

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Матвіїв Роман Олегович



УДК 681.7.08; 536.6.081

**ПЕРЕНОСНІ КАЛІБРАТОРИ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮВАННЯ
ХАРАКТЕРИСТИК ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ**

05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Яцук Василь Олександрович,
професор кафедри «Інформаційно-
вимірювальні технології»
Національного університету
«Львівська політехніка»,
м. Львів

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Середюк Орест Євгенович,
в.о. зав. кафедри метрології та
інформаційно-вимірювальної
техніки Івано-Франківського
національного технічного
університету нафти і газу, м. Івано-
Франківськ

кандидат технічних наук, доцент
Рудик Юрій Іванович,
головний науковий співробітник
відділу організації науково-дослідної
діяльності Львівського державного
університету безпеки
життєдіяльності,
м. Львів

Захист відбудеться «29» листопада 2018 року о 16⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.21 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 28а, ауд. 713 п'ятого навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, Львів, вул. Професорська, 1)

Автореферат розісланий «27» жовтня 2018 р.

*Учений секретар спеціалізованої
вченої ради, д.т.н., доцент*



Т.З. Бубела

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Щораз ширше практичне впровадження кібер-фізичних систем (КФС), пристроїв Інтернету речей промислового використання та розпорощених вимірювальних систем вимагає розроблення принципово нових підходів до метрологічного забезпечення. Дійсно, класичні методи калібрування, оперативного контролювання та метрологічної перевірки вимірювальних каналів (ВК) таких пристроїв в лабораторних умовах втрачають сенс, оскільки потребують демонтажу всієї розпорощеної системи. Крім чисто технічних і організаційних незручностей та фінансових затрат, повірка ВК у, до певної міри, “тепличних” умовах не відображатиме більшості їх метрологічних особливостей в реальних умовах експлуатації. При цьому не перевіряються інші ланки вимірювального кола. У випадку проведення перевірки окремих вимірювальних перетворювачів, на місці експлуатації слід перевірити функціонування модемів, ліній зв’язку та центрального комп’ютера.

Сучасні нормативні документи рекомендують впроваджувати такі системи керування вимірюваннями, які забезпечують придатність вимірювального обладнання та методів вимірювання до використання за призначенням та заданий рівень ризиків отримання невірогідних результатів вимірювання. Тому технічно найдоцільніше проводити метрологічне обслуговування ВК КФС безпосередньо на місці експлуатації. Очевидно, що для практичної реалізації цього необхідні калібратори фізичних величин з можливістю розміщення безпосередньо в технологічних об’єктах. У більшості практичних випадків це або технічно неможливо, наприклад, атомні електростанції, або складно та дорого через необхідність налагодження метрологічних характеристик класичних калібраторів на місці експлуатації ВК КФС. Під час оперативного контролювання на калібраторі зазвичай встановлюється декілька значень вихідного сигналу, рівномірно розподілених в діапазоні вимірювання контрольованого засобу. При цьому на місці експлуатації засобів вимірювань із вхідними напругами низького рівня, наприклад, термоелектричні перетворювачі типу ПП(S), слід коригувати адитивні зміщення калібратора для всіх встановлюваних значень кодів. Це обумовлено тим, що адитивні складові похибок (АСП) його вхідних блоків перетворюються в мультиплікативні. Унаслідок цього час обслуговування стає невиправдано великим, а процедура оперативного контролювання метрологічного стану вимірювальних каналів засобів вимірювання (ЗВ) суттєво ускладнюється. Тому автоматизація процесу коригування адитивних зміщень усуває необхідність в ручному коригуванні похибок калібраторів напруги постійного струму та слугує підґрунтям для значного зменшення його масових та габаритних показників.

Тому вдосконалення переносних калібраторів напруги постійного струму на основі сучасних мікроелектронних та інформаційних технологій сприятиме його реалізації у вигляді інтегральної мікросхеми та покращанню метрологічної надійності оперативного контролю характеристик усього вимірювального кола на місці експлуатації.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації відповідає науковому напрямку кафедри інформаційно-вимірювальних

технологій Національного університету «Львівська політехніка»: «Метрологія та інформаційно-вимірвальні технології в кібер-фізичних, робототехнічних та інших системах; тестування програмного продукту; характеристика та забезпечення метрологічної відповідності і якості продукції». Робота виконувалась в межах науково-дослідної роботи: ДБ/Кібер «Апаратно-програмна платформа для побудови прикладних кібер-фізичних систем», (№ держреєстрації 0115U000446; термін виконання 01.01.2015 р. – 31.12.2017 р.). Робота виконувалась при підтримці ПрАТ «СКБ МП», яка планує використати метод корекції адитивних зміщень калібраторів напруги постійного струму та імітаторів активного опору при модернізації багатозначних мір напруги постійного струму і імітаторів активного опору типів МК4702 і МК4703 (термін виконання 01.01.2016 р. – 07.03.2018 р.)

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення точності калібраторів напруги та імітаторів активного опору шляхом коригування адитивних зміщень.

Виходячи з поставленої мети визначено наступні завдання у дисертаційній роботі:

1. Дослідити та проаналізувати переваги та недоліки існуючих методів компенсації адитивних похибок.
2. Проаналізувати комутаційно-інвертувальний метод коригування адитивних похибок.
3. Проаналізувати коригування адитивних похибок калібраторів постійного струму з двома джерелами зразкової напруги.
4. Синтезувати структури усереднення вихідних сигналів калібратора напруги з комутаційно-інвертувальним методом коригування адитивних похибок;
5. Синтезувати структуру імітатора активного опору на основі методу комутаційного-інвертування.
6. Синтезувати калібратор напруги постійного струму з широтно імпульсним подільником і комутаційно-інвертувальним методом коригування адитивних похибок.
7. Виготовити макет калібратора напруги та провести експериментальні дослідження для підтвердження ефективності запропонованого методу коригування адитивних похибок.

Об'єкт дослідження – методи та засоби коригування адитивних складових похибки під час відтворення електричних величин.

Предмет дослідження – кодировані багатозначні міри напруги та опору.

Методи дослідження. Дослідження базуються на використанні теоретичних основ метрології, теорії лінійних електричних кіл, теорії похибок вимірювань, структурно алгоритмічних методів підвищення точності, концепції непевності вимірювань та опрацювання результатів. Вірогідність отриманих результатів обумовлена коректністю розрахунків, математичних та комп'ютерних моделей проведених з допомогою сучасних прикладних програмних пакетів

Наукова новизна одержаних результатів. У роботі отримані такі наукові результати:

1. Вперше запропоновано для автоматичного коригування адитивних зміщень в калібраторах напруги постійного струму використовувати подвійне комутаційне

інвертування зразкової вхідної напруги та вихідної напруги калібратора, яка через фільтри низьких частот подається до двох вихідних запам'ятовувальних конденсаторів, що забезпечує мале значення нескоригованих адитивних зміщень.

2. Покращено характеристики калібратора напруги постійного струму шляхом уведення додаткового джерела вхідної опорної напруги з полярністю протилежною до полярності основного джерела, почергового підключення обох джерел до входу калібратора та формування додаткового виходу напруги протилежної полярності з допомогою інвертора напруги з подальшим синхронним детектуванням обох вихідних напруг, їх усередненням фільтрами низьких частот та запам'ятовуванням на вихідних конденсаторах, що дає змогу вдвічі зменшити пульсації вихідного сигналу.

3. Вперше запропоновано коригувати адитивні зміщення в імітаторах електричного опору з використанням двох синхронних перемикачів полярності, потенціальні входи одного з яких сполучені з обидвома вхідними клемми імітатора, до яких також підключені струмові виходи іншого, що дозволяє коригувати адитивні зміщення завдяки періодичним перемиканням напряму протікання струмів через імітатор, що практично усуває необхідність в ручному встановленні нуля.

