регулятор буде реагувати лише на відхилення p_k у бік більший, чим $p_{kз}$, тобто на позитивні збурювання. Пропонована схема регулювання (рис. 11) у порівнянні з відомою відрізняється додатковим логічним блоком і перемикачем S . Закон функціонування логічного блоку: $U = 1$, при $P_k > P_{kз}$, $U = 0$, при $P_k < P_{kз}$.

В результаті дослідження імітаційної моделі системи регулювання тиску конденсації з логічним блоком та без нього тих самих параметрах конденсатора та регулятора були отримані графіки перехідних процесів при дії збурення у системі (рис. 12). Крива 1 показує, що процес регулювання затягнутий, для нього характерні висока частота й значна амплітуда коливань збільшень тиску конденсації, встановлене значення тиску конденсації відповідає заданому. При переході на пропоновану схему (крива 2) тиск

конденсації встановлюється на більш низькому рівні й тому знижується навантаження на компресор та енергетичні витрати СХУ в цілому.

У п'ятому розділі дисертаційної роботи розроблені алгоритми та побудована система стабілізації, контролю та діагностування основних параметрів функціонування СХУ на основі підходу FDD з урахуванням змінного характеру теплового навантаження.

Передумовою створення системи стабілізації, контролю та діагностування основних параметрів функціонування СХУ повинні бути визначенні параметри ХА (температури, тиски, ентальпії) у вузлових точках дійсного холодильного циклу (рис. 2). Запропонована методика визначення параметрів ХА та побудови холодильного циклу за допомогою установки всього чотирьох датчиків температури без використання датчиків тиску, як показано на схемі (рис. 13).

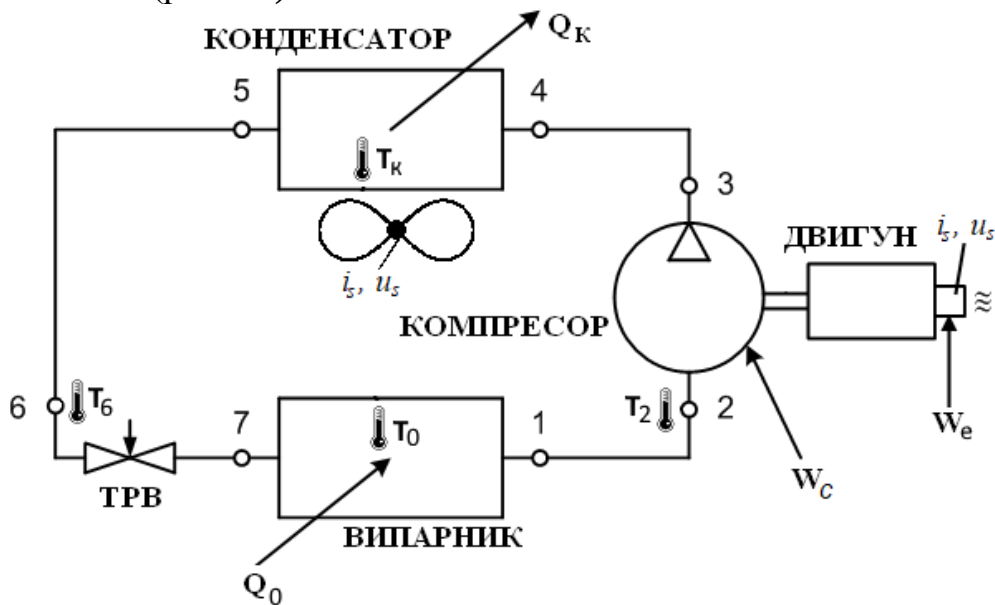


Рис. 13 – Структурна схема суднової холодильної машини

Розроблений алгоритм оцінки енергетичної ефективності СХУ, який наведений на рис. 14. З наведеного алгоритму можна побачити, що він фактично містить три підпрограми, які обчислюють в реальному часі: питому холодопродуктивність та роботу стискування компресора, масову витрату ХА через компресор та механічну потужність на валу. Питома холодопродуктивність q_0 та робота стиснення w_c компресора визначаються різницею ентальпій у відповідних вузлових точках холодильного циклу, які в свою чергу визначаються за даними датчиків температури та рівняннями стану ХА. ККД компресора $\eta_{км}$ в загальному випадку визначається геометричними розмірами та індикаторною діаграмою і вважається незмінним для даного теплового навантаження.

