

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Олеськів Ольга Михайлівна



УДК 006: 004.4: 621.317

**МЕТРОЛОГІЧНА ПЕРЕВІРКА
ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ**

05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2016

Дисертацією є рукопис.

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

Наукові керівники: доктор технічних наук, професор
Микитин Ігор Петрович,
професор кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології» Національного університету «Львівська політехніка»

доктор технічних наук, професор
Томас **Фрьогліх** (*Thomas Fröhlich*),
завідувач кафедри вимірювальних процедур та сенсорної техніки Технічного університету міста Льменау (Німеччина)

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, с.н.с.
Яковлев Максим Юрійович,
заступник начальника Наукового центру Сухопутних військ з наукової роботи Академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного,
м. Львів

доктор технічних наук, професор
Середюк Орест Євгенович,
завідувач кафедри «Методи та прилади контролю якості і сертифікації продукції» Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу,
м. Івано-Франківськ

Захист відбудеться «30» березня 2017 р. о 12⁰⁰ 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 ознайомитись у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий «27» лютого 2017 р.

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



Т.З. Бубела

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. При проектуванні та розробленні сучасних засобів вимірювання (ЗВ) спостерігається тенденція до зменшення аналогової частини та спрощення цифрової частини за рахунок використання мікроконтролерів та мікропроцесорів, а основні обчислення, зокрема результату вимірювання, відбуваються із використанням програмного забезпечення (ПЗ). Тому «вага» ПЗ у сучасних ЗВ постійно зростає. Основні операції опрацювання результатів вимірювання, а саме усереднення, апроксимація, фільтрація, інтерполяція, перетворення Фур'є тощо, реалізуються переважно програмним способом. Некоректна програмна реалізація алгоритмів розрахунку та опрацювання результатів вимірювання, невідповідність ПЗ вимірювальній задачі, випадкова або навмисна зміна функцій ПЗ можуть призвести до невідповідності реальної похибки вимірювання задекларованій.

Під час метрологічної перевірки ПЗ ЗВ постає проблема вибору методів та процедур перевірки. Існуючі методи та процедури не завжди дозволяють коректно проводити метрологічну перевірку ПЗ ЗВ. Тому слід приділяти увагу процедурам, методам, засобам та методикам метрологічної перевірки ПЗ ЗВ, їх удосконаленню, виконувати аналіз їх переваг та недоліків.

Крім того, швидкими темпами розвивається новий напрямок – кібер-фізичні системи. Такі системи без втручання людини можуть змінювати своє ПЗ залежно від поставленого завдання. Тобто, буде застосовуватися так зване гнучке ПЗ. У такому випадку, після зміни ПЗ, необхідним є проведення його метрологічної перевірки.

З урахуванням тенденцій розвитку вимірювальної техніки актуальним є розроблення засад метрологічної перевірки ПЗ ЗВ, створення еталонних засобів та методів метрологічної перевірки ПЗ ЗВ.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась в рамках пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки в Україні, а також в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи «Вимірювання температури мікро- та наноструктурованих об'єктів методом комбінаційного розсіювання світла» (номер державної реєстрації 0115U000431) з 01.01.2015 р. до 31.12.2016 р.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення засад метрологічної перевірки ПЗ ЗВ.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати:

- 1) аналітичний огляд процедур та методів перевірки ПЗ ЗВ;
- 2) дослідження особливостей метрологічної перевірки ПЗ кібер-фізичних систем;
- 3) пошук шляхів покращення існуючих та розроблення нових методів метрологічної перевірки ПЗ ЗВ;
- 4) роботи з розроблення генератора зразкових цифрових послідовностей для метрологічної перевірки ПЗ ЗВ;
- 5) дослідження впливу похибок аналогової частини ЗВ на результати вимірювання, які обчислюються із використанням ПЗ ЗВ;
- 6) дослідження похибок та непевностей ПЗ ЗВ.

Об'єкт дослідження – метрологічна перевірка програмного забезпечення засобів вимірювань.

Предмет дослідження – генератор зразкових цифрових послідовностей для метрологічної перевірки програмного забезпечення засобів вимірювання.

Методи дослідження. Застосовані теоретичні та експериментальні методи досліджень, які ґрунтуються на загальній теорії вимірювання, теорії вимірювальних сигналів, методах імітаційного моделювання, що дає змогу перевірити адекватність та точність побудованих математичних моделей, теорії похибок та непевності результатів вимірювань, теорії статистичного аналізу, що дає змогу оцінити похибки та непевності результатів вимірювання, що обчислюються із використанням ПЗ.

Наукова новизна одержаних результатів:

- 1) розвинуто класифікацію структур ЗВ за критерієм типу використовуюваного ПЗ, що дозволяє оцінити можливість проведення метрологічної перевірки ПЗ ЗВ;
- 2) вперше запропоновано метод багаторівневої метрологічної перевірки ПЗ компонентів кібер-фізичних систем, що дає змогу покращити безпеку функціонування кібер-фізичних систем та полегшити процес метрологічної перевірки їх ПЗ;
- 3) вперше запропоновано метод метрологічної перевірки ПЗ ЗВ на основі методу «чорної скриньки» та методу генерування «еталонних» даних, який дозволяє уніфікувати процес метрологічної перевірки ПЗ ЗВ та суттєво зменшити його тривалість;
- 4) розроблено математичну модель генератора зразкових цифрових послідовностей із врахуванням параметрів вимірюваного сигналу та аналогової частини ЗВ, що дає змогу реалізувати генератор зразкових цифрових послідовностей практично в будь-якому ПЗ сучасних ЗВ, а також, як окремий засіб метрологічної перевірки.

Практичне значення одержаних результатів:

- 1) розроблено генератор зразкових цифрових послідовностей, який дозволяє формувати зразкові цифрові послідовності для метрологічної перевірки ПЗ ЗВ;
- 2) розроблено інтерфейс користувача генератора зразкових цифрових послідовностей, який дає змогу у зручній формі задавати параметри сигналів та аналогової частини ЗВ;
- 3) створений генератор зразкових цифрових послідовностей може використовуватися на етапі розроблення програмного забезпечення як засіб відлагоджування та перевірки ПЗ;
- 4) використання генератора зразкових цифрових послідовностей забезпечує отримання залежності похибки результатів обчислення програмним забезпеченням від параметрів вимірювального сигналу та параметрів аналогової частини ЗВ, що дозволяє одержати оцінку точності результату обчислення даним ПЗ;
- 5) генератор зразкових цифрових послідовностей можна інтегрувати у будь-який програмний пакет сучасних ЗВ (типу MATLAB, LabVIEW тощо) як окремий

блок, що призначений для відлагоджування та метрологічної перевірки програмного забезпечення.

Наукові та практичні результати виконаних досліджень використано в навчальному процесі, в лекційних курсах і лабораторних роботах, які проводяться для студентів кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології» Національного університету «Львівська політехніка» освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр», зокрема в дисципліні «Тестування інформаційно-вимірювальних систем».

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні та експериментальні результати, що викладені в дисертації, отримані автором самостійно. У наукових працях, опублікованих у співавторстві дисертантові належать: [1] – аналіз процедур та методів метрологічної перевірки ПЗ ЗВ та представлення їх переваг і недоліків; [2] – класифікація структур ЗВ відповідно до можливості доступу до ПЗ; [3, 4] – аналіз первинних перетворювачів та засобів вимірювання кібер-фізичних систем, запропоновано проведення багаторівневої метрологічної перевірки ПЗ кібер-фізичних систем.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях: III науково-технічна конференція «Обчислювальні методи і системи перетворення інформації» 25 - 26 вересня 2014, Львів; Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2015», 2 - 6 лютого 2015, м. Славське; II Міжнародна науково-практична конференція «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи», 28 - 30 травня 2015, Львів; Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2016», 1 - 5 лютого 2016, м. Славське.

