

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ТЕХНІЧНОГО  
РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЯКОСТІ**

**Паращанов В'ячеслав Георгійович**



УДК 681.7

**Метрологічне забезпечення випробування  
спряжених деталей на основі імпульсного  
модульованого струму**

05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне  
забезпечення

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса - 2020

Дисертація є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті Міністерство освіти і науки України.

**Науковий керівник:** Заслужений метролог України,  
доктор технічних наук, професор  
**КВАСНІКОВ Володимир Павлович**,  
Національний авіаційний університет,  
завідувач кафедри комп'ютеризованих  
електротехнічних систем та технологій.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**ВАСІЛЕВСЬКИЙ Олександр Миколайович**,  
Вінницький національний технічний  
університет, перший проректор  
з науково-педагогічної роботи з  
організації учбового процесу та його  
науково - методичного забезпечення;

доктор технічних наук, професор  
**ВАГАНОВ Олександр Іванович**,  
Акціонерне товариство «Українська залізниця»,  
заступник начальника Науково -  
впроваджувального центру філії «Науково -  
дослідного та конструкторсько-технологічного  
інституту залізничного транспорту», м. Київ.

Захист відбудеться «30» жовтня 2020 р. о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.113.01 в Одеській державній академії технічного регулювання та якості Міністерства освіти і науки України за адресою: 65020, м. Одеса, вул. Ковальська, 15.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці в Одеській державній академії технічного регулювання та якості за адресою: 65020, м. Одеса, вул. Ковальська, 15.

Автореферат розісланий «30» вересня 2020 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Т.І. Ганєва

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** При виробництві та відновленні машин та механізмів, де вирішальним є забезпечення якості продукції, що визначається на етапі випробувань, встановлено, що обсяг контрольних операцій досягає понад 65% загальної трудомісткості виробництва.

Процес випробування деталей є складовою частиною системи забезпечення якості випробування після відновлення механізмів з сучасними методиками та методами визначення діагностичних параметрів.

Розроблені в цей час методи та методики випробувань спряжених деталей геометричних розмірів та шорсткості ще не достатньо ефективні для визначення придатності виробів, оскільки вони мають низьку швидкодію та точність вимірювання і не придатні для роботи в цехових умовах.

Для подолання недоліків існуючих методів та методик вимірювання геометричних параметрів спряжених деталей, включаючи специфіку сучасних випробувальних лабораторій, основною задачею є розробка методичного та метрологічного забезпечення випробування спряжених деталей, що зумовлює ефективність функціонування і розвиток випробувальних лабораторій для випробування деталей після відновлення.

Процеси відновлення поверхні деталі при роботі вимагають досліджень в області метрологічного забезпечення як випробування так і механіки матеріалів тонких шарів поверхні, впливаючи на надійність та стан роботи всієї механічної системи після відновлення спряжених деталей.

Нестійкі умови при експлуатації в спряжених вузлах призводять до руйнування внутрішнього та зовнішнього матеріалу, що супроводжується матеріальними втратами працюючих поверхонь спряжених деталей. Проте до цих пір відсутнє метрологічне забезпечення процесу відновлення спряжених деталей, що залежить від вхідних параметрів і умов роботи системи при випробуванні спряжених деталей, що впливають на властивості працюючого механізму.

Одним із слабо вивчених аспектів метрологічного забезпечення випробування спряжених деталей після відновлення, стандартизації та сертифікації їх до теперішнього часу залишається підвищення точності вимірювання параметрів при вибіркового контролю для забезпечення високої якості продукції. На сьогодні відсутні стандартні методики контролю спряжених деталей та їх вимірювання, а також стандарти підприємства для випробування спряжених деталей під час здійснення поточного або капітального ремонту механізмів.

Тому, для вирішення задач випробування спряжених деталей необхідно розробити нові положення метрологічного забезпечення технологічних операцій контролю деталей після їх відновлення.

В даний час одним з перспективних напрямів оцінки стану прецизійних систем залишається дослідження якості відновлення геометричних параметрів спряжених деталей.

Значний вклад у розвиток наукового підходу в цій галузі зробили видатні вітчизняні вчені Ф. Б. Гриневич, П. П. Орнатський, Ю. М. Туз, Ю. О. Скрипник, Є.Т. Володарський, Б. І. Стадник, П. Г. Столярчук, В. О. Поджаренко, В. В. Кухарчук, І. С. Кісіль, С. І. Кондрашов та ін.

Метрологічне забезпечення при випробуванні деталей, що використовується в теперішній час, не завжди задовольняє вимогам технічного завдання на виріб та можливості його відновлення для продовження працездатного стану відповідно до технічної документації, а також не забезпечує оптимальний вибір способів та засобів вимірювання в цілях підвищення точності вимірювання.

У зв'язку з цим актуальною є науково - прикладна завдання по метрологічному забезпеченню, яке полягає в розробці та дослідженні ефективних методів контролю процесу випробування деталей з використанням імпульсного модульованого струму (ІМС), що забезпечує їх високу якість.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до наукового напрямку кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем і технологій, відповідно до закону України №3715-VI «Про пріоритетні напрямки інноваційної діяльності в Україні», зокрема, «Освоєння нових технологій високотехнологічного розвитку транспортної системи, ракетно-космічної галузі, авіа- і суднобудування, озброєння та військової техніки», а також пов'язана з держбюджетною тематикою Міністерства освіти і науки України в науково-дослідній роботі №125-ДБ17 «Методологія побудови сучасних дистанційних інформаційно-вимірвальних систем» (номер держреєстрації 0117U002367).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є вирішення важливої наукової задачі підвищення ефективності метрологічного забезпечення вимірювань при випробуванні спряжених деталей за рахунок удосконалення існуючих методів і засобів вимірювання та покращення метрологічних характеристиках на основі імпульсного модульованого електричного струму.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні прикладні задачі:

1.Провести аналіз існуючих методів і засобів вимірювання параметрів спряжених пар та класифікувати відомі теоретичні підходи.

2. Розробити та дослідити нову приладову систему з покращеними метрологічними характеристиками з використанням імпульсного модульованого струму, яка враховує комплексну зміну контролюючих параметрів та дозволяє підвищити достовірність контролю.

3. Розробити метод вимірювання в робочих умовах для забезпечення надійності спряжених деталей на етапі випробування та новий метод проектування приладів і систем вимірювання параметрів, що забезпечують високу ефективність.