4. Покращено характеристики імітатора опору з чотирипровідним підключенням до вимірюваного об'єкту на основі уведення паралельно до обох вхідних клем від'ємного опору на основі підсилювача з від'ємним та додатним зворотними зв'язками, що дозволяє підвищити точність коригування впливу опору одного із струмових під'єднувальних дротів.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Результати випробувань виготовленого макету калібратора напруги постійного струму добре збігаються з теоретичними припущеннями, що дає підстави для його практичного використання.

2. Ряд технічних рішень дисертаційної роботи можуть бути використані при вдосконаленні багатозначних мір напруги і опору типу МК4703, які виготовляються ПрАТ «СКБ мікроелектроніки в приладобудуванні», м. Львів.

3. Отримані основні схемо-технічні рішення будуть використані при модернізації багатозначних мір напруги та опору типів МК4702 і МК4703 в ПрАТ «СКБ мікроелектроніки в приладобудуванні».

4. Метод корекції впливу опору ліній зв'язку в терморезистивних перетворювачах використано на ПрАТ Самбірський приладобудівний завод «Омега».

5. Результати дисертації можуть бути використані в навчальному процесі кафедри інформаційно-вимірювальних технологій під час вивчення дисциплін «Апаратне забезпечення тестувальних процесів», «Методи та засоби підвищення точності вимірювань і випробувань», «Метрологія та інженерія якості», «Програмні та апаратні методи тестування».

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати з формулювання відповідних висновки отримано автором самостійно.

У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належить: [1] – проведено аналіз похибок температурних поправок і визначено їх залежності від

похибок вимірювання температури нормального елемента; [2] - запропоновано метод компенсації впливу опорів ліній зв'язку в двопровідних терморезистивних перетворювачах на основі комутаційного інвертування зразкового вимірювального струму з аналоговим усередненням сигналів на входах ліній зв'язку; [3] – проведено моделювання процесу коригування похибок в калібраторах напруги; [5] – проведено аналіз частотних характеристик коригування адитивних похибок калібраторів напруги та дослідженні фільтри низьких частот; [6] – розроблено структуру калібратора напруги постійного струму з комутаційним інвертуванням та досліджено процес автоматичного коригування похибок за допомогою комп'ютерної моделі; [8] – вдосконалено структуру калібратора напруги з коригуванням адитивних похибок; [9] – проведені експериментальні дослідження макету калібратора напруги з подвійним інвертуванням для коригування адитивних похибок; [10] – вдосконалення структури імітатора опору з коригуванням впливу опорів ліній зв'язку.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати та положення роботи були представлені та обговорювались на: Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2016» (м. Славське, 2016 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Промислова автоматизація в Україні. Просвіта та підготовка кадрів» (м. Львів, 2016 р.); Міжнародній науково-практичній конференції пам'яті проф. П. Столярчука «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи» (м. Львів, 2017 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2018» (м. Славське, 2018 р.); XXI Міжнародному семінару метрологів «Metody i Technika Przetwarzania Sygnow w Pomiarach Fizycznych» (м. Чернівці, 2017 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 10 наукових праць, серед них: 4 статті у наукових фахових виданнях України, з них 1 у виданні України, що включене до міжнародної наукометричної бази, 1 стаття у періодичному виданні іншої держави, 4 тез доповідей на міжнародних, всеукраїнських та студентських науково-технічних та науково-практичних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із анотації, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 117 найменувань та 4 додатків, містить 167 сторінок друкованого тексту, включає 59 рисунків та 69 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та основні задачі дослідження. Подано зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами. Визначено наукову новизну отриманих результатів та їх практичну цінність. Представлено об'єкт, предмет та методи дослідження. Наведені дані про особистий внесок здобувача, апробацію та публікації результатів.

У першому розділі на основі аналізу літературних джерел, публікацій та нормативних документів за напрямом дисертаційних досліджень визначені основні принципи побудови кодированих мір напруги та опору.

Контроль метрологічних характеристик засобів вимірювання на місці експлуатації дозволяє різко зменшити ймовірність використання метрологічно несправного засобу. Розглянуто вимоги нормативних документів до побудови калібраторів напруги, постійного струму та опору. Основну увагу зосереджено на нормуванні границь допустимої приведенної основної похибки і границь допустимої відносної похибки. Проведено аналіз технічних і метрологічних характеристик серійних калібраторів, а також розглянута структура багатозначної комбінованої переносної міри типу МК4702. Проаналізовано існуючі методи та засоби побудови багатозначних мір напруги та опору і класифіковано їх за такими принципами: за функцією перетворення, за способом формування коефіцієнта перетворення, за видом зв'язку між окремими колами, за способом під'єднання. Цей аналіз дозволив встановити, що кодокеровані міри опору доцільно будувати на основі активних імітаторів опору, які складаються в основному з вузлів кодокерованої міри напруги з додатковим зразковим резистором, включеним в коло вхідного підсилювача.

У другому розділі проведено аналіз адитивних складових похибок калібраторів напруги постійного струму і можливих шляхів їх автоматичного коригування.

Адитивні складові похибок калібраторів напруги постійного струму (КНПС) виникають в основному від зміщення нульового рівня функції перетворення аналогових електронних вузлів в колі перетворення, від спадів напруги в лініях зв'язку між окремими вузлами, струмами витоку, електромагнетними наведеннями. При цьому адитивні складові похибок, зумовлені еквівалентними напругами зміщення операційних підсилювачів, в КНПС додаються до значення зразкової напруги і перетворюються в мультиплікативну складову похибки через застосування в них кодокерованих подільників. Адитивні складові похибки вихідних масштабних перетворювачів КНПС зумовлюють адитивне зміщення його вихідної напруги. Окрім того, вони можуть виникати також під час проходження струмів живлення різних вузлів пристрою через опори спільних ліній зв'язку між ними і для їх зменшення використовуються конструктивно-технологічні способи (рис. 1).

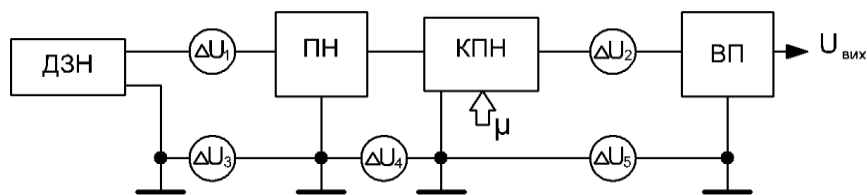


Рисунок 1 – Структурна схема калібратора напруги постійного струму з джерелами адитивних похибок

Адитивні зміщення ΔU_3 , ΔU_4 і ΔU_5 виникають в спільних лініях зв'язку між окремими елементами $\Delta U_i = I_i \cdot R_{ли}$, де I_i – струм, що проходить через лінії зв'язку; $R_{ли}$ – опір ліній зв'язку. Зменшення значень цих АСП досягається конструктивними методами, тобто зменшенням значення опору ліній зв'язку і зменшенням значення струмів живлення між окремими вузлами. Відповідно значення загальної адитивної похибки від зміщення нульового рівня підсилювачів описується виразом

$\Delta U = (\Delta U_1 \cdot K_1 \cdot \mu + \Delta U_2) \cdot K_2$, де K_1, K_2 – коефіцієнт передачі підсилювачів; μ – коефіцієнт перетворення КПН.

На основі проведеного аналізу розроблена структурна схема калібратора напруги, в якій для корекції впливу напруг зміщення ОП використано метод подвійного комутаційного інвертування з додатковим джерелом зразкової напруги зображена на рисунку 2. На виході вихідного підсилювача в залежності від сигналу тактового генератора формуються напруги:

$$U_1 = [(U_{0+} + \Delta U_1) \cdot K_1 \cdot \mu + \Delta U_2] \cdot K_2, \quad 0 \leq t \leq T/2 \quad (1)$$

$$U_2 = -[(U_{0-} + \Delta U_1) \cdot K_1 \cdot \mu + \Delta U_2] \cdot K_2, \quad T/2 \leq t \leq T, \quad (2)$$

де T – період імпульсів тактового генератора ТГ.

