

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ЛЕЩЕНКО ЮЛІЯ ПАВЛІВНА

УДК 004.89:531.7 (043.3)

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ
ВЕЛИЧИН**

05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті Міністерства 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, доцент
Тихан Мирослав Олексійович,
Національний університет
«Львівська політехніка»,
доцент кафедри приладів
точної механіки;

кандидат технічних наук, доцент
Ігнатенко Павло Леонідович,
Чернігівський національний технологічний
університет, доцент кафедри технологій
машинобудування та деревообробки.

Захист відбудеться "15" квітня 2016 р. о 14³⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.07 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги 37, корп. 1, ауд. 317.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги 37.

Автореферат розісланий "15" березня 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
к.т.н., доцент

Ю.В. Киричук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Найважливішу роль у забезпеченні якості та конкурентоспроможності продукції практично всіх галузей народного господарства відіграє контрольно-вимірвальна техніка, в якій особливе місце займають засоби вимірювання та контролю геометричних параметрів деталей, вузлів машин і механізмів. Питанням розробки інформаційно-вимірвальних систем, методів, засобів та алгоритмів вимірювання механічних величин, програмно-математичного забезпечення вимірвальних систем, автоматизації та оптимізації процесів вимірювання присвячені роботи відомих українських вчених Є.Т. Володарського, О.М. Новікова, П. П. Орнатського, І. Б. Сіроджа, Ю.О.Скрипника, Ю. М.Туза та ін. Значні результати в області метрології, теорії похибок, вимірювання механічних величин внесли вчені близького та далекого зарубіжжя А. Е. Кобринський, Л. М. Бойчук, В. С. Медведєв, А. Г. Лєсков, А. С. Ющенко, В. Л. Воронов, В. М. Лохін, І. В. Мірошник, Ю. А. Борцов, Д. В. Пузанков, І. Б. Юнгер, В. І. Соколов, А. А. Гапшис, А. Ю. Каспарайтис, І. М. Макаров, В. А. Ратміров, М. Б. Модестов, В. А. Раманаускас, М. Kazerooni, M. Liu, M. Vukobratovic та ін.

Більшість теоретичних та прикладних досліджень нових прецизійних методів автоматизованого вимірювання з мінімальною похибкою не дістали належного практичного застосування. Виходячи з цього, розробка інтелектуальних вимірвальних систем механічних величин та підвищення їх метрологічних характеристик, є актуальним питанням сучасного розвитку приладобудування.

Подальші дослідження приладів та систем для вимірювання механічних величин, технічних та метрологічних характеристик вказують на необхідність підвищення точності та швидкодії вимірювань. Дані дослідження направлені на створення методів, методик та засобів вимірювання механічних величин на базі створення нових універсальних та перспективних інтелектуальних вимірвальних систем з визначенням складових похибок вимірювання, їх автокомпенсації з використанням експертних систем.

Сучасні вимірвальні системи виконуються із застосуванням передового обладнання, зазвичай, із комп'ютерним управлінням і зберіганням даних. Вимірвальні системи різних типів дозволяють отримувати інформацію про точки реальних координат геометричних параметрів об'єктів з високою точністю, здійснюють комп'ютерну корекцію похибок, зберігання даних про результати та процес вимірювання. Реалізується обробка віртуальних моделей деталей з метою аналізу відхилень їх поверхонь від номінальних, заданих конструктором.

Тому, на даному етапі гостро стає питання про створення інтелектуальних вимірвальних систем, які містять, на відміну від інформаційно-вимірвальних систем, базу даних, базу знань та зразкову вимірвальну систему з блоками незалежної перевірки та самонавчання при вимірюванні геометричних параметрів об'єктів, деформації, переміщень та ін.

Таким чином, наукова задача розробки методів, засобів, методик та технічної реалізації інтелектуальних вимірвальних систем механічних величин є актуальною та має важливе значення для розвитку приладобудування, метрології в цілях вирішення широкого кола вимірвальних задач.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій відповідно до тематичних планів і науково-дослідних робіт Національного авіаційного університету, відповідно до Закону України № 433-IV “Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні”, зокрема за напрямом “Приладобудування, як основа високотехнологічного оновлення всіх галузей виробництва”, а також відповідно до держбюджетної тематики Міністерства освіти і науки України в науково-дослідній роботі № 655-ДБ10 “Розробка методології системи інтелектуального керування мобільними роботами” (номер держ. реєстрації 0110U000211, 2012 р.), де автор була виконавцем підрозділів п. 3.1 та в науково-дослідній роботі № 864-ДБ13 “Теорія та принципи побудови інтелектуальних вимірювальних систем для контролю геометричних параметрів високоточних деталей” (номер держ. реєстрації 0113U000083, 2014 р.), де автор була виконавцем підрозділу 3.2.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення основ створення інтелектуальних систем вимірювання механічних величин, а саме геометричних параметрів деталей, деформації та переміщень.

Для досягнення поставленої мети вирішені наступні завдання:

- аналіз існуючих методів, засобів та методик вимірювань інтелектуальними системами механічних величин та програмно-апаратних засобів реалізації вимірювальних задач;
- теоретичне обґрунтування, розробка методик вимірювання механічних величин таких, як геометричні параметри деталей, деформація та переміщення на базі створення універсальних методів вимірювання механічних величин і розробки методик проектування систем із заданими метрологічними характеристиками;
- удосконалення існуючих координатно-вимірювальних машин на основі розробки нових вимірювальних систем та їх структур з використанням експертних систем з розширеним діапазоном, точністю та швидкодією вимірювання з підвищеними метрологічними характеристиками;
- розробка методологічних засад проектування інтелектуальних вимірювальних систем, виконання теоретичних та експериментальних досліджень вимірювання геометричних параметрів деталей;
- розробка математичних моделей руху маніпулятора з датчиком до об'єкту вимірювання;
- розробка програмно-математичного забезпечення інтелектуальної системи вимірювання механічних величин для реалізації запропонованих методів та моделей.

Об'єкт дослідження – процес вимірювання механічних величин, а саме геометричних параметрів деталей, деформації, переміщень на базі створення інтелектуальних систем.

Предмет дослідження – інтелектуальна система вимірювання механічних величин.

Методи дослідження. При розв'язання поставленої задачі використані методи, що ґрунтуються на теорії вимірювальних систем та координатно-вимірювальних машин (для розділів 1,2), методах імітаційного моделювання та

програмно-математичного забезпечення (для розділу 4), методах створення інтелектуальних вимірювальних систем та методах управління маніпуляторами (для розділу 2, 3), теорії похибок (для розділу 3).

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше обґрунтовано поняття інтелектуальної вимірювальної системи механічних величин, як універсальної системи з підвищеними метрологічними характеристиками, що дає можливість формалізувати нові структури та розробити нові правила експертної системи;

2. Вперше розроблено нелінійну динамічну модель маніпулятора інтелектуальної вимірювальної системи механічних величин, які відрізняється від відомих тим, що враховує пусковий момент маніпулятора і дає можливість підвищити точність позиціонування сенсора;

3. Набули подальшого розвитку теоретичні основи побудови інтелектуальної вимірювальної системи механічних величин на основі створення нових структурних та функціональних схем з використанням бази даних та бази знань, блоку незалежної перевірки, зразкової підсистеми, а також враховують кореляційні зв'язки між дискретними вимірюваннями та змінами дестабілізуючих факторів що дає можливість зменшити похибку на (7-18)% та завадозахищеність;

4. Удосконалено математичні моделі процесу вимірювання механічних величин, які відрізняються від раніше відомих тим, що враховано дію дестабілізуючих факторів і дають змогу визначити положення та позиціонування рухомих ланцюгів системи під час експлуатації системи вимірювання;

5. Удосконалено математичні моделі розрахунку похибок вимірювання механічних величин з врахуванням рухів виконуючих органів та сукупної компенсації дестабілізуючих параметрів (температури, вібрації, вологості, запиленості та загазованості), що дає змогу розширити діапазон вимірювання, підвищити швидкодію і точність вимірювання з підвищеними метрологічними характеристиками систем;

Практичне значення одержаних результатів роботи для галузі приладобудування полягає у розробці оптимальних конструктивних параметрів інтелектуальних вимірювальних систем для ряду технологічних процесів, вимірювання механічних величин, створення еталонної бази України.