Публікації. За тематикою дисертаційної роботи опубліковано 9 наукових праць, серед яких 4 статті у наукових журналах, що входять до переліку наукових фахових видань України, 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 147 сторінок друкованого тексту, у тому числі 107 сторінок основного тексту, містить 62 рисунки, 7 таблиць, список використаних джерел з 110 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** представлено загальну характеристику роботи, висвітлено актуальність проблеми, обґрунтовано мету та основні завдання досліджень, показано зв'язок роботи з науковими програмами та планами, визначено наукову новизну отриманих результатів та показано їх практичну цінність. Представлено об'єкт, предмет та методи досліджень, а також наведено дані про особистий внесок здобувача та апробацію результатів роботи.

У **першому розділі** розглянуто типи програмного забезпечення засобів вимірювання, процедури і методи перевірки та тестування програмного

забезпечення засобів вимірювання, проаналізовано можливість проведення метрологічної перевірки програмного забезпечення засобів вимірювання з різними структурами.

У роботі під *метрологічною перевіркою програмного забезпечення засобів вимірювання* розуміється сукупність методів та засобів, призначених для встановлення похибки результату вимірювання, який розраховується із використанням ПЗ, а також підтвердження придатності ПЗ для використання, у випадку, якщо виробник ПЗ надає інформацію про похибку розрахунків, що виконані даним програмним забезпеченням. Під *похибкою програмного забезпечення засобів вимірювання* розуміється кількісна оцінка впливу розрядності та частоти дискретизації АЦП, який використовується у ЗВ, на результат вимірювання, що обчислюється ПЗ. Під *генератором зразкових цифрових послідовностей* розуміється засіб (програма), що формує зразкові цифрові послідовності, які використовуються для метрологічної перевірки ПЗ ЗВ.

За можливістю доступу ПЗ поділяють на інтегроване та прикладне. Інтегроване ПЗ ЗВ перебуває у складі автономного приладу цільового призначення і доступ до нього переважно відсутній. Прикладне ПЗ ЗВ розташоване на жорстких носіях та працює під певною операційною системою з наявністю доступу до файлів програмного забезпечення. Аналіз типових структур ЗВ показав, що метрологічну перевірку ПЗ ЗВ можна виконати лише тоді, коли є доступ до програмного забезпечення (прикладне ПЗ). Для ЗВ, які мають інтегроване ПЗ, на даний час перевірку ПЗ провести неможливо. Для реалізації метрологічної перевірки ПЗ таких ЗВ необхідно забезпечити додатковий цифровий вхід, який дозволяє подавати цифрові тестові сигнали перевірки на ПЗ.

Розглядалась необхідність проведення метрологічної перевірки ПЗ ЗВ під час експлуатації. На підставі проведеного аналізу можна стверджувати, що метрологічна перевірка ПЗ ЗВ переважно потрібна лише на етапі проектування та розробки. Метрологічна перевірка ПЗ кібер-фізичних систем (КФС) є актуальною і під час експлуатації. Це пов'язано з тим, що у процесі роботи КФС може змінювати свою конфігурацію, що в свою чергу може призвести до використання іншого ПЗ. Тому після реконфігурації ПЗ необхідно виконувати його метрологічну перевірку.

Аналіз існуючих процедур та методів перевірки ПЗ ЗВ показав, що вони не надають оцінки значення похибки ПЗ, а також не забезпечують уніфікованого підходу до метрологічної перевірки ПЗ. Для реалізації метрологічної перевірки ПЗ ЗВ доцільним є поєднання двох методів: методу «чорної скриньки» та методу генерування «еталонних» даних, що дозволить уніфікувати та спростити метрологічну перевірку ПЗ ЗВ.

У другому розділі запропонований алгоритм метрологічної перевірки ПЗ ЗВ, розглянуті кібер-фізичні системи, як один з варіантів реалізації структури ЗВ, розроблені алгоритми метрологічної перевірки ПЗ кібер-фізичних систем на різних рівнях функціонування.

Для метрологічної перевірки ПЗ ЗВ формуються зразкові цифрові послідовності, які подаються на ПЗ ЗВ. Вони повинні враховувати параметри вимірювального сигналу та АЦП, який входить до складу ЗВ. Такий підхід

забезпечує детальнішу перевірку ПЗ у порівнянні зі стандартною метрологічною перевіркою ЗВ, оскільки аналоговими тестовими сигналами на вході ЗВ складно відтворити усі можливі варіанти вхідної величини для ПЗ. Крім того, у разі використання зразкових цифрових послідовностей можна суттєво скоротити тривалість метрологічної перевірки ПЗ ЗВ. Розроблено алгоритм метрологічної перевірки ПЗ ЗВ із використанням методу «чорної скриньки» та методу генерування «еталонних» даних (Рисунок 1).



Рисунок 1 - Алгоритм метрологічної перевірки програмного забезпечення засобів вимірювання

Процесом метрологічної перевірки ПЗ ЗВ переважно керує персональний комп'ютер. Зразкові цифрові послідовності подаються на ПЗ ЗВ. Вихідні дані ПЗ передаються на персональний комп'ютер, де порівнюються із очікуваними результатами. Проводиться обчислення похибок ПЗ і робиться висновок щодо придатності ПЗ ЗВ. Розглянутий алгоритм може бути застосований для перевірки ПЗ ЗВ як на етапі розроблення, так і під час експлуатації.

Проаналізовано кібер-фізичні системи, які, як правило, є складними системами і їх компоненти можуть перебувати на великій відстані одна від одної та з'єднані між собою із використанням глобальних мереж. Враховуючи це, розглянуто можливість виконання метрологічної перевірки ПЗ КФС.

Метрологічна перевірка ПЗ КФС є достатньо складною процедурою з урахуванням того, що КФС переважно складається зі значної кількості підсистем. Враховуючи таку специфіку КФС як «засобу вимірювання», запропоновано багаторівневу метрологічну перевірку її ПЗ. Метрологічна перевірка ПЗ КФС має відбуватися на всіх етапах функціонування, розпочинаючи з самоперевірки ПЗ інтелектуальних первинних перетворювачів та засобів вимірювання і закінчуючи загальною метрологічною перевіркою ПЗ кібер-фізичної системи. Метрологічна перевірка може бути ініційована основною підсистемою контролю або обслуговуючим персоналом, якщо виникли сумніви щодо коректності функціонування кібер-фізичної системи або настав час планової перевірки. Ієрархія ініціювання метрологічної перевірки ПЗ КФС є наступною: людина; основна підсистема контролю; рядові підсистеми; інтелектуальні первинні перетворювачі та засоби вимірювання.

У роботі запропоновані алгоритми багаторівневої метрологічної перевірки ПЗ КФС. Метрологічна перевірка ПЗ КФС може відбуватися на всіх рівнях: системи, підсистеми, інтелектуальних первинних перетворювачів або засобів вимірювання. На рівні системи ініціювання метрологічної перевірки ПЗ здійснює основна підсистема контролю. Якщо за результатами метрологічної перевірки програмного забезпечення системи значення похибок не перевищують допустимих значень, то система функціонує і далі в звичайному режимі до наступної перевірки. Якщо ж похибки ПЗ перевищують допустимі значення, то система повинна замінити непрацездатну частину, здійснити метрологічну перевірку ПЗ цієї частини та продовжити роботу у штатному режимі. Коли системі самотійно не вдасться відновити роботу, вона переходить у безпечний режим роботи, а відновленням роботи системи займається обслуговуючий персонал.

Розроблено також алгоритми метрологічної перевірки ПЗ КФС на рівні підсистеми та інтелектуальних первинних перетворювачів або засобів вимірювання. В ідеалі людський фактор усувається із процесу метрологічної перевірки. Людина бере участь у метрологічній перевірці програмного забезпечення кібер-фізичної системи лише тоді, коли виявлено збої в програмі, з якими система не може справитися самотійно.

Розроблені алгоритми метрологічної перевірки програмного забезпечення засобів вимірювання та програмного забезпечення кібер-фізичних систем на різних рівнях є достатньо подібними. Тому для них доцільним є використання зразкових цифрових послідовностей для метрологічної перевірки ПЗ. З урахуванням цього фактору, пропонується створити генератор зразкових цифрових послідовностей, який дозволяє реалізувати запропоновану метрологічну перевірку ПЗ.

У третьому розділі описано генератор зразкових цифрових послідовностей, який призначений для формування зразкових цифрових послідовностей, що використовуються для метрологічної перевірки ПЗ ЗВ. Крім того, генератор зразкових цифрових послідовностей може використовуватись для відлагоджування ПЗ ЗВ на етапі проектування та розроблення.

