

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

Луценко Вадим Юрійович

УДК 621.317.72

**СТВОРЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОМУТАЦІЙНИХ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СИГНАЛІВ ТЕРМОПАР**

Спеціальність 05.11.05 – прилади та методи вимірювання
електричних та магнітних величин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2008

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі фізики Запорізької державної інженерної академії Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Оселедчик Юрій Семенович,
Запорізька державна інженерна академія,
завідувач кафедри фізики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кондрашов Сергій Іванович
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних
технологій і систем

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 " 30 " жовтня 2008 р. о 14³⁰ 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.

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

Автореферат розісланий " 23 " вересня 2008 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

С.М. Глоба

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На протязі останніх років в рамках розвитку високих технологій, зокрема вирощування широко використовуваних в сучасній нелінійній оптиці нелінійних кристалів, значно виросли вимоги до точності контролю та регулювання профілю температурних полів ростової печі, як до одного з основних технологічних факторів, що безпосередньо впливає на якість одержуваних матеріалів. Одним з найбільш поширених датчиків температури, які використовуються в складі систем вимірювання та контролю температури в ростовій печі є термопари, що пояснюється цілим рядом безумовних переваг їх застосування. Проте мають місце і окремі недоліки, основними з яких є низька температурна чутливість та поява прогресуючої похибки, обумовленої старінням і деградацією термопари внаслідок її експлуатації в агресивних середовищах та зонах високих температур. Цим пояснюється використання в тривалих технологічних процесах вирощування нелінійно-оптичних кристалів (наприклад процес вирощування кристалів LBO, CBO, CLBO триває близько 40÷45 діб) термопар на основі платини або її сплавів, чутливість яких складає одиниці мікровольт на градус, що суттєво ускладнює процес достовірної реєстрації малих змін температури. Реалізація тестових методів контролю лише частково вирішує проблему підвищення точності вимірювань температури деградуючою термопарою. Крім того, окремою, невирішеною задачею залишається одночасне підвищення чутливості вимірювання термо-ЕРС термопари та реалізація структурно-алгоритмічного підходу до вимірювального процесу, що має особливу актуальність та попит при вирощуванні нелінійно-оптичних кристалів. Спроби вирішення цієї задачі часто супроводжуються ускладненням вимірювальних схем, і, як наслідок, зв'язано з цілим рядом технічних проблем. Тому підвищення чутливості, швидкодії, точності вимірювань і контролю температури за допомогою термоелектричних перетворювачів є актуальним завданням сучасної термометрії і зумовлює напрямок дисертаційних досліджень.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі фізики Запорізької державної інженерної академії відповідно до держбюджетної науково-дослідної теми МОН України «Нелінійно-оптичні процеси перетворення частоти лазерного випромінювання в активно-нелінійних боратних кристалах» (№ ДР 0107U001219), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення чутливості, швидкодії та точності вимірювання і контролю температури в тризонних ростових печах за рахунок використання комутаційного перетворення термо-ЕРС.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі основні задачі:

– обґрунтувати вимоги до системи вимірювання і контролю температури в ростових печах для вирощування нелінійно-оптичних

кристалів боратної серії та довести доцільність застосування комутаційного перетворення термо-ЕРС для підвищення чутливості вимірювань;

– виконати теоретичний аналіз електромагнітних процесів в комутаційному перетворювачі, знайти функціональні залежності значення коефіцієнта перетворення комутаційного перетворювача від його основних параметрів;

– розробити і створити програмну і апаратну частину установки для дослідження характеристик комутаційних перетворювачів з можливістю передачі вимірювальної інформації в ЕОМ та установки для дослідження нестационарних процесів устанавлення теплової рівноваги між термопарою і середовищем;

– провести експериментальні дослідження комутаційного перетворювача сигналів термодпар, оцінити ступінь адекватності одержаних математичних виразів і можливість використання їх для проектування комутаційних перетворювачів;

– розробити моделі для оцінки адитивної та мультиплікативної складової похибки вимірювання та оцінити границю основної похибки.

Об'єкт дослідження – процеси вимірювання малих значень електричних сигналів термоелектричних перетворювачів комутаційним методом, який забезпечує підвищення чутливості при одночасному зростанні дії впливових факторів.

Предмет дослідження – комутаційний перетворювач сигналів термодпар з підвищеною точністю перетворення та завадостійкістю.

Методи дослідження: теорія електричних і магнітних ланцюгів, інтегральне і диференційне числення – при створенні математичної моделі комутаційного перетворювача; методи вимірювання електричних величин, методи теорії вірогідності і математичної статистики – для отримання та обробки експериментальних даних; методи аналізу шумових властивостей лінійних чотириполісників, методи теорії метрології, спектральний аналіз, методи комп'ютерного моделювання – з метою оцінки адитивних і мультиплікативних похибок комутаційного перетворювача; методи схемотехніки, елементи теорії автоматичного управління, методи програмування мікропроцесорних пристроїв – при розробці апаратного і програмного забезпечення експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному.

