

**Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Міністерство освіти і науки України**

ГРИГОРЕНКО ІГОР ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 681.518.22

**БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИЙ КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ
ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ
РІЗНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З УРАХУВАННЯМ ФАКТОРНИХ ВПЛИВІВ**

спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення
складу речовини

Реферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків–2024

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі інформаційно-вимірювальних технологій і систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Опоненти:

доктор технічних наук, професор

Кулаков Павло Ігорович,

Уманський національний університет садівництва,
професор кафедри інформаційних технологій;

доктор технічних наук, професор

Кошовий Микола Дмитрович,

Національний аерокосмічний університет
ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний ін-
ститут», професор кафедри інтелектуальних вимірю-
вальних систем та інженерії якості;

доктор технічних наук, професор

Захаров Ігор Петрович,

Харківський національний університет радіоелект-
роніки, завідувач кафедри інформаційно-
вимірювальних технологій.

Захист відбудеться «19» грудня 2024 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.09 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Ректорський корпус (аудиторія 28).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Сергій ЛЬВОВ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Створення інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) обумовлено насамперед конкретними завданнями виробництва і наукових досліджень, що потребують отримання, обробки, відображення та зберігання великих обсягів вимірювальної інформації, оскільки сучасні об'єкти дослідження характеризуються великою кількістю параметрів, що змінюються у часі.

На точність та вірогідність результатів вимірювань, що отримані за допомогою ІВС впливає велика кількість різноманітних факторів, що діють як окремо один від одного, так і взаємно. Без оцінки факторного впливу стає неможливим як розробка адекватної моделі ІВС для конкретного технологічного процесу, так і забезпечення потрібної точності вимірювань. Одним з основних етапів методу контролю якості функціонування ІВС не залежно від її призначення є дослідження дії факторного впливу на результат вимірювання показника контролю. Для виявлення ступеню впливу кожного із факторів на вихідні характеристики ІВС дослідники зазвичай використовують різні методи та способи організації та обробки вибіркового даних. Однак, існує широкий клас об'єктів, стохастичність параметрів яких унеможлиблює створення адекватних фізично реалізованих моделей контрольованих величин. При цьому виникають труднощі із побудовою імовірнісних моделей таких об'єктів через неповноту інформації щодо їх станів. Це різко обмежує можливості використання існуючих методів підвищення вірогідності контролю і діагностики та створює проблему розробки нових ймовірнісно-статистичних та інформаційних методів підвищення вірогідності для об'єктів технологічного призначення, якість та працездатність яких можуть змінюватись у часі через вплив випадкових факторів.

Таким чином, оскільки ІВС відноситься до багатофункціональних об'єктів, тому підвищення вірогідності методів багатопараметричного контролю якості роботи ІВС різного призначення як об'єктів зі стохастичними параметрами або параметрами, що стохастично пов'язані із контрольованими величинами є актуальною науково-практичною проблемою, яка визначила напрям наукового дослідження та перспективи використання результатів дисертації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «ХП». Здобувач як виконавець ряду розділів брав участь в виконанні науково-дослідних робіт: «Метрологічне забезпечення ієрархічних систем управління якістю» (К 6101, ДР 0116U000881, МОН України, 2016 – 2019 рр.), «Математичне моделювання приладів для вирішення задач контролю, діагностики, тестування та якості промислової продукції» (ініціативна К 6103, 2021 – 2023 рр.) та у рамках творчої співпраці з АТ «Українськи енергетичні машини» (м. Харків), ТОВ «Екопродукт 2017» (м. Харків), ТОВ «Управління виробничо-технічної комплектації та реалізації» (м. Харків).

Мета і задачі досліджень.

Метою дисертаційної роботи є підвищення вірогідності методів багатопараметричного контролю якості функціонування інформаційно-

вимірювальних систем різного призначення з урахуванням впливу випадкових факторів.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні задачі:

- розробити узагальнений метод контролю якості функціонування ІВС різного призначення та провести перевірку можливості використання запропонованого методу для ІВС різного призначення;

- розробити математичну модель одночасного впливу п'яти факторів на результат виміру показника контролю (сумарну відносну похибку по каналу вимірювання ІВС), визначити обмеження на кількість рівнів параметра контролю та факторів, що впливають на сумарну відносну похибку по каналу вимірювання ІВС при заданій метрологічній невизначеності параметра контролю;

- провести дисперсійний аналіз моделі факторного впливу на якість роботи ІВС та оцінити достовірність статистичних висновків про інформаційну значущість показників контролю для розробленої моделі перехресної класифікації;

- удосконалити метод оптимізації (за максимумом очікуваної інформації) системи показників вимірювального контролю;

- провести розрахунки і довести на прикладах необхідність використання комбінації методів статистичного аналізу для контролю якості роботи обладнання ІВС різного призначення;

- розробити метод підвищення точності та вірогідності лазерних систем шляхом використання тестових методів контролю із подальшою корекцією функцій перетворення;

- розробити пристрій для контролю лазерної системи виміру геометричних розмірів та якості поверхні деталей і провести аналіз факторного впливу на роботу лазерної системи контролю якості поверхні деталей з метою виділення та врахування основних факторів, що впливають на точність роботи системи;

- розробити реляційно-різницеву модель оператора динамічної корекції похибки лазерної системи контролю, яка надасть можливість введення поправок на динамічну похибку вимірювання;

- запровадити використання графічного інтерфейсу користувача системи fuzzy logic для оцінювання якості готової продукції при виробництві карамелі, питного молока, крабових паличок, кефіру, вареної ковбаси та визначити рівні параметрів контролю, що забезпечують максимальну якість продукції;

- вдосконалити базовий алгоритм розрахунку невизначеностей результатів вимірювань, що отримані за допомогою ІВС різного призначення і розробити програмний продукт, завдяки якому доцільно проводити розрахунки по визначенню сумарної та розширеної невизначеності для корельованих та некорельованих даних.

Об'єкт досліджень – процес виникнення невизначеності результатів вимірювань, що отримані за допомогою ІВС різного призначення в умовах неурахованих ефектів факторних впливів.

Предмет досліджень – методи кількісної оцінки якості контролю функціонування інформаційно-вимірювальних систем різного призначення.

Методи дослідження базуються на теорії тестових методів контролю для підвищення точності ІВС різного призначення, теорії інформації і математичної статистики при оцінюванні вірогідності контролю показників які впливають на якість роботи ІВС, математичних моделях дисперсійного аналізу при дослідженні інформаційних показників контролю якості роботи ІВС різного призначення; коваріаційного аналізу для оцінювання кількості інформації за кожним із показників контролю при факторному впливі на якість роботи ІВС; дискримінантного аналізу для встановлення аналітичної залежності, що дозволяє ранжирувати показники контролю за зменшенням їх чутливості до зміни рівнів параметра контролю; теорії нечіткої логіки при створенні ситуаційної системи для оцінювання якості роботи ІВС різного призначення на підставі визначення основних факторів, що мають найбільший вплив на якість готової продукції.

Наукова новизна одержаних результатів в теорії інформаційно-вимірювальних систем полягає у тому, що вперше розроблено узагальнений метод контролю якості функціонування ІВС різного призначення, який вирішив науково-практичну проблему підвищення вірогідності методів багатопараметричного контролю якості функціонування інформаційно-вимірювальних систем різного призначення шляхом визначення та урахування факторного впливу на результат вимірювань показників контролю за рахунок використання тестових методів, методів статистичного аналізу результатів вимірювань, апарату нечіткої логіки, що забезпечило максимально високу вірогідність отриманих результатів і як наслідок – підтримку встановлених у стандартах норм на вихідні параметри кінцевого продукту.

Основні отримані результати виконаної роботи:

- отримав подальший розвиток метод інформаційного аналізу комплексу факторів, які впливають на якість роботи ІВС, завдяки поєднанню тестових методів, методів статистичного аналізу результатів вимірювань, апарату нечіткої логіки, що дозволив сформулювати систему показників в умовах невизначеності відтворення рівнів параметру контролю (сумарна відносна похибка вихідного сигналу ВК);

- вперше розроблено узагальнений метод контролю якості функціонування ІВС різного призначення, який полягає в побудові моделі процесу контролю параметрів технологічних процесів у вигляді комплексного використання адитивних та мультиплікативних тестових впливів, математичної моделі, статистичного аналізу результатів, алгоритму нечіткої логіки, що дозволив виділити основні джерела факторного впливу, критичні етапи технологій виробництва з метою підвищення вірогідності контролю параметрів технологічних процесів;

- вперше розроблено модель перехресної класифікації, яка врахувала ефекти одночасної взаємодії п'яти факторів (нестабільність аналогової частини вимірювального каналу, вплив електромагнітних перешкод, похибка цифрового перетворення сигналу, шуми пристрою комутації сигналів, відхилення від встановленого температурного режиму роботи) на результат вимірювання одиничного показника контролю (сумарну відносну похибку каналу вимірювання ІВС), впровадження якої дало можливість встановити рівень факторного впливу параметрів контролю на показник контролю, оцінити кількість очікуваної

вимірювальної інформації за показниками контролю та ранжирувати показники за зменшенням кількості інформації;

– вперше розроблено метод підвищення точності та вірогідності лазерних систем шляхом використання тестових методів контролю із подальшою корекцією функцій перетворення, завдяки якому вдалося зменшити динамічну похибку вимірювання та підвищити вірогідність контролю.

– вперше розроблено реляційно-різницеву модель оператора динамічної корекції похибки лазерної системи контролю, яка надала можливість введення поправок на динамічну похибку вимірювання, які отримують із номінальної динамічної моделі вимірювального перетворювача для вимірюного значення швидкості зміни вхідного сигналу, що підвищило точність вимірювань контролю;

– вдосконалено базовий алгоритм розрахунку невизначеностей результатів вимірювань, що отримані за допомогою ІВС різного призначення, за рахунок введення обов'язкової перевірки на наявність кореляції між показниками контролю, завдяки якому стає можливим проводити розрахунки для визначення сумарної та розширеної невизначеності для корельованих та некорельованих даних.

Практичне значення отриманих результатів в галузі інформаційно-вимірювальних технологій:

– розроблена модель перехресних класифікацій, яка врахувала ефекти одночасної взаємодії п'яти факторів на результат вимірювання одиничного показника контролю за для подальшого визначення кількості інформації за кожним із показників контролю при факторному впливі із подальшим їх ранжируванням за рівнями значущості;

– розроблено пристрій для контролю лазерної системи виміру геометричних розмірів та якості поверхні деталей, що дає можливість підвищити точність та вірогідність виміру геометричних розмірів та якості поверхні деталей без зупинки технологічного процесу;

– розроблено евристичні аналізатори на підставі нечіткої логіки для визначення впливу параметрів технологічного процесу на якість готової продукції;

– розроблено базовий алгоритм розрахунку невизначеностей результатів вимірювань, що отримані за допомогою ІВС різного призначення, який реалізовано у програмному продукті на мові JavaScript для проведення розрахунків сумарної та розширеної невизначеності для корельованих та некорельованих даних.

У АТ «Українські енергетичні машини» було впроваджено в процес виробництва пристрій для контролю лазерної системи виміру геометричних розмірів та якості поверхні деталей. Задача підвищення точності та швидкодії виміру геометричних розмірів та якості поверхні деталей вирішена за рахунок динамічного контролю системи без зупинки технологічного процесу (акт від 18.04.2024 р.).

У ТОВ «Екопродукт 2017» результати роботи впроваджено в процес виробництва у вигляді евристичного аналізатора на нечіткій логіці для визначення

впливу параметрів технологічного процесу виготовлення вареної ковбаси на якість готової продукції. Завдяки графічному інтерфейсу користувача побудовано систему з нечіткою логікою, яка надала можливість встановити який саме вплив на якість виготовлення вареної ковбаси здійснюють: точність дозування інгредієнтів, підтримка встановлених діапазонів температур на всіх ділянках технологічного процесу, рівня тиску при формуванні ковбаси, рівня вологості при осаджуванні ковбасних виробів. (акт від 30.05.2024 р.).

У ТОВ «Управління виробничо-технічної комплектації та реалізації» результати роботи впроваджено у вигляді розробленого евристичного аналізатору для визначення факторного впливу на якість комплектуючих для інформаційно-вимірювальних систем. За допомогою графічного інтерфейсу користувача побудовано систему з нечіткою логікою, яка надала можливість встановити дію факторного впливу на якість комплектуючих для інформаційно-вимірювальних систем різного призначення (акт від 24.05.2024 р.).

Технічна новизна розробок захищена 2 патентами України на корисну модель.

Теоретичні та практичні результати, які отримані під час виконання досліджень, впроваджено у практику навчального процесу кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «ХП».

Особистий внесок здобувача. Наукові положення і результати, викладені в дисертаційній роботі та винесені на захист, отримані особисто здобувачем. Серед них: розробка узагальненого методу контролю якості функціонування ІВС різного призначення; розробка моделі перехресних класифікацій, яка врахувала ефекти одночасної взаємодії п'яти факторів на результат вимірювання показника контролю; розробка пристрою для контролю лазерної системи виміру геометричних розмірів та якості поверхні деталей; розробка реляційно-різницевої моделі оператора динамічної корекції похибки лазерної системи контролю; розробка методу підвищення точності лазерних систем шляхом використання тестових методів контролю з подальшою корекцією функцій перетворення; розробка алгоритмів нечіткої логіки для оцінювання якості роботи ІВС різного призначення і на підставі алгоритму розробка програмного продукту на мові JavaScript, завдяки якому доцільно проводити розрахунки для визначення сумарної та розширеної невизначеності для корельованих та некорельованих даних.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати та положення дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та були схвалені на: XX – XXXII Міжнародних науково – практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2012 – 2024), VIII Міжнародній науково-технічній конференції: «Метрологія та вимірювальна техніка» (м. Харків, 2012), I Науково-технічній конференції: «Актуальні проблеми автоматизації та приладобудування України» (м. Харків, 2012), I – III Всеукраїнських науково-технічних конференціях: «Актуальні проблеми автоматизації та приладобудування» (м. Харків, 2014 – 2016), I – III Міжнародних науково-технічних конференціях: «Актуальні проблеми автоматизації та приладобудування» (м. Харків, 2017, 2018, 2020), XII Міжнародній науково-

практичній конференції магістрів та аспірантів (м. Харків, 2018), XVII, XIX Міжнародних науково-технічних семінарах: «Невизначеність вимірювань: наукові, нормативні, прикладні та методичні аспекти (UM-2020)» (Болгарія, 2020, 2022), XIV, XV Міжнародних науково-практичних конференціях магістрів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених» (м. Харків, 2020, 2022), VII Міжнародній науково-технічній конференції з проблем вищої освіти і науки ТК-2022 «Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів». (м. Луцьк, 2022), XXII, XXIII Міжнародних науково-технічних конференціях: «Проблеми інформатики та моделювання (ПІМ-2022, 2023)» (м. Харків, 2022, 2023), X Міжнародній науково – технічній конференції «Датчики, прилади та системи (ДПС) – 2023» (м. Черкаси, 2023), XXII Міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування: стан та перспективи» (м. Київ, 2023), XI Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатизації». (м. Баку – Харків – Бельсько-Бяла, 2023), VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні напрямки розвитку автоматизованих технологічних комплексів» (м. Луцьк, 2024), та на Міжнародних конференціях, збірники статей яких проіндексовані в наукометричній базі SCOPUS: IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL 2019 (Болгарія, 2019), IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) (м. Харків, 2022), IEEE XXXII MNC «ММА 2022» (Болгарія, 2022).