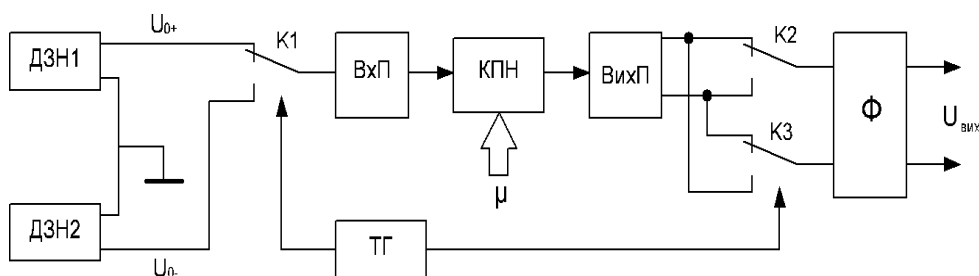


Рисунок 2 – Структурна схема калібратора напруги з додатковим джерелом зразкової напруги

Відповідно на виході ВихП формуються різнополярні сигнали, а на вхід фільтра низької частоти (ФНЧ) подаються сигнали однієї полярності в результаті комутації ключів K_2, K_3 . При цьому на виході фільтра напруга визначається виразом:

$$U_{\text{вих}} = (U_1 - U_2)/2 = \mu K_1 K_2 (U_{0+} - U_{0-})/2. \quad (3)$$

Відповідно на виході фільтра адитивні похибки від зміщення нульового рівня операційних підсилювачів коригуються.

На основі проведеного аналізу видно, що основним недоліком комутаційно-інвертувального методу є вплив точності формування імпульсів керування ключами і затримки формування сигналів, які виникають від недостатньої швидкодії комутуючих ключів і перехідних процесів ОП та ККП. Для усунення впливу перехідних процесів запропоновано вихідні сигнали вихідного ОП запам'ятовувати на елементах аналогової пам'яті (рис. 3). Вихідна напруга вихідного підсилювача на операційному підсилювачі DA_1 додатної полярності через ключі K_1-1 і K_1-2 поступає на конденсатор C_1 і запам'ятовується після перехідних процесів.

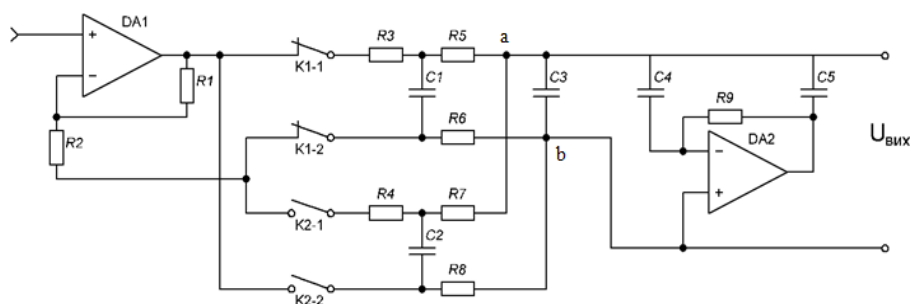


Рисунок 3 – Спрощена схема вихідної частини калібратора напруги постійного струму з елементами аналогової пам'яті

При цьому вихідна напруга ОП DA1 від'ємної полярності через ключі K1-1 і K1-2 зберігається на конденсаторі C2. Напруги конденсаторів C1 і C2 поступають на вхід суматора на резисторах R5, R6, R7, R8. При цьому вихідна напруга суматора в точках а і b визначається виразом:

$$U_{\Sigma} = U_{C1} - \frac{U_{C1} - U_{C2}}{R5 + R6 + R7 + R8} \cdot (R5 + R6) \quad (4)$$

За умови $R5=R6=R7=R8=R$ отримаємо середнє значення напруги $U_{\Sigma} = 0,5(U_{C1} + U_{C2})$. Під час під'єднання конденсатора C1 до вихідного підсилювача зміна напруги на конденсаторі C2 визначається виразом $\Delta U_{C2} = (U_{C1} - U_{C2})[1 - \exp(-t/\tau)]$ $0 \leq t \leq T/2$,

$\tau = \sum_{i=5}^8 R_i C_2$. При під'єднанні конденсатора C2 до виходу ОП DA1 зміна напруги на

$$\Delta U_{C1} = (U_{C1} - U_{C2}) \left[1 - \exp\left(-\frac{t - T/2}{\tau}\right) \right] \quad T/2 \leq t \leq T$$

конденсаторі C1 дорівнює ΔU_{C1} . Відповідно

напруга на виході суматора дорівнюватиме:

$$U_{ab} = \frac{1}{2} (U_{C1} + U_{C2}) + (\Delta U_{1\mu} + \Delta U_2) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right], \quad 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (5)$$

$$U_{ab} = \frac{1}{2} (U_{C1} + U_{C2}) - (\Delta U_{1\mu} + \Delta U_2) \left[1 - \exp\left(-\frac{t - T/2}{RC}\right) \right], \quad \frac{T}{2} \leq t \leq T. \quad (6)$$

Тоді зміна напруги на виході суматора визначається виразами:

$$\Delta U_{ab} = (\Delta U_{1\mu} + \Delta U_2) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right], \quad 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (7)$$

$$\Delta U_{ab} = -(\Delta U_{1\mu} + \Delta U_2) \left[1 - \exp\left(-\frac{t - T/2}{RC}\right) \right], \quad \frac{T}{2} \leq t \leq T \quad (8)$$

З аналізу графічних залежностей зміни напруги на виході суматора (рис. 4) видно, що амплітуда змінної складової вихідного сигналу суматора залежить від

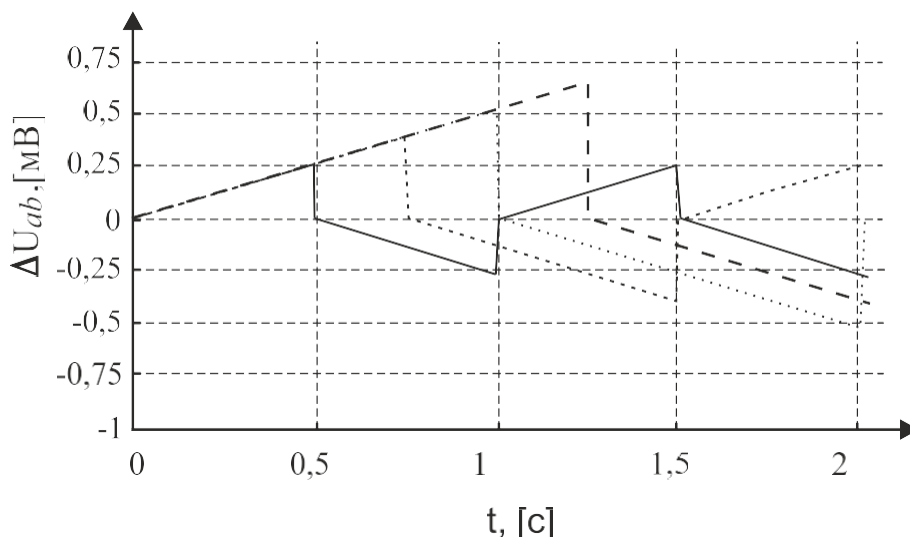


Рисунок 4 – Графічні залежності зміни напруги на виході суматора

постійної часу елементів пам'яті і суматора. При $\tau=18$ мс значення змінної складової дорівнює 0,25 мВ при частоті тактового генератора 1000 Гц і 0,5 мВ при частоті 500 Гц. Для зменшення змінної складової напруги на виході суматора застосовано пасивні та активні (на базі ОП DA2) фільтри. Відповідно для отримання значення змінної складової меншої

від 1 мкВ необхідно застосовувати фільтри з коефіцієнтом послаблення $K=47$ дБ при частоті тактового генератора 1000 Гц і $K=54$ дБ при частоті 500 Гц. Комп'ютерним

дослідженням визначено, що застосований фільтр зменшує змінну складову до 1 мкВ. Отже, запропонований метод коригування АСП КНПС на основі комутаційного інвертування напруги зразкового джерела і вихідного підсилювача з аналоговою пам'яттю дозволяє скоригувати АСП і покращує його динамічні характеристики. При цьому коригуються також похибки зумовлені нерівностями значень півперіодів керуючих сигналів і впливу перехідних процесів ОП і комутаційних елементів.