Момент, який розвиває приводний двигун компресора, визначається як

$$M_o = 3/2 \cdot z_p \cdot [\bar{I}_s \times \int (\bar{U}_s - R_s \cdot \bar{I}_s) dt]. \quad (9)$$

За допомогою рівнянь СС (7) визначаються оцінені миттєві значення моменту опору M_c та частоти обертання Ω вала АД і розраховується механічна потужність компресора $N_{км}$, яка в свою чергу використовується для обчислення потужності стиснення N_c за виразом (4). За відомим значеннями питомої роботи

та потужності стиснення компресора визначається масова витрата ХА:

$$m_{xa} = N_c / w_c. \quad (10)$$

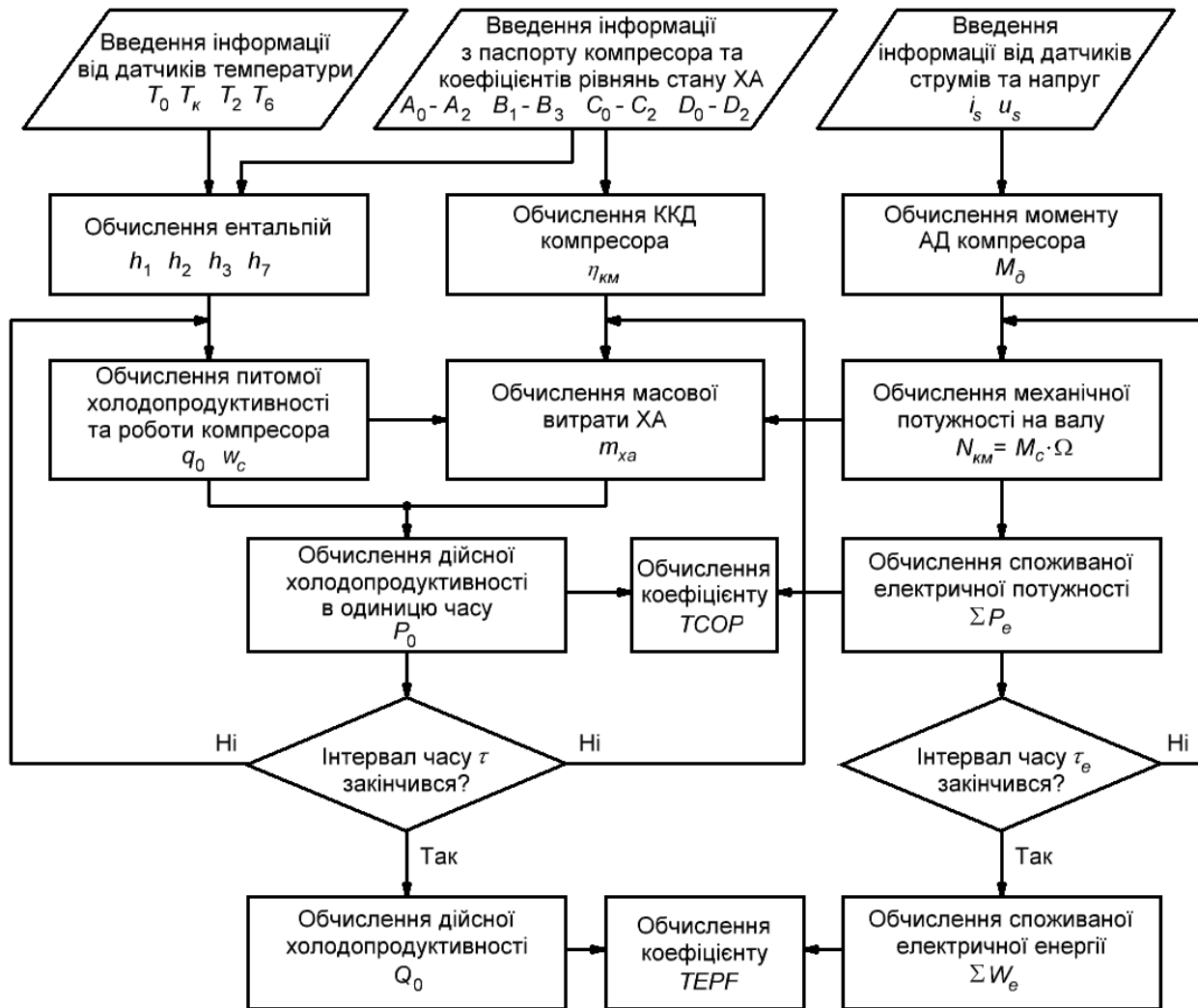


Рис. 14 – Алгоритм оцінки енергетичної ефективності СХУ

Після цього визначаються холодопродуктивності P_0 , Q_0 , споживана електрична потужність P_e та енергія W_e і обчислюються коефіцієнти ТСОР та ТЕРФ за виразами (2).

Реалізація даного алгоритму потребує встановлення лише 8 датчиків: 4 датчиків температури, 2 датчиків струму та 2 датчиків напруги. У якості датчиків температури бажано застосовувати напівпровідникові