1. Розвинуто й обґрунтовано спосіб комутаційного перетворення термо-ЕРС, що дозволяє отримати коефіцієнт перетворення значення термо-ЕРС у амплітуду вихідного імпульсу більше ніж 10^3 раз, що зумовлює підвищення чутливості вимірювань у 10^3 раз.

2. Запропоновано перспективний спосіб компенсації комутаційного шуму, який на відміну від існуючих базується на електромагнітній компенсації комутаційної завади в середині трансформатору, що дозволяє підвищити завадостійкість та понизити поріг чутливості вимірювань.

3. Вперше виконано теоретичний аналіз електромагнітних процесів, що відбуваються в комутаційному перетворювачі безпосередньо після комутації.

Запропоновано математичні вирази, що пов'язують параметри вихідного сигналу з параметрами комутаційного перетворювача, а також аналітичні вирази для розрахунку значення чутливості комутаційного перетворювача та визначено оптимальний режим його роботи, який характеризується максимальним значенням коефіцієнту перетворення.

4. Розроблено уточнені математичні моделі для оцінювання мультиплікативної і адитивної складової похибки вимірювального каналу термо-ЕРС, що дозволило визначити ступінь впливу похибок параметрів комутаційного перетворювача на результуюче значення похибки та встановити фізичну природу формування відношення сигнал/шум в процесі комутації.

5. Вдосконалено спосіб вимірювання термо-ЕРС в режимі протікання зовнішнього струму через спаї термопари, що відрізняється від відомих пропусканням змінного струму з нульовою і ненульовою постійною складовою, в якому виключено вплив на результати вимірювання тепла Джоуля-Ленца.

Практичне значення одержаних результатів для галузі приладобудування полягає в наступному:

- розроблені рекомендації, що дозволяють зменшити амплітуду комутаційних шумів ключів комутаційного перетворювача шляхом їх компенсації в магнітопроводі, що дозволяє підвищити точність вимірювання термо-ЕРС термопари за рахунок зменшення систематичної складової похибки;

- запропоновано алгоритм ідентифікації параметрів математичної моделі комутаційного перетворювача, використання якої дозволить підвищити якість проектування таких перетворювачів та провести модифікацію існуючих;

- розроблено триканальні комутаційні перетворювачі, що використовуються в складі системи вимірювання і контролю температури в ростовій печі в лабораторії нелінійно-оптичних перетворювачів частоти Запорізької державної інженерної академії (м. Запоріжжя);

- розроблено та виготовлено термоелектричний термометр з комутаційним перетворенням термо-ЕРС, що використовується для вимірювання температури в технологічному процесі вирощування акустоптичних кристалів парателуріту в науково-впроваджувальному центрі «Елент А». (м. Дніпропетровськ).

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертаційної роботи, які винесені на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них: математична модель комутаційного перетворювача та методика визначення її параметрів, спосіб компенсації комутаційної завади, моделі для оцінки мультиплікативної та адитивної складової похибки комутаційного перетворення термо-ЕРС, спосіб вимірювання термо-ЕРС в режимі протікання зовнішнього струму через спаї термопари.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідалися і обговорювалися на The 8 th Temperature Symposium (Чикаго,

США, 2002), III міжнародній конференції «Мікропроцесорні пристрої і системи в автоматизації виробничих процесів» (Хмельницький, 2003г.), IV міжнародній конференції «Комп'ютерні системи в автоматизації виробничих процесів» (Хмельницький, 2005г.), V міжнародній науково-практичній конференції «Комп'ютерні системи в автоматизації виробничих процесів» (Хмельницький, 2007г.), міжнародній науково-технічній конференції «Силова електроніка і енергоефективність – 2007» (Алушта, 2007).

Публікації. По темі кандидатської дисертації опубліковано 8 робіт, серед них 7 статей у фахових виданнях ВАК України та 1 патент України на винахід.

Структура та об'єм дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу та 5 розділів, висновків, 3-х додатків і списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 210 сторінок, включаючи 5 рисунків за текстом, 60 рисунків на 32 окремих сторінках; 6 таблиць за текстом, 11 таблиць на 5 окремих сторінках; 3 додатки на 34 сторінках; 115 найменування використаних джерел на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** до дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми, визначено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету та задачі дослідження. Також наведено характеристики об'єкту і предмету досліджень, висвітлено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів та наведені відомості про публікації здобувача і апробацію результатів дисертаційної роботи.