Однак, застосування пасивних ФНЧ призводить до суттєвого зростання сталої часу, збільшення часу встановлення та зростання вихідного опору КНПС. Оскільки активні фільтри низьких частот (АФНЧ) дають можливість суттєвого збільшення коефіцієнта послаблення змінної складової після здійснення подвійної інверсії опорної напруги та розташовані на виході калібратора, то вони повинні лише усереднювати його вихідний сигнал без внесення додаткових АСП у тракт перетворення. Тому й використовується структура АФНЧ без зміщення, основними елементами якої є ОП з прохідним резистором та двома конденсаторами, сполученими із інвертувальним входом та виходом ОП (рис. 5) [9].

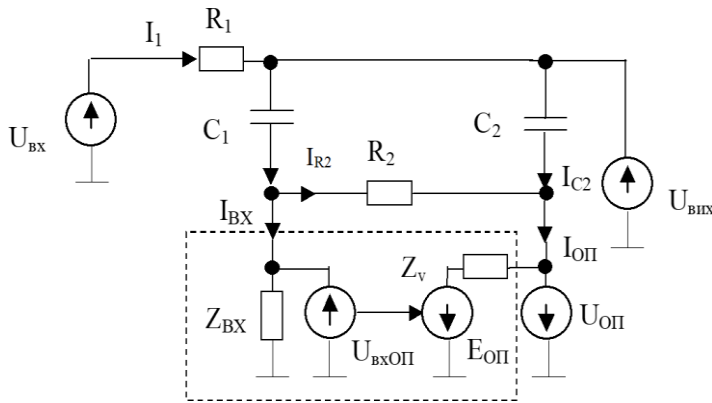


Рисунок 5 – Еквівалентна схема АФНЧ

ОП [1, 3]. Однак частотні параметри ОП можуть призводити до погіршення динамічних та частотних властивостей КНПС з автокалібруванням та усередненням вихідного сигналу АФНЧ. Функція передачі W_A еквівалентної схеми АФНЧ із врахуванням основних параметрів ОП описується як:

$$W_A = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{z}{p^2 + p\omega_z/Q + \omega_z^2 + (\kappa + 1)^{-1}(p^2 a + pb_2 + c_2)}, \quad (9)$$

де $\omega_z = 1/\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}$; Q – частота зрізу та добротність ідеального АФНЧ (без урахування параметрів ОП); R_1, R_2, C_1, C_2 – опори та ємності елементів фільтра; $Z_{\text{вх}}, Z_v, \kappa$ – вхідний та вихідний опори і коефіцієнт підсилення ОП відповідно.

З аналізу часових залежностей вхідної (рис. 6) та вихідної напруг ОП (рис. 7), можна зробити висновок, що ширококутові серійні ОП не будуть насичуватись при імпульсних вхідних напругах, а час встановлення вихідної напруги АФНЧ практично не залежатиме від параметрів використаних ОП. Отже, частота зрізу $f_{\text{зр}}$ АФНЧ, що використовується в тракті корекції АСП кодокерованих мір для сучасної елементної бази, може сягати значень одиниць кілогерц. Для суттєвого зменшення

динамічних властивостей КНПС показав, що за умови використання сучасних ширококутових ОП частота інвертування вхідного сигналу в них може сягати одиниць кілогерц [1]. Аналіз також показує, що при великих коефіцієнтах передачі розімкненого ОП та на низьких частотах передавальна характеристика калібратора мало залежить від параметрів

часу встановлення АФНЧ слід вибирати якомога вищу частоту зрізу фільтра та використовувати каскадне сполучення ланок, співвідношення між параметрами елементів яких задаються коефіцієнтом α за аналогією до [10].

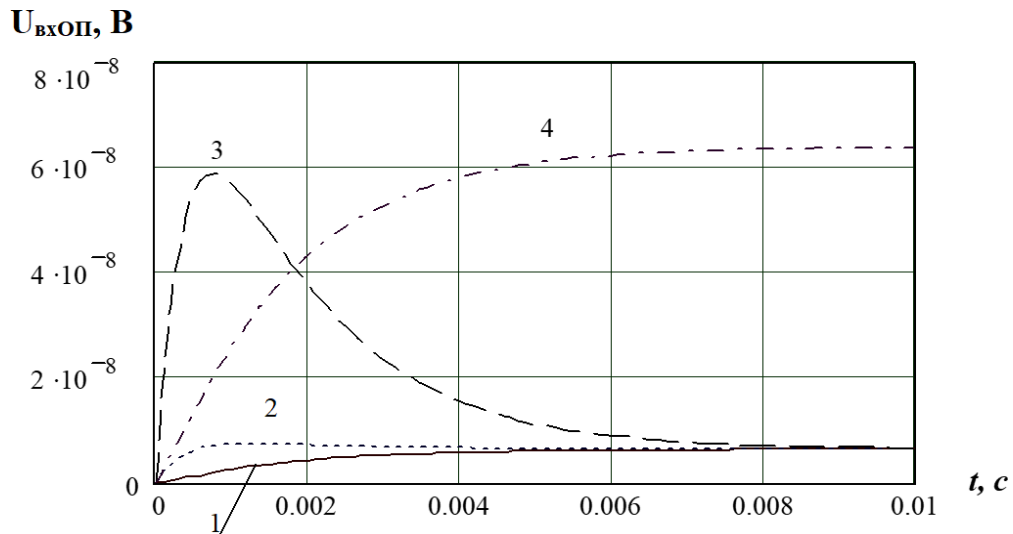


Рисунок 6 – Графіки переходних процесів вхідної напруги ОП при різних значеннях його параметрів: (1 – $k_0=10^5$, $\omega_1=70$ МГц; 2 – $k_0=10^5$, $\omega_1=7$ МГц; 3 – $k_0=10^5$, $\omega_1=0,7$ МГц; 4 – $k_0=10^4$, $\omega_1=7$ МГц)

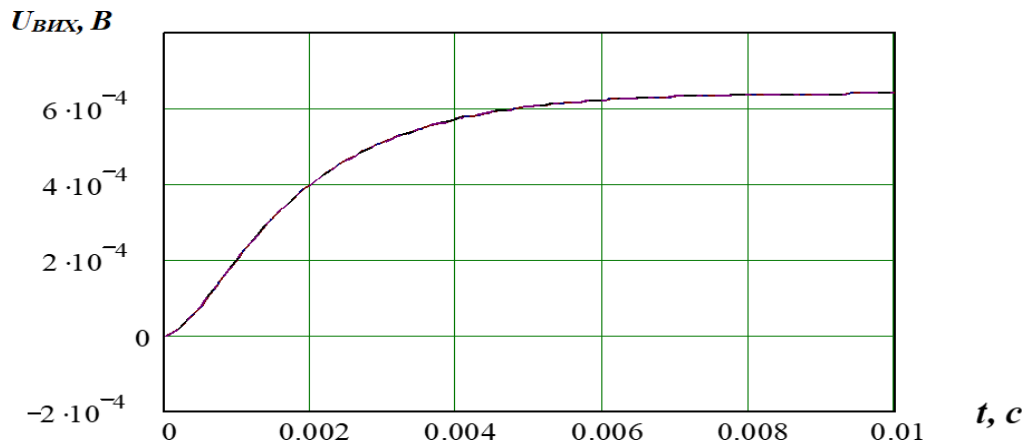


Рисунок 7 – Графіки переходних процесів вихідної напруги АФНЧ при різних параметрах ОП

Отже, фільтри, що використовуються в тракті автоматичної корекції АСП в кодированих мірах, можуть бути реалізовані в базисі як активних, так і пасивних ФНЧ [13]. В базисі АФНЧ можуть бути реалізовані фільтри, придатні для мікроелектронного виконання з часом встановлення десятки мілісекунд з похибкою не більшою 0,01 % [11, 12, 14].

