

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Григоренко Ігор Володимирович

УДК 681.2.08:53.088

**РОЗВИТОК ТЕСТОВИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ
ЕЛЕКТРИЧНИХ КОМПЕНСАЦІЙНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ У
ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМАХ**

Спеціальність 05.11.05 - прилади та методи
вимірювання електричних та магнітних величин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2010

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Кондрашов Сергій Іванович
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Крюков Олександр Михайлович
Академія внутрішніх військ МВС України,
професор кафедри озброєння

кандидат технічних наук, доцент
Черепашук Григорій Олександрович
Національний аерокосмічний університет
ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»,
доцент кафедри авіаційних приладів та вимірювань

Захист відбудеться " 08" квітня 2010 р. о 12-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою:
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21 (електрокорпус, ауд. 92).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою:
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «03» березня 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

С.М. Глоба

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На цей час для промисловості характерно використання вимірювальних каналів (ВК), що мають тривалий безперервний термін дії. Більшість первинних вимірювальних перетворювачів (ПВП) не можуть бути виключеними для метрологічного контролю з безперервного технологічного процесу (ТП), тому традиційні методи метрологічного забезпечення не можливо застосувати для таких ПВП. У той же час точносні характеристики ПВП зазнають значних змін в процесі тривалої безперервної експлуатації. Характерною особливістю більшості вимірювальних каналів (ВК) є наявність у їх складі статичних і астатичних електричних компенсаційних вимірювальних перетворювачів (ЕКВП). Задача контролю точнісних характеристик таких ЕКВП, шляхом проведення бездемонтажного тестового контролю у динамічному режимі, вирішується структурно-алгоритмічними методами підвищення точності.

Структурно-алгоритмічні методи підвищення точності (МПТ) засобів вимірювання (ЗВ) дозволяють здійснити корекцію похибок вимірювання безпосередньо у процесі їх роботи. Найбільший внесок у розвиток цих методів зробили видатні вчені: академік НАН України Ф.Б. Гриневич, доктори технічних наук Є.Т. Володарський, В.І. Губар, Б.Д. Колпак, В.В. Літвіх, Л.А. Назаренко, П.П. Орнатський, В.О. Поджаренко, Ю.О. Скрипник, Б.І. Стадник, Ю.М. Туз, В.Д. Ціделко, К.І. Диденко, С.І. Кондрашов та ін. Аналіз наведених праць вказує на наявність широкого фронту досліджень, спрямованих на розробку нових МПТ вимірювань, але при цьому основна увага приділялася розробці методів адитивної, мультиплікативної або змішаної корекції похибок автономних ЗВ з лінійними функціями перетворення у статичних режимах роботи. Розробці методів контролю електричних вимірювальних перетворювачів (ВП) у динамічних режимах присвячені роботи John W. Sheppard, Mark A. Kaufman, Michael T. Stieber, George Vukovich, Le Jin, Kumar Parthasarathy, Turker Kuyel, В.М.Ординцева, Г.М.Солопченко, Ю.О. Скрипника, Б.І. Стадника, Ю.М. Туза, В.Д. Ціделко, К.І. Диденко, С.І. Кондрашова та ін. На цей час недостатньо вирішена задача динамічного тестового контролю ЕКВП при нелінійній моделі електричного вхідного сигналу. Проблема реалізації методів тестового контролю ВП у розподілених вимірювальних системах ускладнюється їхньою віддаленістю на 1км – 2км від місця обробки інформації, впливом процесів зміни параметрів лінії зв'язку, і необхідністю тимчасової синхронізації тестових процедур.

Актуальність теми дисертаційної роботи зумовлена тим, що розробка і впровадження бездемонтажних методів тестового контролю ЕКВП у динамічних режимах роботи дозволить підвищити точність ЕКВП у реальних умовах тестових впливів, та продовжити термін їх експлуатації у промисловості.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «ХПІ» у процесі розробки держбюджетних науково-дослідних тем за планом МОН України, а саме: «Дослідження проблем прикладної метрології при вирішенні задач управління якістю промислової продукції та самоконтролю технічних систем» (ДР № 0100U001647); «Дослідження наукових проблем метрологічного забезпечення динамічного бездемонтажного самоконтролю інтелектуальних інформаційно-керуючих систем» (ДР № 0103U001539); «Підвищення точності інформаційно-вимірювальних та управляючих систем засобами бездемонтажного тестового контролю» (ДР № 0106U001514), та у рамках угоди про наукове співробітництво між НТУ «ХПІ» і Харківською медичною академією післядипломної освіти, де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка тестових методів підвищення точності електричних компенсаційних вимірювальних перетворювачів у динамічному режимі роботи на базі теорії реляційно-різницевої моделі операторів динамічної корекції їх вхідних сигналів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- провести дослідження математичних моделей динамічних похибок електричних ком-

пенсаційних вимірювальних перетворювачів зі статичною та астатичною функціями перетворення у реальних умовах тестових впливів;

- розглянути можливості тестового контролю статичних електричних компенсаційних вимірювальних перетворювачів при нелінійній моделі зміни вхідного сигналу у динамічних режимах;

- розробити метод оцінки і корекції динамічних похибок статичних електричних компенсаційних вимірювальних перетворювачів для підвищення точності визначення значення їх вихідних сигналів, який забезпечує мінімізацію невиключеної динамічної складової похибки;

- визначити необхідність нормування у комплексі метрологічних характеристик електричних компенсаційних вимірювальних перетворювачів динамічних параметрів лінії зв'язку;

- провести аналіз впливу нелінійності типу зона нечутливості на точність відновлення вхідного сигналу електричних компенсаційних вимірювальних перетворювачів з астатичною функцією перетворення у динамічних режимах при нелінійних моделях зміни вхідних електричних сигналів;

- розробити дослідницький зразок медичної системи контролю балансу ваги хворих реанімаційного відділення.