У **першому розділі** на основі аналізу інформаційних джерел та публікацій за напрямом дисертаційних досліджень вводяться основні вихідні положення, обґрунтовано вибір предмету та методів дослідження. Розглянуто особливості вирощування надчистих нелінійно-оптичних кристалів та доказано необхідність підвищення точності вимірювання і контролю температури в кристалізаційній печі. Проведено аналіз та дана оцінка стану метрологічного забезпечення вимірювань високих температур. Проаналізовано тестові методи підвищення точності вимірювання температури за допомогою термопар та методи підвищення чутливості вимірювання термо-ЕРС. На основі проведеного аналізу методів та пристроїв для вимірювання термо-ЕРС термопар зроблено висновок, що існуючі методи та пристрої не дозволяють у повній мірі вирішити задачу підвищення точності вимірювання і контролю температури в кристалізаційній печі, що пов'язано з притаманними їм недоліками, основними з яких є низька чутливість вимірювань та швидкодія. Проведений аналіз дозволив сформулювати основні напрямки теоретичних та експериментальних досліджень та постановку задач дисертаційної роботи.

Другий розділ дисертаційної роботи містить основні теоретичні розробки, а саме обґрунтування комутаційного способу перетворення сигналу термо-ЕРС та теоретичний аналіз електромагнітних процесів, що

відбуваються в комутаційному перетворювачі безпосередньо після комутації.

Спосіб комутаційного перетворення термо-ЕРС полягає в перетворенні електричної енергії, що генерується термопарою, в короткий імпульс вихідної напруги. Таке перетворення реалізується при розмиканні за допомогою ключа електричного ланцюга, що складається з термопари і індуктивного накопичувача (рис. 1(а)).

а) б)

Рис. 1. Комутаційний перетворювач термо-ЕРС:
а) комутаційний перетворювач термо-ЕРС;
б) вихідний сигнал комутаційного перетворювача.

Відношення амплітуди перехідного процесу – U_{\max} (рис. 1(б)) до величини термо-ЕРС – ε визначається виразом

$$\frac{U_{\max}}{\varepsilon} = \frac{R_{кл}}{r},$$

де $R_{кл}$ – опір розімкнутого ключа;

r – сумарний активний опір ланцюга при замкнутому ключу.

Відношення $\frac{R_{кл}}{r}$ легко може досягати значень порядку $10^2 \div 10^3$, що зумовлює збільшення в стільки ж разів чутливості вимірювань.

При практичній реалізації комутаційного способу перетворення термо-ЕРС в результаті роботи ключа виникає комутаційна завада, яка накладається на корисний сигнал. Для зменшення рівня комутаційного шуму запропоновано та обґрунтовано спосіб його електромагнітної компенсації, що дозволило розробити та створити комутаційні перетворювачі, які відрізняються високими коефіцієнтом перетворення та завадостійкістю. На рис. 2 представлено базовий варіант комутаційного перетворювача. До складу комутаційного перетворювача введено додатковий компенсаційний контур, який складається з включеної зустрічно по відношенню до обмотки вимірювального контуру обмотки трансформатора, резистора – $R_{\text{дод}}$ та польового ключа – VT2. Польові ключі працюють синхронно. Комутаційні шуми, які з'являються в результаті роботи ключів, зумовлюють появу двох складових магнітного потоку, які, в свою чергу, компенсують одна одну в середині сердечника трансформатора.

Рис. 2. Схема комутаційного перетворювача.

Для представленої на рис. 3 еквівалентної схеми заміщення комутаційного перетворювача розроблено його математичну модель, при створенні якої ключі розглядалися як ідеальні, тобто такі що реалізують миттєву комутацію, а розподілена ємність обмоток трансформатора враховувалась за допомогою включеної паралельно обмотці зосередженої ємності.

Рис. 3. Еквівалентна схема заміщення комутаційного перетворювача.

В результаті аналізу отриманих аналітичних виразів, які описують вихідний сигнал, встановлено, що максимальна ефективність комутаційного перетворення термо-ЕРС досягається при мінімальному рівні загасання, при цьому вихідний сигнал максимально наближається до гармонійного. Вихідний сигнал комутаційного перетворювача в такому режимі описується виразом

$$U_{R_n}(t) = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \frac{\left(\frac{\varepsilon}{R_{кон}} - \frac{\varepsilon}{R_{кл} + R_{кон}} \right)}{\omega \left(C_2 + 2 \frac{L_1}{L_2} C_1 \right)} e^{-\beta t} \sin(\omega t),$$

де L_1 , L_2 – індуктивність обмоток сигнального та вимірювального контурів;

ε – джерело ЕРС;

$R_{кон}$ – сумарний опір вимірювального контуру при замкнутому ключі Кл1;

$R_{кл}$ – опір ключа в розімкнутому стані;

C_1 , C_2 – розподілена ємність обмоток сигнального та вимірювального контурів.

Коефіцієнт затухання β визначається формулою (R_n – опір навантаження)

$$\beta = \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{L_2}{R_n} + 2 \frac{L_1}{R_{кл} + R_{кон}} \right)}{(L_2 C_2 + 2 L_1 C_1)},$$

Частота вихідного сигналу дорівнює

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2},$$

$$\text{де } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2 + 2L_1 C_1}}.$$

Підвищення чутливості вимірювання термо-ЕРС за допомогою комутаційного перетворення визначається значенням коефіцієнту перетворення

$$K_{пер} = \frac{U_{\max}}{\varepsilon}, \quad (1)$$

де U_{\max} – максимальне значення амплітуди вихідного сигналу комутаційного перетворювача (рис. 4).