Обґрунтовано раціональний варіант побудови інтелектуальної вимірювальної системи та розроблено методику вимірювання геометричних параметрів деталей, деформації, переміщень, що забезпечують високу точність (до 0,2 мкм) при мінімальному часі вимірювання (до 0,5 с).

Розрахунки та методики, які використані при проектуванні нових інтелектуальних вимірювальних систем та можуть бути прийняті для технічних рішень в цілях підвищення метрологічних характеристик приладів і систем (відносна похибка до 0,3%), атестації вимірювальних каналів інформаційно-вимірювальних систем, що забезпечить створення сучасних метрологічних лабораторій для приладобудівних підприємств та науково-дослідних інститутів.

До найсуттєвіших практичних результатів дослідження належить апробація проектування експериментальної інтелектуальної вимірювальної системи лінійно-

кутових величин. Експериментальним шляхом проведена оцінка ефективності розроблених методів та способів синтезу інтелектуальної вимірювальної системи.

Основні теоретичні і практичні результати досліджень можливо використати у вищих навчальних закладах при підготовці інженерів-метрологів, у науково-виробничих об'єднаннях, конструкторських бюро та метрологічних службах підприємств при розробці і вдосконаленні систем вимірювання механічних величин таких, як геометричні параметри об'єктів, переміщення, деформації та інших.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені у практичні рекомендації щодо використання наукових розробок на Публічному акціонерному товаристві «Науково-виробничого об'єднання» «Київський завод автоматики ім. Г.І. Петровського», м. Київ (Акт впровадження від 03.12.2015 р.) та на держаному підприємстві «Завод 410 цивільної авіації», м. Київ (Акт впровадження від 22.12.2015 р.). Результати дисертації впроваджено у навчальному процесі на кафедрі комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного університету (Акт впровадження від 18.12.2015 р.).

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих в співавторстві, такий:

- розроблено інформаційне та математичне забезпечення процесу вимірювання, а саме базу даних про вимірювання переміщень, лінійно-кутових розмірів і бази знань алгоритмів обробки вимірюваних величин [1];
- запропоновано основні компоненти вимірювальних роботів [14];
- запропоновано процес вимірювання лінійно-кутових розмірів з використанням інтелектуальних вимірювальних роботів [15];
- розроблено метод вимірювання геометричних параметрів деталей з підвищеною точністю вимірювання координатно-вимірювальними роботами [16];
- проаналізовано роботу індуктивної та фотоелектричної вимірювальної системи [19].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідались і обговорювались на: X Міжнародній науково-технічній конференції «ABIA-2011» (Київ, 2011 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції «Обробка сигналів і негаусівських процесів» (Черкаси, 2011 р.); науково-практичній конференції «Сучасні проблеми розбудови Збройних Сил України» (Київ, 2012 р.); VI, VII, VIII, IX Міжнародній науково-практичній конференції «Військова освіта і наука: сьогодення і майбутнє» (Київ, 2010, 2011, 2012, 2013 рр.); I науково-практичній конференції «Інформаційно-вимірювальні технології, технічне регулювання та менеджмент якості» (Одеса, 2010 р.); I Міжнародній науковій конференції пам'яті професора В. Поджаренка (Вінниця, 2011 р.); VII Міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія та вимірювальна техніка» (Харків, 2012 р.); V Міжнародній науково-практичній конференції «Інтегровані інтелектуальні робото технічні комплекси» (Київ, 2012 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2012 р.); XII Міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування: стан і перспективи» (Київ, 2013 р.); The fifth world congress "Aviation in the XXI-st century" "Safety in Aviation and Space Technologies" (Kyiv,

2012 у.); Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених, ад'юнктів, слухачів, курсантів і студентів "Сучасні проблеми розбудови Збройних Сил України" (Київ, 2013 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених, ад'юнктів, слухачів, курсантів і студентів «Актуальні завдання гуманітарного, фінансово-економічного, правового, матеріально-технічного та лінгвістичного забезпечення підрозділів та частин Збройних Сил України» (Київ, 2014 р.); II Міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (Вінниця, 2013 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 25 наукових праць, з них: 8 статей у провідних фахових науково-технічних виданнях, 7 одноосібних (1 стаття у виданні України, яке включено до міжнародної наукометричної бази даних «Index Copernicus»), 17 тез доповідей на міжнародних конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і 5 додатків. Загальний обсяг роботи складає 162 сторінки, 34 рисунки, 6 таблиць, список використаних джерел з 179 найменувань, додатки на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі відзначено актуальність теми дисертаційної роботи, напрямки, мета і задачі дослідження зв'язок роботи з науковими планами, програмами, темами. Викладено основні положення, які виносяться на захист, наукова новизна і практичне значення досліджень, відомості про апробацію та публікацію основних результатів роботи, її обсяг та структуру.

У першому розділі дисертаційної роботи проведено аналіз літературних джерел, розглянуто історію розвитку та наукові досягнення у сфері інформаційно-вимірювальних систем механічних величин.

Показано, що традиційні методи, методики та математичні моделі для контролю при сучасних засобах технічного та програмного оснащення, виявляються недостатньо ефективними і не дозволяють повною мірою задіяти можливості нових технологій вимірювань.

Розглянуті методи контактних та безконтактних вимірювань геометричних параметрів об'єктів та основні характеристики сучасних засобів їх вимірювання. Обґрунтовано основні напрямки розробки інтелектуальних вимірювальних систем механічних величин з алгоритмічною обробкою та зберіганням інформації.

На основі результатів аналітичних досліджень сформульовано загальний підхід до створення нових засобів вимірювання з використанням інтелектуальних систем з підвищеними метрологічними характеристиками, моделей та методів вимірювання механічних величин.

У другому розділі запропоновано функціональну схему інтелектуальної вимірювальної системи механічних величин (лінійно-кутових, деформації, переміщення та ін.) за якою здійснено математичний опис. Приведено та досліджено математичну модель траєкторії рухів маніпуляторів, що здійснюють пересування сенсорів системи.

Запропонована нова структура інтелектуальної вимірювальної системи, що показана на рис. 1. З вимірювальної головки первинна інформація поступає на

комунікаційний блок з послідуною її обробкою і представляється у вигляді фактичних параметрів точок поверхні, що контролюється, з відхиленням цих параметрів від дійсних по трьом координатам з певною похибкою.