терморезистори з можливістю зовнішнього підключення до інформаційних виходів. В такому випадку можливо створити мобільну систему діагностування та контролю технічного стану СХУ, яку можуть використовувати вахтові механіки.

Розроблений алгоритм діагностування обмерзання випарника СХУ, який представлений на рис. 15. Наведений алгоритм фактично містить три однакові підпрограми (на рис. 15 показана тільки одна), які обчислюють коефіцієнт теплопрохідності випарника в залежності від параметрів стану компресора СХУ (робота, зупинка тощо) за узагальненим рівнянням:

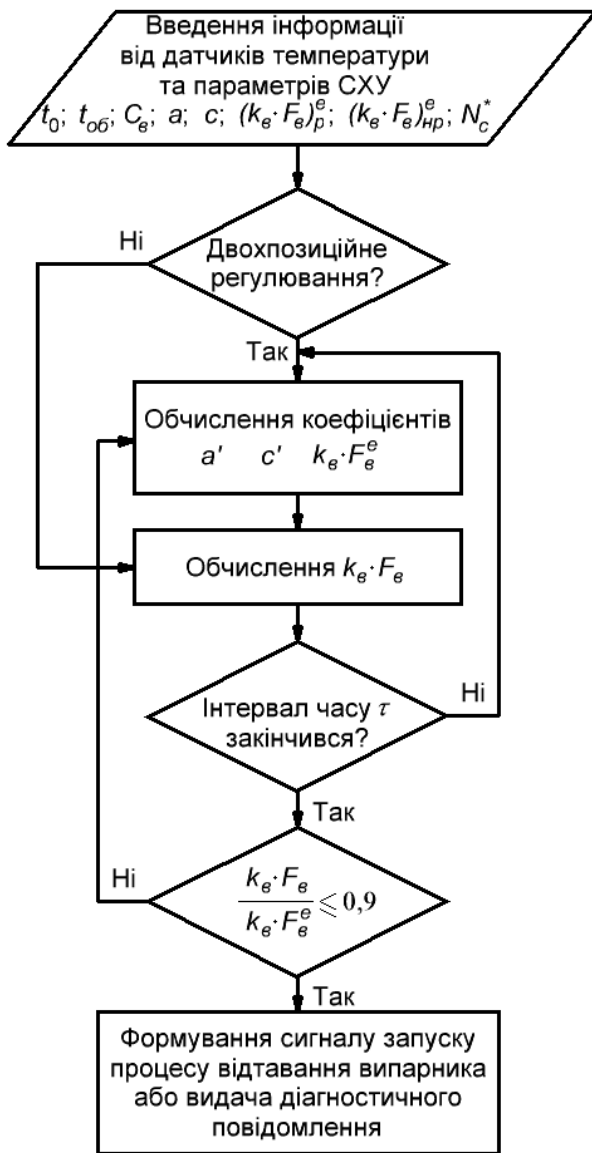


Рис. 15 – Алгоритм діагностики обмерзання випарника СХУ

$$k_e \cdot F_e = \frac{a \cdot \int t_0(\tau) d\tau + c \cdot \tau + C_e \cdot t_0(\tau)}{\int [t_{об}(\tau) - t_0(\tau)] d\tau},$$

де a і c – сталі компресора; C_e – теплоємність випарника. У разі плавного регулювання продуктивності компресора значення коефіцієнтів a , c та $k_e \cdot F_e$ визначається з урахуванням відносної потужності стиснення N_c^* за даними СС компресора.