Рис. 4. Вихідний сигнал комутаційного перетворювача.

Значення амплітуди першого максимуму вихідного сигналу можна розрахувати по формулі

$$U_{\max} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \frac{\varepsilon \left(\frac{1}{R_{\text{кон}}} - \frac{1}{R_{\text{кл}} + R_{\text{кон}}} \right)}{\left(C_2 + 2 \frac{L_1}{L_2} C_1 \right) \omega_0} e^{-\frac{\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} \arctg \left(\frac{\sqrt{1-\alpha^2}}{\alpha} \right)}, \quad (2)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{\beta}{\omega_0}.$$

Таким чином, відповідно до виразів (1) і (2) функція перетворення комутаційного перетворювача є лінійною, а значення коефіцієнта перетворення в основному визначається добутком

$$\sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \frac{1}{R_{\text{еіі}} \left(C_2 + 2 \frac{L_1}{L_2} C_1 \right) \omega_0}.$$

Третій розділ присвячено експериментальному дослідженню комутаційного перетворювача термо-ЕРС, в результаті якого доведено

адекватність запропонованих теоретичних виразів та визначено параметри його математичної моделі.

Експериментально досліджено функцію перетворення комутаційного перетворювача та підтверджено її лінійність. Визначено значення коефіцієнта перетворення, яке складає $K_{пер} = 2300 \pm 10\%$. З використанням розробленої математичної моделі комутаційного перетворювача розраховано значення коефіцієнту перетворення, яке становить $K_{i\dot{a}\dot{a}\dot{d}}^{\dot{a}\dot{a}\dot{d}} = 2320$, що вкладається в розрахований довірчий інтервал.

Експериментально досліджено залежності значення коефіцієнта перетворення від параметрів перетворювача: приведеної ємності, приведенного опору і опору ланцюга термопари. Встановлено, що найбільший вплив на значення коефіцієнту перетворення має опір вимірювального контуру при замкненому ключі. При цьому збільшенню коефіцієнта перетворення відповідає пропорційне зменшення значення цього опору. Така ж тенденція має місце у випадку приведеної ємності. Збільшення приведенного опору характеризується зменшенням затухання, а отже підвищенням коефіцієнту перетворення. Отримані залежності дозволяють спростити процес проектування та параметричної оптимізації комутаційних перетворювачів.

З використанням розробленої математичної моделі виконано чисельне моделювання, в результаті якого розраховано оптимальне значення коефіцієнту трансформації, якому відповідає максимальне значення коефіцієнту перетворення. Розрахунок виконано для випадку коли ємність пропорційно залежить від числа витків обмотки сигнального контуру, яке в свою чергу визначає значення коефіцієнту трансформації. Розраховане значення коефіцієнта трансформації становить близько 2-ох, що є перевагою комутаційного перетворювача, оскільки дозволяє суттєво спростити конструкцію трансформатора.

Експериментально встановлено межі застосування розробленої математичної моделі: використання математичної моделі комутаційного перетворювача можливе за умови коли часом перемикавання ключа – $\tau_{перем}$ порівняно із тривалістю вихідного сигналу – $\tau_{сигн}$ можна знехтувати, тобто $\tau_{перем} \ll \tau_{сигн}$.

В четвертому розділі виконано аналіз мультиплікативної та адитивної складової похибки комутаційного перетворювача. Відхилення реальних параметрів моделі від своїх номінальних значень є причиною виникнення похибки коефіцієнта перетворення. Похибка коефіцієнта перетворення визначає мультиплікативну складову похибки комутаційного перетворювача. Згідно методики оцінки похибки непрямих вимірювань отримано аналітичний вираз для розрахунку значень цієї похибки

$$\frac{\Delta \hat{E}_{i\dot{a}\dot{\delta}}}{\hat{E}_{i\dot{a}\dot{\delta}}} = \left(\left(V_{\eta} \frac{\Delta \eta}{\eta} \right)^2 + \left(V_{L_2} \frac{\Delta L_2}{L_2} \right)^2 + \left(V_{C_{i\dot{\delta}\dot{a}\dot{a}}} \frac{\Delta C_{i\dot{\delta}\dot{a}\dot{a}}}{C_{i\dot{\delta}\dot{a}\dot{a}}} \right)^2 + \left(V_{R_{\dot{e}\dot{e}}} \frac{\Delta R_{\dot{e}\dot{e}}}{R_{\dot{e}\dot{e}}} \right)^2 + \left(V_{R_{\dot{e}\dot{i}\dot{i}}} \frac{\Delta R_{\dot{e}\dot{i}\dot{i}}}{R_{\dot{e}\dot{i}\dot{i}}} \right)^2 + \left(V_{R_i} \frac{\Delta R_i}{R_i} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

де $V_{a_i} = \frac{a_i}{K_{пер}} \cdot \frac{\partial K_{пер}}{\partial a_i}$ – коефіцієнти впливу похибки величини a_i -го параметра комутаційного перетворювача.