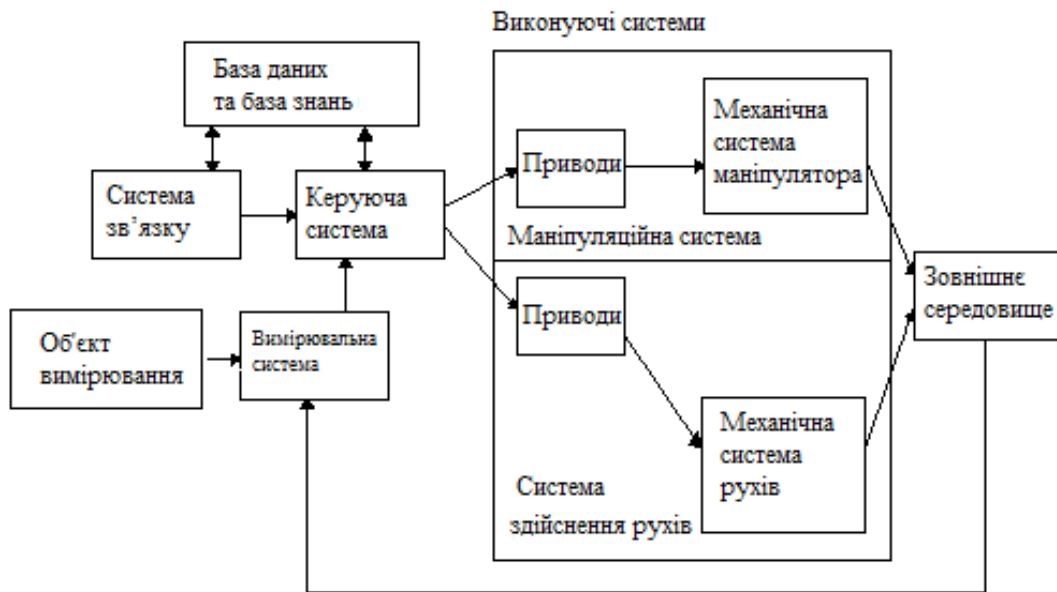


Рисунок 1 – Структурна схема інтелектуальної вимірювальної системи

Обґрунтовано, що бази даних та знань повинні містити інформацію про послідовність дій, позиції і час виконання операцій, набір об'єктів вимірювання та зразкових значень вимірюваної величини.

Розроблені алгоритми процесу вимірювання лінійно-кутових величин з використанням інтелектуальної вимірювальної системи.

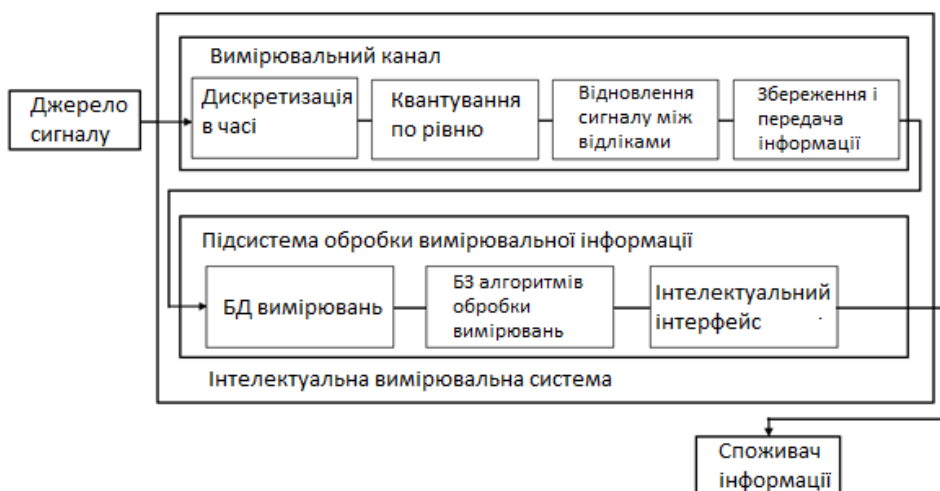
У третьому розділі розроблений алгоритм процесу вимірювання інтелектуальної вимірювальної системи, який сформовано на базі принципів функціонування експертних систем і забезпечує оптимальну тривалість процесу вимірювання та обробки інформації (рис. 2).

Для реалізації описаної схеми роботи інтелектуальної вимірювальної системи повинна включати у свій склад такі основні частини:

- виконавчу, що реалізовує вибраний оптимальний алгоритм обробки вимірювань;
- базу даних вимірювань, що містить відрахунки, отримані з датчиків по каналу зв'язку, а також інформацію про характер завдання, про об'єкти та умови вимірювань, необхідної точності вимірювань, вказаним вимогам та обмеженням;
- базу знань, що включає в себе всі можливі алгоритми обробки вимірювань;
- інтелектуальний інтерфейс, що містить все необхідне програмне забезпечення для отримання вихідної інформації, спілкування з користувачем, використання знань, забезпечення необхідної точності вимірювань, керування виконавчою частиною і видачі результатів обробки вимірів.

Як правило, виконавча частина, БД вимірювань, БЗ алгоритмів обробки вимірювань та інтелектуальний інтерфейс об'єднуються загальною інтерфейсною шиною. У результаті до споживача виводяться отримані характеристики сигналів з оцінкою їх похибок у вигляді порівняльних таблиць і графіків.

Інформаційні процеси, що протікають у інтелектуальній вимірjuвальній системі, відображені на рис 3.



Розроблено новий спосіб корекції похибок інтелектуальної вимірювальної системи механічних величин. Структурну схему такої система показано на рис. 4.

Принцип роботи полягає в організації додаткового такту корекції кожного підрахунку сигналу. Скорегований код

$$N_c = 2N_i - N_z, \quad (1)$$

де N_z - залишковий код.

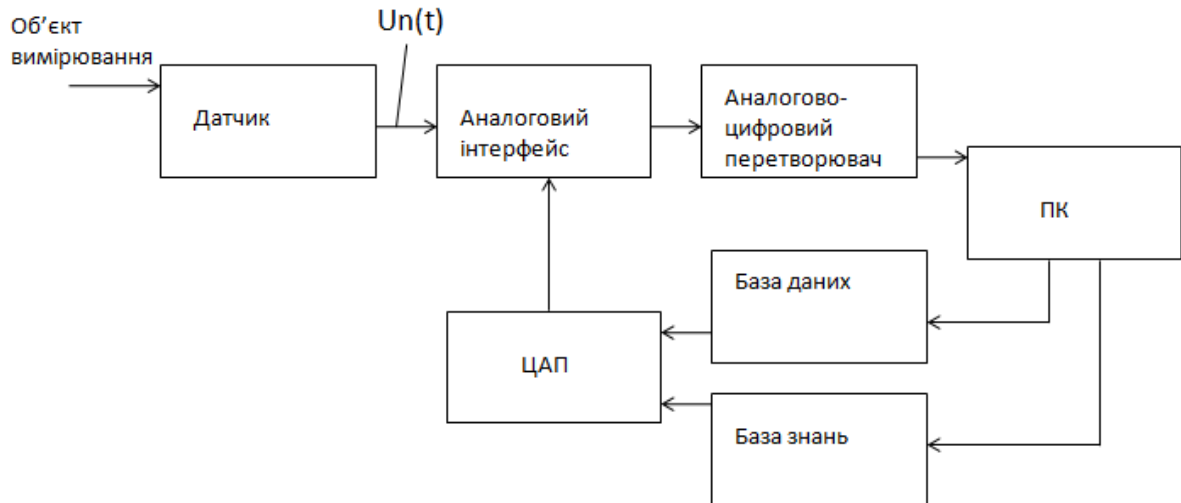


Рисунок 4 – Структурна схема інтелектуально-вимірювальної системи з автоматичною корекцією систематичних похибок

Обґрунтовано, що на етапі проектування інтелектуальних вимірювальних системах доцільно використовувати експертні системи.