Об'єкт дослідження – процеси зміни динамічної складової похибки при тестовому контролі електричних компенсаційних статичних та астатичних вимірювальних перетворювачів у динамічних режимах.

Предмет дослідження – засоби і методи тестового контролю для підвищення точності електричних компенсаційних вимірювальних перетворювачів у динамічних режимах.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження базуються на використанні: теорії тестових методів підвищення точності електричних вимірювальних перетворювачів, теорії узагальнених реляційних моделей (РМ), реляційно-різницевої моделі операторів корекції похибок електричних компенсаційних вимірювальних перетворювачів при формуванні спряжених тестових впливів, теорії нечітких множин, методах теорії автоматичного регулювання, а саме методах побудови передаточних функцій, операторних методах аналізу перехідних процесів у ланцюгах постійного та змінного струму та методах математичного і фізичного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів:

- отримала подальший розвиток теорія структурно-алгоритмічних методів підвищення точності електричних компенсаційних вимірювальних перетворювачів методами динамічної корекції результатів вимірювання без корекції їх функцій перетворення;

- вперше запропоновано метод підвищення точності електричних компенсаційних вимірювальних перетворювачів на основі реляційно-різницевої моделі операторів корекції вхідних сигналів у динамічному режимі роботи для електричних компенсаційних вимірювальних перетворювачів з нелінійною формою вхідного сигналу;

- отримано і обґрунтовано математичні моделі динамічних похибок для статичних та астатичних електричних компенсаційних вимірювальних перетворювачів при різних формах вхідних сигналів, що дозволяють оцінити і виключити динамічну похибку з результату вимірювання;

- теоретично й експериментально обґрунтовано необхідність нормування у комплексі метрологічних характеристик електричних компенсаційних вимірювальних перетворювачів динамічних параметрів лінії зв'язку та визначено їх вплив на точність контролю.

Практичне значення одержаних результатів для галузі приладобудування полягає в наступному:

- на ТОВ «Серп та молот» м. Харків - впроваджено систему тестового контролю динамічних характеристик вимірювальних каналів, які у якості первинних перетворювачів мають ємнісний вимірювач рівня металу, та термопару для контролю температури металу у автоматичній ливарній машині. Система дозволяє вимірювати амплітуду вихідного сигналу, встановлювати нульові початкові умови на виході системи, та формувати тестові сигнали шляхом комутації вихідного сигналу аналогової частини вимірювального каналу;

- у Харківській міській клінічній лікарні швидкої та невідкладної медичної допомоги ім. проф. Мещанінова О.М. - впроваджено метод розрахунку статичних і динамічних параметрів дослідницького зразка двоконтурної системи стеження за зміною ваги хворих реанімаційних відділень.

Особистий внесок здобувача. Всі основні теоретичні і практичні результати дисертаційної роботи, які винесені на захист, отримано здобувачем особисто. Серед них: отримані математичні залежності динамічної похибки ЕКВП з аперіодичною передаточною функцією при нелінійному вхідному сигналі; розроблено модель системи тестового контролю для вимірювальних каналів, що містять статичний ЕКВП з урахуванням індуктивності лінії зв'язку; розроблено алгоритми тестового контролю ЕКВП з аперіодичною передаточною функцією при різних формах вхідного сигналу; для статичного ЕКВП виконані розрахунки залежності похибки визначення динамічних параметрів при зміні параметрів лінії зв'язку (ЛЗ); отримано оцінки динамічної похибки для різних моделей астатичних компенсаційних вимірювальних перетворювачів; проведено аналіз впливу нелінійності типу зона нечутливості на похибку відновлення вхідного сигналу астатичного ЕКВП; розроблено дослідницький зразок медичної системи контролю балансу ваги у хворих реанімаційного відділення; визначено параметри астатичної замкнутої системи з метою забезпечення мінімуму динамічної похибки; запропоновано вирішення задачі метрологічної координації систем вимірювання на основі теорії нечітких множин; проведено комп'ютерне моделювання перехідних процесів, що мають місце при зміні параметрів ЛЗ для вимірювальних каналів зі статичним ЕКВП.

Апробація результатів роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на: Міжнародних науково-технічних конференціях: III - МНТК «Метрологія в електроніці» (Харків, 2000р.); «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2003-2009рр.); II Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (Харків, 2005р.); III, VI МНТК «Метрологія і вимірювальна техніка» (Харків 2006, 2008рр.); 10-й ювілейний міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ ст.» (Харків, 2006р.); 2-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение – 2009» (Мінськ, 2009р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 23 друковані праці, у тому числі: 11 статей у фахових наукових виданнях ВАК України, 1 патент України на винахід.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації становить 224 сторінки, включаючи 63 рисунка за текстом; 11 таблиць за текстом; 16 рисунків на 18 сторінках; 1 таблиця на 1 сторінці; 8 додатків на 25 сторінках; 106 найменувань використаних літературних джерел на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми; сформульовано об'єкт, предмет, мету та основні задачі досліджень; показано зв'язок роботи з науковими держбюджетними темами і програмами; викладено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Наведено дані про апробацію, впровадження основних результатів роботи, а також викладено інформацію про публікації результатів досліджень та особистий внесок здобувача.

