ВИДВИД

Державне підприємство

«Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля»

РЕФЕРАТ РОБОТИ

УДК 004.942:519.254

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ВИМІРІВ
ПРИ СТВОРЕННІ НОВИХ КОНСТРУКЦІЙ
РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ**

**Автори:** Деревянко І.І., к.т.н., науковий працівник

 Козіс К.В., провідний інженер

Дніпро – 2017

На ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля» функціонує система менеджменту якості. Це управління станом і якістю шести основних процесів створення, вдосконалення та модернізації ракетно-космічних комплексів: проектування, розробка конструкторської та експлуатаційної документації, проведення експериментального відпрацювання, визначення характеристик ракетно-космічної техніки та моніторинг її стану. Ефективність управління цими процесами залежить від методів і засобів отримання інформації про стан та якість досліджуваних об'єктів ракетно-космічної техніки, що міститься в якісних оцінках і кількісних вимірах різної фізичної природи та їх математичної обробки, а також від формування візуально-аналітичних даних для підтримки прийняття рішень на різних рівнях менеджменту якості продукції.

В даний час ракетно-космічна техніка являє собою безліч агрегатів, котрі відрізняються своїми конструктивними особливостями. Серед них особливе місце займають металеві конструкції зі зварними з'єднаннями, як сама ненадійна ланка. Як наслідок цього неруйнівний контроль якості та визначення властивостей зварних з'єднань є однією з важливих задач оцінки надійності таких агрегатів. Одними з методів контролю зварних з'єднань є метод магнітної пам'яті металу та ультразвуковий метод, які мають ряд переваг перед іншими.

Також перспективи розвитку ракетно-космічної галузі в значній мірі пов'язані з використанням нових матеріалів та застосуванням передових технологій. Кінець 20-го та початок 21-го століть відмічені все більш широким застосуванням в конструкціях ракет-носіїв полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), та як наслідок, появою нових технологій створення та технологій контролю високоефективних виробів на їх основі. Серед вузлів ракет-носіїв особливе місце займають конструкції з ПКМ. Однією з важливих задач при створенні таких конструкцій є оцінка конструкційно-технологічних рішень, які закладаються в конструкцію міжступеневих відсіків ракет-носіїв та конструкцію корпусів ракетних твердопаливних двигунів із полімерних композиційних матеріалів. Відмінною рисою роботи є унікальність об'єктів контролю – подібні великогабаритні конструкції не виготовлялися раніше з ПКМ, а їх виготовлення вимагає розробки нових інформативних параметрів і методик обробки даних. Тензометричний та фотометричний (оптичний) методи контролю є ефективними для отримання експериментальних вимірювань, що описують якісний стан таких конструкцій і їх локальних місць.

Ці типи контрольованих об'єктів відносяться до класу просторово-розподілених. У першому випадку при магнітометричному та ультразвуковому контролі просторові матриці вимірювань формуються за рахунок переміщення датчиків по поверхні об'єкта та почергового зондування поверхні. У другому випадку, при тензометричному контролі, просторові матриці – це вимірювання великого числа вимірювачів, розташованих віддалено один від одного на поверхні об'єкту контролю. У третьому випадку, вимірювання являють собою безконтактні дистанційні вимірювання за допомогою фото і відеокамер, вимірювачі яких це
ПЗЗ-матриці. Вимірювання проводяться одночасно і охоплюють всю контрольовану поверхню і застосовуються в місцях, недоступних для контактних вимірювачів.

Інформація про стан цих нестаціонарних об'єктів неруйнівного контролю та технічної діагностики міститься в вимірах їх параметрів, стохастичні закономірності яких невідомі, вимірювання спотворені перешкодами, а обсяг вимірювань обмежений. Математична модель таких вимірювань лінійно-протяжних об'єктів представлена у вигляді дискретної послідовності автокорельованих випадкових величин виду

, (1)

де  – контактна (моделююча) перешкода, яка описується автокорельованою послідовністю випадкових величин з законом бета-розподілу;  – вимірювальний шум, послідовність незалежних нормальних випадкових величин, як правило, з невідомою інтенсивністю;  – постійна або повільно змінювана стохастична складова, яка характеризує вплив зовнішніх джерел;  – автокорельована експоненціальна складова, породжувана структурними якісними неоднорідностями;  – складова, породжувана дефектами;  – номер вимірювання точечних об'єктів або номер координат лінійно-протяжних та просторово-протяжних об'єктів.

При контролі просторово-протяжних об'єктів шляхом їх сканування, вимірювання містять інформацію про структуру матеріалу, внутрішніх залишкових напруженнях, їх аномальних вимірах на окремих ділянках і все це відбивається на статистичних закономірностях вимірювань.

