

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Чирва Олександра Олександровича на тему «Моделі нестационарних процесів в елементах системи підготовки повітря та протиобліднювальної системи літака для відпрацювання алгоритмів управління ними»,

подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Актуальність теми.

Сучасні тенденції в авіабудуванні, щодо створення більш економічних, комерційно привабливих та, водночас, задовольняючих сучасним вимогам безпеки літаків, призводять до ускладнення агрегатів систем літаків та систем керування ними.

Пневматичні системи літака виконують багато функцій, серед яких забезпечення створення необхідних комфортних умов для пасажирів та вантажу, а також забезпечення необхідної енергії для системи захисту літака від обледеніння. Кожна пневматична система має свою незалежну систему керування, розробкою яких займаються різні підприємства. Управління кожною системою відпрацьовується на спеціальних стендах. Проте сумісна робота цих систем, як правило, відпрацьовується вже під час льотних випробувань.

Під час льотних випробувань відпрацювати алгоритми керування системами з урахуванням їх сумісної взаємодії на всіх режимах польоту не є можливим, що може призвести до появи позаштатних ситуацій під час серійної експлуатації літака. Тому створення математичних моделей та програмних засобів комп'ютерної реалізації з моделювання динамічних процесів зміни тиску та температури в елементах повітряних систем літака з урахуванням впливів системи управління для відпрацювання алгоритмів управління перехідними режимами системи підготовки повітря (СПП) та протиобліднювальної системи (ПОС) літака при їх сумісному функціонуванні є актуальним науковим та практичним завданням.

Вирішення цієї задачі можна забезпечити на основі розвитку методів та засобів математичного моделювання процесів в СПП та ПОС, а також розробки засобів комп'ютерної реалізації та натурального і напівнатурного моделювання.

Відомі математичні моделі не дозволяють виконати моделювання нестационарних тепло-гідролічних процесів на перехідних режимах роботи систем, або мають значні обмеження на їх застосування, чи вимагають істотних доробок для спільного моделювання з системою управління.

Відомі математичні моделі теплових процесів в теплообмінних апаратах не враховують теплообмін з навколишнім середовищем та не дозволяють з достатньою точністю розраховувати нестационарні процеси в перехідних режимах функціонування СПП та ПОС. Крім того, поява нових кранів регуляторів, в яких використовуються новітні способи регулювання,

Юлія Вх 11

16. 01. 19

потребувала створення нової математичної моделі, що забезпечувала необхідну точність моделювання. Існуючі математичні моделі не вирішують наявні протиріччя між необхідною та досяжною точністю відтворення параметрів в системі, що є особливо актуальним для можливих аварійних режимів. Також на даний час відсутні комплексні моделі перехідних процесів в СПП та ПОС, що дозволяли б визначати необхідні параметри системи в перехідних режимах.

Актуальність проблеми, важливість та перспективність отриманих результатів підтверджується також тим, що робота виконана відповідно до “Державної комплексної програми розвитку авіаційної промисловості в Україні до 2010 року”, затвердженою Постановою Кабінету міністрів України від 12.12.2001 р. № 1665-25. Дослідження виконані в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України відповідно до НДР «Розробка методу автоматизованого формування моделей нестационарних теплових процесів підготовки повітря в системах кондиціонування» (шифр «ТЕРМА», номер держреєстрації 0115U004406), а також в АНТК ім. О. К. Антонова, в рамках експериментальних і науково-дослідницьких робіт із створення літака АН-132 № 132.98.1774.905ПМ «Программа отработки алгоритмов управления кранами-регуляторами ВТ ПОС самолета АН-132 на стенде ПТ ПОС-132», №1757.331 «Методика испытаний воздушно-воздушного теплообменника», літака АН-70 №77.98.1774.859 «Отработка алгоритмов управления ВТ ПОС силовой установки и крыла самолета АН-70 на стенде»..

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.