Реалізовано два режими роботи генератора зразкових цифрових послідовностей: метрологічна перевірка та відлагоджування програми. Якщо

генератор зразкових цифрових послідовностей використовується для метрологічної перевірки ПЗ, то при формуванні зразкових цифрових послідовностей враховуються параметри вимірюваного сигналу: форма сигналу; частота сигналу, амплітуда сигналу; фаза сигналу; та параметри АЦП: розрядність; частота дискретизації; діапазон вхідної напруги, а також тривалість вимірювання. У режимі відлагоджування ПЗ є можливість враховувати також похибки АЦП та аналогової частини засобу вимірювання. На рисунку 2 представлено алгоритм роботи генератора зразкових цифрових послідовностей.

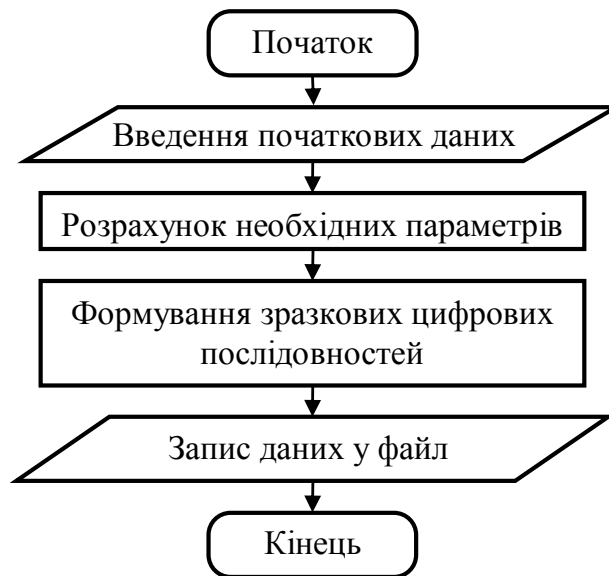


Рисунок 2 – Алгоритм роботи генератора зразкових цифрових послідовностей

Під час роботи генератора зразкових цифрових послідовностей в режимі метрологічної перевірки формується лише одна зразкова цифрова послідовність, яка у подальшому використовується для метрологічної перевірки ПЗ ЗВ.

Під час роботи генератора зразкових цифрових послідовностей в режимі відлагоджування програми можливим є формування n зразкових цифрових послідовностей із врахуванням похибок АЦП та аналогової частини ЗВ. Для кожної послідовності значення похибок змінюються випадковим чином у певному заданому діапазоні. Це дозволяє провести дослідження впливу похибок на результат вимірювання, розрахований із використанням ПЗ, методом Монте-Карло.

Блок «Введення початкових даних» (рисунок 2) реалізує введення основних параметрів АЦП та вимірювального сигналу, таких як: тактова частота АЦП f_{adc} , Гц; розрядність АЦП N_{adc} , біт.; час перетворення t , с; номінальна вхідна напруга АЦП U_{Nadc} , В; реальна вхідна напруга АЦП U_{Iadc} , В, що відповідає амплітуді сигналу A_s , кв; частота сигналу f_s , Гц; фаза сигналу φ_s , град.

У блоці «Розрахунок необхідних параметрів» розраховується загальна кількість даних зразкової цифрової послідовності:

$$n = f_{adc} \cdot t, \quad (1)$$

коефіцієнт вхідної напруги, який використовується для формування цифрового квантованого сигналу та для обмеження або масштабування сигналу за рівнем:

$$k_{U_{vx}} = U_{Iadc} / U_{Nadc}, \quad (2)$$

крок дискретизації:

$$h_d = 1 / f_{adc}, \quad (3)$$

амплітуда сигналу у квантах, враховуючи розрядність АЦП та рівень вхідної напруги:

$$A_s = k_{U_{vx}} \cdot (n_{kv} / 2 - 1), \quad (4)$$

де $n_{kv} = 2^{Nadc}$ - кількість квантованих рівнів за напругою.

У блоці «Формування зразкових цифрових послідовностей» відбувається формування зразкових цифрових послідовностей таких форм: синусоїдальної, типу меандр, трапецієподібної, трикутної, пилкоподібної. Враховуються також характеристики та похибки АЦП.

Формування зразкових цифрових послідовностей сигналу синусоїдальної форми відбувається в циклі за формулою:

$$Ys_i = A_s \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t_i + \phi_s), \quad (5)$$

для сигналу типу меандр:

$$Ym_i = \begin{cases} A_s, & \text{якщо } Ys_i \geq 0; \\ -A_s, & \text{якщо } Ys_i < 0, \end{cases} \quad (6)$$

для трапецієподібного сигналу:

$$Ytr_i = \begin{cases} A_s \cdot k_{tr}, & \text{якщо } Ys_i > A_s \cdot k_{tr}; \\ -A_s \cdot k_{tr}, & \text{якщо } Ys_i < -A_s \cdot k_{tr}; \\ Ys_i, & \text{якщо } -A_s \cdot k_{tr} \leq Ys_i \leq A_s \cdot k_{tr}, \end{cases}, \quad (7)$$

де $i = 0 \dots n - 1$; $t_i = h_d \cdot i$, $k_{tr} = 0,1 \dots 0,4$ - коефіцієнт трапеції, $A_s \cdot k_{tr}$ - рівень обмеження. Приведення зразкових цифрових послідовностей сигналу трапецієподібної форми до граничних значень АЦП відбувається за формулою:

$$Ytr_i = Ytr_i / k_{tr}. \quad (8)$$

Для зразкових цифрових послідовностей сигналів трикутної та пилкоподібної форми розроблено спеціальний алгоритм, який також може використовуватися для формування сигналів будь-якої форми.

Для квантування до ближчого, більшого та меншого рівня використовується функція $floor()$. Якщо рівень вхідної напруги сигналу перевищує максимальне значення діапазону вхідних значень АЦП, то у генераторі зразкових цифрових послідовностей можливі два способи формування сигналу: обмеження сигналу за рівнем; масштабування сигналу.

Обмеження сигналу за рівнем відбувається за формулами:

$$Y_i = \begin{cases} Y_{\max}, & \text{якщо } Y_i > Y_{\max}; \\ Y_{\min}, & \text{якщо } Y_i < Y_{\min}, \end{cases} \quad (9)$$

де $Y_{\max} = n_{kv} / 2 - 1$, $Y_{\min} = -(n_{kv} / 2 - 1)$.

Масштабування сигналу реалізується за наступною формулою:

$$Y_i = Y_i / k_{U_{vx}}. \quad (10)$$

Основними нормованими складовими похибки АЦП є адитивна, мультиплікативна, нелінійна та випадкова складові, які переважно задаються у квантах. При реалізації генератора зразкових цифрових послідовностей використано такі параметри: k_{add} – максимальне значення адитивної похибки; k_{mult} – максимальне значення мультиплікативної похибки; k_{nl} – максимальне значення нелінійної похибки; k_{noise} – максимальне значення амплітуди випадкової похибки.

Адитивна складова похибки є сталою величиною:

$$\Delta add_i = k_{add}. \quad (11)$$

Мультиплікативна складова похибки формується за лінійною залежністю із координатами (Y_{min} , - k_{mult} ; Y_{max} , k_{mult}):

$$\Delta mult_i = (2 \cdot k_{mult} \cdot (Y_i - Y_{min})) / (Y_{max} - Y_{min}) - k_{mult}. \quad (12)$$

Нелінійна складова похибки є квадратичною функцією і її можна описати рівнянням:

$$\Delta nl_i = k_{nl} \cdot (1 - Y_i^2 / Y_{max}^2). \quad (13)$$

Випадкова складова похибки є послідовністю випадкових чисел з середнім значенням близьким до нуля та з рівномірним законом розподілу:

$$\Delta noise_i = 2 \cdot k_{noise} \cdot (rand() / 32767 - 0.5), \quad (14)$$

де $rand()$ – функція, що генерує випадкові числа у діапазоні від 0 до 32767.