4. Розробити методіку вимірювання параметрів спряжених деталей за допомогою технології моніторингу поверхні контакту деталей, з використанням

метрологічних засобів вимірювання із заданими метрологічними характеристиками.

5. Запропонувати метод оцінювання точності вимірювань для забезпечення конкурентоспроможності продукції при випробуванні спряжених деталей на основі визначення взаємозв'язків між статистичними даними та результатами моделювання;

6. Розробити стандарт підприємства для гнучкого проектування та випробування після відновлення спряжених деталей, а також провести експериментальні дослідження розробленої приладової системи вимірювання шорсткості та геометричних параметрів спряжених деталей для підтвердження адекватності теоретичних моделей, ефективності запропонованого метода.

*Об'єкт дослідження* - процес вимірювання параметрів спряжених деталей в цілях підвищення надійності механізмів на етапі випробування виробів та прогнозування.

*Предмет дослідження* – методи, моделі та алгоритми забезпечення якості спряжених деталей в умовах статистичного обробки інформації.

**Методи дослідження.** При розв'язанні поставленої задачі використані методи, що ґрунтуються на теорії вимірювальних систем, теорія ймовірності, теорії ідентифікації, методах імітаційного моделювання. Частотні параметри прецизійного вузла опрацьовувалися спеціальним програмним забезпеченням «SpektraLab». Поверхневу топографію представляли за допомогою приладу «Мікрон-Альфа» з похибкою вимірювання 5 нм. Обробку експериментальних даних та підтвердження кореляційних залежностей проводили методами теорії планування експерименту.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

Розроблено новий підхід щодо метрологічного забезпечення спряжених деталей за рахунок прогнозування безвідмовності деталей з використанням статистичної інформації в умовах обмеженого обсягу вимірювальної інформації.

В роботі отримані такі наукові результати:

1. Вперше введено та обґрунтовано поняття метрологічного забезпечення випробувань при відновленні спряжених пар в реальному часі, що забезпечує моделювання та розрахунок похибки вимірювань.

2. Вперше для оперативного управління якістю розроблено метод ідентифікації геометричних параметрів, який відрізняється від існуючих комплексним застосуванням статистичної інформації та дає можливість реалізації нового класу обладнання на основі імпульсного модульованого струму.

3. Вперше для забезпечення якості прецизійних деталей розроблено модель системи контролю з урахуванням зовнішніх дестабілізуючих факторів, яка на відміну від раніше відомих дозволяє реалізувати принцип гнучкого проектування прецизійних деталей за рахунок використання статистичної інформації та дає можливість підвищити точність контролю на 10%.

4. Запропоновано метод випробування спряжених деталей із застосуванням вихрострумового ефекту, який на відміну від раніше відомих, базується на використанні імпульсного модульованого струму та дає можливість усунення паразитних похибок при використанні цифрового фільтра.

5. Удосконалено метод випробування прецизійних пар за рахунок підвищення інтегральної оцінки узагальненого показника якості, визначено вірогідність аномальних процесів відхилення від форми та розташуванням дослідження фізичних явищ та складу властивостей матеріалу та речовини для створення стандартних зразків деталей про їх придатність.

6. Подальшого розвитку отримав метод прогнозування якості випробування спряжених деталей, який на відміну від існуючих методів, реалізує підвищення ефективності та метрологічної надійності приладової системи з застосуванням електронних вимірювальних приладів та експериментально підтверджено підвищення точності прогнозування.

**Практичне значення одержаних результатів** роботи полягає у наступному:

Запропоновано фізичну модель випробування спряжених деталей, яка дозволяє оцінити якість припрацювання деталей з різним значенням геометричних параметрів, що дозволяє визначити площу фактичного контакту, включаючи геометричні перекося.

Запропоновано фізичну модель спряжених деталей гвинтових та зубчатих поверхонь для реалізації методу випробування, що дає можливість розробити умови ефективної роботи спряжених деталей в складі механізмів.

Запропоновано приладову систему контролю після відновлення спряжених деталей з використанням імпульсного модульованого струму, метод випробування та розроблений спосіб контролю деталей, а також умови для їх випробування.

Запропонований стандарт підприємства з метрологічного забезпечення випробування спряжених деталей та їх діагностики.

Результати дисертаційної роботи впроваджено на підприємствах ПАТ НВО «Київський завод автоматики» та Державному підприємстві «Завод 410 Цивільної Авіації», а також в навчальному процесі Національного авіаційного університету при підготовці фахівців за спеціальністю «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка».

**Особистий внесок здобувача.** Всі наукові результати представлені в дисертації, одержані автором особисто. У роботах написаних у співавторстві автору належать: [1-3, 5-6, 8-13]- внесок здобувача полягає в обґрунтуванні наукового напрямку, [2, 5-6, 8, 9, 10] - формулюванні мету і постановки завдання; [1-2, 4, 8, 10-13, 14-15] - особисто зроблено аналіз та узагальнення отриманих результатів дослідження, а саме: обґрунтовано і розроблено метод експериментальних досліджень, проведені лабораторні дослідження; встановленні теоретичні залежності; сформульована новизни і основні висновки за результатами роботи.

**Апробація результатів дисертації.** Результати наукових досліджень, що включені до роботи доповідались т обговорювались на конференціях: «Наукоємні технології-2006», «Наукоємні технології-2007», «Політ-2007», «Політ-2008», «Політ-2009».Доповідались на наукових семінарах НАУ «Новітні технології» 2006-2017рр. та на міжнародній науково-практичній конференції «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси», ІРТК – 2020р.

**Публікації.** По темі дисертаційної роботи опубліковано 15 наукових праць: із них 10 у фахових наукових виданнях з переліку затвердженої МОН України(1 в наукометричній базі), 3 патенти України на корисну модель, 2 тези доповіді.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків, акти впровадження результатів роботи. Загальний обсяг дисертації складає 168 сторінок. Основний зміст викладено на 157 сторінках, який містить 32 рисунки, 12 таблиць, список використаних джерел по розділах становить: розділ 1 – 45 джерел, розділ 2 – 28 джерел, розділ 3 – 37 джерел, розділ 4 – 26 джерел.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та основні задачі досліджень, показано зв'язок вибраного напрямку з науковими програмами, планами та темами, сформульовано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено дані про особистий внесок здобувача, публікації, апробацію та впровадження результатів досліджень.