Основні наукові результати в дисертації в цілому обґрунтовані теоретично та підтверджені широким обсягом експериментальних досліджень і впровадженням в дослідні та серійні зразки нової техніки в галузі високих технологій. Автором коректно застосовано для теоретичного обґрунтування наукових положень та висновків дисертаційної роботи: методи теорії систем при дослідженні процесів основних агрегатів системи, методи математичного моделювання при обґрунтуванні моделей нестационарних тепло-гідравлічних процесів теплообмінних апаратів, пневматичних кранах-регуляторах і магістральних трубопроводах, методи теоретичного та експериментального дослідження; методи прикладної статистики при обробці експериментальних даних; методи комп'ютерного моделювання для підтвердження адекватності розроблених моделей та встановлення меж їх застосування.

Обґрунтовані теоретичні результати зіставлені з відомими в літературних джерелах, відповідними результатами комп'ютерного моделювання та результатами натурних експериментів на гідравлічних стендах. Обсяги експериментальних досліджень та впровадження є достатніми для підтвердження наукових положень дисертаційної роботи.

Проте не в усіх практичних задачах, що підтверджують теоретичні положення, в достатній мірі наведено особливості програмних засобів моделювання та експериментального отримання даних.

Не зважаючи на вказане, в цілому наукові положення і висновки,

сформульовані в дисертаційній роботі є обґрунтованими теоретично та підтверджені практичним впровадженням в дослідних та серійних зразках нової техніки відповідального призначення.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується коректністю постановки математичних задач дослідження та використанням відповідних математичних методів, відповідністю математичних моделей фізичній суті процесів, що описуються в роботі і оцінкам меж їх застосування. Розроблені в дисертації математичні моделі ґрунтуються на фундаментальних законах рівноваги та збереження, на методах системного аналізу і теорії систем, математичній теорії диференціальних рівнянь, методах математичного моделювання і прикладної статистики, результати підтверджено їх практичним використанням.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше запропоновано математичну трьохпоточну модель нестационарних тепло-гідравлічних процесів в пластинчастих теплообмінних апаратах, що, на відміну від відомих, враховує теплові втрати в навколишнє середовище, яка заснована на обґрунтованому представленні теплообмінника сукупністю теплопередаючих пластин, для кожної з яких вирішується нестационарне диференційне рівняння теплопровідності, включаючи передачу тепла між пластинами та кожухом теплообмінника, де для теплоносія розв'язується диференційне рівняння теплопереносу.

2. Удосконалено математичну модель тепло-гідравлічних процесів електропневматичного крана-регулятора, що включає в себе моделі попереднього регулятора, керуючого та виконавчого механізмів, в якій для кожного агрегату розв'язується диференційні рівняння нерозривності та зусиль на механічних агрегатах, а для керуючого механізму додатково розв'язується диференційне рівняння електричної енергії для електромагніту, та дозволяє визначати кут повороту регулюючої заслінки в залежності від параметрів повітря на вході в кран та керуючих імпульсів, що надходять від системи керування. На відміну від існуючої моделі удосконалена модель дозволяє враховувати вплив температури навколишнього середовища та аеродинамічних сил, що діють на заслінку.

3. На основі аналізу результатів моделювання теплових та гідравлічних процесів в пневматичному трубопроводі з використанням розроблених комп'ютерних моделей, в тому числі моделей нестационарних тепло-гідравлічних процесів в пневматичному трубопроводі з використанням диференціальних рівнянь збереження маси, імпульсу та енергії по довжині трубопроводу, де враховується розривний режим течії при стрибках ущільнення, встановлено, що в зв'язку з великою інерційністю теплових процесів достатня для практики точність забезпечується при використанні моделі квазістационарних теплових гідравлічних процесів на основі газодинамічних функцій.

4. Вперше запропоновано математичну модель нестационарних теплових та

гідравлічних процесів, що протікають при сумісному функціонуванні СПП та ПОС, яка складається з математичних моделей основних агрегатів, що встановлені в пневматичній системі, та поєднані між собою відповідними інтерфейсами. Показано, що для кожної моделі можливо виконувати розрахунки з різним значенням кроку за часом, що дозволило пришвидшити розрахунок параметрів роботи системи зі збереженням достатньої точності.