Публікації. Основні положення та наукові результати дисертаційної роботи відображено у 73 наукових публікаціях, з них: 37 статей у періодичних виданнях, з яких 26 статей в наукових фахових виданнях України категорії Б, 10 у виданнях, внесених до наукометричних баз SCOPUS та/або Web of Science, 1 стаття у закордонному періодичному виданні, 34 у матеріалах апробаційного характеру, 2 патенти України на корисну модель.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 390 сторінок; з них 103 рисунка за текстом; 8 рисунків на 6 окремих сторінках; 29 таблиць за текстом; 17 таблиць на 17 окремих сторінках, список використаних джерел з 170 найменувань на 21 сторінці, 7 додатків на 69 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету, завдання, об'єкт, предмет, розкрито наукову новизну, практичну значущість одержаних результатів, визначено особистий внесок автора, наведено дані стосовно апробації та впровадження в практику результатів дослідження, представлені етапи дослідження, надано кількість публікацій за темою роботи.

Перший розділ присвячено аналізу наукових праць вітчизняних та закордонних вчених з питань проблематики дослідження, що дозволило визначити основні напрями наукового пошуку щодо проблеми підвищення вірогідності методів багатопараметричного контролю якості функціонування інформаційно-

вимірювальних систем різного призначення з урахуванням дії випадкових факторних впливів. Встановлено, що існуючі методи підвищення вірогідності контролю базуються на використанні інформаційної і часової надмірності при обмеженнях на невизначеність дестабілізуючих факторів або властивостей об'єктів контролю. Визначено, що задачу розробки методів підвищення вірогідності методів багатопараметричного контролю якості функціонування ІВС як об'єкту зі стохастичними параметрами повністю не вирішено. Зроблено висновки, що використання існуючих методів підвищення вірогідності контролю без використання підходів до статистичного аналізу кількісних характеристик величин, що контролюються недостатньо для урахування дії факторного впливу на якість роботи ІВС, що у свою чергу створює проблему втрати інформації на етапи навчання системи контролю і виникнення помилки прийняття рішень метрологічним спостерігачем. Поставлена проблема розробки комбінованого методу аналізу ІВС при врахуванні дії факторних впливів, що дозволяє об'єднати переваги всіх відомих методів контролю і може бути використаний для аналізу якості роботи ІВС різного призначення.

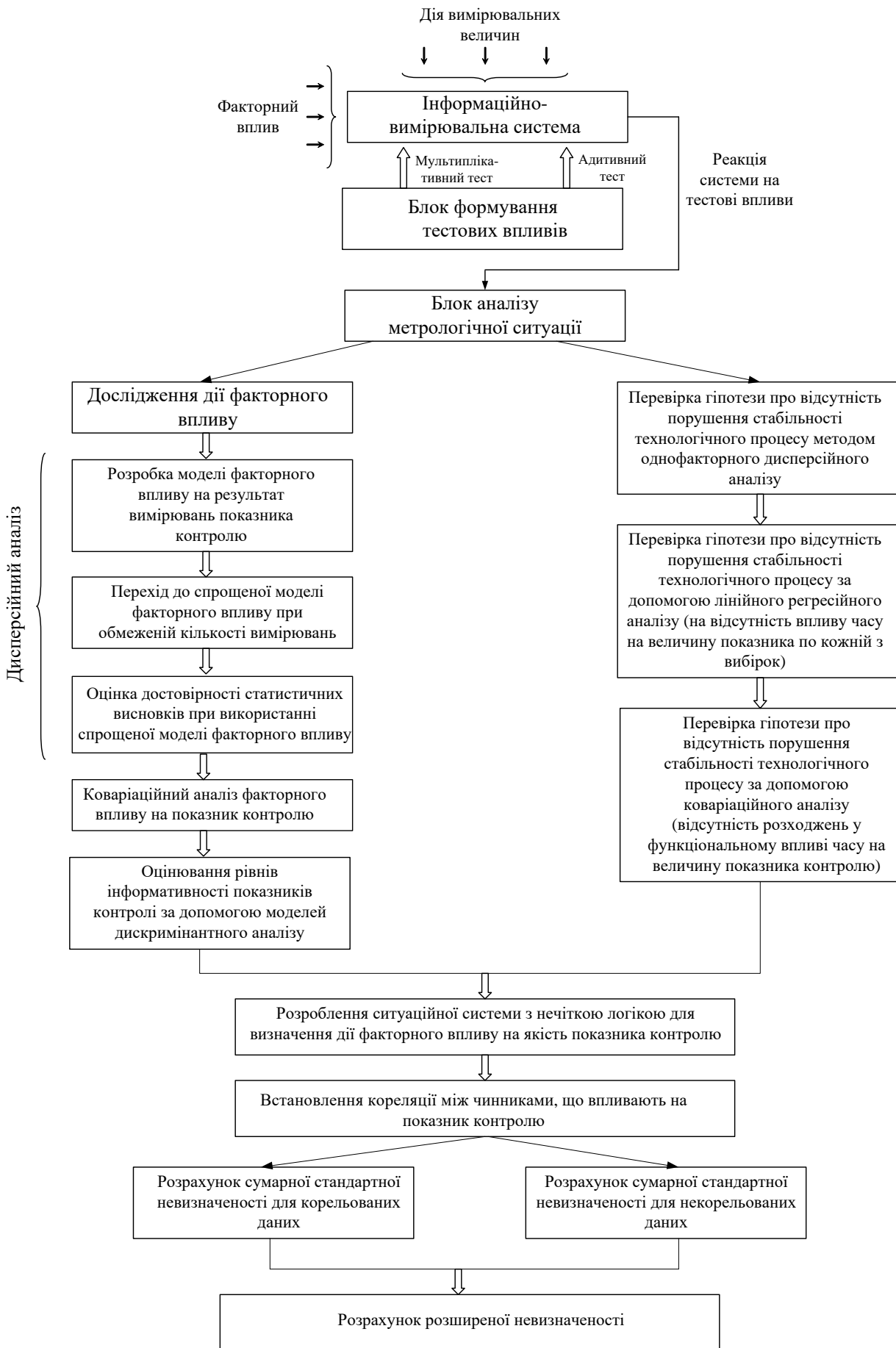
У другому розділі визначені умови формування методу контролю якості функціонування ІВС різного призначення, який полягає у тому, що для ІВС формуються адитивні і мультиплікативні тестові впливи та у залежності від реакції системи на ці тести блок аналізу метрологічної ситуації обирається один з двох можливих шляхів подальшої роботи (рис. 1).

Перший шлях обирається при необхідності врахування дії факторного впливу на роботу ІВС. При цьому розробляється модель факторного впливу, оцінюється достовірність статистичних висновків для розробленої моделі, проводиться коваріаційний аналіз факторного впливу на показник контролю з подальшим оцінюванням рівнів інформативності показників контролі за допомогою моделей дискримінантного аналізу.

Другий шлях обирається коли необхідно перевірити гіпотезу про відсутність порушень технологічного процесу. Перевірка проводиться методами однофакторного дисперсійного аналізу (рівність середніх значень), лінійного регресійного аналізу (на відсутність впливу часу на величину показника за кожній з вибірок), коваріаційного аналізу (відсутність розходжень у функціональному впливі часу на величину показника контролю).

Незалежно від обраного шляху на наступному етапі методу контролю якості обов'язково розробляється ситуаційна системи з нечіткою логікою для визначення дії факторного впливу. Встановлюється наявність кореляції між чинниками, що впливають на показник контролю. У залежності від того чи встановлено кореляційний зв'язок між показниками контролю чи ні, проводиться розрахунок сумарної стандартної невизначеності для корельованих даних або розрахунок сумарної стандартної невизначеності для некорельованих даних.

Фінальним етапом є розрахунок розширеної невизначеності з подальшим прийняттям рішення про дотримання умов технічного завдання.



Рисунки 1 – Структура методу контролю якості функціонування ІВС

Наведено обґрунтування доцільності використання дисперсійного аналізу для побудови моделі факторного впливу на якість роботи ІВС та розроблено математичну модель впливу п'яти факторів на результат виміру показника контролю (сумарну відносну похибку каналу вимірювання ІВС).

Математична модель впливу п'яти факторів з урахуванням їх перехресних взаємодій на результат виміру показника контролю має вигляд

$$\begin{aligned}
 E_{abcde_i} = & \bar{E} + R_a + S_b + T_c + U_d + V_e + (RS)_{ab} + (RT)_{ac} + (RU)_{ad} + (RV)_{ae} + \\
 & + (ST)_{bc} + (SU)_{bd} + (SV)_{be} + (TU)_{cd} + (TV)_{ce} + (UV)_{de} + (RST)_{abc} + \\
 & + (RSU)_{abd} + (RSV)_{abe} + (STU)_{bcd} + (STV)_{bce} + (TUV)_{cde} + \\
 & + (RUV)_{ade} + (RTU)_{acd} + (RTV)_{ace} + (RSTU)_{abcd} + (RSTV)_{abce} + \\
 & + (STUV)_{bcde} + (RTUV)_{acde} + (RSUV)_{abde} + \varepsilon_{abcde_i}.
 \end{aligned} \quad (1)$$

де a, b, c, d, e – номери, що позначають рівні факторів;

\bar{E} – середнє значення показника контролю;

R_a – відхилення результату вимірювання показника контролю E від його середнього значення \bar{E} , що обумовлене впливом параметру Q ;

S_b, T_c, U_d, V_e – відхилення результату вимірювання E_{abcde} від \bar{E} , обумовлене дією п'ятьох факторів;

$(RS)_{ab}, (RT)_{ac}, (RU)_{ad}, (RV)_{ae}, (ST)_{bc}, (SU)_{bd}, (SV)_{be}, (TU)_{cd}, (TV)_{ce}$ –

відхилення, що обумовлені парними взаємодіями факторів, що впливають;

$(RST)_{abc}, (RSU)_{abd}, (RSV)_{abe}, (STU)_{bcd}, (STV)_{bce}, (TUV)_{cde}$, – відхилення, що

$(RUV)_{ade}, (RTU)_{acd}, (RTV)_{ace}$

обумовлені перехресними взаємодіями трьох факторів;

$(RSTU)_{abcd}, (RSTV)_{abce}, (STUV)_{bcde}, (RTUV)_{acde}, (RSUV)_{abde}$ – відхилення, яке

обумовлені перехресними взаємодіями чотирьох факторів, що впливають;

ε_{abcde_i} – випадковий залишок;

i – номер багатократного вимірювання при фіксованих рівнях a, b, c, d, e .

Багатофакторна модель (1) потребує для свого дослідження об'єм вибірки $l^5 \cdot n$, де l – число рівнів за кожним з факторів (може бути наприклад однаковим), а n – число багаторазових спостережень для усіх сполучень рівнів факторів. Для статистичної значущості отриманих у ході дисперсійного аналізу висновків величина l повинна задовольняти умовам $l > 5$, $n > 1$. При $l = 6$, і $n = 2$ мінімальний об'єм числа п'ятимірних спостережень параметра контролю Q повинен бути $6^5 \cdot 2 = 15552$ значення.

Доцільно спростити модель (1) залишивши лише основні відхилення R_a, S_b, T_c, U_d, V_e , а також відхилення, зумовлені парними взаємодіями факторів $(RS)_{ab}, (RT)_{ac}, (RU)_{ad}, (RV)_{ae}$, приймаючи припущення, що трьохфакторні і чотирьохфакторні взаємодії дорівнюють нулю. Вибір саме цих парних взаємодій обумовлений тим, що R_a – відхилення результату вимірювання показника контролю E від його середнього значення \bar{E} , що обумовлене впливом параметру Q

є випадковою величиною, оскільки відображає ефект апріорно невизначених рівнів параметру контролю Q і обов'язково повинна враховуватись у парних взаємодіях за для підвищення вірогідності моделі. Ця величина впливає на точність результатів, отриманих за допомогою ІВС у найбільшій мірі, порівнюючи з іншими парними взаємодіями факторів, що залишилися. Така модель буде містити збільшений залишок γ_{abcde_j} , у який також входить випадковий залишок ε_{abcde_i} та відхилення, що обумовлені дією трьох і чотирьох факторів, що впливають, а також парними взаємодіями $(ST)_{bc}, (SU)_{bd}, (SV)_{be}, (TU)_{cd}, (TV)_{ce}$

$$E_{abcde_j} = \bar{E} + R_a + S_b + T_c + U_d + V_e + (RS)_{ab} + (RT)_{ac} + (RU)_{ad} + (RV)_{ae} + \gamma_{abcde_j}. \quad (2)$$

Складність моделі (2) може бути знижена якщо звести її до чотирьох двофакторних спрощених моделей перехресної класифікації. Це може бути зроблено у випадку, коли трьохфакторні і чотирьохфакторні взаємодії несуттєві (приблизно дорівнюють нулю):

$$E_{ab_j} = \bar{E} + R_a + S_b + (RS)_{ab} + \gamma_{(S)ab_j}; c = d = e = i = j \quad ; \quad (3)$$

$$E_{ac_j} = \bar{E} + R_a + T_c + (RT)_{ac} + \gamma_{(T)ac_j}; b = d = e = i = j \quad ; \quad (4)$$

$$E_{ad_j} = \bar{E} + R_a + U_d + (RU)_{ad} + \gamma_{(U)ad_j}; b = c = e = i = j \quad ; \quad (5)$$

$$E_{ae_j} = \bar{E} + R_a + V_e + (RV)_{ae} + \gamma_{(V)ae_j}; b = d = c = i = j \quad , \quad (6)$$

де j – номер багаторазових вимірювань показника E у комірці таблиць вихідних даних моделей (3) – (6);

$\gamma_{(S)ab_j}, \gamma_{(T)ac_j}, \gamma_{(U)ad_j}, \gamma_{(V)ae_j}$ – випадкові залишки, що обумовлені чотирма факторами.

Порівняння залишків моделей (3) – (6) із залишками моделей (1) та (2) показує, що спрощення моделі знижує її точність, бо ці залишки більше ніж γ_{abcde_j} , а $\gamma_{abcde_j} > \varepsilon_{abcde_i}$.

Проведено дослідження умови, що дозволяє синтезувати модель (1) на основі моделей (3) – (6). Для кожної із цих моделей існує одне і теж саме основне відхилення R_a , додаткові відхилення S_b, T_c, U_d, V_e , а також відхилення, що зумовлені ефектами парної взаємодії.

Для моделювання додаткового факторного впливу (за стовбцями таблиці вихідних даних) на показник E треба провести наступні операції:

- ранжирування за зростанням внутрігрупові значення показника контролю E_p , що відповідає обраному додатковому фактору впливу;
- розбиття ранжированого (за усіма m групами) ряду значень показника E_p на r підгруп;
- у кожній із підгруп обрати t значень інформаційного показника E , що відповідає t значенням показника E_p і занести їх у комірки вихідних даних.

Отримана $m \times r$ таблиця результатів спостережень значень інформаційного показника E із t багаторазовими спостереженнями у кожній із $m \times r$ комі-

рок може бути використано для дисперсійного аналізу будь якої із моделей (3) – (6) перехресних класифікацій, відповідним до заданого додаткового фактору, що впливає E_p , $p = \overline{1,4}$. Введено позначення цих факторів як E_S, E_T, E_U, E_V . У загальному випадку будь який з цих чотирьох факторів буде позначатися як E_p . Тоді будь яка з моделей (3) – (6) може бути представлена виразом

$$E_{azj} = \bar{E} + R_a + p_z + (Rp)_{az} + \gamma_{azj}, \quad (7)$$

де γ_{azj} – випадковий залишок.

Повне розкладання суми квадратів відхилень величин E_{azj} від \bar{E} (із виконанням початкових умов та обмежень моделі (1)) має наступний вигляд

$$L = L_R + L_p + L_{Rp} + L_{\gamma p}. \quad (8)$$

Отриманий вираз для суми квадратів відхилень величин E_{azj} дає змогу провести дисперсійний аналіз моделі (7). Результати виконаного дисперсійного аналізу моделі (7) представлено у вигляді стандартної табл. 1, де $\bar{E}_a, \bar{E}_z, \bar{E}_{az}$ – середні значення за строками, стовбцями та у комірках.