**У першому розділі** проведено аналіз існуючих методів та засобів вимірювання в спряжених деталях. В дисертації зроблено аналіз першоджерел з питань вимірювання після відновлення поверхонь деталей та прецизійних механізмів. Проведено аналіз методик, що використовуються для моніторингу умов вимірювання при випробуванні спряжених деталей.

Відзначено, що метрологічне забезпечення, стандартизація та сертифікація виготовлення якісної промислової продукції базуються на визначенні похибки вимірювання, розробці нестандартних засобів вимірювання, методів, методик і алгоритмів їх вимірювання та контролю.

Встановлені основні фактори, що впливають на електрохімічні методики контролю для відновлення на виробництві спряжених деталей. Показані та обґрунтовані основні способи вимірювання та контролю поверхонь спряжених деталей.

За результатами проведеного аналізу формуються мета роботи, визначаються основні наукові задачі, які необхідно вирішити для її досягнення. На основі проведеного аналізу вирішена задача стосовно випробування поверхонь деталей після відновлення та їх контроль, запропоновано методи та шляхи їх вирішення.

**В другому розділі** розроблено метод проведення моніторингу поверхні деталі в процесі роботи, який полягає у візуальному контролі та

фіксації параметрів вимірювання в режимі експлуатації. Для цього розроблена приладова система контролю(рис.1)(Патент на корисну модель № 36600). Основу її складає вимірювальна система геометричних параметрів механічних деталей, яка поєднана з металографічним мікроскопом, тензодатчиком та іншими приладами.

Розглянуто роботу вихрострумового дефектоскопа ВД10, який використовується для контролю поверхні спряженої деталі після відновлення. Проаналізовані похибки які утворюються при вимірюванні спряжених деталей після відновлення, це чутливість дефектоскопа та площа обробки деталі. Досліджено склад та властивості матеріалів для створення стандартних зразків спряжених деталей.

Запропонована приладова система дозволяє проводити моніторинг поверхонь деталей в динамічному режимі. Дослідження спряжених деталей «метал-метал» що дає можливість проводити моніторинг поверхні.

Вібраційні (спектральні) характеристики фіксували за допомогою прилада ВШВ-003М та програмного забезпечення «SpectraLAB», яке дозволяє обробляти вхідний сигнал в реальному часі.

Для підвищення точності вимірювання та контролю, зменшення впливу сторонніх вібрацій всі працюючі механізми комплексу виготовлені з неметалевих матеріалів, підшипники та інші деталі з фторопласту-4.

Для вимірювання під час відновлення деталі в зону контакту, яка поміщена в поверхнево-активну речовину (ПАР), подається синусоїдальний сигнал на поверхню деталі з генератора частоти ГЗ-34 в діапазоні від 20 Гц до 200 кГц, прилад АВО5 контролює його струм, за допомогою осцилографа С1-72 контролюємо форму сигналу та напругу.

Для модельного дослідження використали сталь 20 та скло, як абсолютно тверде тіло та хімічно і електрично нейтральне. Допоміжними електродами слугували алюміній, мідь, латунь, свинець, матеріали, що використовуються в шестерінчастих та плунжерних насосах та шарика – гвинтовій парі, у вигляді підшипників та корпусних деталей.



Рисунок1-Приладова система для проведення моніторингу поверхні деталі



Визначено, що збудження дислокаційної структури металу проходить під дією низької частоти електричного струму. Для цього було розроблено цифровий електронний генератор з частотою (6,25;12,5 та 25) Гц, що дає можливість надати імпульсної форми електричному сигналу.

При вимірюванні шорсткості або дефектів деталей використовуються вихрострумові дефектоскопи, принцип дії яких заснований на вихрострумових токах. Визначенні фактори які впливають на точність вимірювання дефектів деталі, один з них це еквівалентний опір втрат на вихрові струми. Допустимо, що феромагнітний осердя виготовлене з пластинок товщиною  $t$ , паралельно еквівалентний опір втрат  $R_{Fe}$ , що характеризує втрати на вихрові струми такого сердечника буде наступним:

$$R_{Fe} = \frac{2z \operatorname{ch}\left(\frac{t}{z}\right) - \cos\left(\frac{t}{z}\right)}{t \operatorname{sh}\left(\frac{t}{z}\right) - \sin\left(\frac{t}{z}\right)},$$

де  $z$  – глибина проникання вихрового струму в товщу осердя, знаходиться по формулі:

$$z = \sqrt{\frac{\rho l}{\pi \mu f}};$$

$\rho$  – питомий опір матеріалу осердя,  $f$  – частота струму в котушці;  $\mu$  – магнітна проникність матеріалу. Показано, що для цілей дослідження характеристики індуктивного перетворювача, втрати на вихрові струми більш зручне уявити послідовність еквівалентним опором, яка може бути поєднана з послідовним опором втрати в міді  $R_{Cu}$ .

В дифектоскопах використовуються феромагнітні осердя різної форми: замкнутої форми та з повітряним зазором. В перетворювачах приладової системи використовуються осердя з повітряними зазорами, розміри, яких змінюється в залежності від вимірюваної величини. На більш зручний спосіб оцінки впливу зазору складається введення поняття ефективної проникності, що відноситься до комбінації феромагнітного сердечника і повітряного зазору. Магнітний опір тороїдального сердечника з повітряним зазором буде наступний:

$$\frac{1}{\mu_0 S} \left( \frac{l - \delta}{\mu_s} + \delta \right) = \frac{l}{\mu_s},$$

де  $l$  – повна довжина шляху магнітного потоку;  $\delta$  – товщина повітряного зазору;  $\mu$  – «ефективна» магнітна проникність магнітного ланцюга;  $\mu_0$  – магнітна проникність вакуумна;  $\mu_s$  – магнітна проникність матеріали осердя;  $S$  – переріз полюса який утворює зазор.

Приладова система дозволяє проводити аналіз утворення плівок та контролювати переміщення матеріалу відновлення на поверхні деталі, як візуальним так і вібраційним (спектральним) способом. Також схема може проводити вимірювання в процесі роботи та після відновлення деталі. Крім того за допомогою генератора ГЗ-34 та цифрового генератора з частотою

(2...12) Гц створювати умови проходження струму в середовищах з високим електроопором (ПАР).

При випробуванні відновлених спряжених деталей використовуються різні методи контролю відновлення прецизійних деталей. Один з цих методів є метод магнітної індукції з використанням імпульсного модульованого струму.

