До спеціалізованої вченої ради Д 41.108.01
Національного університету «Одеська морська академія» МОН України,
65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 8

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Букарос Валерії Миколаївни
«Удосконалення систем діагностування та контролю за технічним станом суднової холодильної установки», що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

1. Актуальність теми

Суднові холодильні установки (СХУ) є найбільш поширеними допоміжними судовими енергетичними установками і використовуються майже у всіх типах морських і річкових суден.

Запит практики сучасного морського флоту, як України, так й світу формує досить жорсткі вимоги, що висуваються до СХУ: покращення споживчих властивостей, підвищення точності стабілізації температури в холодильних та морозильних камерах, мінімізація витрат електроенергії, підвищення надійності функціонування, екологічність.

Діагностування та контроль технічного стану є засобами підтримки заданого рівня надійності, забезпечення вимог безпеки та ефективності експлуатації СХУ. У більшості випадків, діагностування технічного стану проводять при зупинці СХУ, а визначення несправностей потребує часткового розбирання/демонтажу окремих вузлів, що пов'язано зі значними витратами часу та порушення нормального протікання технологічних процесів охолодження.

Найбільший ефект діагностування несправностей СХУ досягається використанням підходу "*fault detection and diagnostics*" (*FDD*), який передбачає використання математичних моделей діагностованих вузлів СХУ. Однак, існуючі моделі елементів СХУ найчастіше не враховують змінний характер роботи та взаємний вплив елементів, а ідентифікація більшості параметрів моделей технічно ускладнена.

Вказані протиріччя, недостатня вивченість процесів охолодження при змінюваних навантаженнях, відсутність вітчизняних виробників систем діагностування та контролю технічного стану СХУ, недостатня опрацьованість схемотехнічних рішень перешкоджають впровадженню підходу *FDD* в СХУ.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»
КАНЦЕЛЯРІЯ
Вхідний № 559
Надійшло 08.04.21

Таким чином, підвищення ефективності експлуатації СХУ, що досягається вдосконаленням засобів діагностики і контролю технічного стану на основі імітаційного моделювання окремих вузлів СХУ, є важливою і актуальною науково-технічною задачею.

2. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій

Обґрунтованість запропонованих наукових положень, висновків та практичних рекомендацій забезпечується системним підходом та використанням загальнонаукових методів наукового пізнання при проведенні дослідження та постановці його завдань.

Достовірність запропонованих наукових положень підтверджується коректністю використання апарату математичного моделювання, адекватністю отриманих залежностей, моделей та алгоритмів, задовільною відповідністю експериментальних та розрахункових результатів.

Обґрунтованість та достовірність висновків і практичних рекомендацій, що запропоновані і наведені в дисертаційній роботі, підтверджуються апробацією на наукових конференціях та семінарах, зокрема, на Міжнародній науковій конференції “*Technology Transfer: fundamental principles and innovative technical solutions*” (Таллінн, Естонія) та на науковому семінарі "Оптимальне управління та експлуатація електроприводів спеціальних установок" Наукової Ради Національної академії наук України з проблеми "Наукові основи електроенергетики".

3. Наукова новизна отриманих результатів

У дисертації Букарос В. М. отримані такі результати, які мають підтверджену наукову новизну:

– вперше запропонований алгоритм діагностування обмерзання випарника СХУ, який відрізняється обчисленням інтегрального критерію оцінки коефіцієнту теплопрохідності, що дозволяє своєчасно встановлювати факт обмерзання випарника, автоматизувати запуск процесу відтавання випарника та скоротити час простою СХУ;

– 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;

– удосконалена імітаційна модель температурних режимів СХУ, яка відрізняється врахуванням зміни внутрішніх та зовнішніх параметрів функці-

онування, що дозволяє проводити достовірну оцінку динамічних властивостей СХУ;

– 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 відносно до збурюючих дій, покращує її динамічні показники та енергетичну ефективність СХУ в цілому.