У першому розділі проведено аналіз існуючих бездемонтажних методів тестового контролю електричних вимірювальних перетворювачів у статичному та динамічному режимах роботи. Аналіз довів, що при корекції похибок ВП не можна нехтувати змінами динамічних параметрів, які мають такий же вплив на результуючу дисперсію похибки ВП, як і мультиплікативна складова похибки від зміни коефіцієнта передачі ВП. Корекція динамічних часових параметрів ВП дозволяє підвищити їх точність як у статичному, так і у динамічному режимах контролю технічних характеристик ВП. Підтверджено, що при статичному режимі тестового контролю постійна часу не впливає на відносну похибку вихідного сигналу, тому саме по постійній часу можна судити про зміну параметрів лінії при динамічному тестовому контролі. Зазначено, що необхідність визначення постійної часу при динамічному режимі

тестового контролю пов'язана з тим, що під час експлуатації змінюються параметри опору індуктивності та ємності ЛЗ. Наведено класифікацію методів корекції похибок перетворення вхідних сигналів ЕКВП з статичною та астатичною функціями перетворення.

У роботі доведено, що ряд засобів вимірювання, мають передаточну функцію, яка описується загальною моделлю з запізнюванням, при цьому не вирішене питання відновлення вхідного сигналу з одночасною оцінкою динамічних похибок для астатичних ЕКВП. Обґрунтовано методологію і напрямки наукових пошуків, сформульовані основні задачі та методи досліджень.

Другий розділ присвячено розробці методу корекції динамічної похибки при тестовому контролі вимірювального каналу з нелінійною моделлю зміни електричного вхідного сигналу. За модель аналогової частини ВК прийнята інерційна ланка першого порядку з передаточною функцією

$$H(p) = \frac{K_H}{Tp + 1}. \quad (1)$$

У якості вхідного сигналу прийнята експоненційна модель $\tilde{O}(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}}$, тому, що на практиці більшість первинних вимірювальних перетворювачів (термоперетворювачі, напівпровідникові терморезистори, індуктивні, ємнісні перетворювачі) мають на виході нелінійні сигнали, серед яких найбільш часто зустрічаються сигнали, що мають вигляд експоненти з різними швидкостями наростання. Для спрощення розрахунків використано метод розкладання функції у ряд та обмеження першими трьома членами ряду. Отримані аналітичні співвідношення та побудовано діаграми для вхідного, вихідного сигналів аналогової частини ВК і динамічної складової похибки при здійсненні тестових впливів з урахуванням перших двох та трьох членів ряду.

Для отримання рівняння динамічної похибки було записано динамічну реляційно-різницеву модель (PPM) оператора корекції у формі

$$\frac{\Delta Y_{21}(t_2, t_1)}{\Delta Y_{31}(t_3, t_1)} = \frac{(1 + \delta_m) \cdot \Theta \cdot \left[\frac{\alpha T}{\Theta} + \frac{\beta \cdot T^2}{\Theta} + (X(0) + \alpha \cdot t_2 + \right.}{(1 + \delta_m) \cdot k \cdot X(0) \cdot \left[\frac{\alpha 2T}{kX(0)} + \frac{\beta \cdot 2T^2}{kX(0)} + \frac{\Theta \cdot (1 - (1 - e^{-(t_3 - 2T)/\tau}))}{kX(0)} + \right.} \\ \left. \left. + \beta \cdot t_2^2 + (1 - e^{-(t_2 - T)/\tau}) \right] \right]}{\left[\frac{k \cdot \alpha \cdot (t_3 - 2t - \tau)}{kX(0)} + \frac{k \cdot \beta \cdot t_3^2}{kX(0)} + (1 - e^{-(t_3 - 2T)/\tau}) \right]}. \quad (2)$$

Відношення різницевих значень тестових впливів

$$\frac{\Delta Y_{21}(t_2, t_1)}{\Delta Y_{31}(t_3, t_1)} = \frac{\Theta}{k \cdot X(0)} \cdot \frac{(1 - \delta_{dyn1})}{(1 - \delta_{dyn2})}. \quad (3)$$

На рис. 1 наведено часові діаграми зміни вхідного (рис.1.а), вихідного (рис.1.б) сигналів ВП та динамічної складової похибки (рис.1.в) при здійсненні тестових впливів з урахуванням перших двох членів ряду.

а)

б)

в)

Рис. 1. Часові діаграми зміни вхідного, вихідного сигналів ВП та динамічної складової похибки при здійсненні тестових впливів

Після перетворень було отримано динамічну похибку PPM у вигляді

$$\delta_{dyn} \cong [(\frac{\Delta\alpha^* \cdot T}{\Theta} + \frac{\Delta\beta^* \cdot T^2}{\Theta})] / \Delta Y_{21} \cdot [(\frac{2\Delta\alpha^* \cdot T}{kX(0)} + \frac{2\Delta\beta^* \cdot T^2}{kX(0)} + \frac{\Delta\beta^* t^3}{X(0)} + \frac{\Theta \cdot e^{-(t3-2T)/\tau}}{kX(0)} \cdot (\frac{t3-2T}{\tau} \cdot \delta_\tau)] / \Delta Y_{31}, \quad (4)$$

де $\Delta\alpha^*$ – оцінка абсолютної похибки швидкості зміни вхідного сигналу ВП,

$\Delta\beta^*$ – оцінка абсолютної похибки нелінійності вхідного сигналу ВП.

Аналогічні перетворення було виконано і для кубічного члену ряду. На підставі отриманих результатів було зроблено висновок, що при урахуванні кубічного члену ряду відносна динамічна складова похибки істотно не змінюється, та не перевищує 0.36 %.