Таблиця 1 – Результати дисперсійного аналізу при перехресній класифікації

Джерело мінливості	Число ступенів вільності	Сума квадратів
Основний фактор Q	$m - 1$	$L_R = tr \sum_{q=1}^m (\bar{E}_a - \bar{E})^2$
Додатковий фактор E_p	$r - 1$	$L_p = tm \sum_{z=1}^r (\bar{E}_z - \bar{E})^2$
Взаємодія між Q та E_p	$(m-1)(r-1)$	$L_{Rp} = t \sum_{q=1}^m \sum_{z=1}^r (\bar{E}_{az} - \bar{E}_a - \bar{E}_z + \bar{E})^2$
Залишок (у середині комірки)	$mr(t-1)$	$L_{\gamma p} = \sum_{q=1}^m \sum_{z=1}^r \sum_{j=1}^t (E_{azj} - \bar{E}_{az})^2$
Загальний	$N - 1$	$L = \sum_{q=1}^m \sum_{z=1}^r \sum_{j=1}^t (E_{azj} - \bar{E})^2$

Враховуючи, що для усіх моделей (3) – (6) однаковим є \bar{E} та суми L і L_R представимо суму квадратів відхилень E_{abcde} від E моделі (2) як об'єднання суми (7), $p = \overline{1,3}$ із фіктивною залишковою сумою L_{γ}^* , яка характеризує вплив неврахованих у моделі факторів

$$L = L_R + V_S + L_T + L_U + L_V + L_{RS} + L_{RT} + L_{RU} + L_{RV} + L_{\gamma}^*. \quad (9)$$

Вираз (9) дозволяє спростити модель (2) та представити її у вигляді

$$E_{abcde_j} = \bar{E} + R_a + S_b + T_c + U_d + V_e + (RS)_{ab} + (RT)_{ac} + (RU)_{ad} + (RV)_{ae} + \gamma_{abcde_j}^* \quad (10)$$

де $\gamma_{abcde_j}^*$ – збільшений випадковий залишок на який відрізняються модель (10) від (2), що обумовлений дією чотирьох факторів, що залишилися, а також парними взаємодіями $(ST)_{bc}, (SU)_{bd}, (SV)_{be}, (TU)_{cd}, (TV)_{ce}$.

У табл. 2 представлено результати проведеного дисперсійного аналізу спрощеної моделі (10)

Таблиця 2 – Результати дисперсійного аналізу спрощеної моделі (10)

Джерело мінливості	Число ступенів вільності	Сума квадратів відхилень
Основний фактор Q	$f_R = m - 1$	$\bar{L}_R = L_R / f_R$
Фактор E_S	$f_S = r - 1$	$\bar{L}_S = L_S / f_S$
Фактор E_T	$f_T = r - 1$	$\bar{L}_T = L_T / f_T$
Фактор E_U	$f_U = r - 1$	$\bar{L}_U = L_U / f_U$
Фактор E_V	$f_V = r - 1$	$\bar{L}_V = L_V / f_V$
Взаємодія QE_S	$f_{RS} = (m - 1) \cdot (r - 1)$	$\bar{L}_{RS} = L_{RS} / f_{RS}$
Взаємодія QE_T	$f_{RT} = (m - 1) \cdot (r - 1)$	$\bar{L}_{RT} = L_{RT} / f_{RT}$
Взаємодія QE_U	$f_{RU} = (m - 1) \cdot (r - 1)$	$\bar{L}_{RU} = L_{RU} / f_{RU}$
Взаємодія QE_V	$f_{RV} = (m - 1) \cdot (r - 1)$	$\bar{L}_{RV} = L_{RV} / f_{RV}$
Залишок	$f_\gamma = N - m(4r - 3)$	$\bar{L}_\gamma = L_\gamma^* / f_\gamma$
Загальний	$f = N - 1$	$\bar{L} = L / f$

Визначені обмеження на кількість рівнів параметра контролю та факторів, що впливають на сумарну відносну похибку каналу вимірювання ІВС при заданій метрологічній невизначеності параметра контролю. Спрощена модель (10) дає можливість оцінити кількість очікуваної інформації про рівні параметру Q для інформаційного показника E при урахуванні рівнів як факторів, що впливають так і їх сумісних взаємодій

$$I = \log_2 \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_E}{\sigma_{\Delta E}} \right)^2}, \quad (11)$$

де $\sigma_E^2 = \bar{L}_R$,

$$\sigma_E^2 = \bar{L}_R = \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2, \quad (12)$$

де $\bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n E_i$; $\sigma_{\Delta E}^2$ – являє собою функцією сум квадратів відхилень ($\bar{L}_R, \bar{L}_S, \bar{L}_T, \bar{L}_U, \bar{L}_V \dots, \bar{L}_{RV}$). Отримані формули дисперсійного аналізу, що дозволяють оцінювати вірогідності статистичних висновків про інформаційну значущість показників контролю для розробленої спрощеної моделі перехресної класифікації. На підставі коваріаційного аналізу отримані аналітичні співвідношення, які дозволяють оцінити кількість інформації за кожним із показників контролю при факторному впливі на лінійну функцію перетворення цих показників. Розроблено моделі дискримінантного аналізу для оцінювання кількості інформації за ймовірностями помилок першого та другого роду, а також встановлені аналітичні залежності, що дозволяють ранжувати показники контролю за зменшенням їх чутливості до зміни рівнів параметра контролю. Розроблено спосіб оптимізації (за максимумом очікуваної інформації) системи показників вимірювального контролю та отримано розрахункове рівняння на підставі коваріаційного аналізу односторонньої класифікації результатів багатомірних вимірювань.

У третьому розділі продемонстровано доцільність використання комбінації методів статистичного аналізу для контролю якості роботи ІВС на трьох прикладах систем, а саме: системи зважування автотранспорту, установки комплексної підготовки газу та штучної екосистеми.

Виконано перевірку гіпотези про відсутність порушення стабільності роботи датчиків вказаних систем за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу (рівності середніх значень), лінійного регресійного аналізу (на відсутність впливу часу на величину показника за кожній із вибірок) та коваріаційного аналізу (відсутність розходжень у функціональному впливі часу на величину показника). Наприклад, для контролю стабільності роботи датчиків температури, що працюють у складі мікропроцесорної системи контролю параметрів мікроклімату штучної екосистеми аналіз проводився у наступній послідовності. Використано три серії результатів вимірів показника контролю T (температура води), що отримані з датчика температури DS18B20 у продовж 12 годин ($i = 1, 2, \dots, 12$ годин).

Метод дисперсійного аналізу складається у перевірці за критерієм F нульової гіпотези H_0 про рівність факторної й залишкової дисперсії. Введено позначення, T – показник контролю (температура), у ході виміру значення якого, отримані вибірки F_j . \bar{T} – середнє значення всіх результатів спостереження N , а \bar{T}_i – середнє значення j - і вибірки. Висунуто гіпотезу: $H_0: H_0: \bar{T}_1 = \bar{T}_2 = \dots = \bar{T}_k = \bar{T}$ (процес не має порушень), тоді справедливе

$$T_{ji} = \bar{T} + \gamma_j + e_{ji}, \quad (13)$$

де γ_j – відхилення, викликане впливом фактору;

e_{ji} – випадкове відхилення в j -ої групі, для i -го спостереження.

Задано бажану надійність висновку – встановлюємо рівень значимості $\alpha = 0,05$ ($P = 0,95$). Середнє значення за трьома вибірками $\bar{T} = 21,37$ °C.

Загальна сума квадратів відхилень спостережуваних значень від загального середнього визначається за формулою:

$$S_{\text{заг}} = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^q (T_{ij} - \bar{T})^2, S_{\text{заг}} = 2,109 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Факторна сума відхилень групових середніх від загальної середньої, що характеризує розсіювання між групами має вигляд:

$$S_{\text{факт}} = q \sum_{j=1}^p (T_{\text{гр}j} - \bar{T})^2, S_{\text{факт}} = 0,014 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Залишкова сума квадратів відхилень спостережуваних значень групи від свого групового середнього, що характеризує розсіювання усередині груп, визначається як

$$S_{\text{зал}} = \sum_{i=1}^q (T_{i1} - \bar{T}_{\text{гр}1})^2 + \sum_{i=1}^q (T_{i2} - \bar{T}_{\text{гр}2})^2 + \dots + \sum_{i=1}^q (T_{iN} - \bar{T}_{\text{гр}N})^2 = 2,095 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Якщо справедливо гіпотезу H_0 , то всі ці дисперсії є незміщеними оцінками генеральної дисперсії. Показано, що перевірка нульової гіпотези зводиться до порівняння факторної й залишкової дисперсії за критерієм Фішера-Снедекора. Якщо нульова гіпотеза невірна, то зі зростанням розбіжності між математичними очікуваннями збільшується й факторна дисперсія, а разом з нею й відношення $F_{\text{спост}} = S_{\text{факт}}^2 / S_{\text{зал}}^2$, тому в результаті $F_{\text{спост}}$ виявиться більше $F_{\text{кр}}$, і гіпотеза про рівність дисперсій буде відкинута. $F_{\text{спост}} = 0,014$. $F_{\text{кр}} = 3,32$. при рівні значимості $\alpha = 0,05$ ($P = 0,95$).

Оскільки $F_{\text{кр}} > F_{\text{спост}}$ гіпотеза про рівність математичних очікувань генеральних сукупностей підтверджується, а, отже, підтверджується й гіпотеза H_0 про рівність факторної й залишкової дисперсій.

Перевірено гіпотези про відсутність порушення стабільності роботи датчика температури на підставі лінійного регресійного аналізу (рис. 2, рис. 3, рис. 4) для отриманих вибірок F_1, F_2, F_3 .

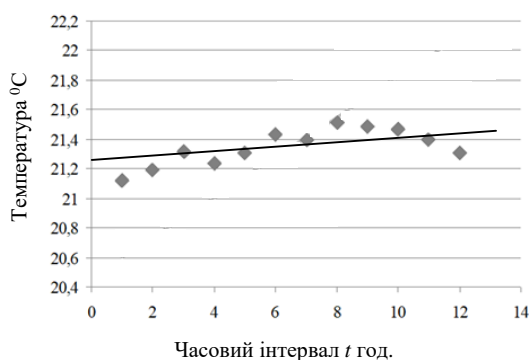


Рисунок 2 – Графічне відображення прямої регресії вибірки F_1
 $F_p = 0,208$

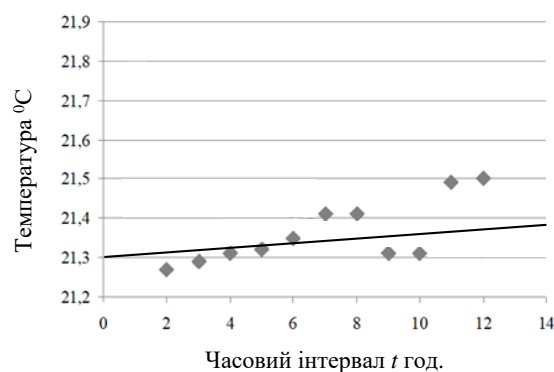


Рисунок 3 – Графічне відображення прямої регресії вибірки F_2
 $F_p = 0,031$

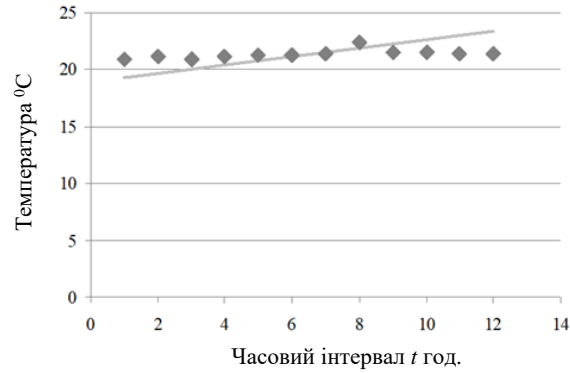


Рисунок 4 – Графічне відображення прямої регресії вибірки F_3
 $F_p = 1,745$

$$F_{кр} = 2,97, \quad F_p < F_{кр} \text{ при рівні значимості } \alpha = 0,05.$$

Результати перевірки гіпотези про відсутність порушення стабільності роботи датчика температури за допомогою коваріаційного аналізу представлено у табл. 3.

Таблиця 3 – Результати коваріаційного аналізу

Джерело впливу на T_i	Сума квадратів відхилень	Число ступенів вільності	Середній квадрат
B_0	$S_0 = \omega_0 + B_0^2 = 429,001$	$\nu_0 = 1$	$\bar{S}_0 = \frac{S_0}{1} = S_0$
(AB)	$S_{AB} = S - S_0 - S_R = -621814$	$\nu_{AB} = 2k - 2 = 4$	$\bar{S}_{AB} = \frac{S_{AB}}{\nu_{AB}} = -155453,5$
Випадкова остача	$S_R = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (x_{iji} - A_j - B_j \cdot t_{ji})^2 = 621386,7$	$\nu_{зал} = N - 2k = 6$	$\bar{S}_{зал} = \frac{S_{зал}}{\nu_{зал}} = 103564,3$
Загальний	$S = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ji} - \bar{x})^2 = 2,1088$	$\nu = N - 1 = 11$	

$$1) F_0 = \frac{\bar{S}_0}{\bar{S}_{зал}} = 3,25,$$

$$2) F_1 = \frac{\bar{S}_{AB}}{\bar{S}_{зал}} = 1,5.$$

$$F_{кр} = F_{1,(N-2k),\alpha} = F_{1,6,0.05} = 4,49$$

$$F_{кр} = F_{4,6,0.05} = 4,28.$$

$$F_0 < F_{кр}$$

$$F_1 < F_{кр}$$

Зроблено висновки про доцільність використання комбінації методів статистичного аналізу для контролю якості роботи обладнання ІВС різного призначення.

У четвертому розділі запропоновано розроблений пристрій для контролю лазерної системи виміру геометричних розмірів та якості поверхні деталей для підвищення точності лазерних систем шляхом використання тестових методів контролю із подальшою корекцією функцій перетворення.

Пристрій працює наступним чином (рис. 5). Світловий потік від лазерного каналу 1, проходячи через фокусуючу двоопуклу лінзу 2, потрапляє на світлоподільну призму 3, яка ділить один світловий потік на два різних за інтенсивністю світлопотоків. Обидва потоки фокусуються за допомогою окремих фокусуючих систем 4, 5. Для вирівнювання інтенсивностей на шляху робочого світлового потоку встановлено оптичний атенюатор 6. Світлові потоки потрапляють відповідно на ідеальну еталонну за геометричними розмірами поверхню 7 і об'єкт вимірювання 8. На еталонну поверхню нанесено ділянку зразкового перепаду розміру ΔX . З об'єктів 7 і 8 зчитується інформація про якість їх поверхні за допомогою відбиття світлових потоків від поверхонь даних об'єктів. Проходячи через системи відбиваючих дзеркал 9, 10, 11 світлові потоки від обох об'єктів потрапляють на кубик Луммера-Бродхуна 12, за допомогою якого відбувається порівняння освітленостей. Дані, отримані після проходження світла через кубик 12, потрапляють до світлоприймача 13 і передаються на блок обробки даних 14, в якому відбувається розрахунок математичного очікування та середньоквадратичного відхилення розміру об'єкту від еталону.