Для формування сигналу врахуванням усіх складових похибки достатньо додати значення цих похибок до значення сигналу:

$$Y_i = Y_i + \Delta add_i + \Delta mult_i + \Delta nl_i + \Delta noise_i. \quad (15)$$

Із використанням математичної моделі, описаної вище, розроблено алгоритм та інтерфейс користувача генератора зразкових цифрових послідовностей.

Інтерфейс користувача генератора зразкових цифрових послідовностей складається із п'яти вікон: «Режим роботи»; «Формування зразкових цифрових послідовностей»; «Параметри АЦП»; «Параметри сигналу»; «Обмеження / масштабування сигналу». Розроблений інтерфейс користувача дозволяє у зручній формі задавати параметри сигналів та АЦП для формування зразкових цифрових послідовностей.

Генератор зразкових цифрових послідовностей можна інтегрувати у будь-який програмний пакет сучасних засобів вимірювання (типу MATLAB, LabVIEW тощо) як окремий блок для метрологічної перевірки ПЗ, а також як засіб відлагоджування ПЗ при створенні ЗВ. У дисертації алгоритм роботи генератора зразкових цифрових послідовностей реалізований у програмних середовищах Builder C++, MATLAB і Mathcad.

У четвертому розділі з використанням розробленого генератора зразкових цифрових послідовностей здійснено метрологічну перевірку програмного забезпечення на прикладі функції перетворення Фур'є (функції $fft()$). Ця функція вибрана як предмет дослідження тому, що вона є достатньо складною в алгоритмічному та математичному плані, має багато варіантів реалізації у різних програмних продуктах. Дослідження проведено у програмних пакетах MATLAB та

Mathcad. Обчислювалася похибка визначення гармонік функцією перетворення Фур'є (далі похибка функції `fft()`).

Дослідження похибок ПЗ проводилося для двох типів даних: типу `int`; типу `double`. `Double` – тип даних з плаваючою комою, який використовують для вирішення завдань з високою точністю обчислень. `Int` – тип даних, що представляє ціле число. Тип `double` у порівнянні з типом `int` може вважатися зразковим. Дані типу `int` відповідають вихідним даним АЦП.

Із використанням розробленого генератора зразкових цифрових послідовностей запропоновано засіб метрологічної перевірки ПЗ ЗВ (рисунок 3), який складається з двох блоків: генератора зразкових цифрових послідовностей та блоку оцінювання точності. Між цими блоками розміщується код програми (компонента, функція, тощо), що перевіряється.

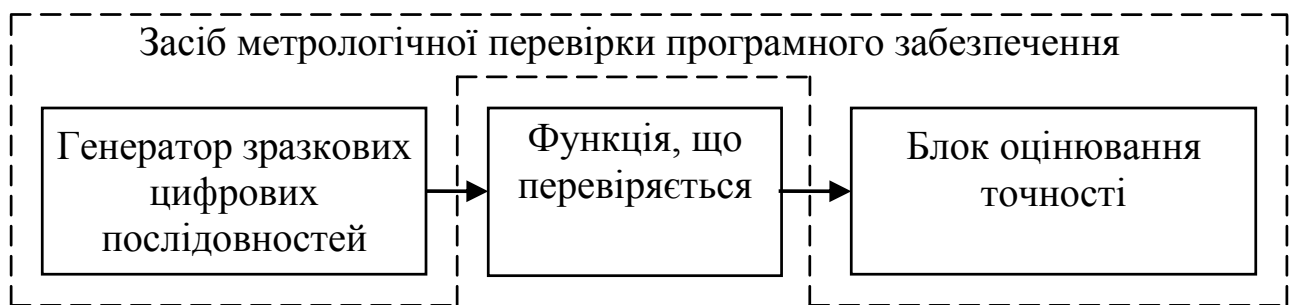


Рисунок 3 – Засіб метрологічної перевірки програмного забезпечення засобів вимірювання

Метрологічна перевірка ПЗ на прикладі функції перетворення Фур'є відбувається наступним чином:

- 1) формується одна або декілька зразкових цифрових послідовностей;
- 2) виконується функція `fft()` із використанням сформованих даних;
- 3) відбувається оцінка похибок функції `fft()`.

У випадку, якщо виробник програмного забезпечення надасть інформацію про похибку функції `fft()`, то можна зробити висновок щодо придатності даної функції до використання. Якщо такої інформації немає, то можлива лише оцінка похибки результату вимірювання, який розраховується із використанням програмного забезпечення.

Для даних типу `double` оцінка точності функції `fft()` проводилася із використанням теорії похибок. Проводилося дослідження похибок функції `fft()` залежно від: частоти сигналу f_s ; фази сигналу φ_s ; частоти дискретизації АЦП f_{adc} . Дослідження проводилося за таких параметрів: $f_{adc} = 100 \text{ кГц}$; $f_s = 10 \text{ Гц}$ $t = 1 \text{ с}$; $A_s = 10 \text{ В}$; $\varphi_s = 0^\circ$; сигнал синусоїдальної форми. Крім того, один з вищеописаних параметрів може змінюватися у певному діапазоні.

На рисунку 4 представлена залежність відносної похибки функції `fft()` від частоти сигналу f_s , яка змінювалася від 1 до 4999 Гц.

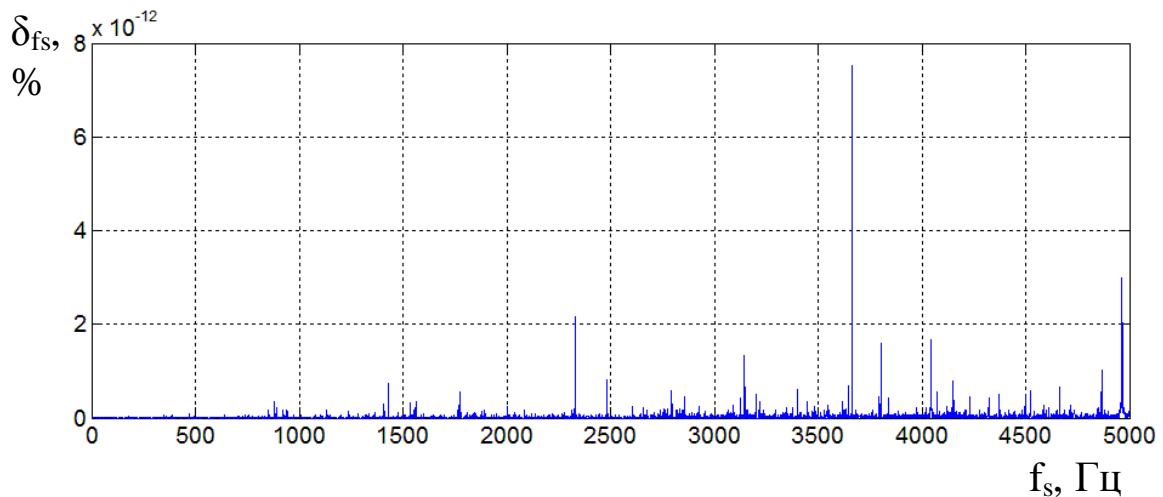


Рисунок 4 – Залежність відносної похибки функції $\text{fft}()$ від частоти сигналу для даних типу `double`

Для досліджуваного діапазону частот відносна похибка функції перетворення Фур'є не перевищує $8 \cdot 10^{-12}\%$. Для низьких значень частоти відносна похибка не перевищує $2 \cdot 10^{-14}\%$. Зі зростанням частоти сигналу відносна похибка функції $\text{fft}()$ зростає.

На рисунку 5 представлена залежність відносної похибки функції $\text{fft}()$ від зміни фази сигналу від 0 до 360° .