У роботі визначено, що у разі використання нелінійних поліноміальних моделей зміни вхідного сигналу ВК необхідно враховувати похибку нелінійності. Треба додати, що усі інші складові апріорно відомі, залишається визначити параметр нелінійності β та сформулювати висновок: при якому значенні β динамічна складова похибки найменша. Якщо α, β, τ – заздалегідь відомі, то в цьому випадку можемо стверджувати, що усі динамічні похибки скомпенсовані, тобто $\Delta\alpha^* = 0$, $\Delta\beta^* = 0$, $\delta\tau = 0$. На практиці частіше відомі значення α та β , а значення параметру β залишається невідомим. Для того, щоб визначити значення параметру β^* для параболічної моделі вхідного сигналу, тобто наблизитись до дійсного значення β , було використано метод відновлення вхідного сигналу поліномом другого ступеню.

Графік залежності динамічної похибки δ_{dyn} від $\Delta\beta^*$ наведено на рис. 2.

Рис. 2. Графік залежності динамічної похибки δ_{dyn} від $\Delta\beta^*$ та $(t3-2T)/\tau$

Досліджено випадок коли за вхідний сигнал взято не розкладену у ряд експоненту, та було проведено усі операції, які виконувалися для параболічного сигналу. Зроблено висновок, що похибка визначення динамічної складової для заданої перехідної функції втрачає свою наочність, тому доцільно вважати доречним розкладання функції в ряд та обмеження першими трьома членами ряду.

Розглянуто випадок коли на виході ВК потрібно мати цифровий сигнал і після аналогової частини каналу стоїть АЦП, що квантує сигнал по рівню та дискретизує по часу. Часові діаграми дискретизації безперервної у часі функції вихідного сигналу ВК при здійсненні тестових впливів наведено на рис.3.

Рис. 3. Часові діаграми дискретизації безперервної у часі функції

На підставі отриманих даних розроблено алгоритм проведення процедури тестового контролю ВК.

Проведене математичне моделювання перехідних процесів, що мають місце у лініях зв'язку, дало змогу довести, що при тестовому контролі ВП з нелінійними електричними вхідними сигналами треба звертати увагу на вибір коефіцієнта нелінійності β , бо тільки від нього залежить величина динамічної складової похибки. Таким чином задача тестового контролю зводиться до параметричної оптимізації вимірювального каналу.

У **третьому розділі** проведено дослідження динамічних параметрів вимірювального каналу зі статичним перетворенням при тестовому контролі електричними сигналами. У ході виконання досліджень розроблено метод динамічного тестового контролю при вимірі динамічних параметрів лінії зв'язку з урахуванням впливу її індуктивності (патент України №86669). Для рішення задачі пропонувалася схема формування тестового сигналу шляхом замикання і розмикання лінії зворотного зв'язку (ЗЗ) ВП поблизу резистора навантаження R_H (рис. 4).

Рис. 4. Структурна схема тестового контролю динамічних характеристик ВК

Метод тестового контролю динамічних характеристик ВК здійснюється наступним чином: виконується підключення еталонної ємності до опору навантаження, далі розмикання кола зворотного зв'язку для встановлення нульових початкових умов. Виконувалося формування тестового сигналу шляхом комутації аналогової частини вимірювального каналу. Метрорологічним спостерігачем формувалася фіксована часова затримка. За допомогою вольтметра пікових значень (ВПЗ) проводився вимір пікового значення вихідного сигналу на ємності.

Отримані аналітичні співвідношення, що встановлюють зв'язок похибки визначення ємності лінії зв'язку й напруги навантаження ВП при динамічному тестовому контролі. Показано, що необхідна чутливість визначення динамічних параметрів забезпечується на початковій ділянці експонентної залежності вихідного сигналу $t < T$. Результати моделювання показали необхідність обліку тимчасової затримки вимірювання ємності лінії зв'язку при синхронізації вимірів. Введення тимчасової затримки, рівної сталої часу, практично виключає вплив індуктивності лінії зв'язку.

Четвертий розділ присвячено тестовому контролю та розробці моделі динамічної похибки вимірювальних каналів з астатичною функцією перетворення. Запропоновано метод оцінки динамічної похибки який не пов'язаний з формою вхідного сигналу, а також не вимагає введення «ідеального перетворювача». Метод зворотного перетворення припускає можливість одержати оцінку динамічної похибки виміру на основі моделювання передатної функції ЗВ й обробки його вихідного електричного сигналу.

Динамічну похибку було визначено для ланки з нелінійністю типу зона нечутливості. Передатна функція реального пристрою (відповідно до прийнятої моделі табл. 1 п. 1) дорівнює

$$H(p) = \frac{ke^{-\tau p}}{p(1 + \beta \frac{ke^{-\tau p}}{p})} = \frac{ke^{-\tau p}}{p + \beta \cdot k \cdot e^{-\tau p}}. \quad (5)$$

Абсолютну динамічну похибку було визначено з співвідношення

$$\Delta_A(p) = X(p) - Y(p) \cdot \beta = \frac{1}{k} \left(p \cdot Y(p) + \tau p^2 Y(p) \right). \quad (6)$$

У розділі наведено оцінки динамічної похибки для різних моделей нелінійних астатичних систем (табл.1), та графік залежності динамічної складової похибки від нестабільності постійної часу, та нестабільності коефіцієнту перетворення ланки.

Таблиця 1

Оцінка динамічної похибки для різних моделей астатичних
компенсаційних вимірювальних перетворювачів

Проведено аналіз впливу нелінійності типу зона нечутливості на відновлення вхідного сигналу.

Отримано оцінку динамічної похибки астатичного вимірювального пристрою з дворівневим силовим зрівноважуванням замкнутого типу за допомогою інтегрального критерію помилки.