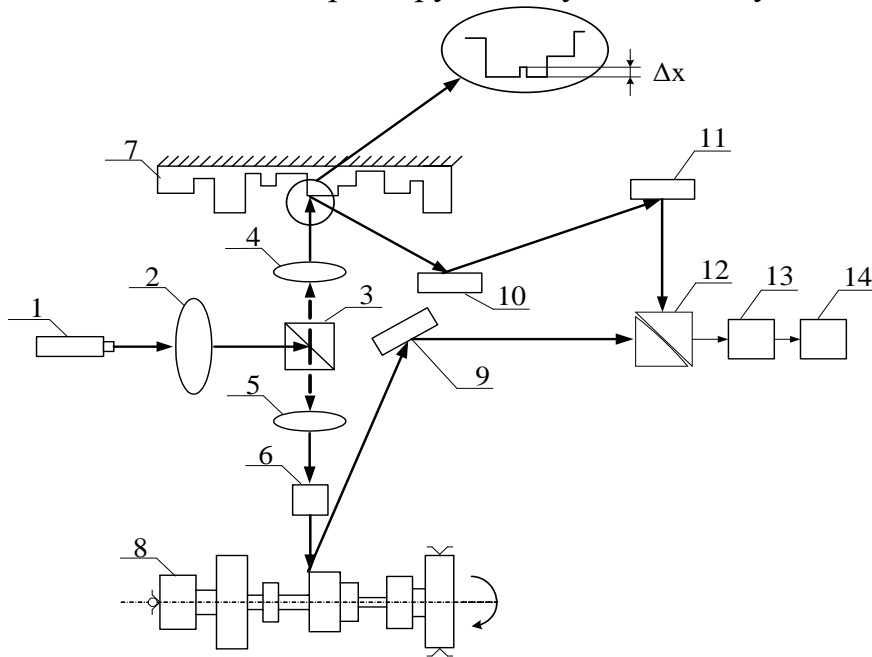


Рисунок 5 – Структурна схема системи лазерного контролю (СЛК)

Розроблено реляційно-різницеву модель оператора динамічної корекції похибки лазерної системи контролю

$$\frac{x(0)}{x(0)_H} = \lambda_{RD} = \frac{(1 - \delta_{D2})}{(1 - \delta_{D2H})} \cdot \frac{(1 - \delta_{D1H})}{(1 - \delta_{D1})} \cdot \frac{\Delta Y_{21}(t_2, t_1)}{\Delta Y_{31}(t_3, t_1)} \cdot \frac{\Delta Y_{21H}(t_2, t_1)}{\Delta Y_{21}(t_2, t_1)} \cdot \frac{Q}{Q_H} \cdot \frac{k_H}{k}, \quad (14)$$

де $x(0)$ – значення вхідного сигналу; $x(0)_H$ – номінальне значення вхідного сиг-

налу; Q_H та k_H – номінальні параметри адитивного і мультиплікативного тестових впливів відповідно; λ_D – реляційно-різницевий тестовий динамічний оператор корекції значення вхідного сигналу вимірювального перетворювача; $\Delta Y_{21}(t_2, t_1)$, $\Delta Y_{31}(t_3, t_1)$ – значення прирощення вихідного сигналу вимірювального перетворювача які визначаються для моментів поточного часу t_1, t_2, t_3 , віддалених одне від одного на інтервал T ; δ_{D1} , δ_{D2} – відносні значення динамічних похибок вимірювання відповідних різницевих значень, які визначаються як:

$$\delta_{D1} = \frac{k \cdot \tau}{\Delta Y_{21}(t_2, t_1)}; \quad (15)$$

$$\delta_{D2} = \frac{Q_1 \cdot (1 - e^{-(t_1-T)/\tau}) + Q_2 \cdot (1 - e^{-(t_3-3T)/\tau}) + k \cdot \tau (1 - e^{-(t_3-2T)/\tau})}{\Delta Y_{31}(t_3, t_1)}, \quad (16)$$

$$\Delta Y_{21}(t_2, t_1) \neq 0, \Delta Y_{31}(t_3, t_1) \neq 0.$$

Значення оцінки вхідного сигналу $x(0)$ знайдено наступним чином:

$$x(0) = x(0)_H \cdot \lambda_{RD} \cdot (1 + \delta_D), \quad (17)$$

де $\delta_{D2} + \delta_{D1} = \delta_D$ – сумарна динамічна похибка.

$$\lambda_{RD} = \frac{\lambda_D}{\lambda_{DH}}. \quad (18)$$

Динамічна похибка реляційно-різницевої динамічна моделі має вигляд

$$\delta_D \cong \left(\left[1 - (\Delta \hat{k} \cdot \Delta \tau) \right] / \Delta Y_{21} \right) \cdot \left(\left[1 - (Q_1 + Q_2 + \Delta \hat{k} \cdot \Delta \tau) \right] / \Delta Y_{31} \right), \quad (19)$$

де $\Delta \hat{k}$ – оцінка абсолютної похибки швидкості зміни вхідного сигналу.

Похибка визначення динамічної складової δ_D для заданої перехідної функції визначається у припущенні, що $\delta \tau = (\tau - \tau_H) / \tau = \Delta \tau / \tau \leq 0,01$, а $\tau \leq 5$.

На рис. 6 наведено графіки залежності δ_D від параметра $(t_3 - 2T) / \tau \leq 5$ при різних значеннях $\delta \tau$ і наступних значеннях параметрів системи тестового контролю: $T = 0,1$ с; $\tau = 0,01$ с; $\Delta \tau = 0,001$ с; $Q_1 = 0,01$ мкм; $Q_2 = 0,02$ мкм; $k = 0,2$; $\Delta \hat{k} = 0,01$; $t_3 = 0,3$ с.

При відпрацюванні лазерною системою контролю вихідних сигналів у моменти часу $t_1 = T$, $t_2 = 2T$, $t_3 = 3T$ для співвідношення $T/\tau = 5$ перехідні процеси на виході у системі тестового контролю, що зумовлені її інерційністю є завершеними на 99,9 %. При цьому, відносна динамічна похибка другого роду не перевищує значення 0,4 %, що на 0,1 % менше за рекомендоване значення 0,5 %.

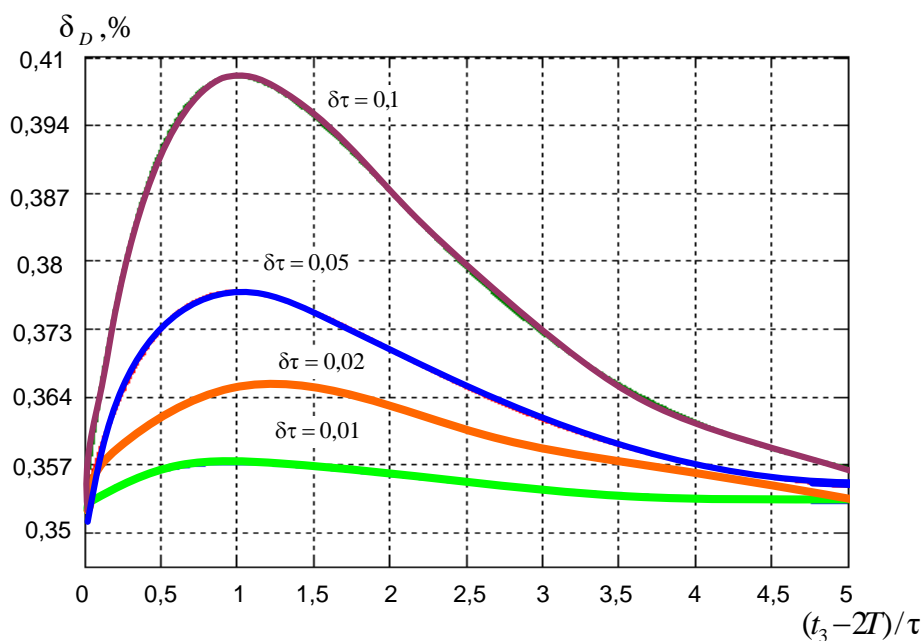


Рисунок 6 – Графіки зміни динамічної складової похибки системи тестового контролю при різних значеннях величини $\delta\tau$

Проведено аналіз факторного впливу на роботу лазерної системи контролю якості поверхні деталей, завдяки якому виділені основні фактори, що впливають на точність роботи. Запропановано комп'ютерну модель системи контролю на якій виконано моделювання дії факторного впливу на точність лазерної системи контролю для металообробляючих верстатів.

Однією з найпоширеніших проблем металообробляючих верстатів є вібрація. Основними особливостями низькочастотних вібрацій є амплітуда вібрації, частота вібрацій (10 ~ 300 Гц), фаза вібрації, низький акустичний шум, що створюється вібрацією. Затримка 1/4 періоду дорівнює зрушенню за фазою на 90 градусів. Модель СЛК із урахуванням одночасної дії двох факторних впливів (засміченість повітря робочої зони та вібрація верстата) представлено на рис. 7.

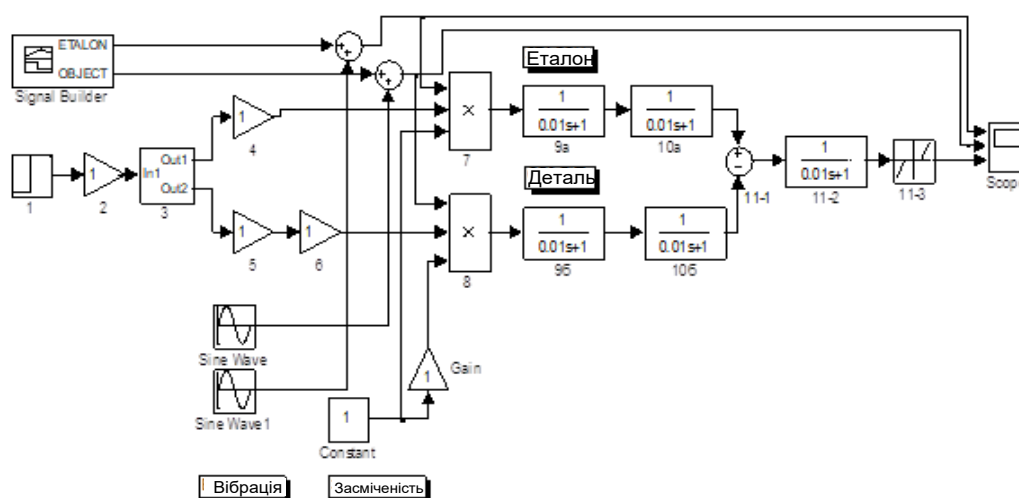


Рисунок 7 – Модель СЛК із урахуванням одночасної дії двох факторних впливів (засміченість повітря робочої зони та вібрація верстата)

Модель ЛСК повинна мати інтегруючі властивості, що дає змогу задавити адитивний шум. Наявність шуму синусоїдальної форми при зсуві фази на $\pi/4$ утворює «брижі» за контуром деталі і еталону (рис. 8). Вплив шуму зростає при збільшенні фазового зсуву. Очевидно, що вплив вібрацій більш помітний, при збільшенні амплітуди коливань.

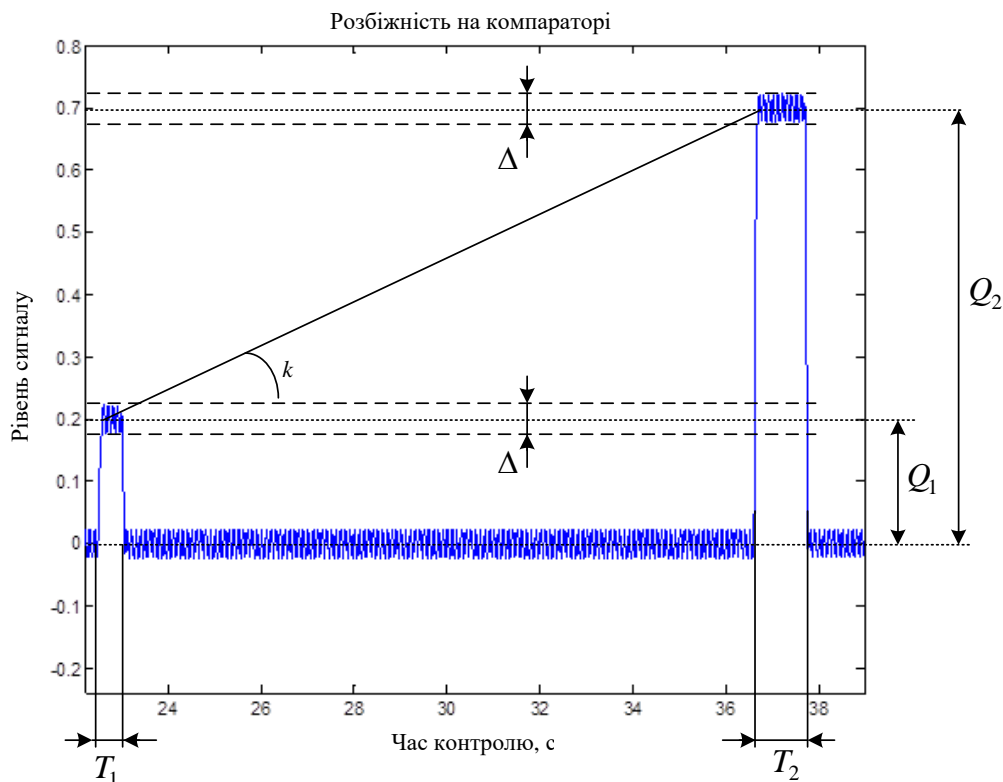


Рисунок 8 – Результат дії двох факторних впливів (засміченість повітря робочої зони та вібрація верстата) (при фазі $\pi/4$) на результат відпрацювання тестових ділянок

На рис. 8 наступні позначення: T_1 , T_2 – час дії першого і другого тестового впливу; Δ – ширина шумової смуги; Q_1 , Q_2 – рівні дії першого і другого тестових впливів відповідно (адитивний тест); k – кут нахилу між початками дії першого і другого тестових впливів, зміна якого відповідно до встановленого значення характеризує наявність мультиплікативної похибки (мультиплікативний тест).

Експериментально доведено, що використання пристрою для контролю лазерної системи виміру геометричних розмірів та якості поверхні деталей підвищило вірогідність контролю на 5 %. Зроблено висновки про необхідність провадження періодичного тестування лазерних систем контролю якості безпосередньо в процесі експлуатації та доцільність використання при обробці результатів реляційно-різницевої моделі операторів корекції похибок вимірювань.

У п'ятому розділі наведено результати використання алгоритмів нечіткої логіки для оцінювання якості роботи ІВС різного призначення на підставі визначення основних факторів, що мають найбільший вплив на якість готової продукції. Структурна схема нечіткої моделі управління для задачі контролю якості роботи ІВС наведена на рис. 9.



Рисунок 9 – Структурна схема нечіткої моделі управління для задачі контролю якості роботи ІВС

Нечітка модель управління працює наступним чином. Для отримання інформації щодо відповідності метрологічних характеристик первинних і вторинних вимірювальних перетворювачів (ВП) ІВС встановленим значенням блок формування тестових впливів формує адитивний та мультиплікативний тести. Інформація про реакцію перетворювачів на тестові впливи надходить до контролеру метрологічної ситуації та блок аналізу метрологічної ситуації формує формалізований опис метрологічної ситуації, яка виникла на об'єкті контролю для вимірювальної підсистемі ІВС. Блок прийняття рішень управління-координації на підставі результатів контролю ВП. Алгоритм роботи системи нечіткої логіки складається з послідовного виконання трьох операцій: фазифікації, обчислення правил і дефазифікації, або приведення до чіткості.

Для формування систематики нечітких понять використовуються лінгвістичні зміни як особлива форма організації експертної інформації. Етап фазифікації статистичних даних метрологічного експерименту полягає у визначенні ступені істинності, тобто значення функцій приналежності для кожного правила (передумов). Іншими словами – відбувається перехід від чітких значень у формі чисел до лінгвістичних терм, що характеризують діапазон зміни вхідних числових даних. Інформація про похибки ВП відображується у нечіткі множини відповідно до предметної шкали сформованої групою або одним експертом-метрологом. Формалізований опис нечіткої поточної ситуації поступає у блок прийняття рішень. Отримана інформація ідентифікується з однією з типових ситуацій шляхом пошуку останньої на основі співставлення ситуацій. Цей етап

відноситься до обчислення правил, тобто формування нечіткого висновку. Саме блок прийняття рішень формує вихідний дефазифікований сигнал у зручному для експерта-метролога вигляді. Операція дефазифікації полягає у зворотному переході від лінгвістичних терм з якими складались правила до чітких висновків у числовій формі.

