

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра автоматизації, метрології та енергоефективних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

Програмний аналізатор спектру з функціоналом отримання чисельних
характеристик
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент __ курсу, групи ДЕА-ІВ23мг
спеціальності : 175 Інформаційно-вимірювальні
технології

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

_____/ Олексій ЯЦЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/ Олена БЛИЗНИЧЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/ Олександр АЛЕКСАНДРОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/ Геннадій КАНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____/ Євгеній КЛЮЧКА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/ Євгеній КЛЮЧКА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
«УКРАЇНСЬКА ІНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГІЧНА АКАДЕМІЯ»

Кафедра автоматизації, метрології та енергоефективних технологій

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні технології

Освітньо-професійна програма «Якість, стандартизація та сертифікація»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис)

д.т.н., проф. Геннадій КАНЮК

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу (дипломну роботу/дипломний проєкт)
другого (магістерського) рівня вищої освіти

здобувачу (ці) вищої освіти _____ Олексію ЯЦЕНКУ
(ім'я, прізвище)

1. Тема «Програмний аналізатор спектру з функціоналом отримання чисельних характеристик»

затверджена наказом по академії № 4801-5/3704 від 21.11.2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «05» грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту : Закони України, Постанови Верховної Ради, Постанови Кабінету Міністрів, теоретичні та практичні розробки вітчизняних та зарубіжних авторів за темою роботи, періодичні видання, статистичні дані, галузева нормативна документація, технологічна документація.

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, що їх належить розробити): Вступ. 1. Аналіз спектру сигналу. 2. Віртуальний прилад "Аналізатор спектру". 3. Експериментальне дослідження віртуального приладу. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал): 1. Ціль, об'єкт, предмет та задачі дослідження 2. Структурна схема супергетеродинного аналізатора спектра 3. Пропуск події під час побудови спектра 4. Структурна схема аналізатора спектра паралельної дії 5 Структурна схема векторного аналізатора 6. Структурні схеми вимірювальної установки 7. Роздільна здатність 8. Панель віртуального приладу DSA 9. Розрахунок спектра сигналу 10 Вікно віртуального приладу «Аналізатор спектру». 11. Блок-схеми віртуальних підприладів 12. Експериментальна установка 13. Спектрограми. 14. Висновки.

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання «2» вересня 2024 р.

Керівник роботи

(підпис) Олена БЛИЗНИЧЕНКО
(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис) Олексій ЯЦЕНКО
(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної роботи
(дипломної роботи/дипломного проєкту)

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Вступ	02.09.2024 – 05.09.2024	
2	Аналіз спектру сигналу	06.09.2024 – 15.10.2024	
3	Віртуальний прилад "Аналізатор спектру".	16.10.2024 – 05.11.2024	
4	Експериментальне дослідження віртуального приладу	06.11.2024 – 20.11.2024	
5	Висновки	20.11.2024 – 25.11.2024	
6	Оформлення пояснювальної записки	26.11.2024 – 01.12.2024	
7	Оформлення презентації та доповіді	02.12.2024 – 05.12.2024	

Здобувач (ка) вищої освіти

(підпис) Олексій ЯЦЕНКО
(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

(підпис) Євгеній КЛЮЧКА
(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка дипломної роботи складає: 73 сторінки, 18 рисунків, 6 таблиць, 35 переліки посилань.

Ключові слова: аналіз спектру, алгоритм, LabVIEW, DAQ, гармоніка, амплітуда, інтеграл, ряд Фур'є, сигнал.

Об'єктом дослідження є алгоритми, що реалізують функції спектрального аналізу.

Мета роботи – вивчення алгоритмів, що реалізують побудову спектру в аналізаторах, вибір оптимального алгоритму та програмну реалізацію у віртуальному приладі, з інструментами аналізу побудованого спектру.

Основні конструктивні, технологічні та техніко-експлуатаційні характеристики розробленого програмного аналізатора спектру: - збір, оцифрування сигналу через пристрій NI USB 6251; - Діапазон частот вхідного сигналу від 1 до $5 \cdot 10^3$ Гц; - максимальна амплітуда вхідного сигналу 5 ст.

Область застосування у лабораторних роботах та дослідженнях студентів НІ ТПУ.

У майбутньому планується доопрацювання ПЗ у частині додавання аналізу другого сигналу, з функціоналом порівняння результуючих спектрів.