У роботі запропоновано визначення оптимальних параметрів астатичної системи з метою забезпечення мінімуму динамічної похибки апаратом теорії нечітких множин. Для того щоб характеризувати величину відхилення від бажаного значення при моделюванні розкиду параметра системи введемо функцію належності. Встановлено, що на динамічну похибку астатичної замкнутої системи впливають два параметри: нестабільність сталої часу ΔT й нестабільність коефіцієнта перетворення ланок Δk . Відхилення параметрів k і T характеризується відповідно функціями належності $\mu_k(k)$ й $\mu_T(T)$, які утворюють векторну функцію належності

$$h(t; \mu_k(k), \mu_T(\tau) = 1) = \begin{cases} \tilde{h}(t) + \frac{1 - \mu_k(k), \bar{\Delta}_1}{\tilde{\sigma}} \cdot \tilde{a}^{-\frac{t}{\tilde{\sigma}}} & \text{якщо } k \geq \tilde{k} \\ \tilde{h}(t) - \frac{1 - \mu_k(k), \bar{\Delta}_1}{\tilde{\sigma}} \cdot \tilde{a}^{-\frac{t}{\tilde{\sigma}}} & \text{якщо } k < \tilde{k}. \end{cases} \quad (7)$$

Для визначення мінімуму динамічної похибки необхідно створити на другому рівні автоматизованої інформаційної системи контролю та керування ситуаційної моделі системи метрологічного контролю ВК на базі завдання метрологічних ситуацій у термінах теорії нечітких множин. Запропоновано метод опису метрологічних ситуацій на рівні окремого астатичного ЕКВК. Обґрунтовано, що найбільш доцільно задавати три опорні ситуації для значень похибок «мала», «середня» та «велика». Розроблено моделі фазифікації та дефазифікації сигналів, які дозволяють враховувати як систематичну, так і випадкову складові похибки визначення вхідних сигналів ЕКВП. Запропонований підхід приводить на другому рівні АІСКК до поняття «метрологічного образу», який необхідно аналізувати відповідно до стану ЕКВП на базі оцінок відхилень реальних технологічних параметрів від їх номінальних, заданих значень.

У п'ятому розділі проведено комп'ютерне моделювання процесів динамічного тестового контролю для апробації отриманих аналітичних залежностей сталої часу від параметрів

лінії зв'язку та одержано графічне відображення процесів, що протікають у вимірювальному каналі. На рис. 5 представлено графік перехідного процесу напруги навантаження при обліку впливу індуктивності лінії зв'язку.

У таблиці 2 приведено залежності максимуму стрибка напруги від індуктивності лінії зв'язку $L_{\text{Е}}$.

Таблиця 2

Залежність максимуму стрибка напруги від індуктивності лінії зв'язку $L_{\text{Е}}$

$L_{\text{Л}}, \text{Гн}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$260 \cdot 10^{-6}$	$510 \cdot 10^{-6}$	$760 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$
$\tau, \text{мс}$	0,67792					0,66768				
$U, \text{мВ}$	92,0	137,5	156,9	165,8	170,9	182,4	184,9	186,0	186,6	186,9

Рис. 5. Перехідний процес при $L_{\text{Л}} = 500 \text{ мкГн}$

Дано опис промисловому впровадженню на ТОВ «Серп та молот» (м. Харків) системи тестового контролю динамічних характеристик вимірювальних каналів.

Розглянуто проведення тестового контролю астатичного ваговимірювального пристрою у Харківській міській клінічній лікарні швидкої та невідкладної медичної допомоги ім. проф. Мещанінова О.М.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано науково-практичну задачу розробки тестових методів підвищення точності електричних компенсаційних вимірювальних перетворювачів у динамічному режимі роботи на базі теорії реляційно-різницевої моделі операторів динамічної корекції їх вхідних сигналів. При цьому одержано такі основні результати:

1. Для електричних компенсаційних вимірювальних перетворювачів зі статичною та астатичною функціями перетворення проведено дослідження математичних моделей динамічних похибок у реальних умовах тестових впливів;

2. Розроблено метод оцінки і корекції динамічних похибок статичних ЕКВП, який забезпечив мінімізацію динамічної складової похибки. Запропоновано рішення задачі тестового контролю вторинних нормуючих компенсаційних електричних ВП для узагальненої експоненційної моделі вхідного електричного сигналу. Відносна динамічна похибка результату вимірювання при урахуванні нелінійності форми вхідного сигналу зменшена з 5.0% до 0.4%; Використовуючи метод апроксимації поліномом другого ступеню параболічного вхідного сигналу отримано результат з похибкою, що не перевищує 0.5%, а використовуючи у якості вхідного сигналу експоненційну функцію, отримано результат з похибкою, що не перевищує 0.9%.

3. Зроблено висновок про необхідність нормування у комплексі метрологічних характеристик електричних компенсаційних вимірювальних перетворювачів динамічних параметрів лінії зв'язку у тому числі урахування індуктивності лінії зв'язку. Розроблено метод визначення динамічних параметрів ЕКВП. При визначенні динамічних параметрів лінії зв'язку з урахуванням впливу її індуктивності запропонованим методом похибку визначення сталої часу зменшено з 6.0 % до 1.2 %. Проведено комп'ютерне моделювання перехідних процесів при тестових випробуваннях, яке підтвердило результати теоретичних розрахунків.

4. Для підвищення точності електричних вимірювань проведено аналіз впливу нелінійності типу зона нечутливості на точність вимірювання і відновлення вхідного сигналу ЕКВП з астатичною функцією перетворення у динамічних режимах при стробоподібній та нелінійній моделях зміни тестових сигналів.