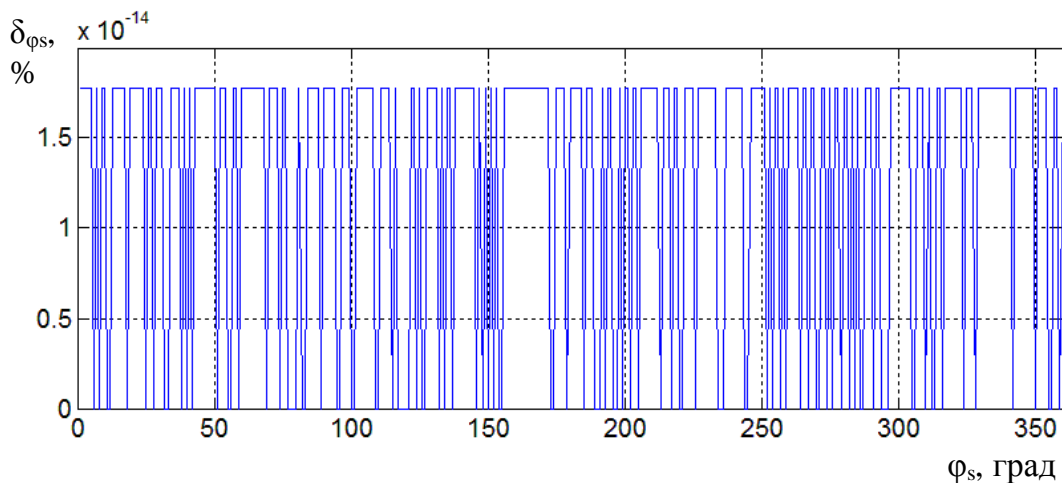


Рисунок 5 – Залежність відносної похибки функції $\text{fft}()$ від фази сигналу для даних типу `double`

Відносна похибка функції перетворення Фур'є від зміни фази сигналу не перевищує $2 \cdot 10^{-14}\%$. За зростання частоти сигналу до $\frac{1}{2}$ частоти дискретизації АЦП відносна фазова похибка функції перетворення Фур'є зростає на 4 порядки.

На рисунку 6 представлена залежність відносної похибки функції $\text{fft}()$ для зміни частоти дискретизації АЦП від 100 Гц до 100 кГц.

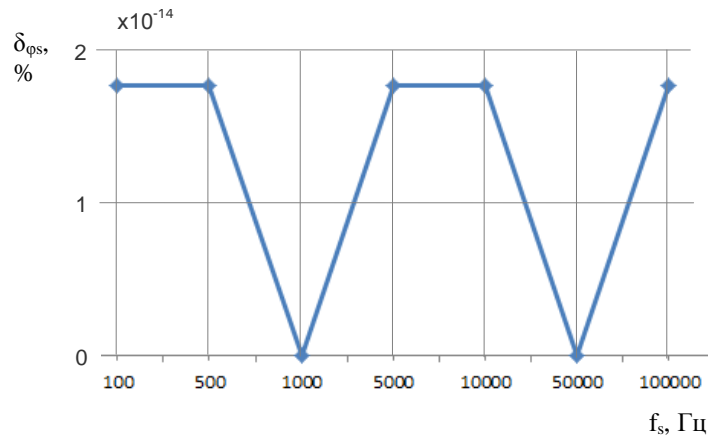


Рисунок 6 – Залежність відносної похибки функції $\text{fft}()$ від частоти дискретизації АЦП для даних типу `double`

Відносна похибка функції перетворення Фур'є за зміни частоти дискретизації АЦП не перевищує $2 \cdot 10^{-14}\%$. За частоти сигналу 10 Гц зміна частоти дискретизації АЦП від 100 Гц до 100 кГц не впливає на значення відносної похибки функції $\text{fft}()$.

Під час дослідження похибок функції $\text{fft}()$ для даних типу `int` при формуванні зразкових цифрових послідовностей враховувалась розрядність АЦП. Оцінка точності функції $\text{fft}()$ проводилася із використанням теорії похибок. Проводилося дослідження похибок функції $\text{fft}()$ від: частоти сигналу f_s ; фази сигналу φ_s ; частоти дискретизації АЦП f_{adc} ; розрядності АЦП N_{adc} ; рівня сигналу U_{i_adc} ; типу квантування; форми сигналу. Дослідження проводилося для таких параметрів: $N_{adc} = 16 \text{ біт}$; $f_{adc} = 100 \text{ кГц}$; $f_s = 10 \text{ Гц}$; $t = 1 \text{ с}$; $\varphi_s = 0^\circ$; $U_{n_adc} = 10 \text{ В}$; $U_{i_adc} = 10 \text{ В}$; сигнал синусоїдальної форми, квантування до ближчого рівня.

На рисунку 7 представлена залежність відносної похибки функції $\text{fft}()$ для зміни частоти сигналу f_s від 1 до 4999 Гц.

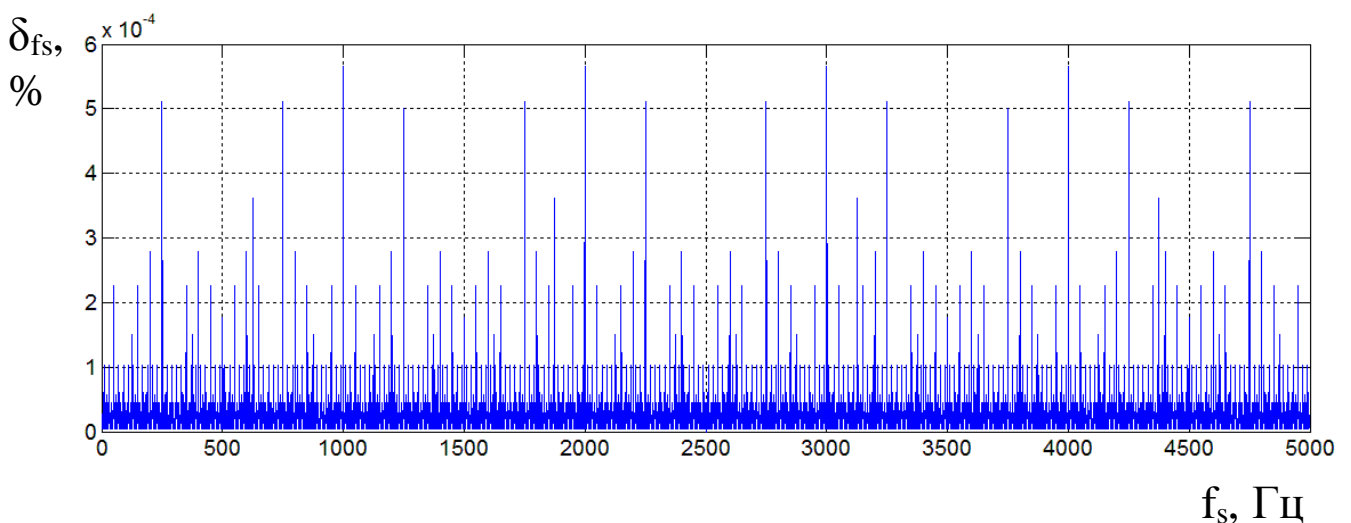


Рисунок 7 – Залежність відносної похибки функції $\text{fft}()$ від частоти сигналу для даних типу `int`

Максимальна відносна похибка функції $\text{fft}()$ не перевищує $6 \cdot 10^{-4} \%$. Отже, перехід від типу `double` до типу `int` з врахуванням розрядності АЦП призводить до суттєвого збільшення похибки функції $\text{fft}()$. У разі використання зразкових цифрових послідовностей типу `double` максимальна відносна похибка δf_{smax} функції $\text{fft}()$ становить $7,5 \cdot 10^{-12} \%$ (рисунок 4), а для квантованого сигналу ($N_{adc} = 16 \text{ біт}$) – $5,7 \cdot 10^{-4} \%$ (рисунок 7). Таким чином квантування сигналу за рівнем збільшило похибку функції $\text{fft}()$ на 8 порядків.

Досліджено залежність похибки функції $\text{fft}()$ для зміни фази сигналу від 0 до 360° (рисунок 8). Максимальна відносна похибка функції $\text{fft}()$ від зміни фази сигналу φ_s для даних типу `double` $\delta \varphi_{max}$ становить $1,8 \cdot 10^{-14} \%$ (рисунок 5), а для квантованого сигналу ($N_{adc} = 16 \text{ біт}$) – $1,8 \cdot 10^{-4} \%$ (рисунок 8). Отже похибка $\delta \varphi$ функції $\text{fft}()$ зростає на 10 порядків.