4. Значимість отриманих результатів для науки

На основі проведених у дисертаційній роботі досліджень здобувачем отримано подальший розвиток методів діагностування елементів СХУ, теорії адаптивних спостерігачів стану повного порядку поршневих компресорів СХУ та удосконалення окремих імітаційних моделей складових СХУ: випарника, компресора, холодильної (морозильної) камери.

5. Практична цінність отриманих результатів

Практична цінність отриманих результатів полягає у розробці алгоритмів та підсистем: стабілізації тиску (температури) конденсації, діагностування обмерзання випарника, оцінки енергетичної ефективності СХУ. Практичне використання запропонованих рішень і результатів дозволяє скоротити час простою СХУ при відтаюванні випарника, зменшити загальний час пошуку причин несправностей та проводити діагностику несправностей СХУ дистанційно, підвищити якість та ефективність системи стабілізації тиску конденсації СХУ і тим самим зменшити витрати електроенергії. У сукупності, наукові результати проведеного дисертаційного дослідження можуть використатися при концептуальному визначенні архітектури системи діагностики та контролю технічного стану і техніко-економічних показників СХУ при їх експлуатації, можуть бути застосовані під час навчання студентів (курсантів) закладів вищої освіти, при підвищенні кваліфікації фахівців морського транспорту, суднових механіків і електромеханіків.

Результати досліджень впроваджено у навчальному процесі Військової академії (м. Одеса) та у діяльність судноплавних компаній *Bourbon Offshore*, *Carisbrooke Shipping*, *Zeaborn Ship Management*. Підтвердженням впровадження результатів дисертаційної роботи є наявність відповідних актів та довідок.

6. Оцінка змісту дисертації, відповідності поставленим задачам, завершеності роботи

У вступі викладено актуальність роботи, мету та задачі дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відомості про публікації автора за темою дисертації та апробацію результатів на наукових конференціях. Обсяг і форма вступу відповідають загальноприйнятим вимогам до кандидатської дисертації та є цілком достатніми для ознайомлення зі змістом положень, що виносяться автором на захист.

У першому розділі проаналізовані існуючі рішення по діагностиці та контролю технічного стану СХУ, що дозволило виділити основні завдання та напрямки досліджень, обґрунтувати вибір у якості об'єкту досліджень парокомпресійні СХУ малої холодопродуктивності з герметичними та безсальниковими компресорами, довести перспективність *FDD* підходу до діагностики та контролю технічного стану за допомогою математичного моделювання окремих вузлів СХУ.

Другий розділ присвячено методології та організації наукового дослідження, зокрема: обґрунтовано вибір теми і основні напрямки дисертаційного дослідження; сформована мета дослідження, для досягнення якої висунута робоча гіпотеза; визначено головне завдання дисертаційного дослідження і складена його технологічна карта, яка передбачає декомпозицію головного завдання на чотири незалежні допоміжні задачі; визначені наукові результати для кожної із задач, на підставі яких знайдений розв'язок головного завдання дослідження; показана наукова значущість та практична цінність результатів досліджень; сформульоване наукове положення.

Доведено, що ефективним підходом до діагностування та контролю технічного стану є застосування методу *FDD* на основі імітаційних моделей окремих елементів СХУ. Застосування методу *FDD* у складі системи керування додатково забезпечує регулювання параметрів функціонування СХУ у відповідності до алгоритмів усунення несправностей.

У третьому розділі проведений аналіз режимів роботи СХУ, який показав взаємозалежність температури кипіння холодильного агенту та температури охолоджувального об'єкту, а також виявив вплив на вказані параметри температури навколишнього середовища, тиску конденсації та коефіцієнту теплопрохідності випарника. На підставі проведеного аналізу отримані термодинамічні залежності, які створюють основу для побудови моделі температурних режимів в СХУ.

Проведено енергетичний аналіз холодильного циклу, на підставі якого визначені показники енергетичної ефективності СХУ: загальний коефіцієнт холодопродуктивності *TCOP* та загальний коефіцієнт енергетичної ефективності *TEPF*.

Проведений аналіз динаміки роботи поршневого компресору СХУ, дозволив виявити визначальні параметри його функціонування. Отримані рівняння динаміки кривошипно-шатунного механізму дозволили ідентифікувати середній момент навантаження компресора - з метою виявлення можливих симптомів несправностей.