Отримане значення коефіцієнту теплопрохідності випарника порівнюється з «еталонним» $k_e \cdot F_e$ та системою діагностування приймається рішення щодо формування сигналу запуску процесу відтавання випарника або видачі діагностичного повідомлення.

Реалізація розробленого алгоритму додатково потребує встановлення в СХУ датчику температури охолоджуваного об'єкту.

На основі діаграми відповідності симптомів та несправностей, рекомендованої компанією Wilhelmsen Ships Service, розроблена методика ідентифікації симптомів та виявлення несправностей СХУ засобами прогнозованої діагностики та FDD (рис. 1). Попередньо проведено угруповання можливих несправностей

за їх симптомами та місцем виникнення (вузлом СХУ).

Аналіз отриманих даних свідчить, що несправності, які належать одному елементу СХУ, викликають практично однаковий набір симптомів, що дозволяє достатньо точно локалізувати місце або пристрій, в якому виникла несправність, та привести можливі комбінації появи симптомів несправностей до декількох випадків. Найбільш поширеними в СХУ є наступні комбінації симптомів (табл. 1).

Зазначені в табл.1 симптоми легко виявляються за розглянутими вище методиками побудови холодильного циклу та оцінки енергетичної ефективності СХУ. Спрацювання клапанів на лініях всмоктування або нагнітання можливо відстежити шляхом використання соленоїдів або електронних клапанів, підключених до контролера. Слід також зауважити, що значну кількість поширених несправностей СХУ можливо ідентифікувати ще до появи

відповідних симптомів за допомогою використання мікропроцесорних пристроїв та засобів автоматики у відповідності до підходу FDD. Це такі несправності, як несправність TRV – шляхом використання електронного TRV; несправність вентилятора випарника, насоса охолоджувальної води – шляхом використання датчиків струму тощо.

Таблиця 1 – Діагностика несправностей в СХУ

№	Несправність	p_k	p_e	TCOP	КН	КВ
1.	Несправність насоса охолоджувальної води, підвищена температура охолоджувальної води, повітря у магістралі охолоджувальної води, несправність клапану тиску нагнітання (КН), байпасного клапану, перезавантаження системи ХА, наявність повітря в холодильній системі	↑↑	↑		*	
2.	Засмічення конденсаторних труб, газ в рідинній лінії, випарений ХА перед терморегулюючим вентилем (TRV)	↑↑	↑	↓	*	
3.	Несправність TRV	↑↑	↑↑	↓		
4.	Несправність вентилятора випарника, несправність клапану тиску всмоктування (КВ), випарник засмічений або покритий льодом, забруднений фільтр-осушувач, несправність регулятора холодопродуктивності	↓	↓↓	↓		*
5.	Кількість ХА в системі недостатня	↓↓	↓↓	↓		*
6.	Знижена температура охолоджувальної води, надмірна витрата охолоджувальної води, несправність датчика	↓↓	↑			
7.	Несправність компресора	↓↓	↑↑	↓		

Отже, загальна система діагностики та контролю технічного стану СХУ з водяним охолодженням конденсатору та повітряним охолодженням випарника, яка використовує розглянуті методики та алгоритми і здійснює прогнозовану діагностику у відповідності до підходу FDD, набуває наступного вигляду (рис. 16). На наведеній структурній схемі позначено: 1 – блок введення параметрів нормального режиму роботи, 2 – підсистема стабілізації тиску (температури) конденсації, 3 – детектор змін, 4 – підсистема оцінки коефіцієнтів енергетичної ефективності СХУ, 5 – СС компресора, 6 – блок діагностики несправності, 7 – підсистема побудови дійсного холодильного циклу, 8 – блок оцінки несправностей та рекомендацій щодо усунення, 9 – підсистема оцінки обмерзання випарника.