База знань в експертній системі призначена для збереження довгострокових даних, що описують область, яка розглядається, і правил, що описують перетворення даних цієї системи.

Головним в експертній системі є алгоритм, що здійснює пошук у базі знань, за певними правилами, для отримання рішення.

Запропоновано 15 правил для бази знань, чотири основних з яких є:

- Таблиця рухів по кожній координаті «вперед», «назад», «вліво», «вправо» по кожній із трьох координат;

- У таблиці правильних траєкторій існує траєкторія з початком $\tilde{j}^0$ і кінцем $\tilde{j}^N$, які близькі до j^0 і j^N , тоді необхідно обрати траєкторію $j(j^0, \tilde{j}^0, \tilde{j}^N, j^N, m)$, де $j(j^0, \tilde{j}^0, \tilde{j}^N, j^N, m)$ - траєкторія, що проходить послідовно через точки $j^0, \tilde{j}^0, \tilde{j}^N, j^N, m$; m - параметр довжини дуги;

- У таблиці правильних траєкторій не існує траєкторії з початком $\tilde{j}^0$ і кінцем $\tilde{j}^N$, які близькі до j^0 і j^N . Тоді, використовуючи таблицю правильних траєкторій, знайти граф, що з'єднує j^0 та j^N , а також відповідну даному графу траєкторію;

- Якщо не існує траєкторій, отриманих за допомогою описаних вище правил, тобто близьких точок, що є в таблиці правильних траєкторій, тоді необхідно побудувати нову проміжну точку за допомогою заданого алгоритму.

Обґрунтовано, що можливо встановлювати і більш складні правила, які моделюються під час процесу навчання.

Показано, що інтелектуальна вимірювальна система дозволяє проводити вимірювання деталі і відразу ж виводити протокол результату. Перевага цієї

системи полягають в тому, що вона «запам'ятовує» геометричні параметри деталі. При проведенні подальших вимірювань чутливий наконечник підводять до контрольованої точки, і далі система працює в автоматичному режимі.

Показано, що у процесі роботи з експертною системою користувач має можливість поповнювати базу знань - «навчати» систему. Показано, що в інтелектуальних вимірювальних системах передбачена експертна підсистема управління та планування процесу вимірювання механічних величин, яка представляє собою базу знань з плануванням траєкторії обходу деталі, методик та моделей вимірювання. Одночасно база знань містить знання про оригінальність конструкції деталей та методики проведення вимірювань, що дають можливість проводити вимірювання деталей складної поверхні з високою точністю.

Похибки вимірювання лінійних величин представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння похибок вимірювання лінійних величин

№ п/п	Метод вимірювання	Відносна похибка вимірювання існуючих вимірювальних системи, %	Відносна похибка вимірювання розробленої інтелектуальної вимірювальної системи, %
1	Метод торкання	1,3	0,5
2	Диференційний метод порівняння з мірою і стеження за поверхнею	1,5	0,7
3	Нульовий метод	0,5	0,3

На рис. 5 показано структуру експертної системи реального часу вимірювання лінійно-кутових величин.

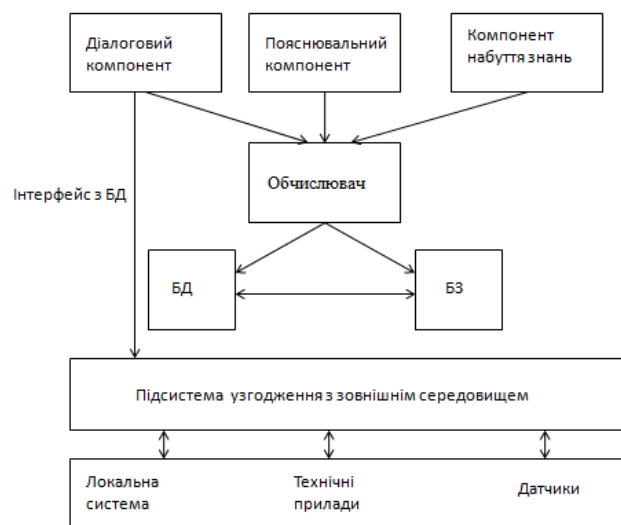


Рисунок 5 – Структура експертної системи реального часу вимірювання лінійно-кутових величин

Обчислювач, використовуючи вихідні дані з робочої пам'яті та знання із бази знань, формує таку послідовність правил, які, будучи застосованими до вихідних даних, призводять до вирішення завдання.

Компонент набуття знань автоматизує процес наповнення експертної системи знаннями, здійснюваний користувачем-експертом.

Показано, що пояснювальний компонент відображає, як система отримала розв'язок задачі (або чому вона не отримала рішення) і які знання вона при цьому використовувала, що полегшує експерту тестування системи та підвищує довіру користувача до отриманого результату. Діалоговий компонент орієнтований на організацію спілкування з користувачем як у ході вирішення завдань, так і в процесі набуття знань і пояснення результатів роботи.

У четвертому розділі розглянуто результати експериментальних досліджень та імітаційне модулювання роботи інтелектуальної вимірювальної системи механічних величин.

Представлено імітаційну моделі дискретно-позиційної системи управління інтелектуальної вимірювальної системи, сутність якої полягає у наступному:

- сигнал з аналогового датчика, "пропорційний" поточній координаті (позиції) знаходження робочого органу інтелектуальної вимірювальної системи, через певний проміжок часу (період опитування) надходить на пристрій порівняння;
- пристрій порівняння сигналів робить аналіз неузгодженості надходження сигналу (поточної координати) зі значенням кінцевої точки позиціонування (кінцевої координати);
- якщо неузгодженість значна (вище роздільної здатності пристрою порівняння), то на виконавчий орган інтелектуальної вимірювальної системи (привід) видається керуючий сигнал, спрямований на ліквідацію неузгодженості двох величин - тобто на переміщення робочого органу у бік кінцевої координати; по закінченні часу, рівному періоду дискретизації, послідовність повторюється;
- якщо неузгодженість не суттєва (не реєструється пристроєм порівняння), то сигнал на переміщення робочого органу не видається, а управління передається наступному контуру (наприклад, керуючому рухом по іншій координаті).

Загальна схема-модель системи управління показана на рис. 6.