Оптимізація аналізатора підвищення швидкості функціонування, розширення частотного діапазону вхідного сигналу.

ABSTRACT

An explaining message consists of: 73 pages, 18 pictures, 6 tables, 35 lists of references.

Keywords: SPECTRUM ANALYSIS, ALGORITHM, LABVIEW, DAQ, HARMONIC, AMPLITUDE, INTEGRAL, SERIES FOURIER, SIGNAL.

The object of the study is algorithms that implement the functions of spectral analysis.

The purpose of the work is to study algorithms that implement spectrum construction in analyzers, select the optimal algorithm and software implementation in a virtual device, with tools for analyzing the constructed spectrum.

The main design, technological and technical and operational characteristics of the developed software spectrum analyzer: - signal collection, digitization via the NI USB 6251 device; - Input signal frequency range from 1 to $5 \cdot 10^3$ Hz; - maximum input signal amplitude 5 st.

Scope of application in laboratory work and research of students of NI TPU.

In the future, it is planned to refine the software in terms of adding analysis of the second signal, with the functionality of comparing the resulting spectra.

Optimization of the analyzer to increase the speed of operation, expand the frequency range of the input signal.

ПЕРЕЛІК СКРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

ВП - віртуальний прилад

ЗВ - засіб вимірювання

КГС - коефіцієнт гармонічних спотворень

КНС - кількісної оцінка нелінійних спотворень

НВЧ - надвисока частота

ПДП - прямий доступ до пам'яті

ПЗ - програмне забезпечення

ШПФ – швидке перетворення Фур'є

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СПЕКТРУ СИГНАЛУ	12
1.1 Основи побудови спектра сигналу	12
1.2 Структурні схеми аналізаторів	17
1.2.1 Аналізатори спектра послідовної дії	17
1.2.2 Аналізатори спектра паралельної дії.....	21
1.2.3 Векторні аналізатори сигналів.....	22
1.2.4 Основні характеристики аналізаторів.....	24
1.3 Огляд існуючих програмно-технічних засобів.....	27
1.3.1 Осцилограф АКТАКОМ АСК-2041	27
1.3.2 Аналізатор спектру DSA	30
Висновки по першому розділу	33
РОЗДІЛ 2 ВІРТУАЛЬНИЙ ПРИЛАД "АНАЛІЗАТОР СПЕКТРУ"	34
2.1 Технічне завдання	34
2.2 NI USB 6251.....	34
2.3 Реалізація ВП.....	38
2.3.1 Основний алгоритм розрахунку спектра сигналу	38
2.3.2 Реалізація алгоритму у середовищі LabVIEW	40
2.4 Функціонал ВП «Аналізатор спектру».....	42
2.4.1 Завдання діапазону частот	44
2.4.2 Розрахунок гармонік	45
2.4.3 Розрахунок коефіцієнтів гармонік.....	47
Висновки до другого розділу.....	48
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІРТУАЛЬНОГО ПРИЛАДУ	50
3.1 Опробування	50

3.2 Визначення технічних характеристик	53
3.2.1 Експеримент № 1: Визначення дозволу аналізу у верхніх межах діапазону	54
3.2.2 Експеримент № 2: Визначення спектра не періодичних сигналів	58
3.2.3 Експеримент №3: Визначення спектра послідовності прямокутних імпульсів	62
Висновки по третьому розділу	67
ВИСНОВОК	68
ПЕРЕЛІК ПОСЛАНЬ	70

ВСТУП

Важливе місце у будь-якій інженерній практиці займають виміри.

Це також стосується вимірювання параметрів сигналу, як електричного так і радіо. Поширеною вимірювальною задачею є спостереження та аналіз сигналу у часовій та частотній областях. Тимчасова складова сигналу аналізується за допомогою осцилографів. Однак у ряді випадків вимірювання в часовій області не має необхідної чутливості. Зміни сигналу можуть бути розтягнуті у часі та фізично не виявлені на екрані осцилографа. [1] Більш чутливою є спектральна форма сигналу. Вимірювання в частотній ділянці можливі за допомогою аналізаторів спектра.

Аналізатор спектру - це прилад, що визначає розподіл енергії коливань по смузі частот. Области застосування аналізаторів спектра широко відомі. До них відносяться як обробка сигналів в акустиці, системах зв'язку енергетиці, так і верифікація, кодування інформації та інше. Використання перетворювачів неелектричних величин в електричні сигнали дозволяє розширити застосування аналізаторів спектра в галузі медицини, ядерної енергетики та механіки.