**У третьому розділі** подальшого розвитку набув метод вимірювання та контролю спряжених деталей.

Для вивчення умов контролю в динамічному режимі розроблена модель, що дає можливість провести моніторинг динаміки утворення поверхневих плівок. Вперше проведено дослідження та розглянуто кінетику руху продуктів приробки на фактичній поверхні контакту (ФПК) в процесі відносного переміщення поверхонь деталі. Для цього досліджували сталі 45 з нормальним навантаженням на зразок, а саме(1; 5; 10) МПа.

Автором розроблена блок-схема етапів локалізації дефекту спряжених деталей (рис. 2). На схемі видно що «розробка методу випробування після відновлення» мало вивчена та відсутні методи вимірювання з мінімальними похибками.

Результати дослідження зношування сталі 40X13 і латуні ЛС59-1 показали (рис.3) зменшення наробітки до 0,08..0,1, також при порівнянні із зношуванням сталі 20. При цьому інтенсивність зношування латуні ЛС59-1 виявилася вдвічі меншою, ніж для сталі 40X13.

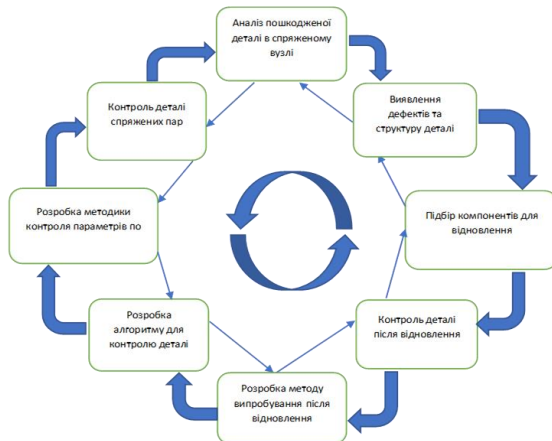


Рисунок 2 - Етапи виявлення локального дефекту спряженої деталі

Поверхня сталі 40X13 та латуні відрізняються різними механізмами утворення плівок. У початковий період проходить вигладжування поверхні деталі сталі 40X13 по поверхні скла.

Сталевий зразок 40X13 накопичує на поверхні продукти зносу за перші 5 хвилин (на швидкості 0,5м/с) до товщини (10...15) мкм, подальше напрацювання, в діапазоні (3...9) км шляху устанавленого режиму роботи поверхня вкривається суцільним шаром захисної плівки.

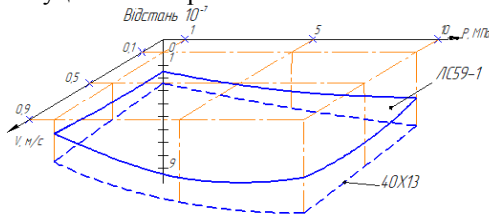


Рисунок 3–Геометричні параметри сталі 40X13 і сплаву ЛС59-1

Розроблено нестандартний засіб вимірювання, а саме приладова система визначення параметрів, як механічних так і фізико-хімічних та геометричних параметрів спряжених деталей.

Виходячи з умов використання матеріалів для прецизійних пар де одна з складових є мідний сплав, в моделюванні використали зразок ЛС59-1. Механізм приробки характеризується перенесенням складових латуні на всій ділянці досліджень.

Розглянутий метод компенсації похибок, який полягає в тому, що вимірювання проводять багато разів таким чином, щоб похибка входила в результати з протилежними знаками, потім її вилучають, розраховуючи середнє значення. При вимірюванні дисперсії випадкового струму та напруги використовується декілька цифрових та аналогових приладів, які мають квадратичну характеристику перетворення. Для випадкового процесу при шорсткості в дискретні моменти часу, оцінка дисперсії  $\tilde{D}$ , визначається відношенням:

$$\tilde{D} = \frac{A^2}{n} \sum_{i=1}^n y_{1i} y_{2i},$$

де  $y_{1i} = y_1(t_i)$ ,  $y_{2i} = y_2(t_i)$  - вибірки в дискретні моменти часу.

Проведено оцінку дисперсії  $\tilde{D}$  стосовно до аналізу випадкових процесів в дискретні моменти часу, при умові, що вибірки  $y_{1i}$ ,  $y_{2i}$  незалежні, так як в залежних вибірках повинен бути розрахунок двомірної щільності вірогідності допоміжних рівномірно розповсюджено випадкових процесів.

Визначена оцінка дисперсії гаусовського випадкового процесу при вимірювання спряжених деталей після відновлення:

$$\begin{aligned} b(D^*) &= \int_{-\infty}^{\infty} g^2(x) \omega(x) dx - D_0 \\ &= -2D_0 \left\{ (1 - \gamma^2)[1 - \Phi(\gamma)] - \frac{\gamma}{\sqrt{2\pi}} - \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2}\right) \right\}, \end{aligned}$$

де  $\gamma = a / \sqrt{D_0}$ , нормований рівень обмежень. При  $\gamma \gg 1$  отримуємо, що зміщення оцінки дисперсії прямує до нуля.

**В четвертому розділі** представлено результати вимірювань після відновлення в поверхнево-активному середовищі ПАР (ПЕГ-400). Визначені умови проходження електричного сигналу крізь робоче середовище з великим електричним опором (до 100 кОм), ПАР концентрацією 75%, є частота струму від 1 кГц до 5 кГц, яку прийнято за несучу. Електричні заряди, що проходять крізь плівку до поверхні металу, «просочуються» по свіжествореним ділянкам ФПК. Вперше проведено модельні випробування металевого зразка в середовищі ПАР, які вказують на переміщення матеріалу складових латунного тіла на поверхню сталі 45 (рис.4). Одночасно при вимірюванні спряженої деталі контролювали вібраційні характеристики поверхні деталі, за допомогою приладу ВШВ-003 та програмного забезпечення «SpektraLab», які вказують, що при напрацюванні найбільш розбалансована система на частоті від 1 кГц до 10 кГц.

Запропоновано метод вимірювання параметрів деталей вихрострумовим методом за допомогою направленої імпульсного модульованого струму високої частоти.