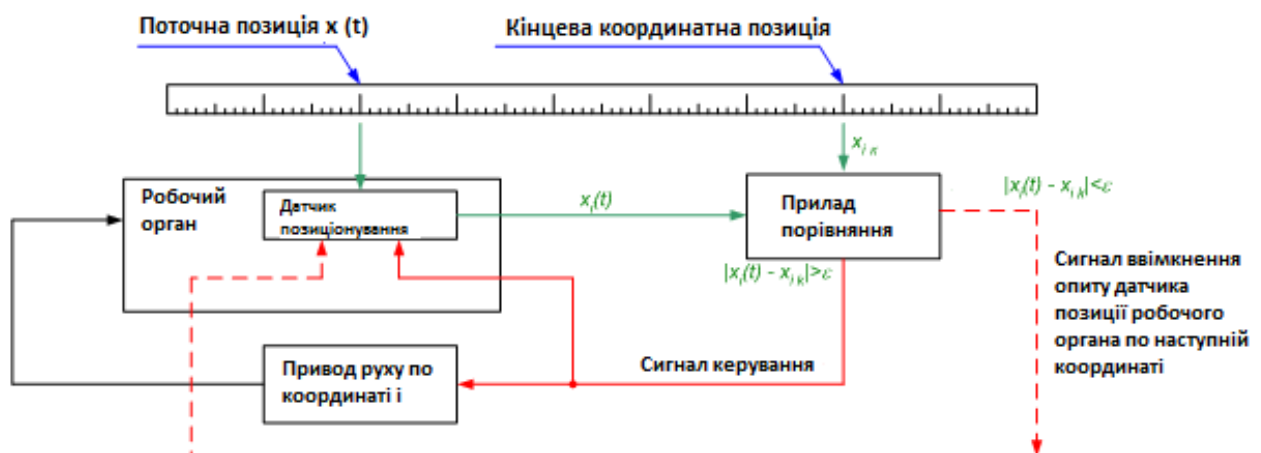


Рисунок 6 – Схема-модель дискретно-позиційної системи керування рухом робочого органу інтелектуальної вимірювальної системи

Принцип роботи розглянутої схеми можна описати математично:

Тоді рівняння рухів робочого органу по першій координаті, і сигналів управління і будуть виглядати наступним чином

$$u_1(t) = 1; u_{1s}(t) = 0; x_1(t_1) = x_{I0}$$

$$\begin{cases} x_I(t_j) = x_I(t_{j-1}) + k_I \Delta t; \\ u_I(t_j) = 1; \text{при } |x_I(t_{j-1}) - x_{Ik}| > \varepsilon; \\ u_{1s}(t_j) = 0; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_I(t_j) = x_I(t_{j-1}); \\ u_I(t_j) = 0; \text{при } |x_I(t_{j-1}) - x_{Ik}| < \varepsilon; \\ u_{1s}(t_j) = 1, \end{cases}$$

де - (t_1) , (t_j) , (t_{j-1}) - значення дискретного часу в перший, поточний і попередній моменти відповідно; Δt - період опитування датчика; $u_1(t_j)$, $u_{1s}(t_j)$ - значення керуючих сигналів в самій системи управління першим ступенем свободи і між першим і s, відповідно; $x_I(t_1)$, $x_I(t_{j-1})$, $x_I(t_j)$ - положення робочого органу інтелектуальної вимірювальної системи у відповідні моменти часу; x_{I0} , x_{Ik} - початкове положення робочого органу інтелектуальної вимірювальної системи і термінальна точка позиціонування; ε - точність вимірювання (точність порівняння); k_I - швидкість переміщення робочого органу по першому ступеню рухливості.

Перші рівняння описують початковий стан системи, а наступні - поведінку системи в часі залежно від показань позиційного датчика.

Розроблено програмні комплекси автоматизації і інтелектуалізації процесу вимірювання та програмно-математичне забезпечення інтелектуальної системи вимірювання механічних величин. Представлені результати імітаційного моделювання процесу вимірювання деталі з чотирма отворами, а саме міжцентрової відстані між кожним отвором при чому діапазон вимірювання доступною інтелектуальною вимірювальною системою уздовж осі Y дорівнює 1500 мм (рис. 7).

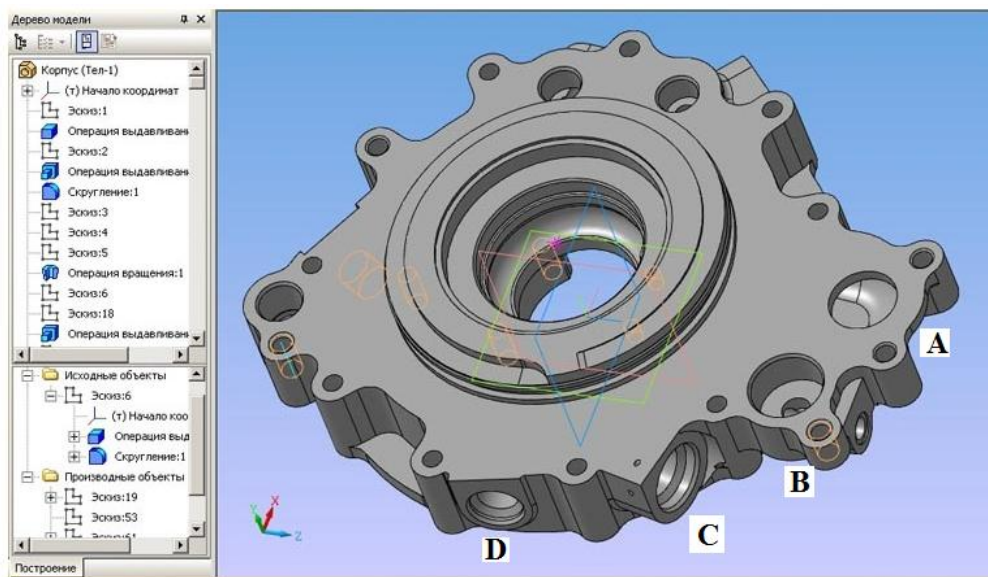


Рисунок 7 – Програмне вікно процесу вимірювання корпусної деталі

Для вирішення поставленого завдання достатньо отримати координати центрів усіх отворів в одній системі координат. Для вирівнювання, в якості spatial rotation використовується площина деталі.

В якості початку координат використовується центр отвору В, а в якості planar rotation використовується центр отвору С. Таким чином, система координат буде мати наступний вигляд:

- вісь Х проходить через центри отворів В і С;
- вісь Z перпендикулярна площині ескізу;
- вісь Y перпендикулярна двом попереднім осям;
- початок координат знаходиться в центрі отвору В.

Показано, що деталь розташовується в робочому об'ємі вимірювальної системи так, щоб можна було провести вимірювання отворів А, В і С.

Обґрунтовано, що для вимірювання четвертого отвору під досить виділити тільки елементи, що відносяться до перших трьох кіл.

Після цього необхідно проробити ручну частину роботи і записати координати вимірюваного центру отвору А в протокол вимірювання.

Запропонована методика вимірювання полягає в наступному. Проводиться операція перебазування і вимірювання координат центру четвертого отвору.

Для цього необхідно перемістити деталь так, щоб в робочому об'ємі системи були доступні для вимірювання отвори В, С і D. Проводяться вимірювання отвору А (виділивши тільки групи BaseAlignment і Position2).

Після обходу при вимірюванні отворів В і С, послідовно виконується вимірювання отвору D.

Після цього центри всіх чотирьох отворів знаходяться в одній системі координат, в базовому вирівнюванні (Base Alignment).

При виконанні перетворювання видаляться виміряні значення координат центру отвору А, тому що вони були раніше занесені в протокол вимірювання.

Для цього необхідно створити теоретичний елемент, тип якого відповідає типу елемента, що використовувався для визначення центру отвору А.

У розробленому програмно-математичному забезпеченні у відповідні поля вводу заносяться координати, які раніше були збережені у протоколі вимірювання.

Показано, що при виконанні зазначеної процедури можна спроектувати необхідну конструкторську документацію деталей.

Розробленою програмою передбачена обробка результатів вимірювання отворів з представленням відхилення від циліндричності.

Розроблений метод дозволяє організувати процес автогенерації протоколів, звітів, може бути адаптований до різного програмного забезпечення інтелектуальної вимірювальної системи і додатково для генерації протоколів у різних форматах, включаючи ізометричне зображення та перерізи деталей з позначенням відхилень від форми та розташування поверхонь, а також похибок вимірювань.