Розрахунок чисельних значень коефіцієнтів впливу (таблиця 1) дозволив визначити параметри, похибки яких є визначальними для значення сумарної похибки.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів впливу

V_{η}	V_{L_2}	$V_{C_{прив}}$	$V_{R_{кон}}$	$V_{R_{кл}}$	V_{R_n}
0,925	0,449	-0,449	-1	0,037	0,064

Такими параметрами є опір вимірювального контуру – $R_{кон}$, приведена ємність перетворювача – $C_{прив}$, індуктивність обмотки сигнального контуру – L_2 і коефіцієнт трансформації – η . Похибки $\frac{\Delta R_{кл}}{R_{кл}}$ і $\frac{\Delta R_n}{R_n}$ майже не впливають на значення результуючої похибки.

Адитивна складова сумарної похибки комутаційного перетворювача визначається рівнем шумів на його виході, для розрахунку яких розроблено еквівалентну схему заміщення, що не містить магнітних зв'язків. Аналіз шумів виконано окремо для кожного етапу роботи перетворювача. В результаті чисельного розрахунку середньоквадратичних значень струму та напруги шуму (таблиця 2) встановлено, що протягом першого такту роботи теплові і дробові шуми приводять до виникнення випадкових флуктуацій магнітної енергії, що накопичується в індуктивності внаслідок протікання термоструму у вимірювальному контурі. При цьому показано, що тепла складова шуму на першому такті роботи перетворювача – $I_{\phi \dot{\delta} \dot{a} \dot{i} \dot{e}}$ превалює над дробовою складовою, визначаючи тим самим рівень шуму першого такту – I_{ϕ} ($I_{\phi} \approx I_{\phi \dot{\delta} \dot{a} \dot{i} \dot{e}}$). Після розмикання ключа ці флуктуації зумовляють появу у вихідному сигналі складової тієї ж частоти, що і інформаційний сигнал, але її амплітуда буде носити випадковий характер – $U_{III \max}$ ($U_{\phi \dot{\delta} \dot{a} \dot{i} \dot{e} \max}$). На вихідний сигнал також накладаються теплові шуми – $U_{\phi R_i}$, основним джерелом яких є резистор навантаження.

Як видно з розрахункових даних таблиці 2, в результаті комутаційного перетворення має місце одночасне збільшення як корисного сигналу так і шуму, при цьому відношення сигнал/шум (розраховано для випадку корисного сигналу на вході перетворювача 1 мкВ) для обох тактів роботи залишається постійним. Розрахована середньоквадратична напруга шуму на виході перетворювача складає близько $3 \frac{i\hat{A}}{\sqrt{\hat{A}\hat{\sigma}}}$, що перевищує рівень власних приведених до входу шумів для більшості сучасних операційних підсилювачів, що в свою чергу дозволяє спростити процес подальшого підсилення корисного сигналу.

Таблиця 2

Результати розрахунку шуму комутаційного перетворювача

Перший такт			Другий такт				
$I_{\phi d\hat{a}i\hat{e}}$, $\frac{nA}{\sqrt{\Gamma\zeta}}$	I_{ϕ} , $\frac{nA}{\sqrt{\Gamma\zeta}}$	$\frac{\text{сигнал},}{\text{шум}}$, Дб	$K_{пер}$ $\times 10^3$	$U_{Ш\text{шнел} \max}$, $\frac{\text{мкВ}}{\sqrt{\Gamma\zeta}}$	$U_{Ш \max}$, $\frac{\text{мкВ}}{\sqrt{\Gamma\zeta}}$	$U_{\phi R_i}$, $\frac{i\hat{A}}{\sqrt{\hat{A}\hat{\sigma}}}$	$\frac{\text{сигнал},}{\text{шум}}$, Дб
1,6913	1,6914	55,43	2,320	2,82578	2,8258	2,57	56,27

Аналіз джерел похибок реального перетворювача дозволив виключити деякі з них за умови реалізації нульового компенсаційного методу вимірювання. Для цього в ланцюг термопари включається шунт, через який від зовнішнього джерела пропускається електричний струм. Значення струму змінюється доки не буде досягнута рівність між діючою в контурі термо-ЕРС і падінням напруги на шунті, що супроводжується появою нульового вихідного сигналу. Реалізація нульового компенсаційного методу вимірювання дозволяє виключити похибки методичного характеру, поява яких зумовлена протіканням струму у вимірювальному контурі. В результаті експериментального дослідження нульового сигналу встановлено, що він крім випадкової складової містить постійну складову, значення якої визначає рівень систематичної похибки, а її поява зумовлена неповною компенсацією комутаційного шуму. Встановлено, що значення результуючої похибки визначається систематичною складовою, яка в перерахунку на вхід перетворювача становить близько $2 \cdot 10^{-7}$ В.