У третьому розділі проведено аналіз активних імітаторів опору і синтез їх структур, на основі методу комутаційно-інвертувального методу коригування адитивних похибок.

Основними джерелами АСП в двопровідних активних імітаторах опору (АІО) є спади напруг на опорах ліній зв'язку ΔU_1 , а також на лініях між окремими елементами схеми ΔU_2 і ΔU_3 , які додаються до значення імітованого опору, напруги

зміщення ΔU_4 і ΔU_5 нульового рівня ОП (рис. 8). Зменшення впливу похибок ΔU_4 , ΔU_5 здійснюється, в основному конструктивно-технологічними методами.

При під'єднанні напруги до входів імітатора опору проходить вхідний струм $I_{\text{вх}}$ і між точками 1 і 2 формується напруга:

$$U_{\text{вх}} = I_{\text{вх}} \cdot (R_{L1} + R_{L2}) + I_{\text{вх}} \cdot R_0 \cdot \mu + \Delta U_1 \cdot (1 - \mu) - \Delta U_2, \quad (10)$$

де R_0 – значення опору зразкового резистора; μ – коефіцієнт передачі кодокерованого подільника напруги (КПН); R_{L1} , R_{L2} – значення опорів ліній зв'язку.

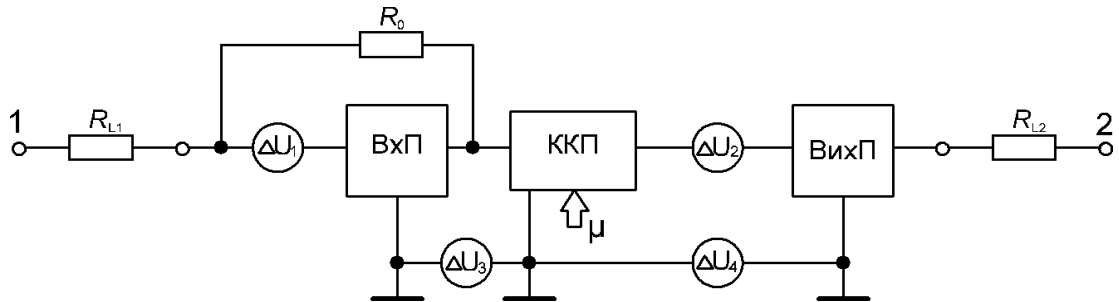


Рисунок 8 – Структурна схема двопровідного імітатора активного опору з джерелами зміщень

Значення імітованого опору даної схеми визначається виразом:

$$R_{\text{ім}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} = R_0 \mu + \frac{\Delta U_1}{I_{\text{вх}}} (1 - \mu) + \frac{\Delta U_2}{I_{\text{вх}}} + R_{L1} + R_{L2}. \quad (11)$$

З аналізу виразу (11) видно, що опори ліній зв'язку впливають на значення імітованого опору, а вплив зміщення нульового рівня вхідного ОП залежить від значення вхідного струму і коефіцієнта передачі КПН, а зміщення нульового рівня вихідного ОП залежить тільки від вхідного струму.

Для корекції впливу значень опорів ліній зв'язку традиційно використовуються чотирипровідні схеми з'єднань, а для корекції впливу напруги зміщення ОП запропоновано застосовувати метод комутаційного інвертування (рис. 9).

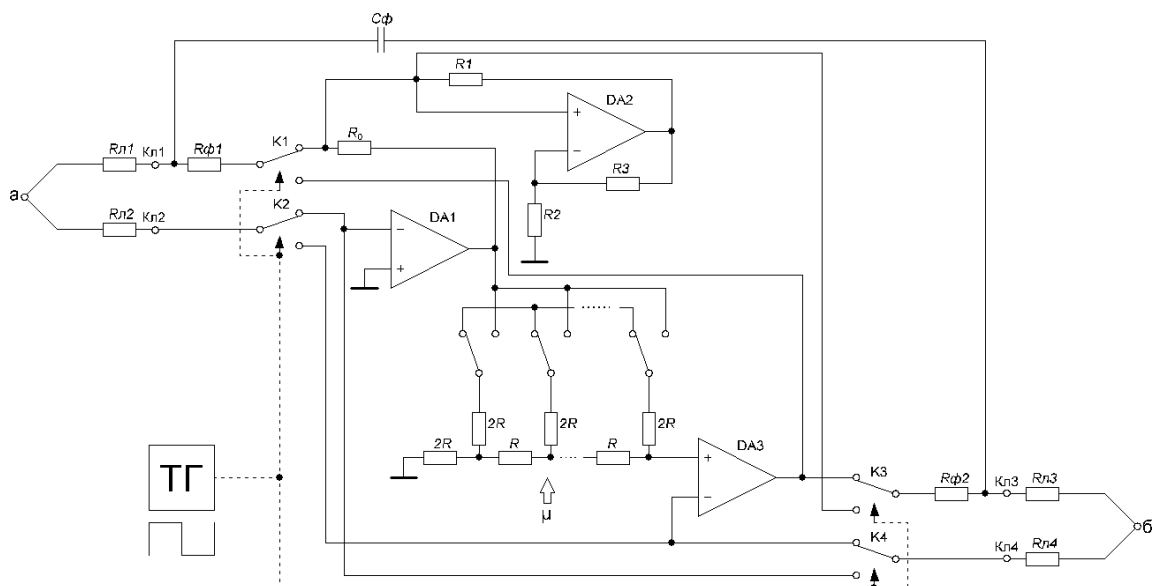


Рисунок 9 – Принципова схема імітатора активного електричного опору

В коло зворотного зв'язку вхідного ОП DA1 імітатора опору включений зразковий резистор R_0 . Друга струмова лінія зв'язку R_{L3} додається до вихідного опору ОП DA3, а друга потенціальна R_{L4} – до його високого вхідного опору, що й забезпечує інваріантність до їх впливу. Входи і виходи ОП DA1 і DA2 перемикаються ключами K1, K2, K3 і K4, при цьому вихід ОП DA1 через зразковий резистор R_0 і вихід ОП DA3 під'єднуються до входу пасивного ФНЧ. Формувач коригувального струму для корекції впливу опорів лінії зв'язку R_{L1} , опорів резисторів фільтра і опору замкнутих ключів K1 і K3 реалізований на ОП DA2 з резисторами зворотного зв'язку R1, R2 і R3. Вихідні клеми АЮ Кл1 і Кл2 через опори ліній зв'язку R_{L1} і R_{L2} під'єднані до точки «а», а клеми Кл3 і Кл4 до точки «б» контрольованого об'єкту. В першому півперіоді тактового генератора ($0 \leq t \leq T/2$) на першому вході «а» вихідна напруга $U_{вих1}$ першого ОП визначається виразом:

$$U_{вих1} = e_1 - I_{ex} \cdot (R_{L1} + R_1 + R_{к11}) - R_0 \cdot (I_{ex} - I_k), \quad (12)$$

де e_1 – напруга зміщення нульового рівня першого ОП DA1; $I_{вх}$ – вхідний струм імітатора; R_{L1} – опір першої лінії зв'язку; $R_{\phi 1}$ – опір резистора фільтра низьких частот; $R_{к11}$ – опір замкнутого контакту ключа K1; R_0 – опір зразкового резистора; I_k – значення компенсаційного струму схеми компенсації на ОП DA2; T – період імпульсів тактового генератора.

Схема корекції опору ліній зв'язку формує коригувальний струм, значення якого визначається виразом:

$$I_k = \frac{[e_1 - I_{ex} \cdot (R_{L1} + R_{\phi 1} + R_{к11}) - 2 \cdot e_2] \cdot R_3}{R_2 \cdot R_1}, \quad (13)$$

де e_2 – напруга зміщення нульового рівня ОП DA2.