Зазначені підсистеми є складовими блоку оцінки ознак несправностей у відповідності до структури системи технічного діагностування, яка використовує принцип FDD (рис. 1). Для реалізації розробленої системи діагностики та контролю технічного стану СХУ необхідно використання шести датчиків температури, шести датчиків струму та напруги, одного датчику

витрати охолоджувальної води, п'яти електронних клапанів. При використанні датчиків та електронних клапанів з інформаційними виходами можливо створення мобільної системи діагностики та контролю технічного стану СХУ.

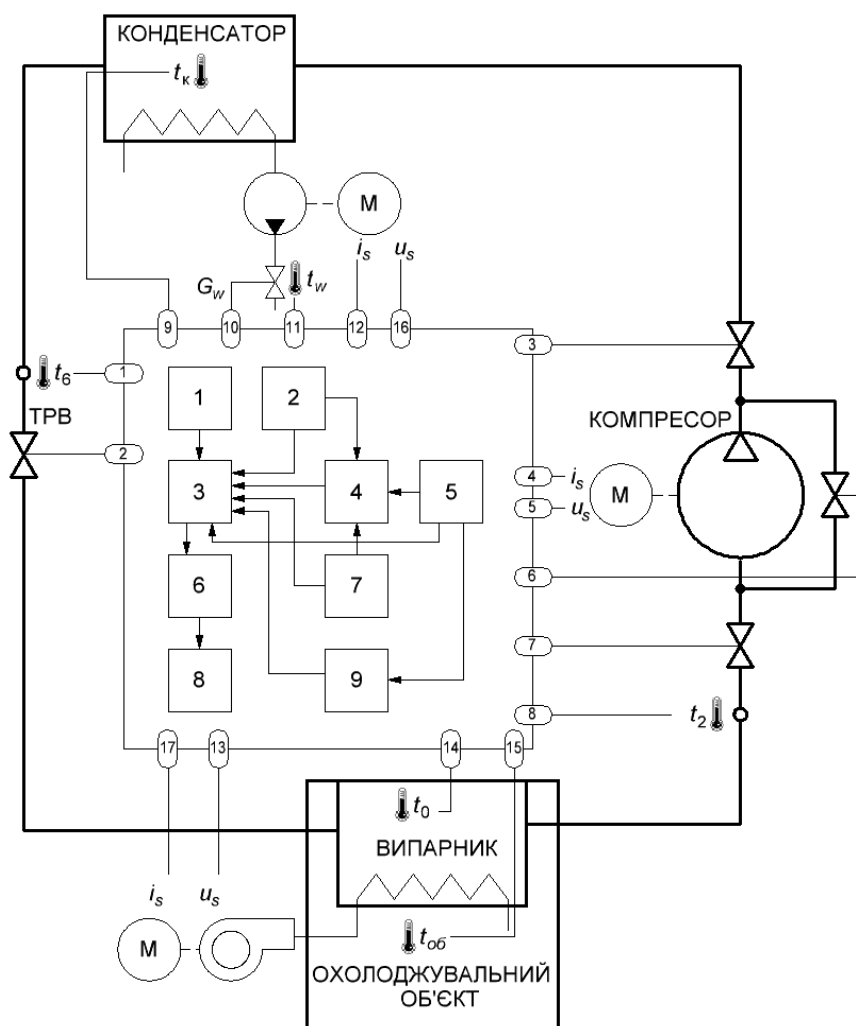


Рис. 16 – Система діагностики та контролю технічного стану СХУ

ВИСНОВКИ

Основний зміст дисертації укладений в розв'язанні актуальної науково-технічної задачі підвищення ефективності експлуатації СХУ, що досягається вдосконаленням засобів діагностики і контролю технічного стану на основі імітаційного моделювання окремих вузлів СХУ. Всі задачі дисертаційного дослідження, сформульовані у вступі, розв'язані, що дозволило сформулювати наступні висновки.