П'ятий розділ присвячено розробці комутаційних перетворювачів для вимірювання температури в тризонних ростових печах опору. Для вирішення задачі контролю температури в таких печах розроблено триканальні перетворювачі з послідовним і паралельним опитуванням каналів, які характеризуються, за умови синхронізації вимірювального процесу з напругою мережі, часом опитування каналів 60 мс та 20 мс відповідно. Також на базі одноканального комутаційного перетворювача розроблено та створено термоелектричний термометр з роздільною здатністю близько 0,2мкВ та швидкодією 25 вимірів/с.

Для реалізації тестових методів вимірювання температури, що дозволяють зменшити зумовлені деградацією термопар похибки, розроблено та створено двоканальний комутаційний перетворювач, на базі якого створено вимірювальну установку, структурна схема якої представлена на рис. 5. Додатковий вимірювальний канал (Канал 2) використовується для калібрування та отримання нульового сигналу, що дозволяє провести його віднімання з вихідного сигналу. Періодичний аналіз нульового сигналу та його віднімання дозволяє підвищити точність вимірювання за рахунок зменшення похибок зумовлених температурним дрейфом.

Рис. 5. Вимірювальна установка для вимірювання температури з можливістю контролю ступеня деградації термопар та дослідження теплових властивостей середовищ.

Для реалізації теплових тестових впливів на основі теплоти Пельтьє розроблено алгоритм вимірювання термо-ЕРС в режимі протікання зовнішнього струму через спаї термопар, який дозволяє виключити вплив на результати вимірювання виділення тепла Джоуля-Ленца. Згідно розробленого алгоритму через термопару пропускається імпульсний різнополярний струм з нульовою постійною складовою. У такому режимі відбувається виділення теплоти Джоуля-Ленца, але при цьому відсутнє виділення теплоти Пельтьє. На цьому етапі проводиться встановлення нуля (точки відліку). Потім відбувається перехід в режим, коли один або декілька імпульсів інвертується. При цьому кількість теплоти Джоуля, що виділяється, не змінюється, але внаслідок появи ненульової постійної складової струму, починає виділятися теплота Пельтьє.

Ефективність запропонованого алгоритму перевірено експериментально. При переході з режиму однополярних в режим різнополярних імпульсів струму зареєстровано зумовлений виділенням теплоти Пельтьє тепловий перехідний процес, при цьому обидва спаї мідь-константової термопар знаходилися у воді. Аналогічний експеримент проведено для термопар, що знаходилась в повітрі. Одержані перехідні процеси розкладено методом послідовного логарифмування з подальшою лінійною апроксимацією одержаної кривої методом найменших квадратів на три експоненціальних складових, кожен з яких можна пов'язати з відповідними джерелами термо-ЕРС – термоелектродами і спаями. В результаті обробки експериментальних даних встановлено, що величина термо-ЕРС, викликана протіканням струму з постійною складовою у воді приблизно в два рази менша ніж для випадку коли спаї знаходилися в повітрі. У цьому виявляється теплова взаємодія термопар з навколишнім середовищем. Таким чином, дослідження подібних нестационарних теплових процесів дозволяє визначати теплові характеристики, які безпосередньо впливають на хід процесів встановлення теплової рівноваги між термопарою і оточуючим середовищем.

У додатках наведено результати розробки математичної моделі комутаційного перетворювача та аналізу адитивної і мультиплікативної складової похибки, а також відомості про впровадження результатів дисертації.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена науково-практична задача, яка полягає в обґрунтуванні і розробці методу комутаційного перетворення термо-ЕРС, його математичного опису, комутаційних перетворювачів і систем вимірювання та контролю температури в трьохзонних ростових печах, що дозволить підвищити точність вимірювання температури за допомогою термоелектричних перетворювачів в умовах їх деградації. Зокрема, отримано наступні результати.

1. Проаналізовано існуючі способи підвищення точності вимірювання термо-ЕРС термопар, доведено відсутність способів вимірювання, які одночасно забезпечують реалізацію структурно-алгоритмічних підходу та підвищення чутливості, та доказана їх перспективність при вирощуванні нелінійно-оптичних перетворювачів частоти.

2. Обґрунтовано і розвинуто спосіб комутаційного перетворення термо-ЕРС, що дозволяє отримати коефіцієнт перетворення значення термо-ЕРС у амплітуду вихідного імпульсу більше ніж 10^3 раз, що зумовлює підвищення у стільки ж разів чутливості вимірювань. Розроблено та створено комутаційні перетворювачі, в яких реалізовано цей метод, що дозволяють компенсувати комутаційний шум, збільшити завадостійкість, понизити поріг чутливості вимірювань, контролювати температурний дрейф та ступінь деградації термопари.