При умові $R_1 = R_0$ і $R_2 = R_3$ та після відповідної підстановки вихідна напруга першого операційного підсилювача DA1 дорівнює: $U_{вих1} = 2 \cdot e_2 - I_{ex} \cdot R_0$. При цьому напруга в точці б контрольованого об'єкту визначається виразом: $U_b = (2 \cdot e_2 - I_{ex} \cdot R_0) \cdot \mu + e_3$, де e_3 – напруга зміщення нульового рівня другого операційного підсилювача DA3. Відповідно напруга між точками а і б при $0 \leq t \leq \frac{T}{2}$ визначається виразом: $U_{аб1} = e_1 - (2 \cdot e_2 - I_{ex} \cdot R_0) \cdot \mu + e_3$.

При додатному сигналі на виході тактового генератора перемикачі K1, K2, K3 і K4 встановлюються в друге положення і відповідно напруга на входах об'єкта при $\frac{T}{2} \leq t \leq T$ дорівнює: $U_{аб2} = -e_1 + (2 \cdot e_2 + I_{ex} \cdot R_0) \cdot \mu - e_3$.

Напруга на вході об'єкта усереднюється пасивним фільтром на резисторах $R_{\phi 1}$, $R_{\phi 2}$ і конденсаторі C_{ϕ} . Відповідно напруга на вході об'єкта між точками а і б дорівнює:

$$U_{абср} = \frac{U_{аб1} + U_{аб2}}{2} = I_{ex} \cdot \mu \cdot R \quad (14)$$

При цьому значення імітованого опору, який формується на вході об'єкту дорівнює:

$$R_{им} = \frac{U_{абср}}{I_{ex}} = R \cdot \mu. \quad (15)$$

З аналізу виразу (15) видно, що вплив опору першої з'єднувальної лінії, опір комутуючих ключів і напруги зміщення нульового рівня ОП і схеми корекції опору ліній зв'язку коригується, а імітований опір прямо пропорційний до коефіцієнта передачі КПН. Отже, метрологічні властивості АЮ визначатимуться похибками зразкового резистора та КПН.

В даному розділі також проведено аналіз можливості використання КПН в КНПС на основі широтно-імпульсного перетворення. Було розроблено структурну схему калібратора напруги з широтно-імпульсним подільником напруги (ШПМ) та коригуванням АСП за методом комутаційного інвертування (рис. 10).

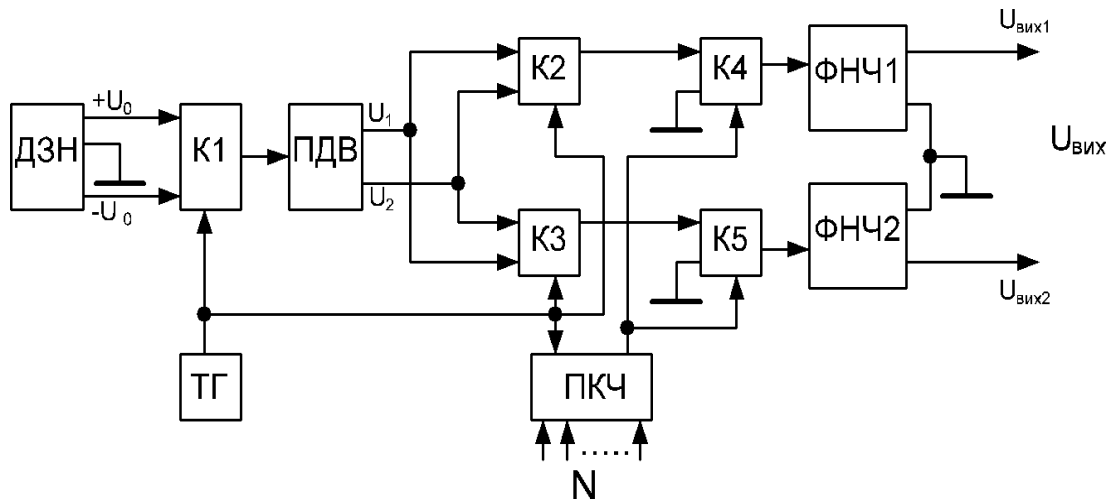


Рисунок 10 – Структурна схема широтно-імпульсного калібратора напруги з коригуванням адитивної похибки

Структурна схема містить двополярне джерело зразкової напруги ДЗН, комутаційні ключі К1, К2, К3, К4, К5, підсилювач зразкової напруги з диференційним виходом ПДВ, тактовий генератор керуючих імпульсів ТГ, перетворювач код-час ПКЧ і ФНЧ1, ФНЧ2.

Тактовий генератор ТГ формує прямокутні симетричні імпульси для керування ключами К1, К2, К3, а також для синхронізації формулювання вихідних імпульсів перетворювача код-час ПКЧ.

В залежності від значень вихідних сигналів тактового генератора ключ К1 під'єднує вхід підсилювача зразкової напруги з диференційним виходом (ПДВ) до виходів U_{0+} і U_{0-} джерела зразкових напруг (ДЗН). Відповідно на його виходах формуються напруги при $0 \leq t \leq T/2$: $U_1 = (U_{0+} + \Delta U_1)K_1$ та $U_2 = -(U_{0+} + \Delta U_2)K_2$ і при $T/2 \leq t \leq T$: $U_1 = (U_{0-} + \Delta U_1)K_1$ та $U_2 = -(U_{0-} + \Delta U_2)K_2$, де U_{0+} , U_{0-} – значення зразкових напруг відповідно додатної і від'ємної полярності; ΔU_1 , ΔU_2 – еквівалентне значення напруги зміщення нульового рівня підсилювача ПДВ відповідно до першого і другого входів; K_1 , K_2 – коефіцієнт підсилення ПДВ відповідно до першого і другого входів. На виході перетворювача код-час (ПКЧ) формується імпульс τ пропорційний до коду N $\tau = NT/2$, де T – період вихідних імпульсів тактового генератора (ТГ); N – значення коду керування, яке змінюється в діапазоні від 0 до 1. Початок формування імпульсу τ синхронізується фронтом вихідних імпульсів ТГ.

На виході фільтру низьких частот ФНЧ1 формується напруга, значення якої визначається виразом:

$$U_{вих1} = \frac{1}{T} \left[\int_0^T U_1 dt + \int_{T/2}^{\tau+T/2} U_2 dt \right]. \quad (16)$$

За умов $|U_{0+}| = |U_{0-}| = U_0$ та $K_1 = K_2 = K$, після перетворень отримується вираз:

$$U_{вих1} = U_0 K \frac{\tau}{T} + (\Delta U_1 - \Delta U_2) K \frac{\tau}{T}, \quad (17)$$

і, відповідно на виході ФНЧ2 напруга визначається виразом:

$$U_{вих2} = -U_0 K \frac{\tau}{T} + (\Delta U_1 - \Delta U_2) K \frac{\tau}{T}. \quad (18)$$

Напруга між виходами фільтрів низьких частот ФНЧ1 і ФНЧ2 визначається виразом: $U_{вих} = 2U_0 K \tau / T$, а абсолютне значення похибки вихідних напруг ФНЧ1 і ФНЧ2 дорівнюватиме: $\Delta_a = (\Delta U_1 - \Delta U_2) K \tau / T$. Відповідно між виходами фільтрів низьких частот похибка від зміщення нульового рівня підсилювача ПДВ коригується.