При проведенні експериментальних досліджень визначено основні лінійні розміри для корпусної деталі (табл. 2).

№ п/п	Назва параметру	Результати досліджень	Похибка
1	Міжосьовий розмір	30 мм	0,05 мм
2	Перпендикулярність	89,675 град	0,025 град
3	Паралельність	0,05 мм	0,002 мм
4	Циліндричність	0,03 мм	0,01 мм

The circuit diagram illustrates a precision rectifier. It features two operational amplifiers (op-amps) and a diode bridge rectifier. The first op-amp is configured as a voltage follower, with its non-inverting input connected to the input signal and its output connected to the inverting input. The output of the first op-amp is connected to the inverting input of the second op-amp. The second op-amp is configured as a precision rectifier, with its non-inverting input connected to ground and its output connected to the inverting input. The output of the second op-amp is connected to the positive terminal of the diode bridge. The negative terminal of the diode bridge is connected to ground. The output of the diode bridge is connected to the output of the circuit. The circuit includes several resistors: 10 kΩ, 100 kΩ, 1 kΩ, and 10 MΩ. A 10 MΩ resistor is connected between the output of the first op-amp and the inverting input of the second op-amp. A 100 kΩ resistor is connected between the output of the second op-amp and the positive terminal of the diode bridge. A 10 kΩ resistor is connected between the output of the diode bridge and the output of the circuit. A 1 kΩ resistor is connected between the output of the first op-amp and the inverting input of the second op-amp. A 10 kΩ resistor is connected between the output of the second op-amp and the positive terminal of the diode bridge. A 100 kΩ resistor is connected between the output of the diode bridge and the output of the circuit. A 10 MΩ resistor is connected between the output of the first op-amp and the inverting input of the second op-amp. The circuit is powered by a 12V DC supply and a 12V AC supply.

Розроблена модель має три постійні часу: електромеханічна постійна часу двигуна маніпулятора ($\tau_1 = R C_1$), постійна часу інерційності поступального руху ($\tau_2 = L / R$), постійна часу диференціюючої ланки, яка утворює нуль в комплексній площині ($\tau_3 = C_1 R_2$)

Розглянуто три випадки: $\tau_1 \approx \tau_2$; $\tau_1 > \tau_2$; $\tau_1 < \tau_2$.

При $\tau_1 \approx \tau_2$ оптимально встановлені параметри дозволяють досягти тривалості перехідного процесу $t_{\text{вст}} = 500 \text{ мкс}$, при цьому похибка становить 0,5% (рис. 9). Для порівняння на рис. 10 зображено не оптимальне відношення параметрів, за яких тривалість перехідного процесу $t_{\text{вст}} = 49 \text{ мс}$, похибка становить 1,5%.

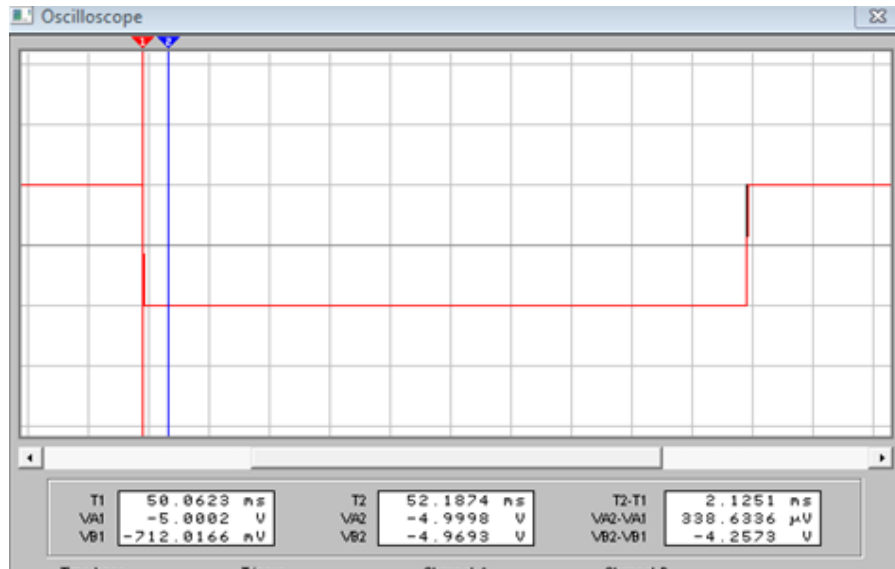


Рисунок 9 – Графік тривалості перехідного процесу при $\tau_1 \approx \tau_2$ (оптимальне відношення параметрів)

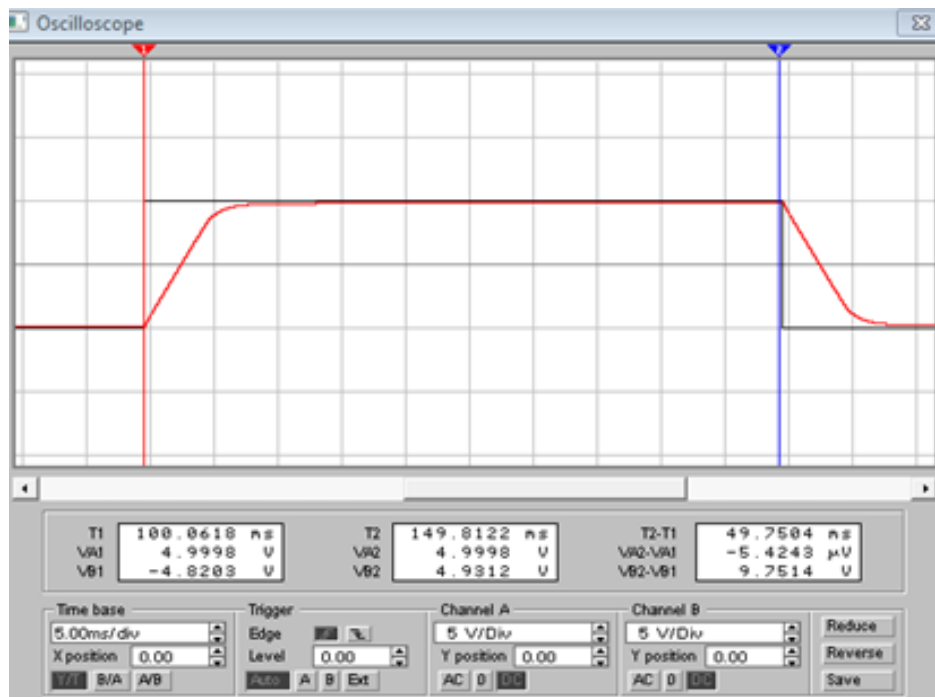


Рисунок 10 – Графік тривалості перехідного процесу при $\tau_1 \approx \tau_2$ (не оптимальне відношення параметрів)

У додатках вміщено акти впровадження результатів дисертаційної роботи, результати експериментальних досліджень, діючі макети запропонованої вимірювальної системи.

Таким чином, експериментально встановлено та доведено ефективність застосування запропонованої інтелектуальної системи вимірювання механічних величин.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна задача розробки інтелектуальної системи вимірювання механічних величин підвищеної точності та швидкодії.

У результаті проведення теоретичних та експериментальних досліджень встановлено, що при використанні розроблених методів та методик забезпечується зменшення похибки вимірювань на 8%-17% та скорочення часу на проведення вимірювань від 12% до 23%.