Наприклад, побудовано евристичний аналізатор для визначення впливу параметрів технологічного процесу на якість вареної ковбаси за допомогою інтерфейсу користувача системи fuzzy-logic за алгоритмом Мамдані. У моделі евристичного аналізатора чотири входи і один вихід. У якості першого входу обрано температура при формуванні ковбаси (Температура 1). У якості другого входу – Тиск. Третій вхід – рівень %RH (Вологість). Четвертий – температура обсмаження ковбаси (Температура 2). Для вхідних величин встановлено нормальний закон розподілу. У якості вихідної величини обрано якість вареної ковбаси (Якість) (рис. 10).

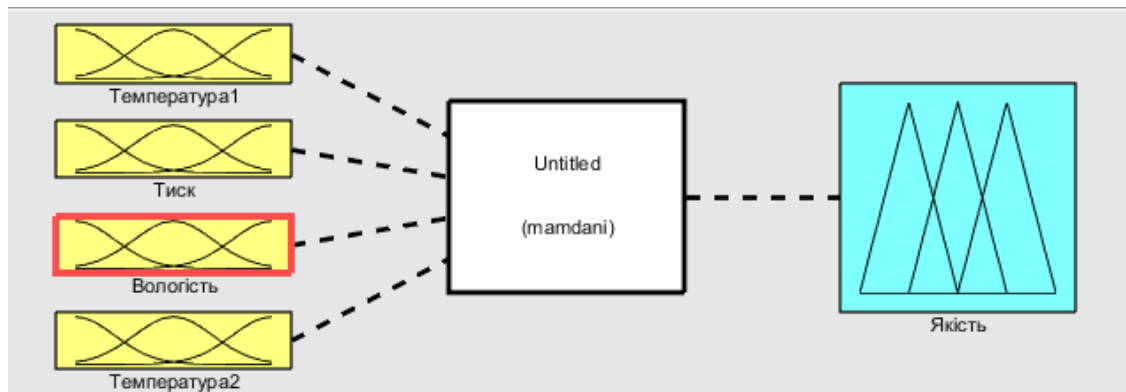


Рисунок 10 – Вікно завдання вхідних та вихідних параметрів евристичного аналізатора процесу виготовлення вареної ковбаси

Встановлено функції належності для обраної вихідної змінної – якості. Задано діапазон у якому змінюється функція: від 1 до 10 балів. Встановлено тип функції належності у графі Туре: для трьох функцій належності, а саме погано – (bad), задовільно – (average) та відмінно – (good). Для трьох функцій обрано розподіл трикутний закон розподілу (trimf) (рис. 11).

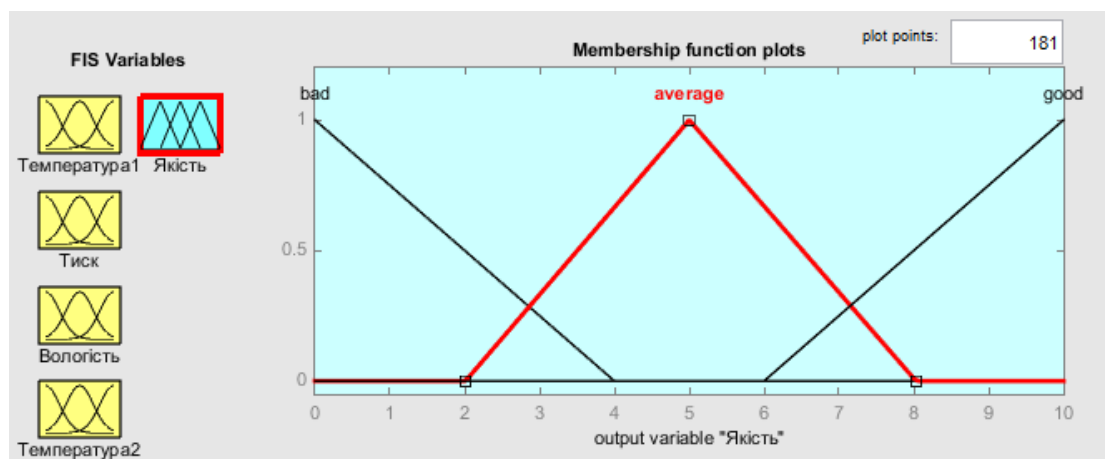
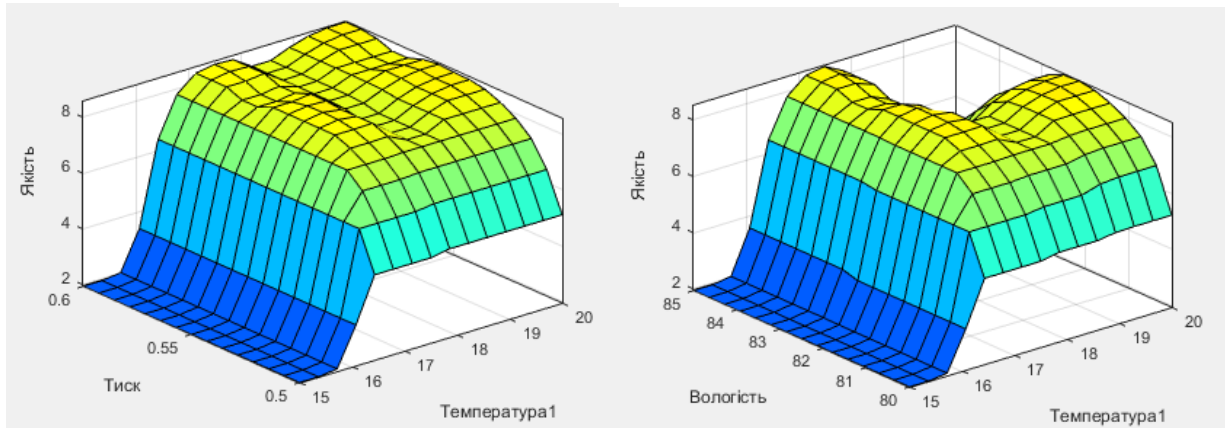


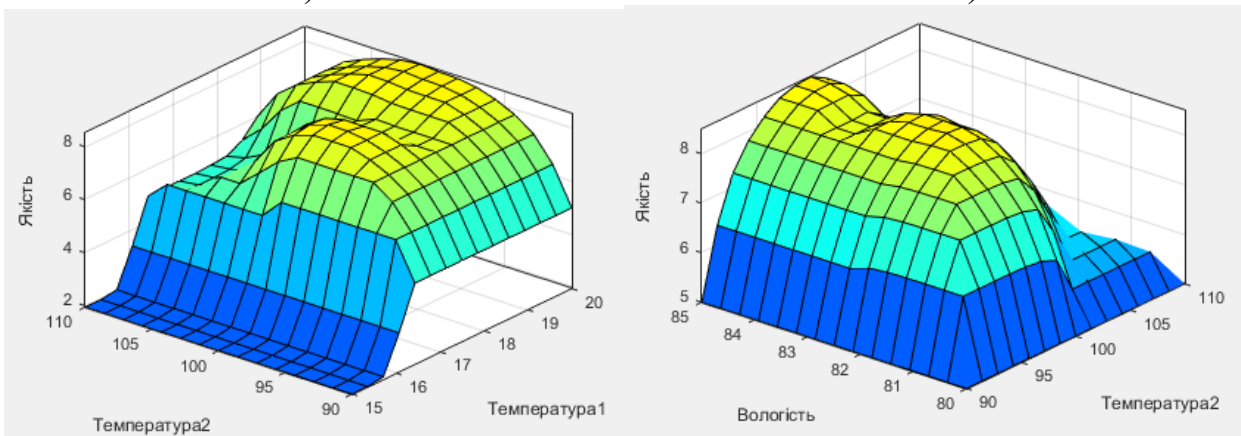
Рисунок 11 – Вікно завдання вихідного параметру – якість вареної ковбаси

Поверхні відгуку при можливих сполученнях параметрів, що впливають на якість вареної ковбаси представлено на рис. 12.



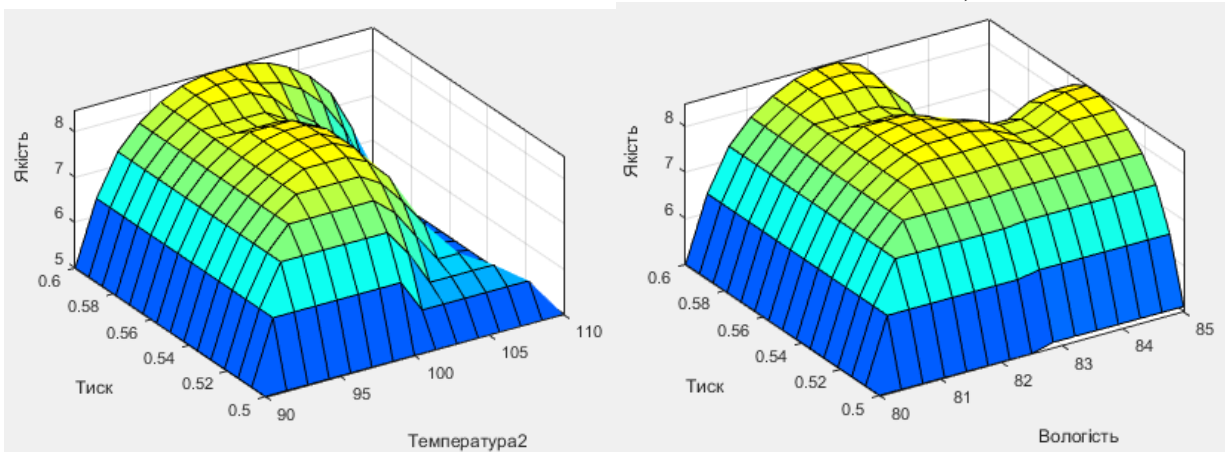
а)

б)



в)

г)



д)

е)

а) рівень температури при формуванні ковбаси та рівень тиску при формуванні, б) рівень температури та вологості, в) рівень температури при формуванні ковбаси та рівень температури при її обсмажуванні, г) рівень вологості при формуванні ковбаси та рівень температури при її обсмажуванні, д) рівень температури при обсмажуванні ковбаси та тиску при її формуванні, е) рівень тиску при формуванні ковбаси та рівень вологості при її формуванні.

Рисунок 12 – Поверхні відгуку параметрів, що впливають на якість вареної ковбаси

Встановлено, що оптимальна якість вареної ковбаси буде коли рівень температура при формуванні ковбаси дорівнює $17,5^{\circ}\text{C}$, рівень тиску при формуванні $0,55\text{ МПа}$, рівень вологості при формуванні – $82,5\% \text{ RH}$, температури при обсмажуванні – 100°C . Експериментально доведено, що використання розробленої ІВС технологічного процесу виготовлення вареної ковбаси разом із запропонованим евристичним аналізатором на підставі нечіткої логіки підвищило вірогідність контролю параметрів технологічного процесу на $4,9\%$.

За допомогою графічного інтерфейсу користувача системи fuzzy logic у розділі також визначено конкретні рівні параметрів технологічного процесу для якісного виробництва карамелі, питного молока, крабових паличок, кефіру, а також рівні параметрів для підтримки високої якості води у акваріумі штучної екосистеми.

У висновках доведено доцільність використання евристичного аналізатора системи fuzzy logic для вирішення науково-прикладних задач, що ставляться перед інформаційно-вимірювальними системами на прикладах ІВС різного призначення.

У шостому розділі запропоновано базовий алгоритм розрахунку невизначеностей результатів вимірювань, що отримані за допомогою ІВС різного призначення і на підставі алгоритму розроблено програмний продукт на мові JavaScript, завдяки якому стає можливим проводити розрахунки для визначенню сумарної та розширеної невизначеності для корельованих та некорельованих даних.

Виконано визначення впливу зовнішніх факторів на результат безконтактного теплового контролю біологічних об'єктів (БО). У якості БО обрано людину. Встановлення кореляційної залежності проводились у два найбільш протилежні за параметрами клімату сезони – зима і літо. Для проведення дослідження було взято одну людину, температура якої вимірювалась за допомогою вимірювальної системи, яка складається із тепловізора FLIR Vue Pro R 640, що встановлений на квадрокоптері Cheerson CX-20 та персонального комп'ютера типу «ноутбук». Вимірювання проводились з інтервалом у оду годину впродовж доби. Данні отримані у літній період 10.08.2022. У зимовий період вимірювання проводились 20.01.2022. Проаналізовано випадок взаємодії трьох величин, а саме встановимо зв'язок між температурою тіла БО (t), вологістю повітря (h) і температурою повітря (a).

Коефіцієнти кореляції визначаються за наступними формулами:

$$r_{ha} = \frac{\sum (h_i - \bar{h}) \cdot (a_i - \bar{a})}{(N-1)s_h s_a}, \quad r_{at} = \frac{\sum (a_i - \bar{a}) \cdot (t_i - \bar{t})}{(N-1)s_a s_t}, \quad r_{ht} = \frac{\sum (h_i - \bar{h}) \cdot (t_i - \bar{t})}{(N-1)s_h s_t},$$

$$\left(\sum = \sum_{i=1}^N \right),$$

де N – загальна кількість результатів експерименту, тобто загальна кількість точок (h_i, a_i, t_i) , а s_h, s_a, s_t – параметри незміщеної вибіркової дисперсії :

$$s_h^2 = \frac{\sum (h_i - \bar{h})^2}{(N-1)}, s_a^2 = \frac{\sum (a_i - \bar{a})^2}{(N-1)}, s_t^2 = \frac{\sum (t_i - \bar{t})^2}{(N-1)}.$$

Мірою залежності між величиною t та величинами h і a є зведений коефіцієнт кореляції

$$R = \sqrt{\frac{r_{ht}^2 + r_{at}^2 - r_{ha} \cdot r_{ht} \cdot r_{at}}{1 - r_{ha}^2}} = \sqrt{1 - \frac{1}{(N-1) \cdot s_t^2} \cdot \sum_{i=1}^N [t_i - \bar{t} - b_{t|h}(h_i - \bar{h}) - b_{t|a}(a_i - \bar{a})]^2}. \quad (20)$$

Для виявлення наявності кореляції між вказаними параметрами проведемо розрахунки коефіцієнтів кореляції та зведеного коефіцієнту кореляції. Результати розрахунків зведено у табл. 4.

Таблиця 4 – Результати розрахунків основних параметрів кореляційних залежностей за літній і зимовий періоди

Літо. 10.08.2022			Зима. 20.01.2022		
$s_h = 4,459$	$s_a = 21,652$	$s_t = 0,834$	$s_h = 4,926$	$s_a = 2,964$	$s_t = 1,282$
$s_h^2 = 19,88$	$s_a^2 = 468,81$	$s_t^2 = 0,695$	$s_h^2 = 24,26$	$s_a^2 = 8,783$	$s_t^2 = 1,644$
$r_{ha} = -0,986$	$r_{at} = -0,105$	$r_{ht} = 0,078$	$r_{ha} = -0,932$	$r_{at} = 0,954$	$r_{ht} = -0,932$
$R = 0,184$			$R = 0,961$		

Перевірити значимість коефіцієнту кореляції для його подальшого обліку (або ігнорування) дозволяє застосування критерію Стьюдента

$$\frac{|R|}{\sqrt{1-R^2}} \sqrt{n-2} \geq t_p(n-2), \quad (21)$$

де $t_p(n-2)$ – коефіцієнт Стьюдента для числа ступенів вільності $(n-2)$ та рівня значимості $\alpha = 0,05$ ($P = 0,95$).