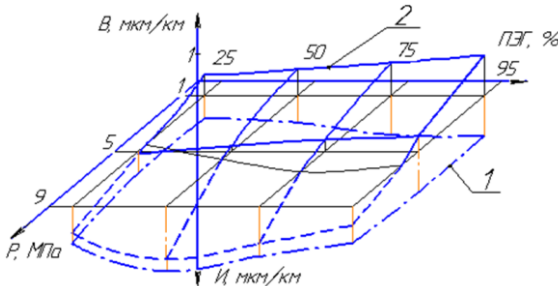


Рисунок 4 - Геометричні параметри при випробуванні сталі 45 по сплаву ЛС59-1

При багатоточкових вимірюваннях спостереження вхідних величин, за допомогою статистичних методів (типу А) проведено оцінку складових невизначеності результату вимірювання:

$$u_A(\bar{\gamma}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{\gamma} - \gamma_i)^2},$$

де:  $n$  – кількість багатоточкових вимірювань;  $\bar{\gamma}$  – середнє значення вхідної величини;  $\gamma_i$  – значення вхідних величин ( $i=1 \dots n$ ).

Коли змінні є незалежними, співвідношення (1) приймає вигляд:

$$u(y(x_{i,j}...)) = \sqrt{\sum_{i=1,m} c_i^2 u(x_i)^2 + \sum_{\substack{i,k=1,m \\ i \neq k}} c_i c_k \cdot u(x_i, x_k)},$$

де:  $u(x_i, x_k)$  є коваріація між  $x_i$  та  $x_k$ , а  $c_i$  та  $c_k$  – коефіцієнти чутливості. Коваріацію пов'язано з коефіцієнтом чутливості  $r_{i,k}$  співвідношенням:

$$u(x_i, x_k) = u(x_i) \cdot u(x_k) \cdot r_{i,k},$$

де:  $-1 \leq r_{i,k} \leq 1$ .

Проведено визначення складових невизначеності за типом В, при відомих даних на похибку приладів  $\pm\delta$ , при умові рівномірного закону розподілу, що визначається за формулою:

$$u_B(\gamma_i) = \delta/\sqrt{3}.$$

Встановлено, що при врахуванні відсутності кореляції між вхідними величинами сумарної невизначеності вихідної величини визначено за формулою:

$$u(\varepsilon) = \sqrt{\sum_m k^2_m (u_{A,m}^2 + u_{B,m}^2)}.$$

Розширена невизначеність оцінена при коефіцієнті охоплення  $k=2$  ( $P=0,95$ ), а саме:  $U = 2 \cdot u(\varepsilon)$ .

Проведено моніторинг умов роботи спряжених деталей за допомогою аналізу вібраційних параметрів у звуковому діапазоні частот. Характеристики величин за допомогою яких проводились вимірювання на приладовій системі представлені в таблиці 1

Таблиця 1

Метрологічні та технічні характеристики приладової системи

№, п/п	Назва величини	Одиниця вимірювання	Значення величини	Відносна похибка вимірювання, %	Середньо – квадрат. відхилення
1	Швидкість	м/с	0,01...0,1	7	0,2
2	Тиск	МПа	1...10	6	0,2
3	Рельєф	мкм	0,16...40	3	0,3
4	Шорсткість	нм	2...6	4	0,12
5	Маса	г	3...9,5	2	0,23

Результати досліджень показали, що запропонована методика компенсації похибки при вимірюванні шорсткості дозволяє оцінити умови утворення геометричних параметрів як візуально, так і за допомогою вібраційних характеристик рис.5, таблиця 2. Це відкриває шлях до активного процесу проведення аналізу роботи та підбору матеріалів.

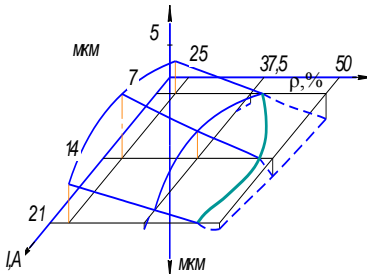


Рисунок 5 – Графік значень геометричних параметрів деталі

Таблиця 2

Значення геометричних параметрів деталі при приборці в залежності від сили імпульсного струму та ПАР,

МКМ			
А/%	25	37,5	50
7	3	-1	-2
14	5	2	-2
21	3	0	-1

Визначено параметри працездатності матеріалів в активному середовищі ПАР та проведено моніторинг зміни поверхонь деталі, а також проведено спектральний аналіз інформативного параметру. Встановлено, що спряжена пара «сталь-латунь» значно збільшує амплітуду сигналу системи на частотах до (5...6) кГц, та зменшує на частотах (10...20) кГц, що вказує на можливість проводити в цехових умовах вимірювання в процесі роботи..

Проведено метрологічну атестацію нестандартних засобів вимірювання, а саме приладової системи, та визначено наступні метрологічні характеристики: амплітудо-частотну та фазо-частотну; похибку вимірювання шорсткості; динамічні характеристики спряжених деталей.

Встановлено що вібраційний сигнал при роботі механізму збільшується починаючи з частоти 1 кГц до 5 кГц. Ефективне вимірювання поверхні деталі настає при дії імпульсного електричного струму (5...8) кГц. Доведено, що розроблена приладова система дозволяє вимірювати швидкість зміни товщини плівки з високою чутливістю та швидкодією. Встановлено, що використання електронної схеми дає можливість автоматично компенсувати, як активні так і реактивні паразитні параметри датчика. Основними впливовими параметрами є насамперед: втрати опору на вихрових струмах ( $R_F$ ) та паразитна ємність датчика ( $C_D$ ).

Для автоматичного компенсування цих параметрів розроблено схему з імпульсною модуляцією різними частотами тестового сигналу та швидкодіючим імпульсним фільтром, який дозволяє виконати операцію компенсування основної частини цих впливових факторів на бездефектній зоні датчика за 0,1 мілісекунду на частоті тестового сигналу (0,1...10) МГц. Обґрунтовано, що цей метод є більш ефективним ніж резонансний, що використовується у вихрострумівих дефектоскопах, наприклад ВД10. Даний спосіб використовується для вимірювання товщини плівки, яка з'являється при відновленні спряжених деталей виготовлених з різних металів. Змінне поле котушки наводить в провіднику матеріалу основи вихрового струму, який створюють в свою чергу магнітне поле. Останнє робить зворотний вплив на котушку і розбалансує таким чином коливальний контур. Ступінь розладу залежить, крім інших факторів, від товщини шару між зондом і матеріалом

основи. Недоліком цього метода є складність реалізації високої чутливості в широкому діапазоні частот. Для усунення цього недоліку була розроблена структурна схема вихрострумове перетворювача та змодельована в програмі Electronics Workbench (рис.6). Особливістю цієї схеми є використання ітераційного інтегруючого перетворювача (ОП) для швидкого та прецензійного перетворення середноспрямованого значення напруги в постійну з точністю нарівні 0.01%. Оскільки ітераційний інтегруючий перетворювач є астатичною системою, він забезпечує більш точне підсилення слабких сигналів. Крім цього, для компенсації паразитної ємності датчика використовується мнержельний ЦАП (МЦАП) з компенсуючою ємністю керований мікроконвертером (МС). При цьому компенсація паразитної ємності відбувається на більш високій частоті для усунення впливу індуктивного опору датчика. Використовуються ОП типу ОРА620.