Спектр сигналу довгий час був лише математичною абстракцією.

На початку дев'ятнадцятого століття французький фізик і математик Жан-Батіст Фур'є теоретично довів, що періодичну функцію можна представити набором тригонометричних складових з власним амплітудним значенням для кожної складової. Їхнє підсумовування при нескінченній кількості ідеально відновлює вихідний сигнал. [11] У процесі розвитку радіоелектроніки високовибірчі радіоприймачі дозволили виміряти гармонійні складові. На цьому принципі було засновано перші аналізатори спектра послідовної дії. Такий підхід мав жорсткі обмеження обґрунтовані смугою пропускання фільтра, що використовується для відсікання частоти.

У цьому дослідженні є обмеження як за частотою, а й у можливному часі аналізу. Таким чином, при дослідженні ми отримуємо поточний спектр сигналу – результат перетворення Фур'є з обмеженою верхньою межею часу. Результируюча функція залежить як від частоти, і від часу, що зближує дослідження у часовій і частотній областях.

У лабораторних умовах аналізатори спектру застосовують, зокрема, при комп'ютерних вимірах. Для аналізу спектра використовують програмні аналізатори, що входять до стандартного пакету набору віртуальних приладів LabVIEW, або програмно-апаратного комплексу NI ELVIS. Обидва рішення ґрунтовані на алгоритмах швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), які мають суттєві обмеження.

Стандартний віртуальний прилад тільки будує спектр і не має інструментів аналізу. Функціонал приладу комплексу NI ELVIS є суттєво обмеженим і не відповідає можливостям реальних аналізаторів. Таким чином, існує потреба в аналізаторі спектру, що дає дослідникам повне уявлення про функціонування реальних сучасних приладів, а так само коректно відображає спектри як періодичних так і не періодичних сигналів, для можливостей дослідження з типовими патернами спектральних складових сигналу.

Актуальність роботи полягає у необхідності створення програмного аналізатора спектра з гнучкими налаштуваннями аналізу, базованого на наявних технічних засобах, для застосування у лабораторних умовах під час проведення вимірювань.

Предмет дослідження – спектральні методи аналізу вимірювальних сигналів.

Об'єктом дослідження є алгоритми, що реалізують функції спектрального аналізу, практична програмна їх реалізація.

Метою даної роботи є вивчення алгоритмів, що реалізують побудову спектра в аналізаторах, вибір оптимального алгоритму і програмна

реалізація у віртуальному приладі з інструментами аналізу побудованого спектра.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести підбір джерелам інформації, провести їх аналіз, вивчити можливості методичного інструментарію спектрального аналізу вимірювальних сигналів;
- вивчити принципи роботи аналізаторів спектру та систематизувати їх функціональні можливості;
- реалізувати алгоритм побудови спектра електричного сигналу в середовищі LabVIEW;
- розробити програмний аналізатор спектру з функціоналом отримання чисельних характеристик;
- виконати порівняння результатів роботи розробленого віртуального приладу з необхідними технічними характеристиками, а також із аналізатором спектру у складі програмно-апаратного середовища NI ELVIS.

Практична значущість роботи полягає у необхідності розробки віртуального аналізатора спектра, що реалізує основні можливості аналізаторів спектра провідних світових виробників.

Авторський внесок автора полягає у підборі приладів, дослідженні роботи аналізаторів спектру різних виробників, у порівнянні функціональних можливостей аналізаторів спектру, розробка алгоритмів аналізу та реалізація їх у програмному аналізаторі спектру в середовищі LabVIEW.

При виконанні роботи використовувалося таке обладнання, інструменти та програмне забезпечення.

- персональний комп'ютер із операційною системою Microsoft Windows 7;
- офісне програмне забезпечення MS Office (Visio, Word);

- програмний пакет LabVIEW;
- DAQ пристрій М серії NI USB 6251.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СПЕКТРУ СИГНАЛУ

Сигнали можна аналізувати в часовій області за допомогою осцилографів і частотній області за допомогою аналізаторів спектра. Два режими аналізу пов'язані один з одним за допомогою перетворення Фур'є, тому кожен сигнал, що змінюється у часі, має характерний частотний спектр.