5. Доведено необхідність створення на другому рівні АІСКК ситуаційної моделі системи метрологічного контролю ВК на базі завдання метрологічних ситуацій у термінах теорії нечітких множин для визначення мінімуму динамічної похибки. Запропоновано метод опису метрологічних ситуацій на прикладі окремого астатичного ЕКВК. Розроблено моделі фазифікації і дефазифікації сигналів, які дозволяють враховувати як систематичну, так і випадкову складові похибки вимірювання вихідних сигналів ЕКВП.

6. Розроблено дослідницький зразок медичної системи моніторингу балансу ваги у хворих реанімаційного відділення. Визначено параметри астатичної замкнутої системи з метою забезпечення мінімуму динамічної похибки.

7. На ТОВ «Серп та молот» впроваджено систему тестового контролю динамічних характеристик вимірювальних каналів.

Для Харківській міській клінічній лікарні швидкої та невідкладної медичної допомоги ім. проф. Мещанінова О.М. розроблено дослідницький зразок медичної системи моніторингу балансу ваги у хворих реанімаційного відділення. Визначено параметри астатичної замкнутої системи з метою забезпечення мінімуму динамічної похибки. Впроваджено метод розрахунку статичних і динамічних параметрів дослідницького зразка двоконтурної системи стеження за зміною ваги хворих реанімаційних відділень.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Григоренко И.В. Измерение технологических параметров с одновременной оценкой динамических погрешностей / К.И. Диденко, С.И. Кондрашов, И.В. Григоренко // Вісник Харківського державного політехнічного університету – Харків: ХДПУ, 2000. – № 112, С.140 – 144.

Здобувачем розраховані математичні моделі оцінок динамічної похибки для чотирьох схем побудови компенсаційних перетворювачів.

2. Григоренко И.В. Анализ влияния нелинейности типа зона нечувствительности на восстановление входного сигнала / К.И. Диденко, С.И. Кондрашов, И.В. Григоренко // Вісник Харківського державного політехнічного університету – Харків: ХДПУ, 2000. – № 127, С.162-165.

Здобувачем виконані розрахунки співвідношень для визначення вхідного сигналу статичної системи зі запізнюванням.

3. Григоренко И.В. Астатическое измерительное устройство с двухуровневым силовым уравниванием / К.И. Диденко, С.И. Кондрашов, И.В. Григоренко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – Харків: НТУ «ХПІ», 2001. – №4, С.51 – 59.

Здобувачем отримані експериментально діаграми перехідних процесів, що мають місце в дворівневих астатичних ваговимірювальних системах при відпрацюванні вхідного впливу.

4. Григоренко И.В. Расчёт параметров и определение погрешностей системы тестового контроля весоизмерителя / С.И. Кондрашов, И.В. Григоренко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – Харків: НТУ «ХПІ», 2003. – № 7, Т. 3. – С. 83 – 88.

Здобувачем виконані розрахунки необхідного числа розрядів АЦП, необхідного для забезпечення потрібної точності вимірів.

5. Григоренко И.В. Модели погрешностей средств измерений с учётом процессов

дрейфовых изменений систематической составляющей / С.И. Кондрашов, И.В. Григоренко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – Харків: НТУ «ХПІ», 2003. – № 21, – С. 85 – 90.

Здобувачем побудовано графічне відображення лінійної, квазістатичної та нелінійної статистичних метрологічних моделей процесів зміни систематичної складової похибки засобів вимірювання.

6. Григоренко І.В. Тестовий метод підвищення точності сенсорів зі структурою прямого перетворення / С.І. Кондрашов, І.В. Григоренко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – Харків: НТУ «ХПІ», 2004. – № 17, – С. 115 – 118.

Здобувачем отримані значення вихідного сигналу при тестовому контролі ланцюга послідовно з'єднаних вимірювальних перетворювачів.

7. Григоренко І.В. Статические реляционно-разностные модели компенсационных измерительных преобразователей перетворення / С.И. Кондрашов, И.В. Григоренко, Д.В. Пономаренко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – Харків: НТУ «ХПІ», 2005. – № 38, – С. 64 – 68.

Здобувачем проведено аналіз систематичних похибок статичних та астатичних систем урівноваження.

8. Григоренко І.В. Определение и коррекция динамических характеристик измерительных преобразователей системы тестового контроля / С.И. Кондрашов, И.В. Григоренко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – № 9, – С. 56 – 61.

Здобувачем проведено аналіз існуючих методів корекції динамічних характеристик вимірювальних перетворювачів.

9. Григоренко І.В. Исследование динамических параметров измерительного канала со статическим преобразованием при тестовом контроле / [Кондрашов С.И., Балев В.Н., Григоренко И.В., Чернышева К.К.] // Український метрологічний журнал – Харків: Національний науковий центр «Інститут метрології», 2007 – № 1, – С. 46 – 52.

Здобувачем виконано розрахунки та проведено комп'ютерне моделювання процесів тестового контролю вимірювального каналу. На підставі розрахунків побудовані графіки перехідних процесів при зміні параметрів лінії зв'язку.

10. Григоренко І.В. Дослідження можливості корекції динамічної похибки тестового контролю при нелінійній моделі зміни вхідного сигналу / С.І. Кондрашов, І.В. Григоренко, М.С. Тюрин // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – № 31, – С. 95 – 98.

Здобувачем отримані динамічні реляційно-різницеві моделі операторів корекції для параболічної моделі зміни сигналу на вході інерційної аперіодичної ланки. Отримано співвідношення для визначення динамічної складової похибки.