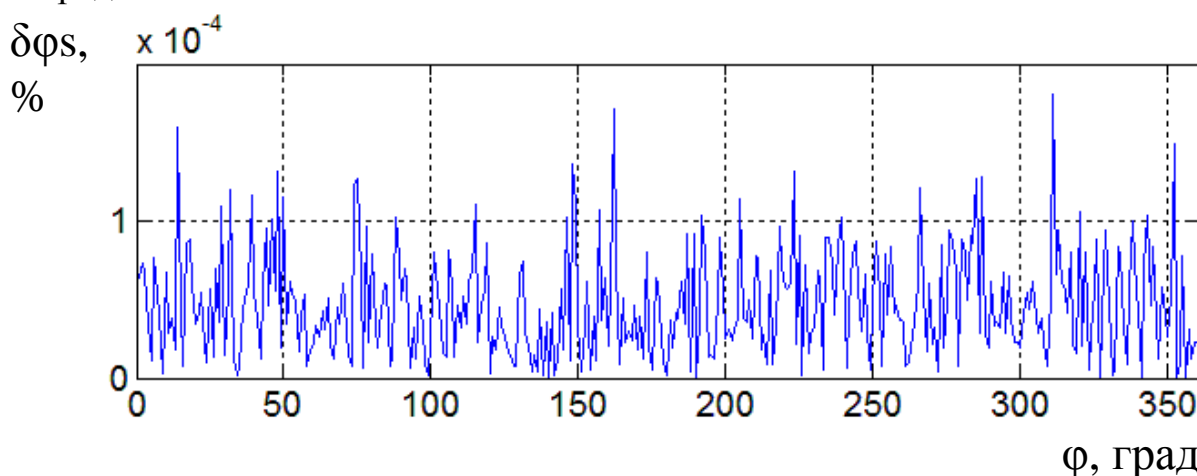


Рисунок 8 – Залежність відносної похибки функції $\text{fft}()$ від фази сигналу для даних типу `int`

На рисунку 9 представлена залежність відносної похибки функції $\text{fft}()$ для зміни частоти дискретизації АЦП від 100 Гц до 100 кГц .

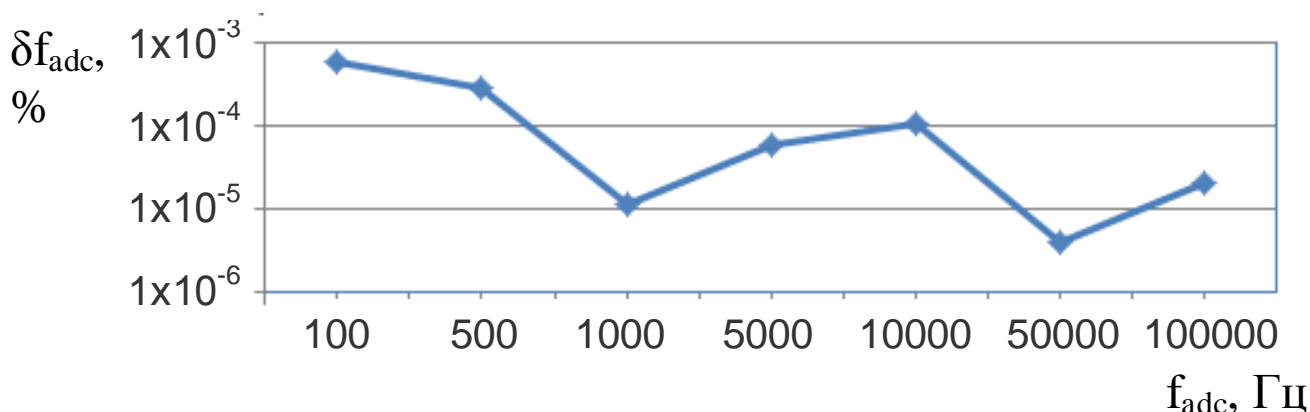


Рисунок 9 – Залежність відносної похибки функції $\text{fft}()$ від частоти дискретизації АЦП для даних типу `int`

При використанні зразкових цифрових послідовностей типу `double` максимальна відносна похибка від зміни частоти дискретизації АЦП $\delta f_{adc max}$ функції

fft() становить $1,8 \cdot 10^{-14}\%$ (рисунок 6), а для квантованого сигналу ($N_{adc} = 16 \text{ біт}$) – $5,7 \cdot 10^{-4}\%$ (рисунок 9). Таким чином похибка δf_{adc} функції fft() зростає на 9 порядків.

Проведено дослідження залежності похибки функції fft() від розрядності АЦП. Розрядність АЦП N_{adc} змінювалася від 8 до 24 біт. Зі збільшенням розрядності АЦП спостерігається зменшення відносної похибки функції перетворення Фур'є δN_{adc} . Для $N_{adc}=24$ біт відносна похибка функції fft() $\delta N_{adc} = 9,79 \cdot 10^{-8}\%$; для $N_{adc}=16$ біт – $\delta N_{adc} = 2,01 \cdot 10^{-5}\%$; для $N_{adc}=8$ біт – $\delta N_{adc} = 7,98 \cdot 10^{-3}\%$.

При дослідженні залежності похибки функції fft() від рівня сигналу, який змінювався від 1 до 10 В, із зменшенням рівня сигналу спостерігається зростання похибки функції fft().

Проведено дослідження залежності похибки функції fft() від типу квантування: до більшого, меншого та ближчого рівня. Похибка функції fft() від типу квантування немає однозначної функціональної залежності. Не завжди оптимальним є квантування до ближчого рівня. У деяких випадках кращим є квантування до більшого або меншого рівня.

У разі використання генератора зразкових цифрових послідовностей у режимі відлагоджування програмного забезпечення можуть використовуватися як попередньо описані можливості генератора, так і додаткові, а саме формування зразкових цифрових послідовностей із врахуванням похибок АЦП, а також аналогової частини ЗВ. Для аналізу результатів, отриманих під час відлагоджування ПЗ, можна використовувати як підхід похибок, так і підхід непевностей. Нижче представлені результати досліджень похибки функції fft() із врахуванням адитивної, мультиплікативної, нелінійної, випадкової та сумарної похибок АЦП. Зразкові цифрові послідовності моделювалися із використанням розробленого генератора.

На рисунку 10 подані результати дослідження залежності відносної похибки функції fft() від частоти сигналу та похибок АЦП.

Дослідження проводилися за таких параметрів: $f_{adc} = 10000 \text{ Гц}$; $t = 1 \text{ с}$; $\varphi_s = 0^\circ$; $N_{adc} = 16 \text{ біт}$; $U_{n_adc} = 10 \text{ В}$; $U_{i_adc} = 9,5 \text{ В}$; квантування до ближчого рівня; значення адитивної, мультиплікативної, нелінійної, випадкової похибок АЦП 0,03 % (абсолютна похибка 10 квантів).

Формувався сигнал синусоїдальної форми із врахуванням похибок АЦП. Частота сигналу змінювалася від 1 до 4999 Гц. Проводилось перетворення Фур'є та обчислювалася похибка функції fft() за формулою:

$$\delta fft_i = \frac{A_i - A_s}{A_i} \cdot 100\% , \quad (16)$$

де A_i – амплітуда i -тої гармоніки спектру; A_s – амплітуда сигналу.

Проведені дослідження показали, що найбільшу похибку функції fft() отримано для мультиплікативної похибки АЦП. У порівнянні з похибкою функції fft(), що спричинена лише квантуванням сигналу (рисунок 5), максимальна похибка $\delta fft_{\text{макс}}$ з врахуванням мультиплікативної складової є на два порядки більшою; а для всіх інших складових – на один порядок. Тому подальші дослідження проводилися лише для мультиплікативної складової похибки АЦП.