1.1 Основи побудови спектра сигналу

Наведемо визначення періодичної функції:

$$f(t) = f(t + nT), \quad (1.1)$$

де T – постійна величина, звана періодом,

n – будь-яке ціле число, позитивне чи негативне. [2]

У формулі (1.1) закладено основну властивість періодичної функції: процес періодично повторюється протягом усього часу від $-\infty$ до $+\infty$. Формула (1.1) виражає математичну модель, що у реальному світі існувати неспроможна.

Якщо взяти до уваги обмеження: функція кусочно- безперервна, обмежена і має протягом періоду кінцеве число екстремальних значення (умови Діріхле), то таку періодичну функцію можна представити поруч із тригонометричних функцій:

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \cos(2\pi k \frac{t}{T} - \varphi_k). \quad (1.2)$$

де c_0 середня амплітуда функції за період;
 c_k амплітуда синусоїдального коливання k ;
 φ_k початкова фаза синусоїдального коливання k ;
 $k \frac{t}{T}$ - частота синусоїдального коливання k .

Таким чином, періодична функція $f(t)$ представлена сумою доданків виду:

$$c_k \cos(2\pi k \frac{t}{T} - \varphi_k).$$

Частоти коливань $k \frac{t}{T}$ є складовими складових періодичної функції $f(t)$, і утворюють гармонійну послідовність. Таким чином, частоти всіх складових кратні частоті $\frac{t}{T}$. Окремі складові мають назву гармонік.

Формула (1.2) може бути розкладена на тригонометричні складові та представлена у формі:

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos 2\pi k \frac{t}{T} + b_k \sin 2\pi k \frac{t}{T}), \quad (1.3)$$

де

$$a_k = c_k \cos \varphi_k, \quad b_k = c_k \sin \varphi_k,$$

так що

$$c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad \operatorname{tg} \varphi_k = \frac{b_k}{a_k}.$$

Коефіцієнти a_k та b_k визначають за формулами:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos 2\pi k \frac{t}{T} dt, \quad (1.4)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin 2\pi k \frac{t}{T} dt. \quad (1.5)$$

Величина c_0 обчислюється за такою формулою:

$$c_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt. \quad (1.6)$$

Якщо взяти кінцеве число значень гармонік N , і апроксимувати функцію в тригонометричний поліном, то ми отримаємо розкладання функції в ряд Фур'є:

$$c_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt. \quad (1.7)$$

Ряд Фур'є можна представити у комплексній формі:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{j2\pi k \frac{t}{T}}, \quad (1.8)$$

де

$$2C_k = c_k e^{-j\varphi k} = a_k - jb_k;$$

$$c_k = 2|C_k|; c_0 = C_0.$$

Розмір $2C_k$ - це комплексна амплітуда; C_k знаходять за формулою:

$$C_k = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-j2\pi k \frac{t}{T}} dt. \quad (1.9)$$

Неперіодичну функцію можна розглядати як граничний випадок періодичної функції при необмежено зростаючому періоді. [2] Таким чином, розкладання до ряду Фур'є отримують шляхом граничного переходу при $T \rightarrow \infty$ до формули (1.8) з розкритим значенням C_k .

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega t} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega t} dt, \quad (1.10)$$

де ω - поточна частота, що змінюється безперервно і $2\pi k \frac{t}{T} \rightarrow \omega$.

Подамо формулу (1.10) у вигляді

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (1.11)$$

де

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt. \quad (1.12)$$

Вирази (1.11) та (1.12) є основними формулами теорії спектрів. Дані висловлювання є двома перетвореннями Фур'є, які пов'язують між собою дві функції: речову функцію часу $f(t)$ і комплексну функцію частоти $S(\omega)$. Так як функція $f(t)$ є неперіодичною, вона при розкладанні є сумою нескінченно великої кількості нескінченно малих, коливань нескінченно близьких за частотою. Частотний інтервал між коливаннями дорівнює збільшенню поточної кутової частоти $d\omega$. При цьому комплексна амплітуда для кожного окремого коливання дорівнює:

$$dC = \frac{1}{\pi} S(\omega) d\omega. \quad (1.13)$$

Таким чином, інтеграл Фур'є визначає неперіодичну функцію як сума коливань з безперервною послідовністю частот, а ряд Фур'є розкладає періодичну функцію сумою нескінченного числа синусоїд з дискретними значеннями частот. Розкладання неперіодичної функції містить усі частоти [14].