1. Аналіз основних проблем та тенденцій розвитку суднової холодильної техніки дозволив виділити основні завдання діагностики і контролю технічного стану СХУ. Обґрунтований вибір у якості об'єкту досліджень парокомпресійних СХУ малої холодопродуктивності з герметичними та безсальниковими компресорами. Проведений порівняльний аналіз літературних

джерел показав, що в рамках обраних напрямків досліджень найбільш перспективним є FDD підхід з використанням засобів імітаційного моделювання. На основі експертного оцінювання проблемних питань, пов'язаних з експлуатацією СХУ, та системного підходу обрана тема і сформульовані основні напрямки та мета дисертаційного дослідження, для досягнення якої висунута робоча гіпотеза. Показано, що найбільш ефективним підходом до діагностики і контролю технічного стану СХУ є метод FDD на основі моделей системи. На підставі висунутої робочої гіпотези сформульована головна задача дисертаційного дослідження. За допомогою системного аналізу та методології наукових досліджень складена технологічна карта досліджень, яка передбачає декомпозицію головної задачі на чотири незалежні допоміжні задачі.

2. На основі термодинамічного аналізу циклу роботи виявлені основні параметри функціонування СХУ, а саме, температура охолоджуваного об'єкта та пов'язана з нею температура кипіння ХА, які в значній мірі залежать від температури навколишнього середовища, температури конденсації ХА, коефіцієнт теплопровідності випарника тощо. Отримані основні математичні залежності між вказаними величинами, що створює основу для побудови моделі температурних режимів в СХУ з метою виявлення можливих симптомів порушення нормальної роботи. На основі енергетичного аналізу холодильного циклу СХУ визначені показники досконалості холодильного циклу, а саме, загальний коефіцієнт холодопродуктивності TCOP та загальний коефіцієнт енергетичної ефективності TERF. Встановлено, що для обчислення цих показників необхідним і достатнім є визначення параметрів ХА в характерних точках дійсного холодильного циклу СХУ та параметрів функціонування компресору. Додатково проведений аналіз динаміки роботи поршневого компресору СХУ дозволив виявити основні параметри функціонування компресору, зокрема, тиск на лініях всмоктування і нагнітання та частоту обертання приводного електродвигуна. Отримані співвідношення між вказаними параметрами являються основою для визначення потужності стискування компресора та моменту опору на валу з метою виявлення можливих симптомів несправностей.

3. На підставі аналізу циклу роботи СХУ, методів чисельного моделювання, теорії інваріантних систем та адаптивних спостерігачів стану повного порядку розроблені: модель температурних режимів у випарнику, модель електропривода компресора, моделі процесів стабілізації тиску конденсації конденсаторів з повітряним та водяним охолодженням. Вказані моделі дозволяють проводити аналіз основних властивостей окремих елементів СХУ, як об'єктів керування, в змінних режимах роботи і можуть бути основою для проектування енергоефективних систем керування холодопродуктивністю, діагностики і контролю технічного стану СХУ. Адекватність розроблених моделей доведена шляхом імітаційного моделювання та порівняння отриманих результатів з відомими експериментальними даними.

4. На підставі термодинамічного та енергетичного аналізу роботи СХУ розроблена методика розрахунку параметрів дійсного холодильного циклу з

розбіжністю результатів розрахунку в порівнянні з іншими методиками не більше 1%. На основі запропонованої методики та створених імітаційних моделей розроблені: алгоритм та підсистема оцінки енергетичної ефективності СХУ, алгоритм та підсистема оцінки коефіцієнта теплопрохідності та прогнозованої діагностики обмерзання випарника СХУ. Вказані алгоритми та підсистеми створюють основу для застосування підходу FDD при проектуванні системи діагностики і контролю технічного стану СХУ з наданням конкретних рекомендацій для обслуговуючого персоналу. На основі діаграми відповідності симптомів та несправностей, рекомендованої компанією Wilhelmsen Ships Service, розроблена методика ідентифікації симптомів та виявлення несправностей СХУ засобами прогнозованої діагностики та FDD. На основі розроблених алгоритмів та підсистем запропонована загальна система діагностики та контролю технічного стану СХУ з використанням мінімально необхідної кількості датчиків.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Букарос В. М. Адаптивна система керування електроприводом компресора / В. М. Букарос, А. Ю. Букарос, М. О. Ромчук // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. - 2014. - № 6 (4). - С. 84-90.
2. Букарос В. Н. Моделирование момента сопротивления однопоршневого компрессора судовой холодильной установки / В. Н. Букарос, А. Ю. Букарос, О. А. Онищенко // Технологический аудит и резервы производства. - 2015. - № 4/1(24). - С. 46-50.
3. Automation of the control processes of the refrigeration units condensers / [V. Bukaros, O. Onishchenko et al.] // Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies. – 2017. – Vol. 23 (1245). – P. 76–83.
4. Букарос А. Ю. Структурная модель судовой холодильной установки / [А. Ю. Букарос, О. А. Онищенко В. Н. Букарос и др.] // Морские интеллектуальные технологии. - 2018. - № 4 (42). - С. 229-235. (Web of Science)
5. Modernization of luenberger observer for control system of hermetic compressor electric drive / [V. Bukaros, O. Onishchenko et al.] // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2019. – Vol. 1. – P. 230-237 (Web of Science)
6. Algorithm for estimation of ship refrigeration unit energy efficiency using full order observers / [A. Bukaros, V. Bukaros et al.] // Applied Aspects of Information Technology. – 2020. – Vol. 3. – No. 1. – P. 418-430.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