11. Григоренко І.В. Дослідження впливу не лінійності зміни вхідного сигналу на динамічну похибку вимірювального перетворювача під час проведення тестового контролю // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – № 57, – С. 50 – 57.

12. Григоренко И.В. Динамические погрешности в нелинейных средствах измерения / К.И. Диденко, С.И. Кондрашов, И.В. Григоренко // Метрологія в електроніці – 2000: III Міжнар. наук. – техн. конф., [наук. праці: у 2 т.]: Харків, 2000. – Т.2. С 161 – 163.

Здобувачем виконані розрахунки динамічної похибки для астатичної системи зі запізнюванням.

13. Григоренко І.В. Аналіз похибок і розрахунків параметрів системи тестового контролю ваговимірювача / С.І. Кондрашов, І.В. Григоренко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XI Міжнар. наук. – практ. конф. – Харків: НТУ «ХП», 2003. – С.279.

Здобувачем виконано розрахунок параметрів системи тестового контролю ваговимірювача.

14. Григоренко І.В. Бездемонтажный тестовый контроль точности весовых дозаторов / С.І. Кондрашов, І.В. Григоренко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XII Міжнар. наук. – практ. конф. – Харків: НТУ «ХП», 2004. – С.28.

Здобувачем отримано результати вимірювального експерименту при бездемонтажному тестовому контролі точності вагових дозаторів.

15. Григоренко И.В. Тестовый контроль компенсационных преобразователей / С.И. Кондрашов, И.В. Григоренко, Д.В. Пономаренко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XIII Міжнар. наук. – практ. конф. – Харків: НТУ «ХП», 2005. – С.35.

Здобувачем зроблено аналіз можливості застосування структурно-алгоритмічних методів підвищення точності для компенсаційних вимірювальних перетворювачів.

16. Григоренко И.В. Тестовые методы повышения точности компенсационных измерительных преобразователей / С.И. Кондрашов, И.В. Григоренко // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: II Междунар. радиоэлектронный форум. – Харків: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2005. Т. VII. – С. 164 –167.

Здобувачем виконано розрахунок похибок каналу виміру температури, який має у своєму складі нормуючий перетворювач.

17. Григоренко И.В. Реализация динамических методов тестового контроля измерительных преобразователей / С.И. Кондрашов, И.В. Григоренко // Радіоелектроніка і молодь в XXI ст.:10-й ювілейний міжнар. молодіжний форум: Зб. матеріалів форуму. – Харків: ХНУРЭ, 2006. – С.436.

Здобувачем виконано аналіз динамічних методів тестового контролю, що використовуються для статичних та астатичних вимірювальних перетворювачів.

18. Григоренко И.В. Расчёт погрешности измерения динамических параметров измерительных преобразователей / С.И. Кондрашов, И.В. Григоренко, К.К. Чернышева // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XIV Міжнар. наук. – практ. конф. – Харків: НТУ «ХП», 2006. – С.32.

Здобувачем отримано співвідношення для розрахунку похибки вимірювання динамічних параметрів вимірювальних перетворювачів.

19. Григоренко И.В. Тестовый контроль динамических параметров измерительных преобразователей / С.И. Кондрашов, И.В. Григоренко, К.К. Чернышева // Метрологія та вимірювальна техніка: V Міжнар. наук. – тен. конф. – Харків: Національний науковий центр «Інститут метрології», 2006 – С.376 –379.

Здобувачем виконано розрахунки та побудовано графік залежності похибки вимірювання від зміни ємності лінії зв'язку.

20. Григоренко И.В. Определение параметров линии связи измерительного канала со статическим преобразованием при тестовом контроле преобразователей / И.В. Григоренко, К.К. Чернышева // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XV Міжнар. наук. – практ. конф. – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – С.33.

Здобувачем виконано розрахунки параметрів лінії зв'язку вимірювального каналу, урахування яких дає можливість зменшити похибку вимірювання.

21. Григоренко І.В. Методика корекції динамічної похибки при тестовому контролі вимірювального каналу з нелінійною моделлю зміни вхідного сигналу / С.І. Кондрашов, І.В. Григоренко, М.С. Тюрин // Метрологія та вимірювальна техніка: VI Міжнар. наук. – тен. конф. – Харків: Національний науковий центр «Інститут метрології», [наук. праці: У 2 т.], 2008. – Т.2. С. 329 – 332.

Здобувачем отримані динамічні реляційно-різницеві моделі операторів корекції для експоненційної моделі зміни сигналу на вході інерційної аперіодичної ланки. Побудовано залежності динамічної складової похибки від зміни не лінійності вхідного сигналу.

22. Григоренко И.В. Динамический тестовый контроль электрических компенсационных измерительных преобразователей (ЭКИП) / С.И. Кондрашов, И.В. Григоренко // 2-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение – Республика Беларусь, г.Минск, БНТУ, 2009. –С. 18.

Здобувачем отримано аналітичні співвідношення для розрахків динамічної похибки при тестовому контролі ЕКВП.

23. Пат. а2007 06581 Україна, МПК G 05B 23/02/, G 05B 23/00/. Способ формування тестових сигналів для контролю динамічних характеристик вимірювальних каналів / С.І. Кондрашов, І.В. Григоренко, Чернишова К.К (НТУ «ХПІ»); заявник і патентовласник НТУ «Харківський політехнічний інститут». – № 86669; заявлено 12.06.2007; опубл. 25.02.2009, Бюл. № 9 (2009).

Здобувачем виконано розрахунки та проведено комп'ютерне моделювання процесів тестового контролю вимірювального каналу.