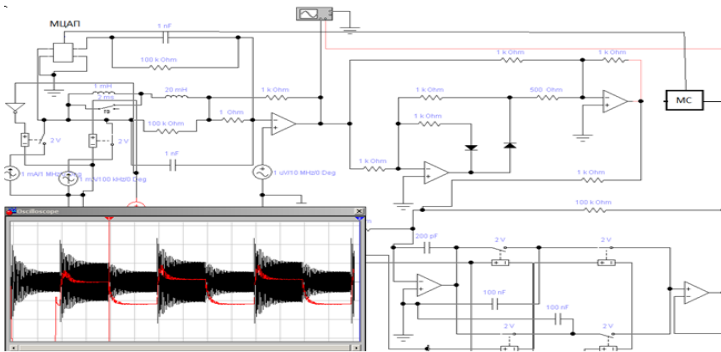


Рисунок 6 - Схема компенсації похибки диференційного датчика змодельоване в програмі Electronics Workbench

Встановлені характеристики середовища ПАР, які здатні пропускати струм (рис. 7). В дослідженнях використали діапазон частот від 20 Гц до 200 кГц та робочу рідину ПАР з концентрацією 75%. Крива 1- синусоїдальний струм; 2 – одноперіодний струм.

Доведено, що електропровідність середовища з високим питомим опором (близько 1Мом/см<sup>2</sup>), унеможливує проходження змінного струму до 1 кГц, для цього використовується розчин 75%. При подачі сигналу частотою (1...10) кГц та модуляцією в 6 Гц фіксується зменшення струму ( $10 \times 10^{-6}$ ) А. Що дає можливість даного метода бути енергоефективним та конкурентоспроможним на ринку новітніх технологій. Визначено миттєву потужність від зміни напруги:  $X_c = 1/\omega C$ , відповідно до рис.7. Показано що із збільшенням частоти в середовищі ПАР опір буде зменшуватися. Тому в зоні роботи механічного вузла струм буде проходити на високих частотах (до 1 МГц). Отримані значення бюджету невизначеності спряжених деталей (табл.3).

Встановлено, що при частоті 1 кГц модульованого сигналу з частотою

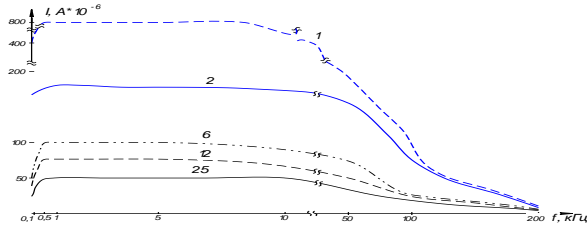


Рисунок 7 - Графік зміни сили струму в залежності від частоти

6 Гц в середовищі ПАР, криві № 2 і 3 амплітуда вібраційного сигналу значно понизилась до (-40...-50) дБ на частоті до 5 кГц і до (-80...-90) дБ на частоті (10...20) кГц. Крива № 1 характеризує частотні параметри установки на режимі холостого ходу (рис.8). З збільшенням частоти струму до 1 кГц досягаємо параметрів приробки на поверхню деталі. В умовах проведення моніторингу роботи сталі20по склу в середовищі ПАР, з характеру поверхневих плівок встановлено, що:

- робота при подачі сигналу на частоті 1 кГц, характеризується плівками до (8...15) мкм товщиною (рис.3), які розподіляються по площині приблизно на 70 %;

- утворені плівки мають товщину (0,5...2) мкм, що ефективно діє на процес контролю спряжених деталей після відновлення, зменшує похибку.

Таблиця 3

Бюджет невизначеності вимірювання спряженої деталі

Вихідна величина	Оцінка вихідної величини	Сумарна стандартна невизначеність	Імовірність, P	Розширена невизначеність	Складові невизначеності, які не ввійшли в модельне рівняння	Стандартна невизначеність, $U_{nom}$
1	2	3	4	5	6	7
Відхилення від форми, S, мкм	0,145	12,2	0,98	21,2	0,2	0,5
Струм, А	22,2	0,3	0,98	0,15	1,6	1,5
Напруга, В	55	1,2	0,95	1,8	0,35	0,24



Рентгенометричне дослідження проведено на монохроматичному  $\text{CuK}\alpha$  – випромінюванні на дифрактометрі ДРОН-УМ1. Частота сигналу до 1 кГц, вказують на зміну розміру кристалічної ґрадки від 2,8669 Å до 2,8678 Å Fe-alpha фази.

На рис.9 показано рентгенометричне дослідження, видно що на деталі з'являється до 10 % Fe-gamma з параметром кристалічної ґрадки 3,6010 Å<sup>0</sup>.

На (рис.11) представлено тривимірне кольорове зображення шестерні з визначенням дефектів на поверхні видно, що після відновлення контроль спряжених пар необхідно проводити в цехових умовах, так як нерівномірно проходить випробування.

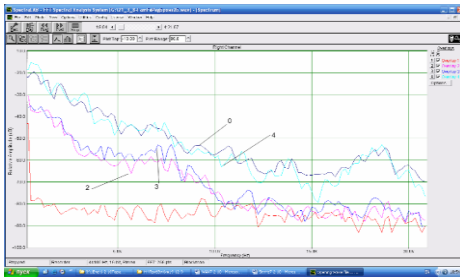


Рисунок 8-Параметри частотного сигналу в спряженому вузлі з модульований частотою 1000 Гц

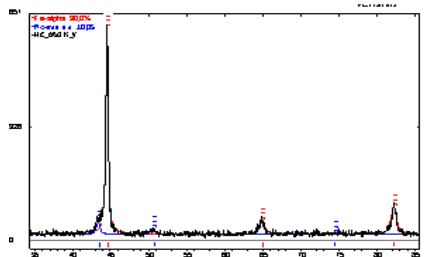


Рисунок 9- Аналіз сигналу поверхні сталі 20

З отриманих результатів дослідження на зносостійкість спряжені пари сталі 20 по ЛС59-1 в середовищі ПАР концентрацією 75% з міддю на (рис. 10) видно, що процес вимірювання після відновлення спряжених пар більш ефективно проходить при використанні імпульсного модульованого струму.