У четвертому розділі розроблені імітаційні моделі температурних режимів у випарнику та охолоджувальному об’єкті при двохпозиційному та повільному регулюванні продуктивності компресора СХУ. Розроблені моделі дозволяють проводити аналіз основних властивостей СХУ, як об'єкту керування, у тому числі - в змінних режимах роботи, і є основою для проектування систем керування холодопродуктивністю, діагностики та контролю технічного стану аналогічних холодильних установок.

Розроблена імітаційна модель компресора, за допомогою якої визначаються енергетичні та механічні показники - з метою діагностування та контролю технічного стану компресора СХУ.

Розроблені імітаційні моделі стабілізації тиску (температури) конденсації холодильних конденсаторів з повітряним та водяним охолодженням. Моделі побудовані на використанні принципів часткової інваріантності до основних збурювань. Використання запропонованих рішень дозволяє підвищити енергетичну ефективність та покращити якість перехідних процесів СХУ, які функціонують у різних умовах рейсу.

Верифікація всіх розроблених моделей підтвердила їх адекватність реальним фізичним процесам охолодження.

П’ятий розділ присвячений побудові системи діагностики та контролю технічного стану СХУ. Запропонована методика визначення параметрів холодильного агенту в характерних точках дійсного холодильного циклу. Проведено порівняння результатів розрахунку за запропонованою методикою з відомими результатами, яке показало розбіжність до 1 %.

Розроблені алгоритми та підсистеми діагностування обмерзання випарника та оцінки енергетичної ефективності СХУ. Запропонована методика ідентифікації симптомів та виявлення несправностей СХУ засобами прогнозної діагностики та *FDD*.

На основі розроблених алгоритмів та підсистем запропонована загальна система діагностики та контролю технічного стану СХУ з використанням мінімально необхідної кількості датчиків.

Загальні висновки по дисертації є коректними, відображають основні наукові й практичні результати.

Структура дисертації, послідовність викладення матеріалу та його обсяг відповідають встановленим вимогам. Назва теми дисертації відповідає її змісту. Дисертація написана в зрозумілій, доступній для аналізу, формі.

Стиль викладення матеріалу логічний, основні положення достатньо аргументовані, у тому числі - посиланнями на літературні джерела. Дисертаційна робота є завершеною науковою кваліфікаційною працею.

7. Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях

Основні положення та результати дисертаційної роботи достатньо повно висвітлені у 11 наукових працях, у тому числі 6 статей у наукових фахових виданнях (з них 2 статті – у виданнях, що входять до міжнародної науково-метричної бази даних *Web of Science*), 2 доповіді на наукових конференціях та 3 патенти України на корисну модель.

Аналіз робіт дозволяє зробити висновок, що в них в повному об'ємі опубліковано матеріали дисертації. У цілому, рівень і кількість публікацій та апробації матеріалів дисертації на конференціях, повністю відповідають вимогам МОН України.

Список використаних джерел із 101 найменування охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації. У авторефераті розкрито внесок дисертанта в даний науковий напрям, розкриті новизна розробок, теоретичні і практичні значення результатів проведених досліджень. Автореферат відповідає змісту дисертаційної роботи і дає повне уявлення про дослідження.

8. Зауваження до змісту дисертаційної роботи

1. У підрозділі 1.2 наголошується на підвищенні екологічної безпеки при експлуатації СХУ з посиланням на ряд міжнародних конвенцій та протоколів, проте незрозуміло, яким чином отримані в роботі наукові результати сприяють екологічності функціонування зазначених установок.
2. Для імітаційної моделі СХУ при повільному регулюванні холодопродуктивності компресора (рис. 4.4, с. 70) незрозуміло, яким чином обрана структура та розраховані параметри налаштування частотного регулятора температури для об'єкту із змінними сталими часу та коефіцієнтами передачі.
3. На с. 34 рис. 2.1 не зрозуміло що мається на увазі - «оцінка несправностей та вирішення». Вирішення чого?
4. На с. 96 конденсатор СХУ пропонується моделювати у вигляді аперіодичної ланки із запізнюванням зі незмінною сталою часу та коефіцієнтом передачі, що є сумнівним рішенням. Адже стала часу конденсатора, як теплообмінного апарату, суттєво залежить від режиму роботи компресора (включений або виключений), а коефіцієнт передачі визначається температурою навколишнього середовища, яка постійно змінюється.