Значущість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Значущість отриманих результатів для науки полягає у розвитку теоретичних положень щодо математичного моделювання об'єктів та систем технічного призначення, а саме, динамічних процесів в елементах СПП та ПОС сучасних літаків. Створений комплекс взаємопов'язаних нових математичних моделей дає можливість вирішити актуальне науково-прикладне завдання, пов'язане із протиріччям між необхідною та досяжною точністю відтворення динамічних процесів в системі, що є особливо актуальним для можливих аварійних режимів, що у сукупності забезпечує у перспективі створення нового покоління високоефективних СПП.

Значущість результатів дисертаційного дослідження для практики полягає у тому, що запропонований в дисертаційній роботі комплекс математичних моделей є науково-методичною основою розробки та проектування високоефективних СПП та ПОС.

Практичне значення полягає у розробці та реалізації у вигляді програмного забезпечення натурних стендів математичних моделей процесів в елементах гідравлічної СПП та ПОС, які дозволили виконати розробку, відладку і випробування таких систем для низки серійних та дослідних літаків. За допомогою розроблених моделей теплообмінних апаратів (ТА), електропневматичного цифрового регулятора (ЕПЦР) та трубопроводів стало можливим відпрацювання алгоритмів управління СПП та ПОС при їх сумісному функціонуванні без проведення льотних випробувань, що дозволило запобігти появі аварійних відключень цих систем на перехідних процесах, тим самим підвищивши безпеку польоту та, відповідно, виключило появу додаткових витрат на усунення наслідків таких ситуацій.

Найбільш вагомими результатами для практичного застосування становлять:

1. Розроблено програмний засіб комп'ютерної реалізації на основі моделі пластинчастих теплообмінних апаратів, що дозволяє оцінити параметри теплообмінника, та на їхній основі вибрати теплообмінний апарат, що може бути встановлений на літаку. Дозволяє оцінити потрібні параметри допоміжної силової установки для здійснення повітряного запуску двигунів.

2. Розроблено програмний засіб комп'ютерної реалізації на основі математичних моделей пневматичного крана-регулятора і магістрального трубопроводу, що дозволило відпрацювати системи управління краном-регулятором і зменшити обсяг натурних випробувань.

3. Розроблено програмний засіб комп'ютерної реалізації для моделювання нестационарних теплових та гідравлічних процесів в СПП та ПОС при їх сумісному функціонуванні, що вперше дозволило формувати алгоритми системи управління для літаків Ан-148, Ан-178, та не потребує оцінки її роботи в льотних випробуваннях на аварійних режимах.

4. Надано рекомендації для уточнення алгоритму керування ЕПЦР ПОС для запобігання аварійних відключень СПП літаків АН-148, АН-158 та АН-178, що дозволить у перспективі підвищити безпеку польотів.

5. Розроблено спеціалізовану апаратуру для вимірювання параметрів повітря на пневматичних стендах.

Результати досліджень, розроблені моделі та програмні продукти їх чисельної реалізації використані:

- при вирішенні проблеми сумісного функціонування СПП і ПОС літаків Ан-158, Ан-178, а також при оптимізації каналів продувки теплообмінника літаків Ан-178 та Ан-132, Акт впровадження на ДП «АНТОНОВ» від 24.09.2018 р.

- при розробці алгоритмів керування ЕПЦР, які встановлені у пневматичних системах літаків розробки ДП «АНТОНОВ», Акт впровадження на ПАТ «АВІАКОНТРОЛЬ» від 17.09.2018 р.

Отримані результати можуть бути використані: у науково-дослідних установах, конструкторських бюро та на підприємствах у галузі газотурбобудування для математичного моделювання процесів в агрегатах СПП і ПОС з метою дослідження режимів, створення програмного забезпечення стендів-імітаторів та проектування бортових і наземних технічних засобів; для навчальних цілей у вищих навчальних закладах Міністерства освіти і науки України.

Повнота викладення результатів в опублікованих матеріалах.