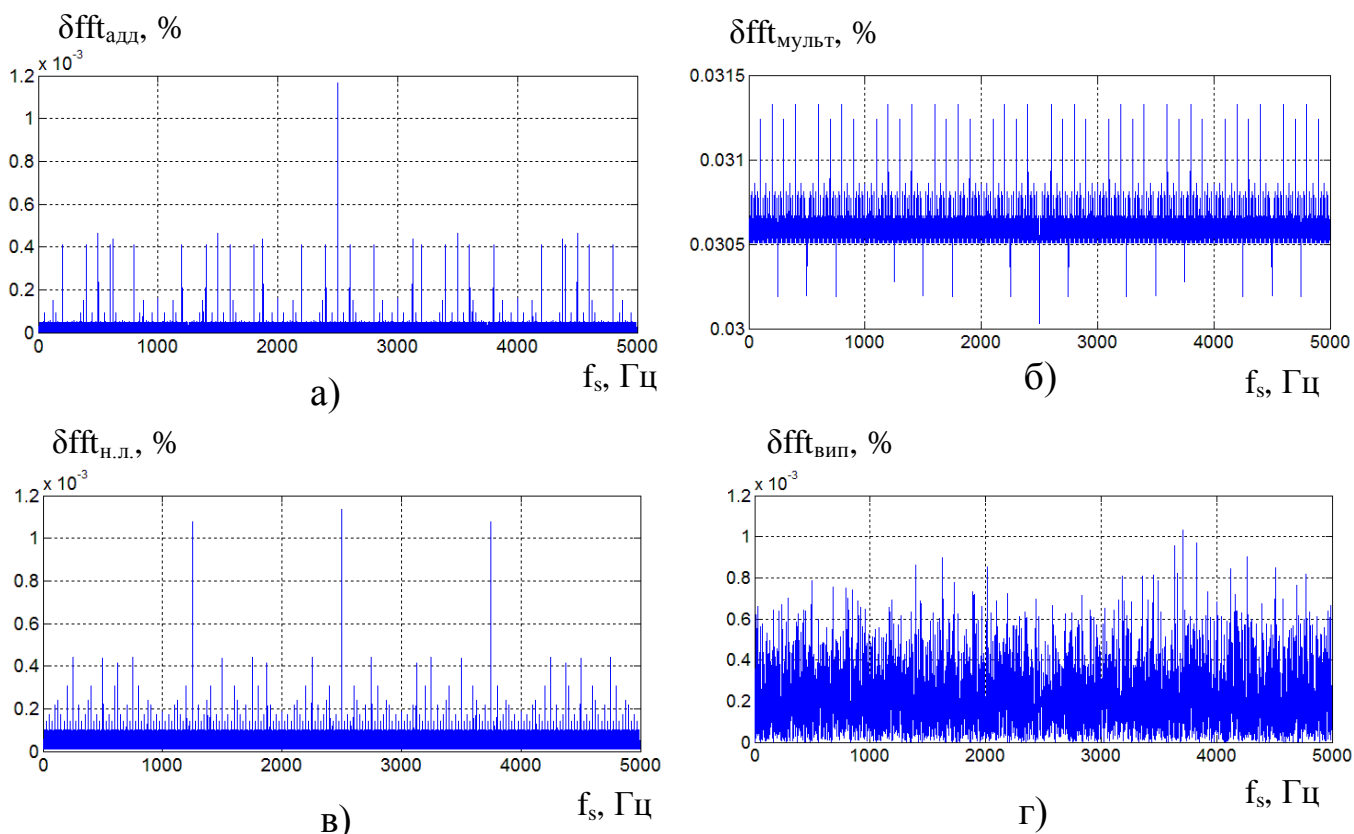


Рисунок 10 – Залежність відносної похибки функції $\text{fft}()$ від частоти сигналу та похибок АЦП: а) адитивної; б) мультиплікативної; в) нелінійної; г) випадкової

Проведено дослідження залежності похибки функції $\text{fft}()$ від мультиплікативної похибки АЦП при зміні розрядності АЦП. Розрядність АЦП N_{adc} змінювалася від 8 до 24 біт, значення мультиплікативної похибки становили 0,003, 0,03, та 0,3%. Із зменшенням розрядності АЦП похибка функції $\text{fft}()$ зростає. Так, наприклад для $\delta_{\text{мульти}} = 0,003\%$ для $N_{adc}=24$ біт відносна похибка функції $\text{fft}()$ $\delta_{\text{fft}} = 2,97 \cdot 10^{-3}\%$; для $N_{adc}=16$ біт – $\delta_{\text{fft}} = 2,99 \cdot 10^{-3}\%$; для $N_{adc}=8$ біт – $\delta_{\text{fft}} = 1,52 \cdot 10^{-2}\%$. Для мультиплікативної похибки АЦП $\delta_{\text{мульти}}=0,3\%$ і більше похибка функції $\text{fft}()$ практично не змінює свого значення. Похибка квантування у цьому випадку практично не впливає похибку функції $\text{fft}()$, а домінуючим є вплив мультиплікативної похибки АЦП.

Проведено дослідження залежності похибки функції $\text{fft}()$ від мультиплікативної похибки АЦП при зміні фази сигналу. Фаза сигналу φ_s змінюється від 0 до 360°, значення мультиплікативної похибки 0,03%. Для значення мультиплікативної похибки 0,03%, у порівнянні із результатами досліджень, де враховувалося лише квантування сигналу, похибка функції $\text{fft}()$ зростає на 2 порядки.

Проведено дослідження залежності похибки функції $\text{fft}()$ від мультиплікативної похибки АЦП при зміні частоти дискретизації АЦП. Частота дискретизації АЦП f_{adc} змінювалася від 100 Гц до 100 кГц, значення мультиплікативної похибки становили 0,003, 0,03, та 0,3%. Зі зменшенням частоти дискретизації АЦП похибка функції $\text{fft}()$ зростає. Для мультиплікативної похибки

АЦП $\delta_{\text{мульт}}=0,03\%$ і більше похибка функції $\text{fft}()$ практично не змінює свого значення. Для значень мультиплікативної похибки 0,003, 0,03, та 0,3%, у порівнянні із результатами досліджень, де враховувалося лише квантування сигналу, похибка функції $\text{fft}()$ зростає на 1 - 3 порядки.

Проведено оцінку непевності результату обчислень функції $\text{fft}()$ для сигналу синусоїдальної форми. Розраховувалася розширена непевність функції $\text{fft}()$ для довірчої ймовірності $P = 0,99$ (коефіцієнт Стюдента $t_{st} = 2,785$). Проведені дослідження показали, що відносна розширена непевність результату обчислення гармонік функцією $\text{fft}()$ для сумарної похибки АЦП практично дорівнює відносній розширеній непевності функції $\text{fft}()$ для мультиплікативної похибки АЦП.

Проведено дослідження непевностей функції перетворення Фур'є програмного пакету Mathcad. У програмному пакеті Mathcad проведено дослідження залежності непевності функції $\text{fft}()$ від похибок АЦП. За результатами досліджень, непевності функції перетворення Фур'є для програмних пакетів Mathcad та MATLAB є практично однаковими.

Проведені дослідження показали, що на похибку програмного забезпечення засобів вимірювання суттєвий вплив має дискретизація сигналу.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено нове розв'язання актуального науково-технічного завдання, яке полягає у розробленні генератора зразкових цифрових послідовностей для метрологічної перевірки програмного забезпечення засобів вимірювання, а саме:

1. Розроблено алгоритми метрологічної перевірки програмного забезпечення засобів вимірювання та кібер-фізичних систем.
2. Запропоновано багаторівневу метрологічну перевірку програмного забезпечення компонентів кібер-фізичних систем, що дозволяє покращити безпеку функціонування кібер-фізичних систем та полегшити процес метрологічної перевірки їх програмного забезпечення.
3. Розроблено генератор зразкових цифрових послідовностей, зокрема його математичну модель та алгоритм роботи, що дозволяє формувати зразкові цифрові послідовності з врахуванням параметрів вимірюваного сигналу та параметрів АЦП.
4. Генератор зразкових цифрових послідовностей можна інтегрувати у будь-який програмний пакет сучасних засобів вимірювання (типу MATLAB, LabVIEW тощо) як окремий блок для метрологічної перевірки програмного забезпечення, а також як засіб відлагоджування програмного забезпечення при розробленні засобу вимірювання.
5. Із використанням розробленого генератора зразкових цифрових послідовностей проведено метрологічну перевірку функції перетворення Фур'є програмних пакетів MATLAB і Mathcad. За результатами метрологічної перевірки функції перетворення Фур'є з використанням даних типу double похибка не перевищує $10^{-10}\%$.