3. Виконано теоретичний аналіз електромагнітних процесів, що відбуваються в перетворювачі безпосередньо після комутації. Запропоновано математичні вирази, що пов'язують параметри вихідного сигналу з параметрами комутаційного перетворювача, а також аналітичні вирази для розрахунку значення чутливості комутаційного перетворювача. Визначено оптимальний режим роботи комутаційного перетворювача, який характеризується максимальним значенням коефіцієнту перетворення.

4. Експериментально визначено значення параметрів моделі комутаційного перетворювача: приведеної ємності, індуктивності, опору, по яким розраховано значення коефіцієнта перетворення, що становить $2 \cdot 10^3$. Досліджено залежності параметрів вихідного сигналу і коефіцієнта перетворення комутаційного перетворювача від параметрів перетворювача та визначені умови для їх оптимізації.

5. Визначено межі використання запропонованої моделі комутаційного перетворювача. Встановлено, що значення коефіцієнта перетворення пропорційно зменшується із збільшенням часу перемикання ключа. Визначено, в результаті чисельного моделювання комутаційного

перетворювача, оптимальне значення коефіцієнта трансформації, якому відповідає максимальне значення коефіцієнта перетворення.

6. Розроблено математичні моделі для оцінки адитивної і мультиплікативної складової похибки. Встановлено, що значення результуючої похибки визначається систематичною складовою, яка в перерахунку на вхід перетворювача становить близько $2 \cdot 10^{-7}$ В.

7. Розроблено і створено універсальну вимірювальну установку, яка дозволяє контролювати ступінь деградації термопари і досліджувати теплові властивості різних середовищ. Вдосконалено спосіб вимірювання термо-ЕРС в режимі протікання зовнішнього струму через спаї термопари, який дозволяє виключити вплив на результати вимірювання виділення тепла Джоуля-Ленца.

8. Розроблено і створено термоелектричний термометр на базі комутаційного перетворювача, що дозволяє проводити вимірювання термо-ЕРС термопари з похибкою 0,2 мкВ при цьому час одного вимірювання становить 20мс.

9. Результати роботи впроваджені в лабораторії нелінійно-оптичних перетворювачів частоти Запорізької державної інженерної академії (м. Запоріжжя) та в науково-впроваджувальному центрі «Елент А». м. Дніпропетровськ).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Романов Л.Г., Луценко В.Ю. Применение алгоритмов случайного поиска в решении оптимизационных задач // Электротехника та електроенергетика.–Запоріжжя: Запорізький національний технічний університет. – 2002. – №2. – С. 43-48.

Здобувачем виконано аналіз ефективності використання алгоритмів випадкового пошуку при вирішенні задач оптимізації електронних пристроїв.

2. Луценко В.Ю., Жагров А.С. Применение операции дифференцирования для регистрации малых изменений напряжений или ЭДС // Вісник технологічного університету Поділля. С. Технічні науки. – Хмельницький: Технологічний університет Поділля.–2003. – Т.2. – С.180-183.

Здобувачем доказана доцільність використання операції диференціювання для реєстрації сигналів низького рівня.

3. Луценко В.Ю., Галкин Л.А., Жагров А.С. Повышение чувствительности контроля температур дифференцирующим преобразователем // Український метрологічний журнал. – Харків: ДНВО «Метрологія».– 2004. – №1. – С.36-41.

Здобувачем розроблено шумові моделі термоелектричних термометрів, за допомогою яких розраховано рівень шуму на їх виході, та доведена можливість збільшення відношення сигнал/шум у випадку комутаційного перетворення термо-ЕРС.

4. Луценко В.Ю., Переверзев А.В., Жагров А.С. Высокоточный датчик с коммутационным преобразованием термо-ЭДС // Вісник Хмельницького національного університету. С. Технічні науки.– Хмельницький: Хмельницький національний університет. – 2005. – Ч.1,Т.1. – С.188-191.

Здобувачем розроблено схему датчика температури з комутаційним перетворенням термо-ЕРС та експериментально досліджено залежність коефіцієнта перетворення від значення опору навантаження, який визначає ступінь затухання вихідного сигналу.

5. Луценко В.Ю., Жагров А.С. Математическая модель датчика с коммутационным преобразованием термо-ЭДС // Український метрологічний журнал. – Харків: ДНВО «Метрологія». – 2006. – №3. – С.27-34.

Здобувачем розроблено математичну модель датчика з комутаційним перетворенням термо-ЕРС і методика визначення її параметрів.

6. Луценко В.Ю., Жагров А.С., Готовкин М.А. Исследование нестационарных процессов теплового взаимодействия термодпары с окружающей средой // Вісник Хмельницького національного університету. С. Технічні науки. – Хмельницький: Хмельницький національний університет. – 2007. – Т.1. – С.161-164.