Основні положення і результати дисертаційного дослідження опубліковані в 13 наукових працях, з яких: 6 статей у виданнях, що входять до переліку наукових фахових видань України (в тому числі 2 статті в журналі, індексованому в міжнародних наукометричних базах даних), 7 – публікації матеріалів конференцій. Проте географія публікацій є обмеженою.

В опублікованих працях викладено в повному обсязі основні отримані результати. Особистий внесок здобувача в сумісних публікаціях є підтвердженим. Рівень та кількість публікацій, рівень апробації відповідають вимогам, що ставляться до кандидатських дисертацій в Україні, хоча для підтвердження світового рівня результатів дисертації її бажано було б більш широко апробувати на міжнародному рівні.

Структура та зміст дисертації.

Дисертацію викладено на 155 сторінках, з яких основний зміст роботи викладений на 118 сторінках. Робота складається зі вступу, основного змісту, що включає чотири розділи, висновків, списку використаних джерел з 100 найменувань та 2 додатку на 5 сторінках.

У вступі обґрунтована актуальність теми дослідження, встановлений зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, сформульована мета роботи, основні напрями досліджень і методи їх вирішення. Надані опис об'єкту і предмету досліджень, викладені наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, наведені відомості про апробацію результатів роботи і публікації.

У першому розділі проведений аналіз структури СПП та ПОС і визначено основні конструктивні елементи, з яких вона формується. Виконана детальна, поелементна декомпозиція СПП та ПОС. Аналіз конструкції існуючих пневматичних сучасних літаків показав, що системи складаються з типових елементів.

Виділені наступні основні елементи: теплообмінні апарати, крани-регулятори, пневматичні трубопроводи, заслінки, системи керування.

Проведено аналіз існуючих математичних моделей основних елементів та визначені ті елементи, математичні моделі яких потребують уточнення або необхідна розробка нової моделі.

Виконаний аналіз результатів розрахунків на основі існуючих математичних моделей теплообмінника з перехресним током та пневматичного трубопроводу.

В результаті проведеного аналізу обґрунтовані напрями наукового дослідження, визначені задачі дослідження і методи їх вирішення. На основі проведеного огляду і порівняльного аналізу застосованих методів і засобів математичного моделювання встановлена теоретична значущість і прикладна необхідність проведення досліджень у напрямі створення нових математичних моделей динамічних процесів, що відбуваються при роботі СПП та ПОС.

У другому розділі дисертації представлена трьохпоточна математична модель нестационарних теплових процесів у пластинчатому теплообміннику, яка включає теплообмін з навколишнім середовищем.

Модель оснований на розв'язку диференційного рівняння теплопровідності. Теплообмінник розглядається як сукупність однорідних пластин, товщина яких значно менша за довжину та ширину. Поміж пластин розміщені канали повітря, параметри яких змінюють вздовж пластини.

В розділі наведено опис стенду випробовувань теплообмінника. Виконано порівняння експериментальних даних з розрахунковими по пропонуваній моделі, та отриманих методом об'ємного моделювання.

Розроблена математична модель теплових та гідравлічних процесів перехреснопоточного теплообмінника дозволяє моделювати нестационарні процеси з урахуванням втрат тепла у навколишнє середовище.

Створений програмний засіб комп'ютерної реалізації для моделювання теплових та гідравлічних процесів дозволяє проводити розрахунок нестационарних процесів теплообмінника.

Показано, що для моделювання теплового стану теплообмінника достатньо виконувати розрахунок тільки для декількох теплопередаючих пластин та пластів теплоносія, які знаходяться ближче до кришок теплообмінника, що дозволило значно час необхідний для розрахунку.

Виконано натурний експеримент перехрестнопоточного теплообмінника, та отримані дані про зміну за часом параметрів теплообмінника в широкому діапазоні режимів роботи. На їх основі визначені параметри моделі ТО.

Порівняльний аналіз результатів чисельного та натурального експерименту показує, що розроблена математична модель забезпечує похибку в розрахунку не більше 6°C , а найменше значення коефіцієнту детермінації становить 0.88, що є достатнім для інженерних розрахунків.

У третьому розділі представлена математична модель нестационарних гідравлічних процесів в електропневматичному цифровому крані-регуляторі.