Проведено оцінку значимості зведеного коефіцієнту кореляції між величиною t та величинами h і a , що отримані у зимовий період (20.01.22).

$$\frac{|0,961|}{\sqrt{1-0,961^2}} \sqrt{25-2} > t_{0,95}(23); \quad 16,7 > 2,069.$$

Таким чином, зведений коефіцієнт кореляції між величиною t та величинами h і a є значимим і повинен враховуватися при розрахунку розширеної невизначеності для корельованих даних. Отримані у процесі реалізації базового алгоритму GUM результати вимірювання температури людини у літній період при сезонній зміні температури та вологості повітря представлені у вигляді бюджету невизначеності вимірювань табл. 5

Таблиця 5 – Бюджет невизначеності вимірювань (Літо. 10.08.2022)

Вимірювана величина	Вимірне значення	Невизначеність за типом А	Невизначеність за типом В	Сумарна стандартна невизначеність	Розширена невизначеність
$a, ^\circ\text{C}$	25,16	$u_A(a) = 0,91$	$u_B(a) = 0,58$	$u_c(a) = 1,08$	$U(a) = 2,16$
$h, \%$	61,88	$u_A(h) = 4,42$	$u_B(h) = 1,73$	$u_c(h) = 4,75$	$U(h) = 9,5$
$t, ^\circ\text{C}$	36,88	$u_A(t) = 0,17$	$u_B(t) = 0,06$	$u_c(t) = 0,18$	$U(t) = 0,36$
Ефективне число степенів вільності	$\nu_{eff} \rightarrow \infty$				
Коефіцієнт охоплення	$k = 2$				

Бюджет невизначеності вимірювань з урахуванням кореляції між вимірюваними величинами (Зима. 20.01.2022) представлено у табл. 6.

Таблиця 6 – Бюджет невизначеності вимірювань з урахуванням та без урахування кореляції між вимірюваними величинами (Зима. 20.01.2022)

Вимірювана величина	Вимірне значення	Невизначеність за типом А	Невизначеність за типом В
$a, ^\circ\text{C}$	-11	$u_A(a) = 1,01$	$u_B(a) = 0,58$
$h, \%$	88	$u_A(h) = 0,60$	$u_B(h) = 1,73$
$t, ^\circ\text{C}$	34,25	$u_A(t) = 0,26$	$u_B(t) = 0,06$
Сумарна стандартна невизначеність з урахуванням кореляції	Розширена невизначеність з урахуванням кореляції	Сумарна стандартна невизначеність без кореляції	Розширена невизначеність без кореляції
$u_c(y)_{ha} = 1,89$	$U(y)_{ha} = 3,71$	$u_c(y)_{ha}^* = 2,17$	$U(y)_{ha}^* = 4,25$
$u_c(y)_{at} = 1,39$	$U(y)_{at} = 2,82$	$u_c(y)_{at}^* = 1,19$	$U(y)_{at}^* = 2,4$
$u_c(y)_{ht} = 1,77$	$U(y)_{ht} = 3,47$	$u_c(y)_{ht}^* = 1,84$	$U(y)_{ht}^* = 3,6$
Ефективне число степенів вільності		Коефіцієнт охоплення	
З урахуванням кореляції	Без урахування кореляції	З урахуванням кореляції	Без урахування кореляції
$\nu_{eff\ ha} = 4696$	$\nu_{eff\ ha}^* = 272$	$k_{ha} = 1,96$	$k_{ha}^* = 1,96$
$\nu_{eff\ at} = 34$	$\nu_{eff\ at}^* = 39$	$k_{at} = 2,03$	$k_{at}^* = 2,02$
$\nu_{eff\ ht} = 12051$	$\nu_{eff\ ht}^* = 1477$	$k_{ht} = 1,96$	$k_{ht}^* = 1,96$

У розділі наведені результати двох варіантів використання ІВС, а саме: контроль процесу виготовлення губної помади та процес виготовлення карамельного сиропу, проведено кореляційний аналіз при оцінюванні невизначеності впливу зовнішніх факторів на вказані процеси.

Зроблено висновки про необхідність врахування кореляції при аналізі невизначеності результатів вимірювань.

У **висновках** наведено основні результати дисертаційної роботи при розв'язанні поставлених завдань.

У **додатках** наведено результати експериментальних та дослідно-промислових вимірювань параметрів технологічних процесів, акти впровадження результатів дослідження у промисловість і в навчальний процес, список публікацій здобувача за темою дисертації.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну проблему підвищення вірогідності методів багатопараметричного контролю якості функціонування інформаційно-вимірювальних систем різного призначення шляхом визначення та урахування факторного впливу на результат вимірювань показників контролю за рахунок використання тестових методів, методів статистичного аналізу, апарату нечіткої логіки, що забезпечило максимально високу вірогідність отриманих результатів і як наслідок – підтримку встановлених у стандартах норм на вихідні параметри кінцевого продукту.

1. Вперше розроблено узагальнений метод контролю якості функціонування ІВС різного призначення, який полягає у тому, що для ІВС формуються адитивні і мультиплікативні тестові впливи та у залежності від реакції системи на ці тести блок аналізу метрологічної ситуації обирає один з двох можливих шляхів подальшої роботи. Перший шлях обирається при необхідності врахування дії факторного впливу на роботу ІВС. При цьому розробляється модель факторного впливу, оцінюється достовірність статистичних висновків для розробленої моделі, проводиться коваріаційний аналіз факторного впливу на показник контролю з подальшим оцінюванням рівнів інформативності показників контролю за допомогою моделей дискримінантного аналізу. Другий шлях обирається коли необхідно перевірити гіпотезу про відсутність порушень технологічного процесу. Незалежно від обраного шляху на наступному етапі розробляється ситуаційна системи з нечіткою логікою для визначення дії факторного впливу на якість показника контролю. Встановлюється наявність кореляції між чинниками, що впливають на показник контролю. У залежності від того чи встановлено кореляційний зв'язок між показниками контролю чи ні, проводиться розрахунок сумарної стандартної невизначеності для корельованих даних або розрахунок сумарної стандартної невизначеності для некорельованих даних. Фінальним етапом є розрахунок розширеної невизначеності з подальшим прийняттям рішення про дотримання умов технічного завдання.

Доведено доцільність використання запропонованого методу для ІВС різного призначення, а саме: виробництва карамелі, питного молока, крабових паличок, кефіру, вареної ковбаси, а також системи контролю параметрів штучної

екосистеми. Використання узагальненого методу дало можливість підвищити вірогідність контролю параметрів описаних технологічних процесів на 5 % у порівнянні з очікуваною ймовірністю 95 % потрапляння результатів вимірювань у встановлені стандартами підприємств довірчі інтервали.

2. Вперше розроблено математичну модель одночасного впливу п'яти факторів на результат виміру показника контролю (сумарну відносну похибку по каналу вимірювання ІВС). Визначені обмеження на кількість рівнів параметра контролю та факторів, що впливають на сумарну відносну похибку по каналу вимірювання ІВС при заданій метрологічній невизначеності параметра контролю. Впровадження моделі дало можливість встановити рівень факторного впливу параметрів контролю на показник контролю (сумарну відносну похибку по каналу вимірювання ІВС), оцінити кількість очікуваної вимірювальної інформації за показниками контролю та ранжирувати показники за зменшенням кількості інформації.

3. У результаті виконання дисперсійного аналізу моделі факторного впливу на якість роботи ІВС, отримано оцінки вірогідності статистичних висновків про інформаційну значущість показників контролю для розробленої моделі перехресної класифікації.

4. Вдосконалено метод оптимізації (за максимумом очікуваної інформації) системи показників вимірювального контролю за рахунок визначення аналітичної залежності, що дозволила розраховувати кількість очікуваної інформації по показникам контролю. На прикладі технологічного процесу виготовлення карамелі визначено, що найбільший вплив на якість карамелі має температура, далі – тиск пару, вологість сировини, похибка цифрового перетворення сигналу і шум аналогової частини вимірювального каналу.

5. Виконано розрахунки та доведено на прикладах необхідність використання комбінації методів статистичного аналізу для контролю якості роботи обладнання ІВС різного призначення а саме: контроль якості роботи датчика ваги KELI QS-D у системі зважування автотранспорту; контроль якості роботи датчика тиску газу «ROSEMOUNT» у складі установки комплексної підготовки газу; контроль якості роботи датчика температури DS18b20 у складі штучної екосистеми.

У результаті аналізу якості роботи цифрового тензодатчика KELI QS-D фірми Keli у складі ІВС зважування автотранспорту підтверджено гіпотезу про відсутність порушень стабільності процесу вимірювання ваги вантажівки, що дало можливість визнати датчик ваги метрологічно надійним.

У результаті аналізу якості роботи датчика тиску газу «ROSEMOUNT» у складі установки комплексної підготовки газу підтверджено гіпотезу про відсутність порушень стабільності процесу вимірювання тиску газу, що дало можливість визнати датчик тиску метрологічно надійним.

У результаті аналізу якості роботи датчика температури DS18b20 у складі штучної екосистеми підтверджено гіпотезу про відсутність порушень стабільності процесу вимірювання температури води, що дало можливість визнати датчик DS18b20 метрологічно надійним.

6 Вперше розроблено метод підвищення точності та вірогідності лазерних систем шляхом використання тестових методів контролю із подальшою корекцією функцій перетворення, завдяки якому вдалося підвищити точність вимірювань на 0,1 %, а вірогідність контролю на 5 %.

7. Розроблено пристрій для контролю лазерної системи виміру геометричних розмірів та якості поверхні деталей і проведено аналіз факторного впливу на роботу лазерної системи контролю якості поверхні деталей, що дало можливість виділити та врахувати основні фактори, які впливають на точність роботи системи. Такими факторами визнано вібрацію технічного обладнання та засміченість робочої зони парами змазуючо-охолоджуючої рідини. Розраховано значення довірчої границі випадкової похибки вимірювань ($\Delta_{0,9973}^0 = 0,0237$ відн. од.) при дії факторного впливу на результат вимірювань, яке виключено із результатів вимірювань для підвищення їх точності. Експериментально доведено, що використання пристрою для контролю лазерної системи виміру геометричних розмірів та якості поверхні деталей підвищило вірогідність контролю на 5 %.

8. Вперше розроблено реляційно-різницеву модель оператора динамічної корекції похибки лазерної системи контролю, завдяки якій введено поправки на динамічну похибку вимірювання, які отримано із номінальної динамічної моделі вимірювального перетворювача для вимірюваного значення швидкості зміни вхідного сигналу $x(t)$. При цьому, відносна динамічна похибка другого роду не перевищує значення 0,4 %, яке на 0,1 % менше за рекомендоване значення 0,5 %, що підтверджує підвищення точності вимірювань.

9. У результаті впровадження графічного інтерфейсу користувача системи fuzzy logic для оцінювання якості готової продукції при виробництві карамелі, питного молока, крабових паличок, кефіру, вареної ковбаси встановлено:

– найвища якість карамельного сиропу забезпечена при наступних режимах технологічного процесу: температура дорівнює $92,5^{\circ}\text{C}$, % RH – 97,5 %, тиск – 599 кПа;

– найкраща якість молока забезпечена при наступних режимах технологічного процесу: рівень тиску у трубах 13 МПа, рівень рН – 6,5 %, температури – 72°C ;

– найвища якість фаршу для крабових паличок забезпечується при температурі $22,5^{\circ}\text{C}$, рівень рН – 6,5 %, кількості обертів валу двигуна міксера – 92,5 об/хв;

– найвища якість кефіру забезпечена при наступних режимах технологічного процесу: температура дорівнює $+ 92^{\circ}\text{C}$, кислотність – $77,5^{\circ}\text{T}$, тиск – 16,25 МПа;

– найвища якість вареної ковбаси буде, коли рівень температура при формуванні ковбаси дорівнює $17,5^{\circ}\text{C}$, рівень тиску при формуванні 0,55 МПа, рівень вологості при формуванні – 82,5 % RH, температури при обсмажуванні – 100°C .

При контролі якості види у акваріумі штучної екосистеми встановлено:

– найвища якість води штучної екосистеми буде коли рівень розчинного кисню дорівнює 8,13 мг/л, рівень рН – 7,42 %, температура – 24,8 °С;

Проведені експериментальні дослідження на ТОВ «Екопродукт 2017» довели, що використання розробленої ІВС технологічного процесу виготовлення вареної ковбаси разом із запропонованим евристичним аналізатором на підставі нечіткої логіки підвищило вірогідність контролю параметрів технологічного процесу на 4,9 %.

10. Вдосконалено базовий алгоритм розрахунку невизначеностей результатів вимірювань, що отримані за допомогою ІВС різного призначення, за рахунок введення обов'язкової перевірки на наявність кореляції між показниками контролю, завдяки якому стає можливим проводити розрахунки для визначення сумарної та розширеної невизначеності для корельованих та некорельованих даних. Розроблено програмний продукт на мові JavaScript, завдяки якому проведено розрахунки по визначенню сумарної та розширеної невизначеності для корельованих та некорельованих даних. Аналіз кореляції при оцінюванні невизначеності результатів вимірювання температури у процесі виготовленні губної помади, довів:

– ігнорування кореляції збільшує значення сумарної стандартної невизначеності у 3,3 рази;

– ігнорування кореляції при розрахунку розширеної невизначеності призводить до не виправданого збільшення розширеної невизначеності у 3 рази.

Кореляційний аналіз при оцінюванні невизначеності впливу зовнішніх факторів на результат теплового контролю біологічних об'єктів довів:

– відсутність лінійної кореляції між температурою повітря, його вологістю і температурою тіла людини у літній період і наявність кореляції між цими параметрами у зимовий період.

– ігнорування кореляції між температурою та вологістю повітря призводить до збільшення розширеної невизначеності у 1,2 рази;

– неврахування кореляції між температурою повітря і температурою людини призводить до зменшення розширеної невизначеності у 0,85 рази;

– ігнорування кореляції між вологістю повітря і температурою людини призводить до зменшення розширеної невизначеності у 0,96 рази.

11. Матеріали теоретичних досліджень впроваджені у навчальний процес кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології і системи» НТУ «ХПІ» у курсах: «Інформаційно-вимірювальні системи» та «Вступ в теорію систем». У АТ «Українськи енергетичні машини» було впроваджено в процес виробництва пристрій для контролю лазерної системи виміру геометричних розмірів та якості поверхні деталей. Задача підвищення точності та швидкодії виміру геометричних розмірів та якості поверхні деталей вирішена за рахунок динамічного контролю системи без зупинки технологічного процесу. У ТОВ «Екопродукт 2017» результати роботи впроваджено в процес виробництва у вигляді евристичного аналізатора на нечіткій логіці для визначення впливу параметрів технологічного процесу виготовлення вареної ковбаси на якість готової продукції. Впроваджено систему з нечіткою логікою, яка надала можливість встановити рівень факторного впливу на якість виготовлення вареної ковбаси. У ТОВ «Управління

виробничо-технічної комплектації та реалізації» результати роботи впроваджено у вигляді розробленого евристичного аналізатору для визначення факторного впливу на якість комплектуючих для інформаційно-вимірвальних систем. Побудовано систему з нечіткою логікою, яка надала можливість встановити дію факторного впливу на якість комплектуючих для інформаційно-вимірвальних систем різного призначення.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в наукових фахових виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та/або Web of Science Core Collection

1. Кондрашов С.І., Григоренко І.В., Опришкіна М.І., Трохін М.В. Обґрунтування вибору параметрів систем тестового контролю у динамічному режимі роботи. *Східно-європейський журнал передових технологій*. Харків, 2015. № 3/9 (75). С. 24–29 (А).

Здобувачем розроблено математичну модель динамічної похибки та визначені параметри систем тестового контролю за критерієм заданої точності.