5. При поясненні роботи структурної схеми системи стабілізації тиску конденсації СХУ (рис. 4.23, с. 99), стверджується, що «Найбільш ефективна робота пропонованої системи у таких випадках, коли СХУ працює у режимах суттєвих відхилень, що значно відрізняються від розрахункових режимів», але при дослідженні моделі цієї схеми (рис. 4.24) на с. 101 розглядається внесення збурення 5 % ходу регулюючого органу, що не є суттєвим.

6. Частота обертання і середньогеометричний корінь позначені великою літерою Омега із застосуванням індексів. Можна порадити для позначення частоти обертання використовувати малу літеру омега - ω. У рівняннях 5.10, 5.11 на с. 108, для позначення миттєвих значень струмів, напруг та потокозчеплень застосовані великі літери. Рекомендується змінити їх на малі.

7. Виклад параграфу 4.3.1 є оглядовим, отже його можна було суттєво скоротити та навести у розділі 1 без шкоди для основного змісту роботи, оскільки положення, викладені у даному параграфі, добре відомі та безпосередньо не відносяться до розв'язання поставленого науково-технічного завдання.

8. Структурну схему системи №1 регулювання тиску конденсації (рис. 4.20, с. 95) можна спростити, оскільки одне із збурень (витрата охолоджувальної води) є контрольованим. Отже, шляхом встановлення найпростішого регулятора витрати (тиску) охолоджувальної води прямої дії можливо стабілізувати даний параметр та позбутися одного із додаткових зворотних зв'язків.

9. На с. 105 автор стверджує, що запропоновані ним рівняння стану холодильного агенту 5.1-5.7 «забезпечують достатню точність розрахунку ентальпій h в залежності від тиску p і температури T». Але результати розрахунку за запропонованою методикою та порівняння з джерелом [100], наведені у табл. 5.2 на с. 106, містять значення лише ентальпій та тисків. Потребує пояснень точність визначення температур холодильного агенту.

10. За текстом роботи є декілька неточностей та несуттєвих помилок. Наприклад: с. 97 «*PI controller* – датчик тиску конденсації» – скоріше за все мова йде про регулятор тиску конденсації; одна з умов рівнянь 4.44 на с.99 повинна містити рівність; на с. 48 застосоване поняття «теплоприплив», а на с. 62, 64 – «теплоприток».

Зазначені зауваження не мають принципового характеру, не ставлять під сумнів наукову новизну та достовірність одержаних у дослідженні результатів. Вони не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Букарос В. М., на її наукову та практичну цінність.

9. Висновок

Дисертаційна робота Букарос Валерії Миколаївни «Удосконалення систем діагностування та контролю за технічним станом суднової холодильної установки» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту. Дисертація є завершеною кваліфікаційною науково-дослідною роботою, в якій вирішено актуальну науково-технічну задачу підвищення ефективності експлуатації СХУ.

Виходячи із актуальності теми, доведеної достовірності та наукової новизни результатів, теоретичного та практичного їх значення, повноти викладу в опублікованих працях, апробації основних положень, вважаю, що дисертаційна робота і її автореферат цілком відповідають вимогам п. п. 9, 11, 12, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 567 (із змінами), а її автор, Букарос Валерія Миколаївна, заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту.

Офіційний опонент, доктор технічних наук,
професор, директор Київського інституту
водного транспорту імені гетьмана
Петра Конашевича-Сагайдачного
Державного університету інфраструктури
та технологій МОН України О. М. Тимощук

Підпис професора Богомʼї В.І. засвідчую
в.о. ректора ДУІТ Н.С. Брайковська