У розділі приводиться склад та схема ЕПЦР, описується процес управління, обґрунтовано математичні моделі складових елементів та співвідношення для їх цифрової реалізації. В розділі наведено опис стенду випробовувань дослідження роботи крана-регулятора. Виконано порівняння експериментальних даних з розрахунковими по пропонованій моделі, та отриманих методом об'ємного моделювання. Результати моделювання показують, що розроблена модель електропневматичного цифрового регулятора дає достатню точність для інженерних розрахунків.

Удосконалено модель крана –регулятора, яка дозволяє моделювати його роботу на різних режимах роботи пневматичної системи та при різних температурах і тиску навколишнього середовища.

Розроблено програмний засіб комп'ютерної реалізації, що дозволяє моделювати роботу крану-регулятору на різних режимах роботи системи.

Проведений натурний експеримент крану-регулятору дозволив отримати дані про параметри його роботи при різних величинах ширини імпульсів на нагнітання та стравлення тиску з виконавчого механізму, а також різних величинах паузи між імпульсами.

На основі порівняння результатів чисельного експерименту з результатами натурального експерименту визначено, що максимальне відхилення між ними не перевищує $0,1 \text{ кгс/см}^2$, а найменше значення коефіцієнту детермінації становить 0.8973, що є достатнім для практичного використання

Четвертий розділ присвячено розробці математичної моделі нестационарних теплових процесів в СПП і ПКС літака, для якої додатково були розроблені математичні моделі пневматичного трубопроводу, заслінок, підсистеми відбору повітря від двигуна та системи керування. Виконано ряд тестових завдань, результати яких дозволили уточнити алгоритми керування пневматичними системами літака.

Розроблено математичну модель нестационарних теплових та гідравлічних процесів, що протікають в системах підготовки повітря та протиобліднювальних системах. Модель включає в себе.

- математичну модель нестационарних теплових та гідравлічних процесів, що протікають у перехресно поточному теплообміннику;
- математичну модель нестационарних теплових та гідравлічних процесів, що протікають у електропневматичному крані регуляторі;
- математичну модель нестационарних теплових та гідравлічних процесів, що протікають у магістральному трубопроводі;

- математичну модель крану-регулятора тиску в СПП;
- математичну модель крану-регулятора температури в СПП;
- математичну модель заслінки відбору від високого ступеня;
- математичну модель підсистеми відбору повітря від двигуна;
- математичну модель систем управління СПП та ПОС.

На основі результатів розрахунків за допомогою математичної моделі нестационарних гідравлічних процесів у магістральному трубопроводі показано, що для моделювання нестационарних теплових процесів гідравлічні процеси в пневматичних системах літака можна розглядати як квазістационарні.

Запропоноване автоматичне формування граничних та початкових умов для кожної складової моделі загальної моделі.

Розроблене програмне забезпечення, що дозволяє виконувати моделювання нестационарних теплових процесів в пневматичних системах літака.

У додатках наведено допоміжні матеріали, зокрема, акти впровадження результатів роботи, результати перевірки установки «ИПВ-1».

Автореферат ідентичний за змістом з основними положеннями дисертації і в повній мірі відображає основні завдання, суть наукових положень, практичну значущість та висновки. Дисертаційна робота та автореферат оформлені у відповідності з вимогами, що ставляться до кандидатських дисертацій в Україні, хоча по тексту дисертації зустрічаються опечатки, невідповідності у посиланні на формули, мають місце стилістичні неточності.

Зауваження до роботи.

1. Перелік умовних позначень та скорочень не є достатньо повним.
2. На с. 120 вказано «На основі заданих вхідних даних за допомогою математичної моделі двигуна визначається значення параметрів повітря (тиск та температура) на фланцях відбору від двигуна.» Але математична модель двигуна не наводиться.
3. Розділ 4.9 «Визначення кроку розрахунку за часом різних математичних моделей»: вказані максимальні кроки розрахунку за часом різних складових моделей. Але не досить ясно обґрунтовано засіб поєднання моделей з різними на декілька порядків кроками розрахунків.
4. Обґрунтування схеми з вагами (с. 48) на прикладі вирішення звичайного диференційного рівняння першого порядку є дискусійним.
5. В роботі не приділено достатньої уваги опису створених програмних засобів, що реалізують розроблені математичні моделі та методи, рівня їх програмної та обчислювальної складності.
6. Робота має достатній рівень апробації, але основні публікації автора викладено виключно в друкованих працях ІМЕ ім. Г. Є. Пухова

НАН України.