Здобувачем розроблено структурну схему і алгоритм функціонування установки для досліджень нестационарних процесів взаємодії термодпар з навколишнім середовищем.

7. Переверзев А.В., Луценко В.Ю. Система измерения и контроля температуры на основе коммутационного преобразователя // Технічна

електродинаміка. – Київ: Інститут електродинаміки НАН України. – 2007. – Ч.5. – С.15-18.

Здобувачем розроблено структурну схему системи вимірювання і контролю температури в ростовій печі та експериментально досліджено функцію перетворення комутаційного перетворювача

8. Патент 30068 України, МПК G01K 7/2. Пристрій для вимірювання температури./ Луценко В.Ю., Оселедчик Ю.С., Жагров А.С. (Україна) – №200711373; заявлено 15.10.2007; Опубл. 11.02.2008, Бюл. № 3.

Здобувачем розроблено схему для електромагнітної компенсації комутаційного шуму.

АНОТАЦІЇ

Луценко В.Ю. Створення та дослідження комутаційних перетворювачів сигналів термопар. – 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. – 2008.

Дисертацію присвячено розробці та дослідженню комутаційних перетворювачів сигналів термопар. Розвинуто й обґрунтовано спосіб комутаційного перетворення термо-ЕРС в короткий імпульс вихідної напруги, що дозволило підвищити чутливість вимірювання температури. Розроблено схеми комутаційних перетворювачів, які дозволяють проводити вимірювання температури з високою швидкістю й роздільною здатністю, контролювати ступінь деградації термопари і досліджувати теплові властивості різних середовищ. Запропонована математична модель комутаційного перетворення та виконано аналіз складових результуючої похибки комутаційного перетворення. Вдосконалено алгоритм вимірювання термо-ЕРС в режимі протікання зовнішнього струму через спаї термопари, що дає можливість виключити вплив на результати вимірювання виділення тепла Джоуля-Ленца.

Ключові слова: комутаційне перетворення термо-ЕРС, термопара, електрорушійна сила, комутаційний шум, коефіцієнт перетворення, чутливість, точність, похибки.

Луценко В.Ю. Разработка и создание коммутационных преобразователей сигналов термопар. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.05 – приборы и методы измерения электрических и магнитных величин. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”. Харьков. – 2008.

Диссертация посвящена разработке и исследованию коммутационных преобразователей сигналов термопар, которые позволяют повысить точность измерения и контроля температуры с помощью термопар в условиях их

деградации. В диссертации обоснован и развит способ коммутационного преобразования термо-ЭДС, который отличается высоким значением коэффициента преобразования термо-ЭДС в амплитуду выходного импульса, что обуславливает повышение чувствительности измерений. Разработаны и созданы коммутационные преобразователи, которые позволяют производить измерение температуры с высоким быстродействием и разрешающей способностью, компенсировать коммутационные шумы, контролировать температурный дрейф и степень деграда

ции термопары. Предложена математическая модель коммутационного преобразования и определены ее параметры. Экспериментально исследованы зависимости коэффициента преобразования от параметров коммутационного преобразователя. Выполнен анализ основных источников погрешностей и определена граница основной погрешности. Усовершенствован алгоритм измерения термо-ЭДС в режиме протекания внешнего тока через спаи термопары, позволяющий исключить влияние на результаты измерений выделения теплоты Джоуля-Ленца.

Ключевые слова: коммутационное преобразование термо-ЭДС, термопара, электродвижущая сила, коммутационный шум, коэффициент преобразования, чувствительность, точность, погрешности.

Lutsenko V.Y. Developing and researching switching converters of signals of thermocouples. – Manuscript.

Dissertation for scientific degree of engineering sciences on speciality 05.11.05 – equipment and methods of measurement of electric and magnetic magnitudes. – National Technical University is the “Kharkov Polytechnic Institute”. Kharkov. – 2008.

Thesis deals with scientific and technical problem of development and research of switching converters of thermocouples signals. The method of switching transformation of thermo-EMF in the short pulse of an output voltage is proved and developed. It allowed raising sensitivity measurement of temperature. Circuit of switching converters for measurement of temperature with tall fast operation and high resolution are developed. They allow to control degradation of the thermocouple and to investigate thermal properties of different environment. The mathematical model of switching transformation is developed. Components of a resulting lapse of switching transformation are established. The algorithm of measurement of thermo-EMF in the regime of leakage of external electrical current through junction of thermocouples is developed. This algorithm expels the effect on results of heat production of the Joule.

Key words: switching converters of thermo-EMF, thermocouple, electromotive force, commutation noise, conversion coefficient, sensitivity, precision, errors.

Підписано до друку 16 вересня 2008р. Формат 60x84 1/32. Папір офсетний.
Умовн. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим.
Замовлення №

Віддруковано друкарнею
Запорізької державної інженерної академії
з комп'ютерного оригінал-макету

69006, м. Запоріжжя, пр. Леніна, 226
РВВ ЗДІА, тел. 22-38-240