АНОТАЦІЇ

Григоренко І.В. Розвиток тестових методів підвищення точності електричних компенсаційних вимірювальних перетворювачів у динамічних режимах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.05 – прилади та методи вимірювання електричних та магнітних величин. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2009.

У дисертаційній роботі розв'язується наукова задача дослідження можливих шляхів підвищення точності електричних компенсаційних вимірювальних перетворювачів у динамічному режимі роботи тестовими методами на базі теорії реляційно-різницевої моделі операторів динамічної корекції їх вхідних сигналів. Побудовано математичну модель динамічної похибки ЕКВП з аперіодичною передаточною функцією при нелінійному вхідному сигналі. Розроблено модель системи тестового контролю для вимірювальних каналів, що містять статичний ЕКВП з урахуванням індуктивності лінії зв'язку. Виконано розрахунки залежності динамічної похибки ЕКВП з аперіодичною передаточною функцією при різних параметрах вхідного сигналу. Розроблено алгоритми тестового контролю ЕКВП з аперіодичною передаточною функцією при

різних формах вхідного сигналу. Для статичного ЕКВП виконано розрахунки залежності похибки визначення динамічних параметрів при зміні параметрів лінії зв'язку. Проведено комп'ютерне моделювання перехідних процесів, що мають місце при зміні параметрів ЛЗ для вимірювальних каналів зі статичним ЕКВП. Отримано оцінки динамічної похибки для різних моделей астатичних компенсаційних вимірювальних перетворювачів. Проведено аналіз впливу нелінійності типу зона нечутливості на похибку відновлення вхідного сигналу астатичного ЕКВП. Розроблено дослідницький зразок медичної системи контролю балансу ваги у хворих реанімаційного відділення. Визначено параметри астатичної замкнутої системи з метою забезпечення мінімуму динамічної похибки. Запропоновано вирішення задачі метрологічної координації систем вимірювання на основі теорії нечітких множин.

Ключові слова: електричний компенсаційний перетворювач, нелінійна характеристика, електричний сигнал, коефіцієнт перетворення, чутливість, точність, похибка.

Григоренко И.В. Развитие тестовых методов повышения точности электрических компенсационных измерительных преобразователей в динамических режимах. – Рукопись.

Диссертация на получение научной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.05 – приборы и методы измерения электрических и магнитных величин. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2009.

В настоящей диссертационной работе решена актуальная научно-практическая задача в области повышения точности электрических компенсационных измерительных преобразователей (ЭКИП) в динамическом режиме работы тестовыми методами на базе теории реляционно-разностных моделей операторов динамической коррекции входных сигналов.

Диссертационная работа посвящена развитию тестовых методов повышения точности статических и астатических ЭКИП в динамических режимах работы. Усовершенствованы пути уменьшения динамической погрешности при тестовом контроле. Установлено, что для статических ЭКИП необходимо знать скорость изменения входного сигнала и постоянную времени, а для астатических ЭКИП необходимо ещё учитывать запаздывание в интегрирующем элементе, тогда путём динамической коррекции можно минимизировать динамическую составляющую погрешности. Получена математическая модель динамической погрешности ЭКИП с апериодической передаточной функцией при нелинейном входном сигнале. Предложен способ формирования тестовых сигналов для контроля динамических характеристик измерительных каналов, которые содержат статический ЭКИП, с учетом индуктивности линии связи. Выполнены расчеты зависимости динамической погрешности ЭКИП с апериодической передаточной функцией при разных параметрах входного сигнала. Разработаны алгоритмы тестового контроля ЭКИП с апериодической передаточной функцией при разных формах входного сигнала. Для статического ЭКИП выполнены расчеты зависимости погрешности определения динамических параметров при изменении параметров линии связи. Проведено компьютерное моделирование переходных процессов, которые имеют место при изменении параметров ЛС для измерительных каналов со статическим ЭКИП. Получена оценка динамической погрешности для разных моделей астатических компенсационных измерительных преобразователей. Проведен анализ влияния нелинейности типа зона нечувствительности на погрешность восстановления входного сигнала астатического ЭКИП. Разработан исследовательский образец медицинской системы контроля баланса веса у больных реанимационного отделения. Определены параметры астатической замкнутой системы с целью обеспечения минимума динамической погрешности. Предложено решение задачи

метрологической координации систем измерения на основе теории нечетких множеств.

Ключевые слова: электрический компенсационный преобразователь, нелинейная характеристика, электрический сигнал, коэффициент преобразования, чувствительность, точность, погрешность.

Grigorenko I.V. Development of test methods increase exactness of electric compensative measurings transformers in the dynamic modes. Manuscript.

The dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences on speciality 05.11.05 – device and methods of the measurements electric and magnetic values.– Nnational Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, – 2009.

In dissertation work a scientific task is decided in area of increase exactness of electric compensative measurings transformers (ECMT) in dynamic office test methods hours on the base of theory relational - difference models of operators of dynamic correction of their entrance signals.

Dissertation work is devoted development of test methods increase of exactness static and astatic ECMT in the dynamic modes their robots. Built mathematical model of dynamic error of ECMT with a aperiodic transmission function at a nonlinear entrance signal. The method of forming of check signals is offered for control of dynamic descriptions of the measurings ductings which contain static ECMT taking into account inductance of flow line. The research standard of the medical checking of balance of weight system is developed at patients of reanimation separation. The parameters of the astatic closed system are certain with the purpose of providing of a minimum of dynamic error. Solutions of task of metrology co-ordination of the measuring systems are offered on the basis of theory of fuzzy sets.

Keywords: electric compensative transformer, nonlinear description, electric signal, coefficient of transformation, sensitiveness, exactness, error.