7. Алгоритм керування ЕПЦР (с. 83) є ідеальним ПД-законом регулювання, що фізично неможливо реалізувати. В роботі не вказано, як досягається компроміс між необхідністю отримання наближеного значення похідної похибки та обмеженням смуги пропускання регулятора.
8. Теза автора (с. 84) «ПД регулятор повинен бути самоналагоджувальним, що досягається визначенням величини скважності керуючих імпульсів для забезпечення необхідної величини похідної тиску в системі за часом» є сумнівною, оскільки не передбачає зміни коефіцієнтів регулятора при зміні параметрів керуючого механізму.
9. Модель ЕПЦР має велику кількість вхідних параметрів, значення яких відомі лише наближено та можуть змінюватися в широких межах.
10. В розділі 4 пропонуються деякі удосконалення алгоритмів керування системи, які є досить дискусійними, оскільки призводять до коливального режиму (Рис. 4.11, 4.13). Висновок 5 цього розділу, зокрема «...що дозволило підвищити безпеку польоту.» не є підтвердженим.
11. Зауваження щодо оформлення дисертації. У дисертаційній роботі мають місце загальні недостатньо коректні вислови типу “Алгоритм керування являє собою ПД регулятор”, “ що призведе до видачі пілотам інформації про проблеми в ПОС”, “Дана ситуація...” та ін., зустрічаються опечатки, невідповідність у посиланнях на формули, неточності у позначеннях у формулах, що ускладнює сприйняття матеріалу дисертації. Деякі позначення співпадають, зокрема швидкість звуку (с. 12) та постійні (с.с. 22, 23, 57). В списку літератури деякі джерела не мають повних вихідних даних. Ілюстрації в дисертації погано читаються, деякі не мають позначень на вісі ординат (Рис. 1.2, с. 25, Рис. 3.8, с.101 та ін.).

Незважаючи на висловлені зауваження, в цілому дисертація справляє позитивне враження завдяки ґрунтовності теоретичних та експериментальних досліджень

Загальні висновки.

Оцінюючи роботу в цілому, вважаю, що дисертаційна робота Чирва Олександра Олександровича на тему «Моделі нестационарних процесів в елементах системи підготовки повітря та протиобліднювальної системи літака для відпрацювання алгоритмів управління ними» є завершеною науковою працею, в якій отримані нові, науково обґрунтовані та практично важливі результати, що у сукупності вирішують актуальну науково-прикладну задачу розробки математичних моделей та програмних засобів комп'ютерної реалізації, що дозволили моделювати нестационарні теплові та гідравлічні


процеси, які протікають в елементах пневматичних систем літака, а саме СПП та ПОС, з урахуванням впливу систем керування ними.

Основні результати дисертації відповідають вимогам паспорту наукової спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, зокрема формулі спеціальності та абзацам 1,3 у розділі II.

Дисертаційна робота за своїм змістом відповідає вимогам п.п. 9,11,13,14 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого Постановою Кабінету міністрів України № 567 від 24 липня 2013 року (зі змінами 2015 р.) та чинним вимогам МОН України, а її автор – Чирва Олександр Олександрович заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ:

Завідувач кафедри електротехніки та систем ракетно-артилерійського озброєння
Військової академії (м. Одеса),



д.т.н., доцент

Миргород В.Ф.

Підпис завідувача кафедри електротехніки та систем ракетно-артилерійського озброєння д.т.н., доцента В.Ф. Миргорода засвідчую:

Начальник відділення особового складу та стройового
Військова академія (м. Одеса)



О.І.Штогрін