2. Григоренко І. В., Григоренко С. М., Жук О. В., Гавриленко С. Ю. Прикладні аспекти використання кореляційного аналізу для розрахунку невизначеності. *Український метрологічний журнал*. Харків, 2020. № 3А. С. 23–29. (А)

Здобувачем проведено розрахунок сумарної стандартної невизначеності для корельованих даних.

3. Hryhorenko I. Tverytnyukova E., Hryhorenko S., Demidova Yu. The usage of statistical analysis methods for controlling the operational stability of gas treatment facility. *Ukrainian metrological journal*. Kharkі metalloобробляючих верстатів металообробляючих верстатів v, 2021. № 1. p. 26–32.(А)

Здобувачем проведено перевірку гіпотези про відсутність порушень стабільності процесу вимірювання тиску газу на установці комплексної підготовки газу за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу, лінійного регресійного аналізу та коваріаційного аналізу.

4. Єфименко С. А., Григоренко І. В., Хорошайло Ю. Є., Григоренко С.М. Застосування коваріаційного аналізу для визначення факторного впливу на параметр контролю при колориметричному дослідженні. *Український метрологічний журнал*. Харків, 2022. № 3. С. 49–55.(А)

Здобувачем отримані аналітичні співвідношення, що дозволяють оцінити кількість інформації для показників колориметричного контролю при факторному впливі.

5. Ihor Hryhorenko, Svitlana Hryhorenko, Oleksandr Zhuk. The use of correlation analysis in assessing the uncertainty of the influence of external factors on the result of thermal control of biological objects. *Advanced Information Systems*. Kharkiv: National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2023. Vol. 7, No. 1. P. 66–70. (А)

Здобувачем проведено визначення впливу зовнішніх факторів на результат безконтактного теплового контролю тіла людини шляхом проведення ек-

спериментального зняття показників контролю у два найбільш протилежні за параметрами клімату сезони – зима і літо.

6. S. Yefymenko, I. Hryhorenko, S. Hryhorenko. Dispersion Analysis In Colorimetric Control. *Український метрологічний журнал*. Харків, 2023. № 2. С. 28–32. (A)

Здобувачем отримані аналітичні співвідношення для оцінювання достовірності статистичних висновків, що характеризують інформаційну значимість показників колориметричного контролю для спрощеної моделі перехресної класифікації.

7. Григоренко І.В., Кондрашов С.І., Григоренко С.М., Опришкін О.С. Дослідження факторного впливу на однорідність помелу зерна кави методами статистичного аналізу. *Системні дослідження та інформаційні технології*. Київ: НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського. № 2, 2024. С. 137–149. (A)

Здобувачем розроблено математичну модель одночасного впливу чотирьох факторів на однорідність помелу зерна кави.

8. Ihor Hrihorenko, Hrihorenko Svitlana, Tverytnykova Elena. Improving the accuracy of the laser control system. *IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL 2019, Sozopol, Bulgaria*. p. 232–235. (SCOPUS, США).

9. Ihor Hryhorenko, Elena Tverytnykova, Svitlana Hryhorenko, Viktoria Krylova. Research of microprocessor system by methods of statistical analysis. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 2022. Kharkiv, Ukraine. p. 102–107. (SCOPUS, США).

10. Serhii Yefymenko, Ihor Hrihorenko, Iurii Khoroshilo, Svitlana Hryhorenko, Inna Petrovska. Evaluation of informativeness of indicators in colorimetric control using discriminative analysis models. *IEEE XXXII MHC «ММА 2022»*, Sozopol, Bulgaria. p. 1–4. (SCOPUS, США).

Статті в наукових фахових виданнях України категорії Б.

11. Григоренко І.В., Кондрашов С.І., Белєвцова А.С. Система бездемонтажного лазерного контролю геометричних розмірів та якості поверхні деталей. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Автоматика та приладобудування. Харків: НТУ «ХПІ», 2012. № 37. С. 56–59.

Здобувачем виконано розробку структурної схеми методу бездемонтажного контролю геометричних розмірів та якості поверхні деталей при їх механічній обробці.

12. Григоренко І.В., Чуніхіна Т.В. Застосування тестових методів підвищення точності перетворювачів у вимірювальних системах. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. Київ, 2012. № 6 (82) С. 21–26.

Здобувачем проведено розробку евристичного аналізатора системи з нечіткою логікою для визначення мінімального значення динамічної похибки при відомих змінах постійної часу та статичного коефіцієнту перетворення.

13. Григоренко І.В., Белєвцова А.С. Аналіз можливості тестового контролю лазерних систем. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*.

Серія: Автоматика та приладобудування. Харків: НТУ «ХПІ», 2013. № 8(982). С. 21–24.

Здобувачем розроблено структурну схему засобу тестування лазерної системи контролю геометричних розмірів та якості поверхні деталей.

14. Григоренко І.В., Белєвцова А.С. Побудова тестових впливів для діагностичного приладу лазерних систем. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ».* Серія: Автоматика та приладобудування. Харків: НТУ «ХПІ», 2014. № 15(1058). С. 30–34.

Здобувачем зроблено опис роботи пристрою для контролю лазерної системи виміру геометричних розмірів та якості поверхні виробів та записані аналітичні співвідношення, що описують вплив мультиплікативного тесту на вихідний сигнал перетворювача.

15. Григоренко І.В., Белєвцова А.С., Харченко О.В. Дослідження динамічних та температурних похибок лазерної системи при тестовому контролі *Вісник Національного технічного університету «ХПІ».* Серія: Автоматика та приладобудування. Харків: НТУ «ХПІ», 2015. № 29. (1138). С. 3–7.

Здобувачем проведено оцінювання динамічної похибки лазерної системи тестового контролю за допомогою інтегрального критерію помилки.

16. Григоренко І. В. Кондрашов С. І., Глоба С. М. Методи додаткових вимірювань за корекції систематичних похибок засобів вимірювальної техніки. *Метрологія та прилади.* Харків: Харківський Національний університет радіоелектроніки, 2016. № 1 (57). С. 22–26.

Здобувачем проведено аналіз сучасного стану розвитку методів корекції вхідних сигналів.

17. Григоренко І. В. Аналіз можливості використання нейронної мережі для підвищення точності лазерних систем тестового контролю. *Український метрологічний журнал.* Харків, 2016. № 1. С. 43–47.

18. Григоренко І. В., Григоренко С. М. Дослідження впливу зовнішніх та внутрішніх факторів на похибку виявлення дефектів металевих виробів завдяки апарату fuzzy-logic. *Метрологія та прилади.* Харків: Харківський Національний університет радіоелектроніки, 2017. № 3 (65). С. 44–48.

Здобувачем побудовано систему з нечіткою логікою, яка надала можливість встановити, які повинні бути параметри вихрострумове перетворювача та його розміщення над дефектом, щоби амплітудне значення похибки вихідного сигналу було мінімальним.

19. Григоренко І. В., Григоренко С. М., Гавриленко С. Ю. Дослідження можливостей використання апарату fuzzy-logic при класифікації дефектів металевих труб. *Український метрологічний журнал.* Харків, 2017. № 2 С. 42–49.

Здобувачем побудовано систему з нечіткою логікою яка надала можливість встановити тип дефекту металевих труб на основі даних, отриманих при математичному моделюванні дефектів із різними параметрами, за допомогою методу кінцевих елементів.

20. Григоренко І. В., Григоренко С. М., Безбородий Є. А. Використання нечіткої логіки для контролю точності та підвищення якості продукції. *Метрологія та прилади.* Харків: Харківський Національний університет радіоелектро-

ніки, 2018. № 3 (71) С. 52–57.

Здобувачем побудовано систему з нечіткою логікою яка надала можливість встановити якими саме повинні бути параметри технологічного процесу виготовлення кефіру, щоб забезпечити його максимальну якість.

21. Григоренко І. В., Григоренко С. М. Визначення робочих режимів для лазерної системи тестового контролю за допомогою штучної нейронної мережі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ», Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка*. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. № 8 (1284). С. 30–38.

Здобувачем проведено аналіз факторного впливу на роботу лазерної системи контролю якості поверхні деталей та розроблено комп'ютерну модель системи контролю на якій виконано моделювання дії факторного впливу на точність лазерної системи контролю.

22. Григоренко І. В., Григоренко С. М. Розроблення системи контролю параметрів середовища в акваріумі. *Метрологія та прилади*. Харків: Харківський Національний університет радіоелектроніки. 2019. № 1 (75) С. 66–71.

Здобувачем розроблено структурну, та електрично-принципову схеми системи контролю параметрів середовища в акваріумі.

23. Григоренко І. В., Григоренко С. М., Носова І. В. Розроблення та дослідження системи контролю параметрів технологічного процесу виготовлення халви. *Метрологія та прилади*. Харків: Харківський Національний університет радіоелектроніки, 2019. № 5 (79). С. 41–48.

Здобувачем розроблено структурну, та електрично-принципову схеми системи контролю параметрів технологічного процесу виготовлення халви.

24. Hrihorenko I., Drozdova T., Hrihorenko S., Tverytnykova E. Application of user interface Fuzzy Logic Toolbox for quality control of products and services. *Advanced information system*. Kharkiv: National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2019. Vol. 3, № 4. p. 118–125.

Здобувачем побудовано систему з нечіткою логікою яка надала можливість встановити який саме вплив на якість вина здійснюють якість вхідної сировини і дотримання технології виробництва.

25. Григоренко І. В., Григоренко С. М., Вовк Л. О. Дослідження контрольно-вимірювального обладнання за допомогою системи Fuzzy Logic. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. № 26 (1351). С. 3–10.

Здобувачем побудовано систему з нечіткою логікою яка надала можливість встановити якими саме повинні бути параметри технологічного процесу виготовлення карамельного сиропу, щоб забезпечити його максимальну якість.

26. Григоренко І. В., Григоренко С. М., Боженко М. М. Аналіз кореляції при оцінюванні невизначеності результатів вимірювання температури у процесі виготовленні губної помади. *Метрологія та прилади*. Харків: Харківський Національний університет радіоелектроніки, 2020. № 3 (83). С. 50–55.

Здобувачем проведено розрахунки сумарної стандартної та розширеної невизначеності для корельованих даних, що отримані у процесі виробництва губної помади.

27. Hryhorenko I., Hryhorenko S., Ovcharenko M. Substantiation of the choice of methods of non-destructive testing of elements of energy equipment using a fuzzy logic apparatus. *Advanced information system*. Kharkiv: National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2020. Vol. 4, № 3. P. 143–149.

Здобувачем розроблено евристичний аналізатор на базі інтерфейсу користувача системи нечіткої логіки Fuzzy Logic Toolbox програми Matlab, щоб визначити оптимальну комбінацію методів неруйнівного контролю, які треба використати для забезпечення максимальної якості контролю вкладишу підшипника парової турбіни.

28. Григоренко І. В., Кондрашов С. І., Григоренко С. М. Використання комбінації методів статистичного аналізу для контролю якості роботи датчика ваги KELI QS-D у системі зважування автотранспорту. *Метрологія та прилади*. Харків: Харківський Національний університет радіоелектроніки, 2021. № 1 (87). С. 42–48.

Здобувачем виконано перевірку гіпотези щодо відсутності порушень стабільності роботи датчика ваги за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу, лінійного регресійного аналізу, коваріаційного аналізу.

29. Григоренко І. В., Кондрашов С. І., Григоренко С. М. Розробка та дослідження системи контролю параметрів середовища штучної екосистеми апаратом fuzzy-logic. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Сучасні інформаційні системи. Харків: НТУ «ХПІ», 2021, Том. 5, №4. С. 49–54.

Здобувачем розроблено структурну, та електрично-принципову схеми системи контролю параметрів штучної екосистеми та побудовано систему з нечіткою логікою, яка надала можливість встановити який саме вплив на якість води штучної екосистеми здійснюють рівень розчинного кисню, рівень рН та температура.

30. Григоренко І.В., Григоренко С.М. Розроблення системи контролю параметрів середовища при розведенні креветок. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 2 (12). С. 80–85.

Здобувачем розроблено структурну, та електрично-принципову схеми системи контролю параметрів середовища при розведенні креветок.

31. Григоренко І. В., Григоренко С. М., Жук О. В. Використання дисперсійного аналізу при побудові моделі факторного впливу на результат дистанційного теплового контролю біологічних об'єктів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Сучасні інформаційні системи. Харків: НТУ «ХПІ». 2022. Т. 6, № 3 С. 23–27.

Здобувачем розроблено модель факторного впливу на результат дистанційного теплового контролю температури тіла людини при одночасній дії чотирьох факторах, що впливають на підставі дисперсійного аналізу.

32. Григоренко І. В., Андрєєв Д. А. Система контролю технологічного процесу виготовлення господарського мила. *Вісник Національного технічного*

університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 3 (13). С. 35–40.

Здобувачем розроблено структурну, та електрично-принципову схеми системи контролю параметрів технологічного процесу виготовлення господарського мила.

33. Григоренко І. В., Кондрашов С. І., Опришкін О. С. Розроблення ситуаційної системи з нечіткою логікою для другого рівня інформаційно-вимірювальної системи. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 4 (14). С. 24–34.

Здобувачем побудовано систему з нечіткою логікою для визначення найкращого співвідношення між кількістю обертів валу двигуна, часом помелу, вологістю зерна кави для отримання найвищої однорідності помелу.

34. Григоренко І.В., Кондрашов С.І., Опришкін О.С. Формування тестових впливів для першого рівня інформаційно-вимірювальної системи. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* Харків: НТУ «ХПІ». 2023. № 1 (15). С. 19–26.

Здобувачем визначено аналітичні співвідношення, що описують дію адитивних і мультиплікативних тестових впливів для системи помелу зерна кави та отримана формула для розрахунку динамічної похибки системи помелу.

35. Григоренко І. В., Момот М. О., Григоренко С. М. Інформаційно-вимірювальна система для задач технологічного контролю виготовлення майонезу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* Харків: НТУ «ХПІ». 2023. № 2 (16). С. 42–47.

Здобувачем розроблено структурну, та електрично-принципову схеми інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів технологічного процесу виготовлення майонезу.

36. Григоренко І.В., Григоренко С.М., Андренко Д. О., Кубрик Б.І. Система контролю технології виробництва крабових паличок з нечіткою логікою. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 1 (19). С. 42–48.

Здобувачем побудовано систему з нечіткою логікою яка надала можливість встановити якими саме повинні бути параметри технологічного процесу виготовлення крабових паличок, щоб забезпечити максимальну якість кінцевого продукту.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

37. Григоренко І.В., Кондрашов С.І., Белєвцова А.С. Дослідження системи лазерного контролю геометричних розмірів та якості поверхні деталей. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: зб. тез доп. XX Міжнар. наук.- практ. конф.* Харків: НТУ «ХПІ». 2012. С. 113.

38. Григоренко І.В., Кондрашов С.І., Белєвцова А.С. Аналіз точності системи лазерного контролю геометричних розмірів та якості поверхні виробів. *Метрологія та вимірювальна техніка: зб. тез доп. VIII Міжнар. наук.- техн.*

конф. Харків: Національний науковий центр «Інститут метрології», 2012. С. 476–479.

39. Григоренко І.В., Белєвцова А.С. Дослідження тестових методів підвищення точності системи лазерного контролю геометричних розмірів та якості поверхні деталей. *Актуальні проблеми автоматики та приладобудування України*: зб. тез доп. наук.-техніч. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених. Харків: НТУ «ХП», 2012. С.45–46.

40. Григоренко І.В., Белєвцова А.С. Система тестового контролю лазерного діагностичного приладу. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: зб. тез доп. XXI Міжнар. наук.-практ. конф. Харків: НТУ «ХП», 2013. С. 99.