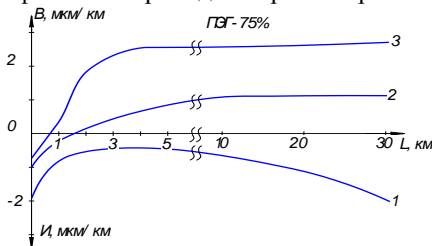


Рисунок 10 - Геометричні параметри спряженої пари сталі 20 по сплаву ЛС59-1 в умовах частотної модуляції

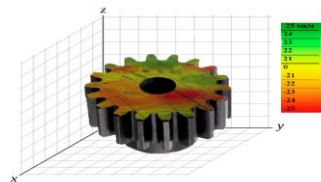


Рисунок 11 - Кольорова карта геометричних параметрів відхилення від форми та розташування поверхні

Використовування приладової системи та розробленого метода з використанням імпульсного модульованого струму дає можливість зменшити

похибки вимірювання геометричних параметрів та шорсткості деталі в процесі відновлення на 10 %.

## ВИСНОВКИ

В результаті проведених в дисертаційній роботі теоретичних та експериментальних досліджень отримані такі наукові та практичні результати:

1. Вперше проведено аналіз методів вимірювання спряжених деталей та проаналізовано похибки які виникають при їх випробуванні після відновлення. Введено та обгрунтовано поняття метрологічного забезпечення випробувань при відновленні спряжених пар в реальному часі.
2. Вперше розроблено метод визначення ідентифікації геометричних параметрів для оперативного управління якістю, який відрізняється від чинних комплексним застосуванням статистичної інформації та дає можливість реалізації нового класу обладнання на основі імпульсного модульованого струму.
3. Вперше розроблено модель системи контролю для забезпечення якості прецизійних деталей з урахуванням зовнішніх дестабілізуючих факторів, яка на відміну від раніше відомих, дозволяє реалізувати принцип гнучкого проектування прецизійних деталей за рахунок використання статистичної інформації та дає можливість підвищити точність контролю на 10 %.
4. Запропоновано метод випробування спряжених деталей із застосуванням вихрострумowego ефекту, який на відміну від раніше відомих базується на використанні імпульсного модульованого струму та дає можливість усунення паразитних похибок при використанні цифрового фільтра.
5. Розроблено новий метод випробування спряжених пар на основі імпульсного модульованого струму з урахуванням інтегральної оцінки узагальненого показника якості на базі визначення вірогідності аномальних процесів відхилення від форми та розташуванням поверхонь, дослідження фізичних явищ та складу і властивостей матеріалу, а також матеріалу для створення стандартних зразків деталей про їх придатність.
6. Подальшого розвитку отримав метод прогнозування якості випробування спряжених деталей, який на відміну від існуючих методів на основі кількісного та інформаційного, що дає можливість підвищення ефективності метрологічної надійності вимірювальної системи та експериментально підтверджено підвищення точності прогнозування.
7. Розроблений стандарт підприємства для випробування спряжених деталей в цехових умовах після відновлення на основі застосування нового класу обладнання на основі імпульсного модульованого струму.

**СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Свирид М.М. Комплекс для дослідження трибологічних параметрів вузла тертя / Паращанов В.Г., Онищенко А.В.// Проблеми тертя та зношування. –2006. – Вип.45. – С. 54-62.
2. Свирид М.М. Мониторинг трибологических характеристик в полиэтиленгликоле / В.Г. Паращанов, Л.Б. Лучук // Проблеми тертя та зношування. – 2007. – Вип.49, т.1. – С.111-117.
3. Свирид М.М. Моніторинг утворення топографії поверхонь при терті без змащування, під дією магнітного поля / В.Г. Паращанов, Л.Б. Лучук // Наука і молодь, прикладна серія: збірник наукових праць. - 2007. – С.34-37.
4. Свирид М.М. Трибологічні властивості електроіскрових покриттів на основі титану і молібдену / М.М. Свирид, Е. Вайс, Н. Радек, В.Г. Паращанов, С.М. Задніпровська // машинознавство: 2008. - №1 (127). – С.41-45.
5. Свирид М.М. Енергетична концепція стабілізації стану трибосистеми / М.М. Свирид, І.А. Кравець, С.М. Занько, Л.Б. Приймак, В.Г. Паращанов // Проблеми трибології. – 2008. – №4 (50) – С. 13-18.
6. Свирид М.Н. Мониторинг трибологических параметров узла трения в условиях переноса массы / М.Н. Свирид, В.Г. Паращанов, И.Ю. Беспалов // Проблеми тертя та зношування. – 2009. – Вип. 51. – С. 25 – 32.
7. Свирид М.М. Механізм відновлення поверхні тертя дією магнітного поля на робоче середовище модифіковане діамгнетиком / М.М. Свирид, І.Л. Трофимов, Л.Б. Приймак, В.Г. Паращанов // "Східно-Європейський журнал передових технологій". - 2013. - №4/5 - С. 24 – 27.
8. Паращанов В.Г. Аналіз методів та засобів вимірювання шорсткості деталей при переміщенні / В.Г. Паращанов // Вісник Інженерної академії України. – 2018. - №3 – С.107-111.
9. Квасніков В.П. Метод алгоритмічної компенсації похибки вимірювання в трибосистемах / В.П. Квасніков, В.Г. Паращанов // Вісник Інженерної академії України – 2019. - №2. – С.19-23.
10. Паращанов В.Г. Метрологічне забезпечення проведення випробування прецизійних деталей / В.Г. Паращанов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2019.- №2 – С.46-49.
11. Патент № 36600 (Україна), МПК G01N 3/56. Пристрій для дослідження тертя та зношування [Текст] / Свирид М.М., Занько С.М., Паращанов В.Г., Задніпровська С.М., Приймак Л.Б. // Реєстрац. номер заявки U200809663. Оpubліковано 27.10.2008, Бюл. № 20, 2008 р.
12. Патент № 36601 (Україна), МПК G01N 3/56, Спосіб відновлення поверхні тертя [Текст] / Свирид М.М., Кравець І.А., Паращанов В.Г., Занько С.М., Задніпровська С.М. // Реєстрац. номер заявки U200809664. 27.10.2008, Бюл. № 20, 2008 р.