7. Букарос В. М. Аналіз роботи механізму однопоршневого холодильного компресора суднової холодильної установки / В. М. Букарос, О. А. Онищенко // Матеріали науково-технічної конференції «Морський і річковий флот: експлуатація й ремонт», 17-18 березня 2016 р. – Одеса: НУ «ОМА», 2016. – С. 100-108.
8. Bukaros A. Development of the luenberger observer for the automated

electric drive of hermetic compressor / A. Bukaros, V. Malyshev, V. Bukaros // Technology Transfer: fundamental principles and innovative technical solutions : annual scientific conference, Tallinn, 23 November 2018 : proceeding. – Tallinn: Scientific Route, 2018. – P. 40-42.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

9. Патент України, UA 100304, МПК H02P 23/00. Тиристорний регулятор напруги для електропривода герметичного компресора / В. М. Букарос, А. Ю. Букарос, Н.О. Ромчук. № u201413129; заявл. 08.12.2014; опубл. 27.07.2015. Бюл. №14.

10. Патент України, UA 117180, МПК F25B 49/00. Пристрій регулювання тиску конденсації суднової холодильної установки / В. М. Букарос, А. Ю. Букарос, О.А. Онищенко. № u201609878; заявл. 26/09/2016; опубл. 26.06.2017. Бюл. №12.

11. Патент України, МПК F25B49/00. Система регулювання тиску конденсації суднової холодильної установки / В. М. Букарос, А. Ю. Букарос, О.А. Онищенко. № u201705994; заявл. 15.06.2017; опубл. 11.12.2017. Бюл. №23.

АНОТАЦІЯ

Букарос В.М. Удосконалення систем діагностики та контролю технічного стану суднових холодильних установок. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту. – Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир, 2021.

У дисертаційній роботі розв’язується актуальна науково-технічна задача підвищення енергетичної ефективності і надійності, вдосконалення засобів діагностики і контролю технічного стану шляхом використання імітаційних моделей окремих вузлів судових холодильних установок.

Розроблені та досліджені імітаційні моделі спостерігача стану повного порядку компресора, температурних режимів випарника та охолоджувального об’єкту, системи стабілізації тиску конденсації. Запропоновані алгоритми оцінки енергетичної ефективності суднових холодильних установок та діагностування обмерзання випарника. Розроблена методика ідентифікації симптомів та виявлення несправностей суднових холодильних установок.

Розроблені алгоритми та моделі інтегровані в загальну систему діагностики та контролю технічного стану суднової холодильної установки з використанням мінімально необхідної кількості датчиків.

Ключові слова: суднова холодильна установка, діагностика, контроль технічного стану, спостерігач стану, енергетична ефективність, імітаційна модель.

АННОТАЦИЯ

Букарос В.М. Усовершенствование систем диагностики и контроля технического состояния судовых холодильных установок. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.20 – Эксплуатация и ремонт средств транспорта. – Государственный университет «Житомирская политехника», Житомир, 2021.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-В диссертационной работе решается актуальная научно-техническая задача повышения энергетической эффективности и надежности, совершенствование средств диагностики и контроля технического состояния путем использования имитационных моделей отдельных узлов судовых холодильных установок.