Проведено порівняльний статистичний аналіз магнітометричних вимірювань зварних з'єднань чотирьох однотипних блоків. Кожен з блоків містить 45-50 з'єднань і кожному ставиться в відповідність магнітометричні вибірки обсягом 150-250 вимірювань. Магнітометричні вимірювання зварного з'єднання представляють собою випадкові величини з невідомими статистичними закономірностями. Їх послідовність розглядається як нестаціонарний дискретний процес обмеженої тривалості, причому в одному і тому ж блоці в більшості випадків невідомі зв'язки номерів точок з координатами їх на зварних з'єднаннях, невідомо також – вибірки замкнуті або не замкнуті.

Проведено порівняльний статистичний аналіз тензометричних вимірювань відносної деформації на чотирьох етапах статичних випробувань (Транспортне навантаження, Політ-1, Політ-2, Політ-3). За допомогою тензорезисторів контролювались характеристики міцності та оцінювалася відносна деформація. Вся поверхня була розподілена на 83 точки, в кожній точці розташовано 4 тензодатчика, що роблять такі виміри: 1-й та 2-й - відносні деформації в горизонтальному та вертикальному напрямку на зовнішній поверхні, 3-й та 4-й - відносні деформації в горизонтальному та вертикальному напрямку на внутрішній поверхні конструкції.

Також у роботі представлені результати розробки теплозахисної системи із матеріалів вітчизняного виробництва, що застосовується в конструкції корпусу ракетного двигуна твердого палива. При створенні котрого було проведено експериментальне відпрацювання внутрішнього теплозахисного покриття та розроблена інформаційна технологія візуально-аналітичної обробки цифрових зображень внутрішніх теплозахисних покриттів. Проведено порівняльних статистичний аналіз цифрових зображень внутрішньої поверхні теплозахисного покриття на перших трьох демонстраційних конструкціях ракетних двигунів.

Розв'язана задача оцінки статистичних параметрів та дослідження статистичних закономірностей експериментальних вимірювань лінійно-протяжних об'єктів. Розглянуто питання оцінки стаціонарності та незалежності вибірок, вид та порядок їх моделей, виділення різних складових моделі (1), а також дефектоскопія та дослідження якості контрольованих об'єктів.

Досліджувані об'єкти - це система пристроїв, механізмів та агрегатів. Їх параметри перебувають в причинно-наслідкових зв'язках, як між собою, так і з навколишнім середовищем, на їх якість та працездатність впливає багато факторів (навантаження, теплові впливи, вібрації, тертя, порушення зв'язків та багато інші невідомі). Щоб з'ясувати, як і на що вони впливають, необхідним є факторний аналіз, проведений шляхом дорогих фізичних експериментів. У наше століття інформаційних технологій не все, але багато чого, можна оцінити шляхом проведення комп'ютерних обчислювальних експериментів. Це потужний засіб подолання багатьох незнань, невизначеностей і навіть невідомого.

Факторні керуючі обчислювальні експерименти – це одна з можливостей отримання інформації про причинно-наслідкові зв'язки. Обчислювальні експерименти проводяться на віртуальних об'єктах менеджменту якості шляхом створення математичних моделей з керованими параметрами, факторами, причинно-наслідковими зв'язками, невизначеностями і заданими статистичними закономірностями. Керуючи ними, можна досліджувати їх вплив на стан і якість майбутньої ракетно-космічної продукції, оцінювати і прогнозувати зміни, визначати інформативність вимірювань і ефективність рішень.

Математичне забезпечення обчислювальних експериментів – це система комп'ютерно-інтегрованих алгоритмів і програм, на основі яких формуються вибірки вимірювань, що містять інформацію про стан та якість контрольованих об'єктів, і шляхом їх обробки формуються дані для підтримки прийняття рішень і впливу на них різних факторів. Результати досліджень на віртуальних об'єктах обов'язково перевіряються шляхом проведення фізичних експериментів зі значно зменшеними обсягами і витратами.

**ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** Процеси менеджменту якості складних технічних об'єктів, зокрема ракетно-космічної техніки (РКТ), при розробці та модернізації мають свої особливості: рішення про їх стан має прийматися на основі обробки експериментальних вибірок вимірювань параметрів різної фізичної природи, що контролюються, шляхом аналізу і підготовки візуально-аналітичних даних для інтелектуального методу прийняття рішень. Рішення цієї задачі пов'язано з необхідністю врахування таких факторів як відсутність апріорних знань про статистичні закономірності вимірюваних параметрів, помилок вимірювань і обмежень на обсяг вимірювань. Об'єкти контролю, як правило, складні системи і комплекси з випадковими і нестаціонарними параметрами, одно і багатопараметричні, лінійно і просторово-розподілені, з невідомими причинно-наслідковими зв'язками і нечітко сформульованими критеріями стану і якості. Серед відомих методів неруйнівного контролю найчастіше використовуються ультразвукові, тензометричні і магнітометричні (метод магнітної пам’яті). Їх вимірювання можуть оброблятися одними і тими ж вимірювально-інформаційними технологіями, вдосконалення яких має бути спрямоване на подолання перерахованих вище труднощів. Методологічні і теоретичні основи їх простежуються в дослідженнях таких вчених як Дегтярев О.В., Потапов О.М., Бабак В.П., Дубов А.О., Малайчук В.П., Єрьоменко В.С., Кобзар А.І., Лемешко С.Б., Маєвський С.М., Радченко С.Г., Maybeck P.S., Box G., Reinsel G., Konishi S.