13. Патент №54490 (Україна), МПК G01N 3/56. Спосіб відновлення поверхні тертя в рідинах з високим питомим електроопором [Текст] / Свирид М.М., Кравець І.А., Паращанов В.Г. Сидоренко О.Ю. // Реєстрац. номер заявки U201006047 10.11.2010. Бюл.№21, 2010 р.

14. Parashchanov V.G. Structural Changes of the friction surface due to action of pulse modulated curren/ A.P. Kudrin, M.N. Svirid, V.G. Parashchanov, A.Y. Yakobchuk // “THE FIFTH WORLD CONGRESS AVIATION IN THE XXI-st CENTURY”. – Kyiv: NAU, 2012. - P.1.4.35-1.4.38.

15. Паращанов В.Г. Метрологічне забезпечення проведення випробування прецизійних деталей після їх відновлення [Текст] / В.Г.Паращанов // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2020). XIII міжнародна наукова-практична конференція 19-20 травня 2020 року, Київ, Україна.- К.:НАУ, 2020.- С.155-156.

### АНОТАЦІЯ

**Паращанов В.Г. Метрологічне забезпечення випробування спряжених деталей на основі імпульсного модульованого струму - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.02 – «Стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення». Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса, 2020.

Науково обґрунтовано новий підхід щодо метрологічного забезпечення спряжених пар за рахунок прогнозування безвідмовності деталей при зношування з використання статистичної інформації в умовах обмеженого обсягу виміральної інформації.

Вперше введено та обґрунтовано поняття метрологічного забезпечення випробувань в спряжених деталях, при контролі та вимірюванні зносу та відновлення в спряжених парах в реальному часі, що забезпечує моделювання та розрахунок складних схем синтезу шарико-підшипникового вузла.

Отримав подальший розвиток метод якості випробування спряжених пар за рахунок підвищення інтервальної оцінки узагальненого показника якості на базі визначення вірогідності аномальних процесів що характеризують значення зовнішнього вигляду по геометричним параметрам виробу з тривимірним зображенням пошкоджень та відновлення деталей.

Подальший розвиток отримало оперативне управління якістю, розроблено метод ідентифікації визначення геометричних параметрів який відрізняється від існуючих об'єднаним застосування статистичної інформації та результатів випробування.

Вперше для забезпечення якості в спряжених вузлах розроблено модель приладової системи, яка дозволяє реалізувати принцип гнучкого

проектування окремих деталей за рахунок прогнозованого значення вагового коефіцієнта обходу деталі при вимірюванні.

Розроблено метод прогнозування якості випробування спряжених пар та експериментально підтверджено підвищення точності прогнозування який на відміну від існуючих методів реалізує підвищення ефективності та метрологічної надійності вимірювальних комплексу з застосуванням електронних вимірювальних приладів.

*Ключові слова:* метрологічне забезпечення, вимірювання при випробуванні, фільтрація паразитних сигналів, спряжені деталі, похибка вимірювання, шорсткість, геометричні параметри.

## АННОТАЦІЯ

Паращанов В.Г. Метрологическое обеспечение испытания сопряженных деталей на основе импульсного модулированного тока - Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.01.02 - «Стандартизация, сертификация и метрологическое обеспечение». Одесская государственная академия технического регулирования и качества, м. Одесса, 2020.

Научно обоснован новый подход к метрологическому обеспечению сопряженных пар за счет прогнозирования безотказности деталей при износе по использованию статистической информации в условиях ограниченного объема измерительной информации.

Впервые введено и обосновано понятие метрологического обеспечения испытаний в соединительных узлах, при контроле после их восстановления в сопряженных парах в реальном времени, обеспечивающие моделирование и расчет сложных схем синтеза шарикоподшипникового узла.

Получил дальнейшее развитие метод качества испытания сопряженных пар за счет повышения интервальной оценки обобщенного показателя качества на базе определения достоверности аномальных процессов характеризующие значение внешнего вида по геометрическим параметрам изделия с трехмерным изображением поврежденных деталей.

Дальнейшее развитие получило оперативное управление качеством, Разработан метод идентификации определения геометрических параметров отличающийся от существующих объединенным применением статистической информации и результатов испытания.

Впервые для обеспечения качества сопряженных узлах разработана модель прибора, которая позволяет реализовать принцип гибкого проектирования отдельных деталей за счет прогнозируемого значения весового коэффициента обхода детали при измерении.

Разработан метод прогнозирования качества испытания сопряженных пар и экспериментально подтверждено повышение точности прогнозирования который в отличие от существующих методов реализует

повышения эффективности и метрологической надежности измерительных комплекса с применением электронных измерительных приборов.

*Ключевые слова:* метрологическое обеспечение, измерения при испытании, фильтрация паразитных сигналов, сопряженные детали, погрешность измерения.

## SUMMARY

**Parashchanov VG Metrological support of testing of conjugate parts on the basis of pulse modulated current - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.**

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.01.02 - "Standardization, certification and metrological maintenance". Odessa State Academy of Technical Regulation and Quality, Odessa, 2021.

A new approach to the metrological support of conjugate pairs by predicting the failure of parts during wear using statistical information in a limited amount of measurement information is scientifically substantiated.

For the first time the concept of metrological support of tests in tribosystems, at control and measurement of wear and restoration in conjugated pairs in real time is introduced and substantiated, providing modeling and calculation of complex schemes of synthesis of ball-bearing unit.

Received a further method of quality testing of conjugated pairs by increasing the interval evaluation of the generalized quality indicator based on determining the probability of anomalous processes characterizing the value of appearance on the geometric parameters of the product with a three-dimensional image of damage and restoration of parts.

Further development of operational quality management, developed a method of identifying the definition of geometric parameters, which differs from the existing combined application of statistical information and test results.

For the first time to ensure quality in conjugate nodes, a model of the instrument system was developed that allows to implement the principle of flexible design of individual parts due to the predicted value of the weight of the bypass of the part during measurement.

A method for predicting the quality of conjugate pair and experimental tests has been developed, and an increase in the accuracy of prediction has been confirmed.

*Keywords:* metrological support, measurement during test, filtering of parasitic signals, conjugate details, measurement error.