У четвертому розділі для проведення експериментальних досліджень ефективності запропонованих автором структур виготовлений макет КНПС з коригуванням адитивних зміщень (рис. 11). Схема для проведення експериментальних досліджень макету КНПС з коригуванням АСП складалася з макету калібратора напруги, прецизійного вольтметра для вимірювання вихідної напруги U_K калібратора (мультиметр М3514А №ТW0013442 фірми PICOTEST), частотоміра (ЧЗ-54 зав. №8711069) та осцилографа (Rigol DS1202CA зав. №DS1AB113000314) для вимірювання значення частоти і контролю форми сигналу ТГ. Експериментальні дослідження макету КНПС з коригуванням АСП проведено на різних частотах тактового генератора 100 Гц, 300 Гц, 600 Гц, 1,2 кГц, 2,5 кГц, 5,0 кГц. Дослідження проводилося без використання і з використанням імітатора АСП. При цьому значення напруги імітатора АСП становило 10 мВ, що є приблизно рівним еквівалентній напрузі зміщення нульового рівня використаних в макеті КНПС ОП. Відповідно імітатор АСП підключався до різних входів ОП і при цьому реєструвалися максимальні значення похибок, як різниці між показами цифрового вольтметра із вимкненим та увімкненим імітатором АСП. Результати експериментальних досліджень показали певну частотну залежність похибки КНПС,

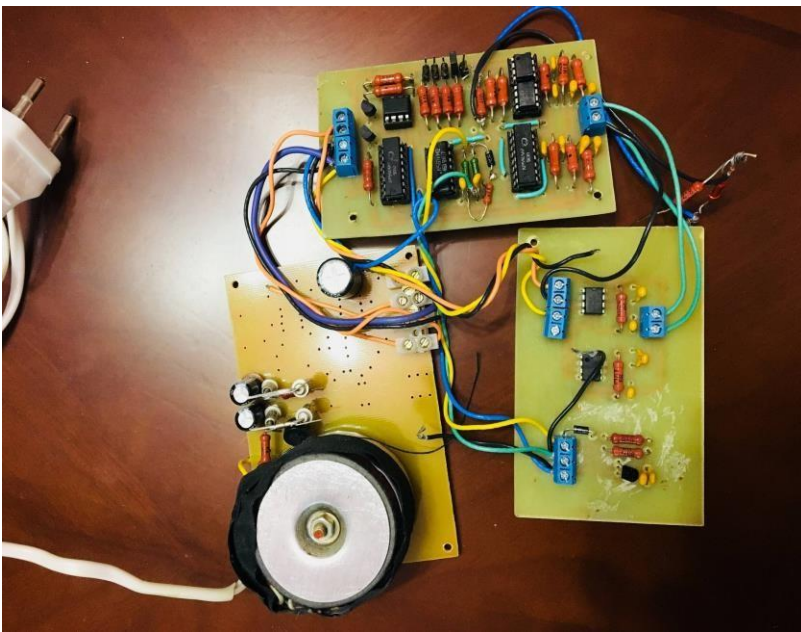


Рисунок 11 – Зовнішній вигляд макету калібратора напруги з коригуванням адитивних зміщень

Результати експериментальних досліджень показали певну частотну залежність похибки КНПС,

мінімальне значення якої було на частоті біля 1 кГц. Це можна пояснити частотними властивостями використаних в макеті електронних ключів. В таблицях 1 і 2 подано опрацьовані результати досліджень макету калібратора.

Таблиця 1 – Результати опрацювання значень вихідних напруг макету калібратора напруги в ручному режимі

U _{вих} , %	Додатна полярність опорної напруги		Від'ємна полярність опорної напруги		Вихідна напруга калібратора		Різниця напруг КНПС ΔU _к , мкВ
	U _{+безІАСП} , В	U _{+зІАСП} , В	U _{+безІАСП} , В	U _{-зІАСП} , В	U _{кбезІАСП} , В	U _{кзІАСП} , В	
0	0,001545	0,011800	0,001539	0,011794	0,000003	0,000003	0
25	0,253012	0,263266	-0,249446	-0,239192	0,251229	0,251229	0
50	0,504388	0,514642	-0,499936	-0,489682	0,502162	0,502162	0
75	0,755435	0,765689	-0,750393	-0,740139	0,752914	0,752914	0

Таблиця 2 – Різниця вихідних напруг макету калібратора напруги на частоті тактового генератора 1200 Гц

U _{вихн} , В	U _{безІАСП} , В	U _{зІАСП} , В	ΔU _к , В
0,0	0,000005	0,000011	-0,000006
0,5	0,484721	0,484713	0,000008
1,0	0,981985	0,981976	0,000009
1,5	1,47537	1,47527	-0,00001
2,0	1,97854	1,97844	0,00001

Як показує аналіз результатів експериментальних досліджень у ручному режимі керування нескориговане значення АЗ не перевищує ±1 мкВ. Нескориговане значення до ±10 мкВ при значеннях відтворюваної напруги в діапазоні від 0 до 2 В можна пояснити впливом витоків з джерела живлення та його пульсацій, недостатньою швидкодією і комутаційними викидами використаних в макеті низькочастотних електронних ключів, а також зміною одиниці молодшого розряду вольтметра під час перемикання його піддіапазонів вимірювання.

ВИСНОВКИ

У результаті виконаних у цій роботі досліджень, спрямованих на розв'язання актуального науково-практичного завдання вдосконалення переносних калібраторів для оперативного контролювання характеристик засобів вимірювань, отримано такі наукові та практичні результати:

1. Теоретично доведено, що для автоматичного коригування адитивних зміщень в калібраторах напруги постійного струму доцільно використовувати метод подвійного комутаційного інвертування зразкової вхідної напруги та вихідної напруги калібратора, яка через фільтри низьких частот подається до двох вихідних запам'ятовувальних конденсаторів.

2. З метою зменшення пульсацій теоретично показано можливість вдосконалення структури калібратора напруги постійного струму з використанням

додаткового джерела вхідної опорної напруги з полярністю протилежною до полярності основного джерела, почерговим підключенням обох джерел до входу калібратора та формуванням додаткового виходу напруги протилежної полярності з допомогою інвертора напруги з подальшим синхронним детектуванням обох вихідних напруг, їх усередненням фільтрами низьких частот та запам'ятовуванням на вихідних конденсаторах.

3. Теоретично доведено доцільність коригування адитивних зміщень в імітаторах електричного опору на основі методу комутаційного інвертування вимірювального струму, що протікає через його клеми з використанням двох синхронних перемикачів полярності, потенціальні входи одного з яких сполучені з обидвома вхідними клемми імітатора, до яких також підключені струмові виходи іншого.

4. Для підвищення точності та потенційної стійкості вдосконалено структуру імітатора опору з чотирьохпроводним підключенням до вимірювального об'єкту на основі уведення паралельно до обох вхідних клем від'ємного опору на основі підсилювача з від'ємним та додатним зворотними зв'язками, що дозволяє підвищити точність коригування впливу опору одного із струмових під'єднувальних дротів.

5. Аналіз результатів експериментальних досліджень макету калібратора напруги з автоматичним коригуванням адитивних зміщень показав дуже добру збіжність з теоретичними припущеннями. У режимі ручного керування нескориговане значення адитивної складової похибки в діапазоні каліброваних напруг до 1 В було меншим від одиниці молодшого розряду (1 мкВ) використаного для вимірюваних вихідних напруг калібратора прецизійного цифрового вольтметра.

6. Результати комп'ютерного моделювання структури калібратора напруги показали, що нескориговане значення адитивних зміщень не перевищило ± 3 мкВ, що добре збігається з результатами експериментальних досліджень. Експериментально встановлено, що нескориговане значення адитивних зміщень в діапазоні відтворюваних напруг до 1 В досягає мінімального значення ± 5 мкВ на частоті тактового генератора приблизно 1 кГц в частотній смузі зміни частот від 50 Гц до 5 кГц.

7. Результати комп'ютерного моделювання структури імітатора електричного опору показали, що нескориговане значення адитивних зміщень не перевищило ± 3 мкВ, що добре збігається з результатами теоретичних припущень.

8. За результатами комп'ютерного моделювання структури імітатора електричного опору можна зробити висновок про можливість зменшення впливу опорів струмових з'єднувальних опорів зі значенням порядку сотень Ом до значень менших від 0,001 Ом, що задовольняє вимоги до більшості його практичних використань.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Барило Г.І. Мікропроцесорна корекція значення електрорушійної сили насичених нормальних елементів / Г.І. Барило, О.В. Бойко, О.П. Чабан, Р.О. Матвійів, Н.І. Кус // Методи та прилади контролю якості. - 2012. - № 1. - С. 142-147.