Серед об'єктів менеджменту особливе місце займають лінійно і просторово-розподілені об'єкти. Контроль їх має на меті виявлення і оцінку параметрів ділянок у межах яких якість і стан матеріалів не відповідають вимогам норми або має місце порушення їх цілісності. Такі ділянки називаються аномальними, а серед них необхідно виділити дефектні. Розробка інформаційних технологій підготовки даних для аналізу і прийняття рішень в задачах неруйнівного контролю лінійно і просторово-розподілених об'єктів у процесі їх розробки та модернізації є актуальною науково-технічною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження виконані відповідно з роботами по розробці ракети-носія, призначеної для оперативного, високоточного виведення на кругові, геостаціонарні та сонячно-синхронні орбіти одного або групи космічних апаратів різного призначення.

Також дослідження виконувалися в рамках наступних держбюджетних договорів Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара на виконання науково-дослідних робіт Міністерства освіти та науки України:

– ДР № 0110U001291 «Математичне забезпечення неруйнівного контролю, моніторингу та прогнозування стану виробів та агрегатів ракетно-космічної техніки та транспорту», термін виконання 2010-2012 рр.;

– ДР № 0113U003038 «Інформаційно-аналітична система підтримки прийняття рішень у задачах технічної діагностики вузлів та агрегатів ракетно-космічної техніки», термін виконання 2012-2014 рр.

**Мета та завдання досліджень.** Мета дослідження полягає у вирішенні актуальної науково-технічної задачі створення інформаційної технології підготовки даних для візуально-аналітичного аналізу, а також підтримки прийняття рішень стосовно стану та якості лінійно і просторово-розподілених об’єктів при їх проектуванні, модернізації та випробуваннях.

**Об'єкт досліджень** *–* процеси неруйнівного контролю лінійно та просторово-розподілених об’єктів в умовах невизначеності їх статистичних закономірностей та обмежень на об’єм вимірів.

**Предмет досліджень**– моделі, методи і інформаційні технології обробки та візуально-аналітичного аналізу експериментальних вимірів у задачах підготовки даних для підтримки прийняття рішень про стан об’єктів, що контролюються.

**Методи досліджень.** Лінійна алгебра, математичний аналіз, теорія ймовірності та математична статистика, теорія випадкових процесів, теорії адаптивної фільтрації та чисельних методів.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Синтезовано нові моделі ультразвукових, магнітометричних та тензометричних вимірів, котрі за експертним рішенням більш якісно описують експериментальні виміри, та дають можливість проводити розрахункові експерименти з метою факторного аналізу без залучення трудомісткого процесу їх одержання. Запропоновано візуально-аналітичний метод підготовки даних для прийняття рішень про стан та якість контрольованих об'єктів шляхом обробки експериментальних вимірювань при випробуваннях РКТ та аналізу їх результатів.
2. Вперше розроблені та запропоновані методи оцінки вимірів стану стаціонарності, засновані на дослідженні різниць, незалежності і коррельованості вимірювань в умовах невизначеності їх статистичних закономірностей і обмежень на обсяг вимірювань з урахуванням помилок першого і другого роду.
3. Удосконалено метод цифрової адаптивної фільтрації нестаціонарних складних стохастичних автокорельованих ультразвукових вимірювань, спотворених контактною перешкодою і вимірювальним шумом, за рахунок адаптивного вибору найкращого порядку і розміру рухомого вікна на кожній ділянці кривої.
4. Вперше запропоновано і розроблено метод цифрової обробки вибірок двовимірних ультразвукових автокорельованих вимірювань у задачах підготовки даних для візуально-аналітичного аналізу та підтримки прийняття рішень про дефектність і зміни якості лінійно-розподілених об'єктів, заснований на одночасному оцінюванні на кожній елементарній ділянці середніх значень, дисперсій і показників кореляції, їх порівнянні й співставленні.
5. Вперше розроблено теплозахисну систему з матеріалів вітчизняного виробництва, що застосовується в конструкції корпусу ракетного двигуна твердого палива.
6. Вперше розроблено нові методи обробки великих масивів даних та створені нові інформаційні технології дослідження і оцінки стану просторово-розподілених об’єктів, шляхом обробки:

– магнітометричних вимірів однотипних блоків зварних з’єднань;

– тензометричних вимірів міжступеневого відсіку із полімерних композиційних матеріалів;

– цифрових зображень поверхонь теплозахисних покриттів.