Отримані такі наукові та практичні результати:

1. Розроблено і обґрунтовано теоретичні положення побудови інтелектуальних систем вимірювання механічних величин з підвищеною точністю та швидкістю з використанням сучасних інформаційних технологій та експертних систем.

2. Розроблено динамічну модель маніпулятора, яка визначає оптимальні параметри для мінімізації тривалості перехідного процесу (до 500 мкс), що дає можливість підвищити точність позиціонування сенсора.

3. Удосконалено математичну модель процесу вимірювання лінійно-кутових величин на базі створення інтелектуальних вимірювальних систем з використанням експертних систем, що значно розширює сферу використання цих систем та компенсує або зводить до незначущих складові похибок вимірювального каналу.

4. Розроблено програмно-математичне забезпечення моделювання впливу дестабілізуючих факторів на швидкість та точність вимірювання, що служить основою для проектування інтелектуальних вимірювальних систем.

5. Набув подальшого розвитку комплекс математичних моделей визначення похибок лінійно-кутових величин. За математичними моделями отримано конструктивні параметри та режими роботи системи інтелектуальних вимірювань механічних величин, прогножуючи їх зміни та забезпечуючи незалежну перевірку вимірювальних підсистем.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз – Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Director, DRIVER, BASE, ПИНЦ, ResearchBib, DOAJ, WorldCat, EBSCO, Directory Indexing of International Research Journals, DRJI, OAJI, Sherpa/Romeo, Open Access Articles:

1. Квасніков В.П. Розробка та дослідження інтелектуальної системи для аналізу ймовірнісних характеристик випадкових процесів механічних величин / В.П. Квасніков, Ю.П. Лещенко // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – №5/3(25). – С. 100-102.

Здобувачем розроблено методику побудови інтелектуальної системи моделювання випадкових процесів механічних величин.

Статті у наукових фахових виданнях України:

2. Лещенко Ю.П. Синтез структури інтелектуального вимірювального роботу / Ю.П. Лещенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – №9(86). – С. 212-214.
3. Лещенко Ю.П. Маніпуляційні системи вимірювального роботу / Ю.П. Лещенко // *Методи та прилади контролю якості*. – 2011. – №26. – С. 100-102.
4. Лещенко Ю.П. Експертні системи реального часу для вимірювальних робіт / Ю.П. Лещенко // *Вісник інженерної академії України*. – 2011. – №2. – С. 70-72.
5. Лещенко Ю.П. Принцип роботи координатно-вимірювальних машин та інтелектуальних вимірювальних робіт / Ю.П. Лещенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – №10(97). – С. 205-208.
6. Лещенко Ю.П. Застосування експертних систем в роботі вимірювальних робіт / Ю.П. Лещенко // *Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»*. – 2012. – №3. – С. 164-167.
7. Лещенко Ю.П. Інтелектуальна система управління вимірювальним роботом / Ю.П. Лещенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – №10(107). – С. 199-202.
8. Лещенко Ю.П. Вимірювання геометричних параметрів об'єктів інтелектуальними вимірювальними системами / Ю.П. Лещенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – №7(114). – С. 164-167.

Тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій:

9. Лещенко Ю.П. Експертні системи інтелектуального прийняття рішень вимірювальними роботами / Ю.П. Лещенко // *Військова освіта та наука: сьогодення і майбутнє: тез. доп. VI Міжнар. наук.-практ. конф., 25-26 листопада 2010 р.* – Київ, ВІКНУ, 2010. – С. 468-470.
10. Лещенко Ю.П. Особливості вимірювання деталей на координатно-вимірювальній машині / Ю.П. Лещенко // *Інформаційно-вимірювальні технології, технічне регулювання та менеджмент якості: праці I наук.-практ. конф., 16 грудня 2010 р.* – Одеса, ОДІВТ, 2010. – С. 209-210.
11. Лещенко Ю.П. Бази знань експертних систем / Ю.П. Лещенко // *АВІА-2011: матеріали X Міжнар. наук.-практ. конф., 19-21 квітня 2011 р. Том I*. – Київ, НАУ, 2011. – С. 1.141-1.142.
12. Лещенко Ю.П. Система керування вимірювального робота / Ю.П. Лещенко // *Обробка сигналів і негауссівських процесів: праці III Міжнар. наук.-практ. конф., 24-27 травня 2012 р.* – Черкаси, НТУУ «КПІ», НАУ, НУ «Львівська політехніка», ОНАЗ, ОНПУ, ХНУР, ВНТУ, ЧДТУ, 2012. – С. 202-203.
13. Лещенко Ю.П. Системи інтелектуального керування вимірювальними роботами / Ю.П. Лещенко // *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах: тез. доп. I Міжнар. наук. конф. пам'яті професора Володимира Поджаренка, 18-20 жовтня 2011 р.* – Вінниця, 2011. – С. 175.
14. Проценко В.О. Інтелектуальні вимірювальні роботи: основні компоненти та системи керування / В.О. Проценко, Ю.П. Лещенко // *Військова освіта та наука: сьогодення і майбутнє: тез. доп. VII Міжнар. наук.-практ. конф., 24-25 листопада 2011 р.* – Київ, ВІКНУ, 2011. – С. 71.

Здобувачем описано основні компоненти вимірювальних робіт.

15. Квасніков В.П. Основні об'єкти, що контролюються інтелектуальними вимірювальними роботами / В.П. Квасніков, Ю.П. Лещенко // Сучасні проблеми розбудови Збройних Сил України: тез. доп. наук.-практ. конф., 27 квітня 2012 р. – Київ, ВІКНУ, 2012. – С. 76-77.

Здобувачем описано процес вимірювання інтелектуального вимірювального роботу.

16. Ковшов С.Б. Точність координатно-вимірювальних роботів для вимірювання геометричних параметрів відхилення форми складних поверхонь / С.Б. Ковшов, Ю.П. Лещенко // Метрологія-2012. – 2012. – С. 484-486.

Здобувачем розглянуто методи вимірювання геометричних параметрів, а також підвищення точності вимірювання координатно-вимірювальними роботами.

17. Лещенко Ю.П. Алгоритми роботи координатно-вимірювальних машин. Метод заміщення / Ю.П. Лещенко // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси: тез. доп. V Міжнар. наук.-практ. конф., 15-16 травня 2012 р. – Київ, НАУ, 2012. – С. 131-132.

18. Лещенко Ю.П. Переваги використання координатно-вимірювальних машин на базі інтелектуальних систем / Ю.П. Лещенко // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів: матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф., 23-25 травня 2012 р. – Чернігів, ЧДТУ, НАУ, 2012. – С. 102.

19. Kolomiets L.V. Measuring systems of coordinate moving of measuring robots / L.V. Kolomiets, Y.P. Leschenko // Safety in Aviation and Space Technologies: proceedings V world congress "Aviation in the XXI-st century", 25-27 September 2012 y. – Kyiv, NAU, 2012. – P. 1.9.22-1.9.25.

Здобувачем проаналізовано роботу індуктивної та фото-електричної вимірювальної системи.

20. Лещенко Ю.П. Пристрої взаємодії вимірювальної системи з вимірювальною деталлю / Ю.П. Лещенко // Військова освіта та наука: сьогодення і майбутнє: тез. доп. VIII Міжнар. наук.-практ. конф., 23 листопада 2012 р. – Київ, ВІКНУ, 2012. – С. 70.

21. Лещенко Ю.П. Інтелектуалізація засобів вимірювання / Ю.П. Лещенко // Приладобудування: стан і перспективи: тез. доп. Міжнар. наук.-практ. конф., 23-24 квітня 2013 р. – Київ, НТУ «КП», 2013. – С. 110.