41. Григоренко І.В., Белєвцова А.С. Формування мультиплікативних тестових впливів для лазерних систем. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: зб. тез доп. XXII Міжнар. наук.-практ. конф. НТУ «ХП», 2014. Ч. 2. С. 107.

42. Григоренко І.В., Белєвцова А.С. Оцінка розсіювання лазерного світла у системах лазерного контролю. *Актуальні проблеми автоматики та приладобудування*: зб. тез доп. I Всеукраїнська наук.-техніч. конф. 2014. НТУ «ХП», 2014. С.47–48.

43. Григоренко І.В., Белєвцова А.С., Харченко О.В. Аналіз похибки розсіювання проміння лазера при тестовому контролі. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: зб. тез доп. XXIII Міжнар. наук.-практ. конф. НТУ «ХП», 2015. Ч. 2. С. 45.

44. Григоренко І.В., Дудник О.В., Харченко О.В. Дослідження діагностичного приладу лазерних систем за допомогою комп'ютерного моделювання. *Актуальні проблеми автоматики та приладобудування України*: зб. тез доп. II Всеукраїнська науково-технічна конференція. Харків, 2015. С.137–138.

45. Григоренко І. В., Харченко О.В. Використання нейронної мережі для контролю функціонування лазерної системи тестового контролю. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: зб. тез доп. XXIV Міжнар. наук.-практ. конф. Харків, 2016. С 54.

46. Григоренко І. В., Сікора Н.С. Цифровий вимірювач параметрів технологічного процесу виготовлення вина. *Актуальні проблеми автоматики та приладобудування України*: зб. тез доп. III Всеукраїнська наук.-техніч. конф. Харків, 2016. С. 150–151.

47. Григоренко І. В., Буличова К. В. Використання нейронної мережі для контролю точності роботи лазерної системи. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: зб. тез доп. XXV Міжнар. наук.-практ. конф. Харків, 2017. С. 118.

48. Григоренко І. В., Сікора Н.С. Дослідження цифрового вимірювача параметрів технологічного процесу виготовлення вина. *Актуальні проблеми автоматики та приладобудування України*: зб. тез доп. I Міжнародна науково-технічна конференція. Харків, 2017. С 151–152.

49. Григоренко І. В. Лазерний контроль якості виготовлення багатомірних об'єктів складної форми. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія,*

освіта, здоров'я: зб. тез доп. XXVI Міжнар. наук.- практ. конф. том 2. Харків, 2018. С 20.

50. Григоренко І. В., Баданіна А. М. Вдосконалення системи контролю параметрів середовища в акваріумі. *Конф. магістрів та аспірантів*. зб. тез доп. XII Міжнар. наук.- практ. том 1. Харків, 2018. С 6–7.

51. Григоренко І. В., Вовк Л. О. Вимірювач основних параметрів технологічного процесу виготовлення карамелі. *Актуальні проблеми автоматики та приладобудування України*: зб. тез доп. II Міжнародна науково-технічна конференція. Харків, 2018. С 165–166.

52. Григоренко І. В., Вовк Л. О., Григоренко С. М. Розробка евристичного аналізатора для визначення впливу параметрів технологічного процесу виготовлення карамелі на якість готової продукції. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: зб. тез доп. XXVII Міжнар. наук.- практ. конф. том 2. Харків, 2019. С 14.

53. Григоренко І. В., Гукенгеймер К. С. Система контролю мікроклімату у теплиці при вирощуванні орхідей. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: зб. тез доп. XXVIII Міжнар. наук.- практ. конф. том 2. Харків: НТУ «ХП», 2020. С. 13.

54. Григоренко І. В., Григоренко С. М., Жук О. В. Прикладні аспекти використання кореляційного аналізу для розрахунку невизначеності. *Невизначеність вимірювань: наукові, нормативні, прикладні та методичні аспекти (UM-2020)*: зб. тез доп. XVII Міжнародний наук.- техніч. семінар: Созополь: «Софт-трейд», Болгарія, 2020. С. 12–13.

55. Григоренко І. В., Григоренко С. М., Жук О. В., Красильник О. Г. Розробка та дослідження медичної системи контролю ваги. *Актуальні проблеми автоматики та приладобудування України*: зб. тез доп. III Міжнародна наук.- техніч. конф. Харків: НТУ «ХП», 2020. С. 92–93.

56. Григоренко І. В., Григоренко С. М., Андрусенко О. О. Дослідження системи контролю параметрів технологічного процесу виготовлення йогурту. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених*: зб. тез доп. XIV Міжнародна наук.- практ. конф. магістрів та аспірантів. Харків: НТУ «ХП», 2020. С. 27–28.

57. Григоренко І. В., Корнієнко Д. О. Система контролю параметрів технологічного процесу виготовлення цукру із цукрового буряка. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: зб. тез доп. XXIX Міжнар. наук.- практ. конф. том 2. Харків: НТУ «ХП», 2021. С. 297.

58. Григоренко І. В., Новосьолова Ю. О., Григоренко С. М. Система контролю параметрів технологічного процесу виготовлення одноразового пластикового посуду. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених*: зб. тез доп. XV Міжнародна наук.- практ. конф. магістрів та аспірантів. Харків: НТУ «ХП», 2021. С. 112–113.

59. Григоренко І. В., Андрєєв Д. А. Розробка систем контролю технологічного процесу виготовлення господарського мила. *Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів (ТК-2022)*: зб. тез доп. VII Міжнародна наук.- техніч. конф. Луцьк, Україна, 2022. С. 63–64.

60. Григоренко І. В., Григоренко С. М., Жук О. В. Математичне моделювання факторного впливу на результат теплового контролю біологічних об'єктів. *Проблеми інформатики та моделювання (ПІМ-2022)*: зб. тез доп. XXII Міжнар. наук.-техніч. конф., Харків: НТУ «ХП», 2022. С. 28.

61. Григоренко І.В., Савицький О.Ю. Розроблення інформаційно-вимірювальної системи для процесу виробництва питного молока. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: зб. тез доп. XXX Міжнар. наук.-практ. конф. Харків: НТУ «ХП», 2022. С. 363.

62. Hryhorenko I.V., Hryhorenko S.M., Zhuk O.V. Study of correlation in assessing the uncertainty of results of non-contact thermal control of biological objects. *XIX International Scientific and Technical Seminar «Uncertainty in Measurement: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects» (UM-2022)* Софія: «Софттрейд», Болгарія, 2022. С. 10–11.

63. Григоренко І.В., Савицький О.Ю. Побудова евристичного аналізатора для інформаційно-вимірювальної системи по контролю за переробкою питного молока. *Автоматизація, електроніка, інформаційно-вимірювальні технології: освіта, наука, практика* : зб. тез доп. IV Міжнародна наук.-техніч. конф. Харків: НТУ «ХП», 2022. С. 105–106.

64. Григоренко І. В., Момот М.О. Розроблення системи параметричного контролю технологічного процесу виготовлення майонезу. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: зб. тез доп. XXXI Міжнар. наук.-практ. конф. Харків: НТУ «ХП», 2023. С. 471.

65. Григоренко І.В., Кондрашов С.І., Григоренко С.М., Опришкін О.С. Кореляційний аналіз факторного впливу на однорідність помелу зерна кави. *Приладобудування: стан і перспективи*: зб. тез доп. XXII Міжнар. наук.-техн. конф. Київ : НТУУ «КП» ім. Ігоря Сікорського, 2023. С. 363–365.

66. Григоренко І.В., Григоренко С.М., Андренко Д.О. Розроблення моделі інформаційно-вимірювальної системи контролю технології виробництва крабових паличок. *Проблеми інформатики та моделювання (ПІМ-2023)*: зб. тез доп. XXIII Міжнар. наук.-техніч. конф., Харків: НТУ «ХП», 2023. С. 44.

67. Григоренко І. В., Кондрашов С.І., Опришкін О.С., Григоренко С. М. Інформаційно-вимірювальна система для контролю режимів помелу зерна кави. *Датчики, прилади та системи (ДПС) – 2023* : зб. тез доп. X Міжнар. наук.-техніч. конф. Черкаси : Черкаський державний технологічний університет, 2023. С. 131–132.

68. Григоренко І.В., Ольховіков Д.С. Метод оцінювання достовірності контролю технічного стану складних систем. *Проблеми інформатизації*: зб. тез доп. XI Міжнародна наук.-техніч. конф. Баку – Харків – Бельсько-Бяла: НУО АР, НТУ «ХП», ХНУРЕ, НАУ «ХАІ», УТІГН, 2023. С. 89.

69. Григоренко І.В., Білецький Р.І. Інформаційно-вимірювальна система для технологічного процесу виготовлення чіпсів. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*. зб. тез доп. XXXII Міжнар. наук.-практ. конф.: Харків: НТУ «ХП», 2024. С. 505.

70. Григоренко І.В., Григоренко С.М. Розробка інформаційно-вимірювальної системи контролю процесу виготовлення плавленого сиру.

«Прогресивні напрямки розвитку автоматизованих технологічних комплексів» (ТК-2024): зб. тез доп. VIII Міжнародній наук.-техніч. конф. Луцьк: ЛНТУ. 2024. С. 55–56.

Праці у закордонних періодичних виданнях:

71. Nryhorenko Ihor, Olkhovikov Dmytro, & Piskun Serhii. A method of forming a set of diagnostic features for optimizing control parameters and diagnosing technical systems. *Deutsche Internationale Zeitschrift Für Zeitgenössische Wissenschaft*, 64, (2023). P. 36–39. DOI: 10.5281/zenodo.8355410. (Німеччина).

Здобувачем розроблено методу формування комплексу діагностичних ознак для оптимізації параметрів керування та діагностування технічних систем при оцінці їх технічного стану.

Патенти:

72. Пат. 85637 У Україна, МПК G01B 11/30(2006.01). Пристрій для контролю лазерної системи виміру геометричних розмірів та якості поверхні виробів / І. В. Григоренко, С. І. Кондрашов, О. П. Давиденко, А. С. Белєвцова; Власник НТУ «ХП», № u2013 06975; заявлено 03.06.2013, опубл. 25.11.2013, бюл. № 22 (2013).

73. Пат. u2009 04833 Україна, МПК G 01 G3/00. Медична система контролю балансу ваги / Григоренко І.В, Кондрашов С.І., Велигоцький М.М., Горбуліч О.В. Заявник і патентовласник Харківський Національний Університет «ХП». № 47682; заявлено 18.05.2009; опубл. 25.02.2010, Бюл. № 4 (2010).

АНОТАЦІЇ

Григоренко І.В. Багатопараметричний контроль якості функціонування інформаційно-вимірювальних систем різного призначення з урахуванням факторних впливів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовини. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2024 р.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну проблему підвищення вірогідності методів багатопараметричного контролю якості функціонування інформаційно-вимірювальних систем різного призначення шляхом визначення та урахування факторного впливу на результат вимірювань показників контролю за рахунок використання тестових методів, методів статистичного аналізу, апарату нечіткої логіки для забезпечення максимально високої вірогідності отриманих результатів і як наслідок – підтримки встановлених у стандартах норм на вихідні параметри кінцевого продукту.

Вперше розроблено узагальнений метод контролю якості функціонування ІВС різного призначення який полягає у тому, що для ІВС формуються адитивні і мультиплікативні тестові впливи та у залежності від реакції системи на ці

тести блок аналізу метрологічної ситуації обирає один з двох можливих шляхів подальшої роботи – врахування дії факторного впливу на роботу ІВС, або перевірки гіпотезу про відсутність порушень стабільності технологічного процесу із подальшою розробкою ситуаційна системи із нечіткою логікою для визначення дії факторного впливу на якість кінцевого продукту, встановлення наявності кореляції між чинниками, що впливають на показник контролю та розрахунком розширеної невизначеності з прийняттям рішення про дотримання умов технічного завдання, який дав можливість підвищити вірогідність контролю параметрів технологічних процесів на 5 %.

Вперше розроблено модель перехресної класифікації, яка врахувала ефекти одночасної взаємодії п'яти факторів (нестабільність аналогової частини вимірювального каналу, вплив електромагнітних перешкод, похибка цифрового перетворення сигналу, шуми пристрою комутації сигналів, відхилення від встановленого температурного режиму роботи) на результат вимірювання одиничного показника контролю (сумарну відносну похибку каналу вимірювання ІВС), впровадження якої дало можливість встановити рівень факторного впливу параметрів контролю на показник контролю, оцінити кількість очікуваної вимірювальної інформації за показниками контролю та ранжувати показники за зменшенням кількості інформації;

Вперше розроблено метод підвищення точності та вірогідності лазерних систем шляхом використання тестових методів контролю із подальшою корекцією функцій перетворення, завдяки якому вдалося зменшити динамічну похибку вимірювання 0,1 % та підвищити вірогідність контролю на 5 %.

Вперше розроблено реляційно-різницеву модель оператора динамічної корекції похибки лазерної системи контролю, яка надала можливість введення поправок на динамічну похибку вимірювання, які отримують із номінальної динамічної моделі вимірювального перетворювача для вимірюного значення швидкості зміни вхідного сигналу, що підвищило точність вимірювань на 0,1 %.

Ключові слова: інформаційно-вимірювальна система, контроль якості, факторний вплив, математична модель, тестовий контроль, дисперсійний аналіз, регресійні залежності, довірчий інтервал, вірогідність, перевірка гіпотез, планування експерименту, нечітка логіка, невизначеність вимірювань, похибка.

Hryhorenko I.V. Multi-parameter quality control of the functioning of information and measurement systems for different purposes taking into account factor influences. – Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the Doctor of Technical Sciences on a specialty 05.11.13 – devices and methods of the control and definition of structure of substances. National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2024.

The dissertation solves the actual scientific and practical problem of increasing the reliability of methods of multi-parameter quality control of the functioning of information and measurement systems of various purposes by determining and taking into account the factor influence on the result of measurements of control indicators

through the use of test methods, methods of statistical analysis, apparatus fuzzy logic to ensure the highest possible probability of the obtained results and, as a result, support the norms established in the standards for the initial parameters of the final product.

For the first time, a generalized method of controlling the quality of the functioning of IMS for various purposes has been developed, which consists in the fact that additive and multiplicative test effects are formed for IMS, and depending on the reaction of the system to these tests, the metrological situation analysis block chooses one of two possible ways of further work - taking into account the effect of factorial impact on the operation of the IMS, or testing the hypothesis about the absence of violations of the stability of the technological process with the subsequent development of a situational system with fuzzy logic for determining the effect of factor influence on the quality of the final product, establishing the presence of correlation between factors affecting the control indicator and calculating the extended uncertainty with decision-making on compliance with the terms of the technical task, which made it possible to increase the probability of controlling the parameters of technological processes by 5 %.

For the first time, a cross-classification model was developed, which took into account the effects of the simultaneous interaction of five factors (instability of the analog part of the measuring channel, the influence of electromagnetic interference, the error of digital signal conversion, noise of the signal switching device, deviation from the established temperature mode of operation) on the result of measuring a single indicator control (total relative error of the IMS measurement channel), the implementation of which made it possible to establish the level of factorial influence of the control parameters on the control indicator, to estimate the amount of expected measurement information according to the control indicators, and to rank the indicators according to the decrease in the amount of information;

For the first time, a method of increasing the accuracy and reliability of laser systems was developed by using test control methods with subsequent correction of transformation functions, thanks to which it was possible to reduce the dynamic measurement error by 0,1 % and increase the control probability by 5 %.

For the first time, a relational-difference model of the dynamic error correction operator of the laser control system was developed, which made it possible to introduce corrections to the dynamic measurement error, which are obtained from the nominal dynamic model of the measuring transducer for the measured value of the rate of change of the input signal, which increased the accuracy of measurements by 0,1 %.

Key words: information and measurement system, quality control, factor influence, mathematical model, test control, variance analysis, regression dependencies, confidence interval, probability, hypothesis testing, experiment planning, fuzzy logic, measurement uncertainty, error.