**Практичне застосування отриманих результатів.** Отримані результати статистичного візуально-аналітичного аналізу тензометричних вимірювань міжступеневого відсіку ракети-носія та цифрових зображень поверхонь теплозахисних покриттів з полімерних композиційних матеріалів включені в підсумкові технічні звіти, що підтверджує практичну цінність наукової роботи.

Методи оцінки стаціонарності, незалежності, фільтрації, дефектоскопії та контролю якості були застосовані для оцінки якості міжступеневих відсіків
ракет-носіїв, вуглепластикових корпусів маршових двигунів, а також вуглепластикових кабельних жолобів та жолобів термостатування.

На підставі проведених досліджень розроблено методичне та програмне забезпечення, яке використовується для аналізу експериментальних вимірювань просторово-розподілених об'єктів ракетно-космічної техніки в ДП «КБ «Південне», а також використовується в навчальному процесі Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара при викладанні фахових дисциплін: «Статистичні методи в неруйнівному контролі», «Проектування вимірювально-інформаційних технологій неруйнівного контролю» і «Обробка вимірювань та сигналів НК».

Про практичне застосування отриманих результатів, представлених в роботі, свідчать відповідні акти про впровадження.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення та результати досліджень, представлені в роботі, доповідалися та обговорювалися на XX Ювілейній міжнародній конференції «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики» (Гурзуф – 2012 р.), V Міжнародній науково-практичній конференції «Ефективність сотових конструкцій у виробах авіаційно-космічної техніки» (Дніпропетровськ – 2013), IX Міжнародній науковій конференції студентів та молодих вчених «Наука та освіта – 2014» (Астана – 2014 р.), VIII Міжнародній конференції «Матеріали та покриття в екстремальних умовах: дослідження та застосування екологічно чистих технологій виробництва та утилізації виробів», (Київ – 2014 р.), Міжнародному форумі студентів, аспірантів та молодих вчених (Дніпропетровськ – 2013 р.), XV‑XVIII Міжнародних молодіжних науково-практичних конференціях «Людина та космос» (Дніпропетровськ – 2013‑2015 рр.), XII Міжнародній конференції «Стратегія якості в промисловості і освіті» (Варна – 2016 р.).

**Публікації.** За результатами наукових досліджень опубліковано 35 наукових робіт, з них 6 статей у виданнях, що входять до наукометричних баз даних (Index Scopus та Index Copernicus), 9 статей у фахових виданнях України (з них одна – у секретному виданні); 20 робіт у матеріалах наукових конференцій і збірниках тез доповідей.

**Структура та обсяг роботи.** Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури, додатків до роботи та доданих публікацій по темі роботи. Загальний обсяг роботи становить 250 сторінок. Основний зміст викладено на 180 сторінках. Робота містить 81 малюнок, 51 таблицю та 123 формули. Список використаної літератури містить 115 найменувань. Прикладених публікацій – 37 сторінок.

Оскільки робота на здобуття премії Президента України для молодих вчених 2017 р. подається повторно, то варто відзначити розвиток роботи із попереднього її розгляду:

– вперше розроблена теплозахисна система із матеріалів вітчизняного виробництва, а також технологія її нанесення на корпус ракетного двигуна твердого палива;

– проведені відпрацювання технології виготовлення теплозахисного покриття з визначенням її експлуатаційних параметрів методами дериватографії та спектрометрії;

– вперше розроблено нові методи обробки великих масивів даних та створені нові інформаційні технології дослідження візуально-аналітичних показників цифрових зображень поверхонь теплозахисних покриттів для оцінки стану та прийняття рішень про їх якість;

– вперше розроблено міжступеневий відсік із ПКМ, розроблені методики проведення статичних випробувань та розроблена нова спеціальна оснастка для проведення випробувань;

– створенні інформаційні технології обробки тензометричних вимірів міжступеневого відсіку із полімерних композиційних матеріалів;

– закінчено дослідження розроблених методів оцінки вимірів стану стаціонарності і незалежності в умовах невизначеності їх статистичних закономірностей і обмежень на обсяг вимірювань з урахуванням помилок першого і другого роду;

– закінчено дослідження розробленого методу цифрової обробки вибірок двовимірних ультразвукових автокорельованих вимірювань у задачах підготовки даних для візуально-аналітичного аналізу та підтримки прийняття рішень про зміни якості лінійно-розподілених об'єктів.