2. Бойко В.О. Компенсація впливу опорів ліній зв'язку в двопровідних терморезистивних перетворювачах / В.О. Бойко, Р.О. Матвіїв, О.П. Чабан // *Методи та прилади контролю якості*. - 2015. - № 1. - С. 83-89.

3. Яцук В.О. Моделювання процесу автоматичного коригування похибок калібраторів напруги постійного струму / В.О. Яцук, Р.О. Матвіїв // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: Комп'ютерні системи та мережі : збірник наукових праць. – 2016. – № 857. – С. 119–125.

4. Матвіїв Р. Удосконалення структурних методів коригування адитивних похибок калібраторів напруги постійного струму / Р. Матвіїв // *Вимірювальна техніка та метрологія: міжвідомчий науково-технічний збірник / Міністерство освіти і науки України; відповідальний редактор Б.І. Стадник*. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. – Випуск 77. – С. 22–28.

5. Матвіїв Р. Аналіз частотних характеристик коригування адитивних зміщень у калібраторах напруги постійного струму / Матвіїв Роман, Яцук Василь, Микийчук Микола, Яцук Юрій // *Вимірювальна техніка та метрологія: міжвідомчий науково-технічний збірник / Міністерство освіти і науки України; відповідальний редактор Б.І. Стадник*. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. – Випуск 78. – С. 3–9.

6. Mykola Mykyuchuk, Yuriy Yatsuk, Orest Ivakhiv, Roman Matviiv. Voltage and Resistance Calibrators for Verification of Industrial Instrument Applications. – *Proceedings of Metrology Commission of Katowice branch of Polish Academy of Sciences. Series: Conferences No. 21. - XII Conference “Problems and Progress in Metrology’2016”, Szczyrk, 05 - 08 czerwca 2016 r.* – P. 114-117.

7. Матвіїв Р.О., *Можливості дистанційного калібрування кібер-фізичних систем з гальванічним розділенням вимірювальних каналів // Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2016», 1-5 лютого 2016 року: тези доповідей / Відп. за вип. Володарський Є.Т.* – Київ: Академія метрології України, 2016. – С. 77-78.

8. Р.О. Матвіїв., В.О. Яцук., *Вдосконалення калібраторів напруги постійного струму з коригуванням адитивних похибок // Всеукраїнська науково-практична конференція «Промислова автоматизація в Україні. Просвіта та підготовка кадрів», 24-25 листопада 2016 року: тези доповідей / Відп. за вип. М.М. Микийчук.* – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2016. – С. 59-60.

9. Матвіїв Р., Яцук В., *Експериментальне дослідження макету калібратора напруги з коригуванням адитивної складової похибки // III міжнародна науково-практична конференція пам'яті професора Петра Столярчука «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи», 11-12 травня 2017 року: тези доповідей / Відп. за вип. М.М. Микийчук.* – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. – С. 185-186.

10. Матвіїв Р.О., Яцук В.О., Здеб В.Б. *Активний імітатор опору з коригуванням похибок, зумовлених лініями зв'язку // Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2018», 13-18 лютого 2018 року: тези доповідей / Відп. за вип. Володарський Є.Т.* – Київ: Академія метрології України, 2018. – С. 43-44.

АНОТАЦІЯ

Матвій Р.О. Переносні калібратори для оперативного контролювання характеристик засобів вимірювань. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення. Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2018.

Дисертація присвячена вдосконаленню структур калібраторів напруги та імітаторів опору за допомогою коригування адитивних похибок. Проведено аналіз вимог нормативних документів до метрологічних характеристик калібраторів напруги та опору. Запропоновано в калібраторах напруги та опору застосовувати метод комутаційного інвертування для коригування адитивних похибок. Розроблено структуру калібратора напруги з коригуванням адитивних похибок. Вдосконалено структури калібратора напруги постійного струму за допомогою використання додаткового джерела зразкової напруги та елементів аналогової пам'яті, що дозволило зменшити вплив перехідних процесів. Проведено дослідження комп'ютерної моделі калібратора напруги постійного струму. Розроблено структуру імітатора опору постійного струму з коригуванням адитивних похибок. Запропоновано структуру калібратора напруги з широтно-імпульсним подільником напруги в якому для коригування похибок використаний метод комутаційного інвертування. Проведені комп'ютерні дослідження моделей імітатора опору та калібратора напруги з широтно-імпульсним подільником. Виготовлено експериментальний макет калібратора напруги постійного струму з коригуванням адитивних похибок. Проведено експериментальні дослідження макету калібратора напруги та вибрано оптимальну частоту тактового генератора для керування комутуючими елементами.

Ключові слова: калібратор напруги, імітатор опору, адитивна похибка, метод комутаційного інвертування, активний фільтр низької частоти, автоматичне коригування похибок.

АННОТАЦИЯ

Матвиив Р.О. Переносные калибраторы для оперативного контроля характеристик средств измерений. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.01.02 - стандартизация, сертификация и метрологическое обеспечение. Национальный университет «Львовська політехніка» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2018.

Диссертация посвящена усовершенствованию структур калибраторов напряжения и имитаторов сопротивления с помощью коррекции аддитивных составляющих погрешности. Проведен анализ требований нормативных документов к метрологическим характеристикам калибраторов напряжения и сопротивления. Предложено в калибраторах напряжения и сопротивления для коррекции аддитивных составляющих погрешности применять метод коммутационного инвертирования. Разработана структура калибратора напряжения с коррекцией аддитивных составляющих погрешности. Усовершенствована структура

калибратора напряжения постоянного тока путем использования дополнительного источника образцового напряжения и элементов аналоговой памяти, что позволило уменьшить влияние переходных процессов. Проведено исследование компьютерной модели калибратора напряжения постоянного тока. Разработана структура имитатора сопротивления постоянного тока с коррекцией аддитивных составляющих погрешности. Предложена структура калибратора напряжения с широтно-импульсным делителем напряжения, в котором для коррекции погрешностей использован метод коммутационного инвертирования. Проведены компьютерные исследования моделей имитатора сопротивления и калибратора напряжения с широтно-импульсным делителем. Изготовлен экспериментальный макет калибратора напряжения постоянного тока с коррекцией аддитивных составляющих погрешности. Проведены экспериментальные исследования макета калибратора напряжения и выбрана оптимальная частота тактового генератора для управления коммутирующими элементами.

Ключевые слова: калибратор напряжения, имитатор сопротивления, аддитивная составляющая погрешности, метод коммутационного инвертирования, активный фильтр низкой частоты, автоматическая коррекция погрешностей.

ANNOTATION

Matviiv R.O. Portable calibrators for operational control of measurement characteristics. - On the rights of manuscript.

The thesis for a scientific degree of the Candidate of Technical Sciences by specialty 05.01.02 – Standardization, Certification and Metrological Assurance. Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

The thesis is devoted to the improvement of voltage calibrators and resistance imitators structures by means of additive errors correction. The analysis of normative documents requirements for voltage and resistance calibrators metrological characteristics was carried out. It was proposed to use a switching inverting method for additive errors correction in voltage and resistance calibrators. The voltage calibrator structure with additive errors correction has been developed. The DC voltage calibrator structure has been improved by using an additional reference voltage source and analogue memory elements which have reduced the impact of transient processes. The research of DC voltage calibrator computer model has been conducted. The DC resistance imitator structure with additive errors correction has been developed. The voltage calibrator structure with a pulse voltage divider, in which the switching inverting method is used for the errors correction, has been proposed. The computer investigation of resistance and voltage calibrator simulator models with pulse width divider were carried out. An experimental model of the DC voltage calibrator with additive errors correction has been created. Experimental studies of the voltage calibrator model were conducted and the optimum frequency of the clock generator was selected for switching elements controlling.

Keywords: voltage calibrator, resistance imitator, additive error, switching inverter method, active low frequency filter, automatic error correction.