22. Лещенко Ю.П. Алгебраїчна модель інтелектуальної частини інтелектуальної вимірювальної системи / Ю.П. Лещенко // Сучасні проблеми розбудови Збройних Сил України: тез. доп. Всеукраїнської наук.-практ. конф. молодих вчених, ад'юнктів, слухачів, курсантів і студентів, 26 квітня 2013 р. – Київ, ВІКНУ, 2013. – С. 92.

23. Лещенко Ю.П. Експертні системи як інтелектуальні вимірювальні системи / Ю.П. Лещенко // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах: тез. доп. II Міжнар. наук. конф., 29-31 жовтня 2013 р. – Вінниця, ВНТУ, 2013. – С. 260.

24. Лещенко Ю.П. Прийняття рішень за допомогою експертної системи / Ю.П. Лещенко // Військова освіта та наука: сьогодення і майбутнє: тез. доп. IX Міжнар. наук.-практ. конф., 22 листопада 2013 р. – Київ, ВІКНУ, 2013. – С. 50.

25. Лещенко Ю.П. Інтелектуальна схема керування інформаційно-вимірювальними системами / Ю.П. Лещенко // Актуальні завдання гуманітарного, фінансово-економічного, правового, матеріально-технічного та лінгвістичного забезпечення підрозділів та частин Збройних Сил України: тез. доп. Всеукраїнської наук.-практ. конф. молодих вчених, ад'юнктів, слухачів, курсантів і студентів, 25 квітня 2014 р. – Київ, ВІКНУ, 2014. – С. 91.

АНОТАЦІЯ

Лещенко Ю.П. Інтелектуальна система вимірювання механічних величин. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.01 – Прилади та методи вимірювання механічних величин. – Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ. – 2016.

Дисертацію присвячено дослідженню та вдосконаленню роботи інтелектуальної системи вимірювання механічних величин. Запропоновано вдосконалити методику побудови інтелектуальної системи вимірювання механічних величин. Дані інтелектуальні вимірювальні системи матимуть можливість працювати з заданими об'єктами і параметрами, дозволять програмно задавати реакцію системи на певні події у вигляді алгоритму, і нададуть можливість виміряти геометричні параметри об'єктів складної форми.

Запропоновано нову структуру бази знань інтелектуальної вимірювальної системи, а саме розроблено нові критерії для використання правил з бази знань. Введення нових правил дає можливість оцінити порядок роботи вимірювальної системи та дозволяє вирішувати більш широкий спектр задач.

Запропоновано базу знань інтелектуальної вимірювальної системи з новими правилами прийняття рішення про відповідність конструкторській документації вимірювання механічних величин. Встановлено можливість для визначення відхилення геометричних параметрів об'єктів від заданого значення з підвищеною точністю, швидкодією, навчання та функціонування вимірювальної системи.

Побудовано динамічну модель маніпулятора та проведено, у відповідності зі стратегією пошуку оптимального поєднання факторів, експеримент пошуку оптимальних параметрів для мінімізації тривалості перехідного процесу.

Ключові слова: інтелектуальна система, база даних, база знань, механічна величина, кутовий параметр, експертна система, похибка вимірювання.

АННОТАЦИЯ

Лещенко Ю.П. Интеллектуальная система измерения механических величин. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.01 - Приборы и методы измерения механических величин. - Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев. - 2016.

Диссертация посвящена исследованию и совершенствованию работы интеллектуальной системы измерения механических величин.

Современные измерительные системы выполняются с применением передового оборудования, как правило, с компьютерным управлением и хранением данных.

Измерительные системы различных типов позволяют получать информацию о точках реальных координат с высокой точностью и используют компьютерную коррекцию погрешностей и хранения данных.

С помощью программных пакетов, как специализированных, так и общеинженерных реализуется обработка виртуальных моделей деталей с целью анализа отклонений их поверхностей от номинальных, заданных конструктором.

Дальнейшие исследования приборов и систем для измерения механических величин, технических и метрологических характеристик указывают на необходимость повышения точности и быстродействия измерений.

Данные исследования направлены на создание методов, методик и средств измерения механических величин на базе создания новых универсальных и перспективных интеллектуальных измерительных систем с определением составляющих погрешностей измерения, их автокомпенсации с использованием экспертных систем.

Поэтому, на данном этапе остро стоит вопрос о создании интеллектуальных измерительных систем, которые содержат, в отличие от информационно-измерительных систем, базу данных и базу знаний.

Интеллектуальные измерительные системы способны самообучаться, накапливая новые данные в базе данных и новые правила в базе знаний.

Таким образом, научная задача разработки методов, средств и технической реализации интеллектуальных измерительных систем механических величин является актуальной и имеет важное значение для развития приборостроения, метрологии в целях решения широкого круга измерительных задач.

Интеллектуальные измерительные системы обеспечивают высокое качество измерений, возможность выполнять контроль геометрических размеров, а также проведения измерений деформации и других механических величин.

Предложено усовершенствовать методику измерения на интеллектуальной системе измерения механических величин.

Данные интеллектуальные измерительные системы будут иметь возможность работать с заданными объектами и параметрами, позволят программно задавать реакцию системы на определенные события в виде алгоритма, и предоставят возможность измерить геометрические параметры объектов сложной формы.

Предложено усовершенствовать базу знаний интеллектуальной измерительной системы, а именно разработаны новые правила для базы знаний. Введение новых правил дает возможность оценить порядок работы измерительной системы и позволяет решать более широкий спектр задач.

Предлагается дополнить базу знаний интеллектуальной измерительной системы новыми правилами принятия решения о соответствии конструкторской документации измерения механических величин.

Установлена возможность для определения отклонения геометрических параметров объектов от заданного значения с повышенной точностью, быстродействием, обучение и функционирования измерительной системы.

Построена динамическая модель манипулятора и проведен, в соответствии со стратегией поиска оптимального соотношения факторов, эксперимент поиска оптимальных параметров для минимизации длительности переходного процесса.

Ключевые слова: интеллектуальная система, база данных, база знаний, механическая величина, угловой параметр, экспертная система, погрешность измерения.

ABSTRACT**Leschenko Y.P. Intelligent system for measuring mechanical quantities.**

Thesis for the Candidate of Technics grade in the Specialty 05.11.01 - Instruments and methods for measuring mechanical quantities. It is the National technical university of Ukraine «KPI», m. Kyiv. – 2016.

The thesis is devoted to research and the improvement of intellectual system of measuring mechanical quantities. An improved method of the intelligent system of measurement of mechanical quantities. These intelligent metering systems will be able to work with given objects and parameters allow the software to set system response to certain events in the form of an algorithm and provide an opportunity to measure the geometric properties of objects with complex shapes.

The new database structure intellectual measuring system, in particular developed new criteria for the use of the rules of the knowledge base. The introduction of new criteria makes it possible to estimate the order of the measuring system and can solve a wider range of tasks.

A knowledge base of intellectual measuring system with the new rules of the decision to match the design documentation of measurement of mechanical quantities. The possibility to determine the geometric parameters of objects deviation from the set value with high accuracy, performance, training and operation of the measuring system.

Constructed a dynamic model of the manipulator and conducted in accordance with the strategy of finding the optimal combination of factors, the experiment found the optimal parameters to minimize the duration of the transition process.

Keywords: intelligent system, database, knowledge base, mechanical size, angular parameter, expert system, measurement error.