6. При використанні зразкових цифрових послідовностей із урахуванням квантування сигналу похибка функції перетворення Фур'є суттєво зростає та для 16-розрядного АЦП не перевищує $6 \cdot 10^{-4}\%$.
7. При використанні зразкових цифрових послідовностей із урахуванням квантування сигналу та сумарної похибки АЦП від 0,003% до 0,3%, похибка функції перетворення Фур'є для 16-розрядного АЦП не перевищує 0,0033% та 0,33%.
8. Проведені дослідження показали, що на похибку програмного забезпечення засобів вимірювання суттєвий вплив має дискретизація сигналу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Олеськів О.М. Аналітичний огляд процедур та методів метрологічної перевірки програмного забезпечення засобів вимірювання / О.М. Олеськів, І.П. Микитин, І.Я. Кунець // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2014. – №75. – С. 19-23.
2. Олеськів О. Метрологічна перевірка програмного забезпечення засобів вимірювання з різними структурами / О. Олеськів, І. Микитин // Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2015. – № 826. – С. 325-330.
3. Олеськів О. М. Особливості метрологічної перевірки компонентів кібер-фізичних систем / О.М. Олеськів, І.П. Микитин // Науковий вісник НЛТУ України. – 2016. – Вип. 26.5. – С. 340-344.
4. Oleskiv O. Metrological verification of cyber-physical systems / O. Oleskiv, I. Mykytyn // Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Elektrotechnika. – 2015. – №34. – P. 87-92.
5. Олеськів О.М. Багаторівнева метрологічна перевірка кібер-фізичних систем. / О.М. Олеськів // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2015. – №76. – С. 117-124.
6. Олеськів О. М. Процедури та методи метрологічної перевірки програмного забезпечення засобів вимірювання / О. М. Олеськів, І. П. Микитин // III науково-технічна конференція «Обчислювальні методи і системи перетворення інформації»: Тези доповідей. – Львів, 25-26 вересня 2014 р. – С. 149-152.
7. Олеськів О. М. Особливості метрологічної перевірки програмного забезпечення засобів вимірювання з різними структурами / О. М. Олеськів, І. П. Микитин, Т. Фрєогліх // Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2015»: – Тези доповідей. – Славське, 2-6 лютого 2015 р.– С. 83-85.
8. Олеськів О. М. Проблематика та перспективи метрологічної перевірки кібер-фізичних систем / О. М. Олеськів, І. П. Микитин // II Міжнародна науково-практична конференція «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи»: Тези доповідей. – Львів, 28-30 травня 2015 р. – С. 211.
9. Олеськів О. М. Структури кібер-фізичних систем та алгоритми метрологічної перевірки їх програмного забезпечення / І.П. Микитин, О. М. Олеськів //Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у

царині метрології «Technical Using of Measurement – 2016»: – Тези доповідей. – Славське, 1 - 5 лютого 2016 р.– С. 56-59.

АНОТАЦІЯ

Олеськів О. М. Метрологічна перевірка програмного забезпечення засобів вимірювання. – 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, 2016.

Дисертація присвячена розробленню генератора зразкових цифрових послідовностей для метрологічної перевірки програмного забезпечення засобів вимірювання. Розвинуто класифікацію структур засобів вимірювання за критерієм можливості доступу до програмного забезпечення засобів вимірювання. Запропоновано метод багаторівневої метрологічної перевірки програмного забезпечення компонентів кібер-фізичних систем, що дозволяє покращити безпеку функціонування кібер-фізичних систем та полегшить процес метрологічної перевірки їх програмного забезпечення. Розроблено алгоритми метрологічної перевірки програмного забезпечення засобів вимірювання та кібер-фізичних систем. Запропоновано метод метрологічної перевірки програмного забезпечення засобів вимірювання на основі методу «чорної скриньки» та методу генерування «еталонних» даних із врахуванням параметрів аналогової частини засобів вимірювання, що дозволить спростити та розвинути процес метрологічної перевірки програмного забезпечення засобів вимірювання. Розроблено генератор зразкових цифрових послідовностей, який дозволяє уніфікувати процес метрологічної перевірки програмного забезпечення засобів вимірювання. Отримано залежності похибки та непевності результатів обчислення програмним забезпеченням від параметрів вимірювального сигналу та параметрів АЦП на прикладі функції перетворення Фур'є.

Ключові слова: метрологічна перевірка, програмне забезпечення, засіб вимірювання, кібер-фізична система, алгоритм.

АННОТАЦИЯ

Олеськив О. М. Метрологическая поверка программного обеспечения 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 «Львівська політехніка», Министерства образования и науки Украины, Львов, 2016.

Диссертация посвящена разработке генератора образцовых цифровых последовательностей для метрологической поверки программного обеспечения средств измерений. Развито классификацию структур средств измерений по критерию возможности доступа к программному обеспечению. Метрологическую поверку программного обеспечения средств измерений можно провести только в случае, когда есть доступ к программному обеспечению (прикладное программное обеспечение). Для средств измерений, которые используют интегрированное программное обеспечение, поверку программного обеспечения провести невозможно. Для реализации метрологической поверки программного обеспечения таких средств измерений необходимо обеспечить дополнительный цифровой вход, который позволит подавать цифровые тестовые сигналы непосредственно на программное обеспечение.

Рассмотрены процедуры и методы поверки программного обеспечения средств измерений. Ни одна из рассмотренных процедур поверки программного обеспечения не в достаточной мере регламентирует методику метрологической поверки программного обеспечения средств измерений. Рассмотренные методы не обеспечивают унифицированного подхода к метрологической поверки программного обеспечения. Для реализации метрологической поверки программного обеспечения средств измерений предложено использование двух методов: «чёрного ящика» и генерирования «эталонных» данных.

Предложен метод многоуровневой метрологической поверки программного обеспечения кибер-физических систем. Разработаны алгоритмы метрологической поверки программного обеспечения средств измерений и кибер-физических систем. Разработан генератор образцовых цифровых последовательностей, который позволяет унифицировать процесс метрологической поверки программного обеспечения средств измерений. Генератор образцовых цифровых последовательностей позволяет формировать образцовые цифровые последовательности с учетом параметров измерительного сигнала и параметров аналоговой части средств измерений. Генератор образцовых цифровых последовательностей можно интегрировать в любой программный пакет современных средств измерений (типа MATLAB, LabVIEW и т.д.) как отдельный блок для метрологической поверки программного обеспечения, а также как средство отладки программного обеспечения при разработке средств измерений.

Проведено метрологическую поверку функции преобразования Фурье программных пакетов MATLAB и Mathcad. Получены зависимости погрешности и неопределенности результатов вычисления программным обеспечением от параметров измерительного сигнала и параметров АЦП на примере функции

преобразования Фурье. Проведенные исследования показали, что на погрешность программного обеспечения средств измерений существенно влияет дискретизация сигнала, а также погрешности аналоговой части средств измерения.

Ключевые слова: метрологическая поверка, программное обеспечение, средство измерения, кибер-физическая система, алгоритм.

ANNOTATION

Oleskiv O.M. Metrological verification of software measuring instruments. – On the rights of manuscript.

The thesis for a scientific degree of the Candidate of Technical Sciences by speciality 05.01.02 – Standardization, Certification and Metrological Assurance. Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2016.

The thesis is devoted to solve actual applied scientific task of development of digital standard sequences generator for metrological verification of software measuring instruments. Classification of structure for measuring instruments is developed. This classification describes access to software of measuring instruments. The method of multilevel metrological verification of software of cyber-physical systems is suggested. This method improves the security of cyber-physical systems and facilitate the process of metrological verification their software. Algorithms of metrological verification of software measuring instruments and cyber-physical systems are developed. The method of metrological verification of software measuring instruments on the basis of the "black box" and the method of generating "Standard" data with regard to the parameters of the analog part of measuring instrument is proposed. This method allows simplifying and developing process of software metrological verification of measuring instruments. Software Standard of Digital Signal is developed, what allows unifying the process of metrological verification software of measuring instruments. Dependence of measurement error and uncertainty of calculation results with software for parameters of measuring signal and of ADC for example Fourier transform is received.

Keywords: metrological verification, software, measuring instrument, cyber-physical system, algorithm.