Разработаны и исследованы имитационные модели наблюдателя состояния полного порядка компрессора, температурных режимов испарителя и охлаждающего объекта, системы стабилизации давления конденсации. Предложенные алгоритмы оценки энергетической эффективности судовых холодильных установок и диагностирования обледенения испарителя. Разработана методика идентификации симптомов и выявления неисправностей судовых холодильных установок.

Разработанные алгоритмы и модели интегрированы в общую систему диагностики и контроля технического состояния судовой холодильной установки с использованием минимально необходимого количества датчиков.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, герметичный компрессор, малая холодильная установка, энергетическая эффективность, имитационная модель.

ABSTRACT

Bukaros V.M. Improvement of systems of diagnostics and control of technical condition of ship refrigeration units. – Qualification scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the PhD degree in Technical Sciences (Doctor of Philosophy) in the specialty 05.22.20 “Operation and maintenance of transport facilities”. – Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, 2021.

In the dissertation the actual scientific and technical task of increasing energy efficiency and reliability, improving the means of diagnosis and monitoring of technical condition by using simulation models of individual components of ship refrigeration units was solved.

The conducted analysis of problems and trends in the development of ship refrigeration equipment allowed identifying the main tasks of diagnosing and monitoring the technical condition of the main components of ship refrigeration units. Choice as the object of research of steam compression low refrigeration capacity ship refrigeration units with hermetic and semihermetic compressors was justified. A comparative analysis of the literature has shown that in the selected areas of research

the most promising approach is "fault detection and diagnostics" using mathematical modeling of individual nodes of the ship refrigeration units.

Based on the thermodynamic analysis of ship refrigeration units operation cycle the main parameters of the operation were revealed and the simulation model of ship refrigeration units temperature modes was improved. Based on this model an algorithm and a subsystem for estimating the heat transfer coefficient and the predicted diagnostics of evaporator icing was developed. The algorithm was tested by means of simulation.

The analysis of the reciprocating compressor dynamics was carried out and allowed to reveal the main parameters of the compressor operation. Based on this analysis and the theory of adaptive full order state observers a model of the compressor state observer which is able to determine energy and mechanical parameters in real time to diagnosing and monitoring the technical condition of the compressor was developed.

The energy analysis of the ship refrigeration units refrigeration cycle was carried out and allowed to determine the perfection indicators of the refrigeration cycle. A method for calculating the parameters of the actual refrigeration cycle was developed and compared with other sources. On the basis of the specified technique the general algorithm and a subsystem of an estimation of ship refrigeration units energy efficiency with using the compressor adaptive state observer are offered for the first time.

Simulation models of condensing pressure stabilization processes of air- and water-cooled condensers were developed and studied. Based on the developed models the ship refrigeration units condensing pressure stabilization system was improved. It differs in using additional feedback on the cooling water flow and temperature channels and the presence of a logic switching device in the pressure regulator circuit which gives the system the properties of robustness in relation to disturbing actions, improves its dynamic performance and allows to increase the energy efficiency of the ship refrigeration units as a whole.

Based on the symptom and fault correlation chart recommended by Wilhelmsen Ships Service Company a method for identifying symptoms and detecting ship refrigeration units faults using predictive diagnostics and "fault detection and diagnostics" approach was proposed. The method is based on the construction of an actual refrigeration cycle with subsequent comparison with the "reference" refrigeration cycle and the detection of typical deviations. On the basis of the developed algorithms and subsystems the general system of diagnostics and control of a technical condition of ship refrigeration units with use of the minimum necessary set of sensors was offered.

Keywords: ship refrigeration unit, energy efficiency, diagnostics, technical condition monitoring, state observer, simulation.

Підп. до друку 17.03.2021. Формат 60x84/16. Папір офсет.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 1,34.
Замовлення № 78-2021 РВВ ВА. Наклад 100 прим.

Віддруковано з готового оригінал-макета
у друкарні Військової академії (м. Одеса)
65009, м. Одеса, вул. Фонтанська дорога, 10
тел.: (0482) 63-76-60, e-mail: zbirnyk.vaodesa@ukr.net
www.vaodessa.org.ua