Ряд Фур'є пов'язує періодичну функцію з періодичними гармоніками її складовими. Використовуючи інтеграл Фур'є неперіодична функція представляється сумою періодичних складових, таким чином сума не має суттєвих властивостей своїх доданків.

1.2 Структурні схеми аналізаторів

1.2.1 Аналізатори спектра послідовної дії

Свіпуючий супергетеродинний аналізатор спектра послідовної дії, що має традиційну архітектуру, кілька десятиліть тому дозволив інженерам вперше провести вимірювання частотної області. [6] Виконані спочатку повністю на аналогових компонентах, ці аналізатори розвивалися відповідно до вимог додатків, де вони застосовувалися. У сучасних свіпуючих аналізаторах спектра використовуються цифрові компоненти, такі як аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), цифрові сигнальні процесори та мікропроцесори. Однак принцип свіпування, як і раніше використовуваний в цих аналізаторах, найкраще підходить для спостереження тільки за сигналами з передбачуваною поведінкою. Типову структурну схему такого аналізатора зображено на рис.1.1.

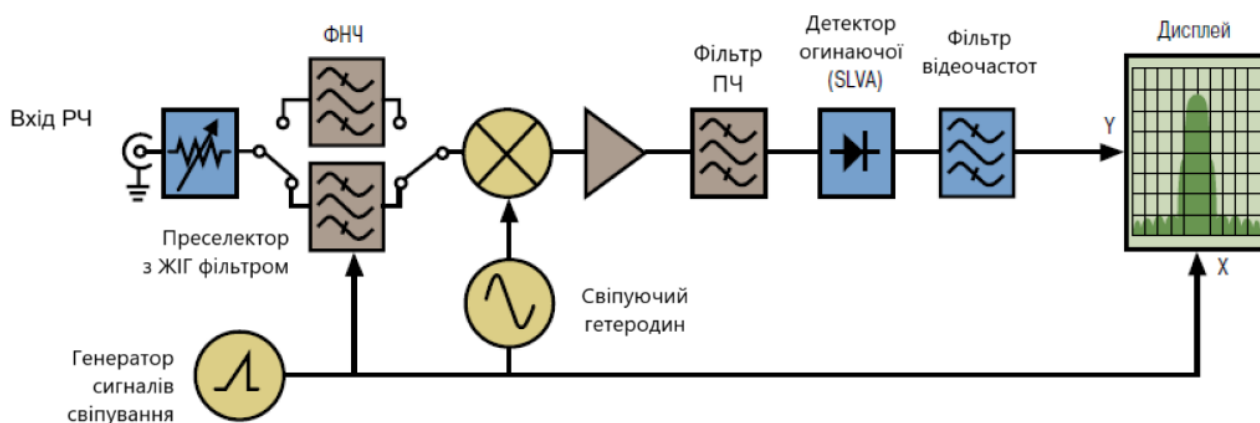


Рис. 1.1 Структурна схема супергетеродинного аналізатора спектра

Модуляційну характеристику свіпуючого гетеродина зазвичай прагнуть виконати лінійною для того, щоб його частота коливань змінювалася під впливом напруги, що управляє, з генератора розгортки

лінійно в часі. [9] Девіацію частоти гетеродина Δf_g встановлюють за допомогою регулювання смуги огляду такою, щоб охопити весь спектр сигналу.

У цьому випадку принаймні зміни частоти гетеродина складові спектру, як показано на рис. 1.2, будуть переміщатися щодо фіксованої частоти вузькосмугового фільтра, послідовно в часі потрапляючи в смугу пропускання $f_{\text{ч}}$ цього фільтра, значення якої встановлюють регулюванням смуги пропускання. На вхід детектора подають сигнали з частотою заповнення, що дорівнює проміжній частоті $f_{\text{пч}}$, і амплітудою, пропорційною спектральній складовій сигналу частоти $f_{\text{пч}}(t_i) = f_g(t_i) + f_{\text{пч}}$. [9] Після детектування та посилення відеоімпульси подають на Y-пластини ЕЛТ. На X-пластини подають напругу розгортки, яка є модулюючою напругою при частотній модуляції гетеродина.

На екрані ЕПТ складові спектру будуть спостерігатися у вигляді вертикальних смуг, які світяться, і які мають кінцеву ширину, що визначається формою АЧХ вузькосмугового фільтра, і висоту, пропорційну середньому значенню спектральної щільності даної ділянки спектра сигналу.

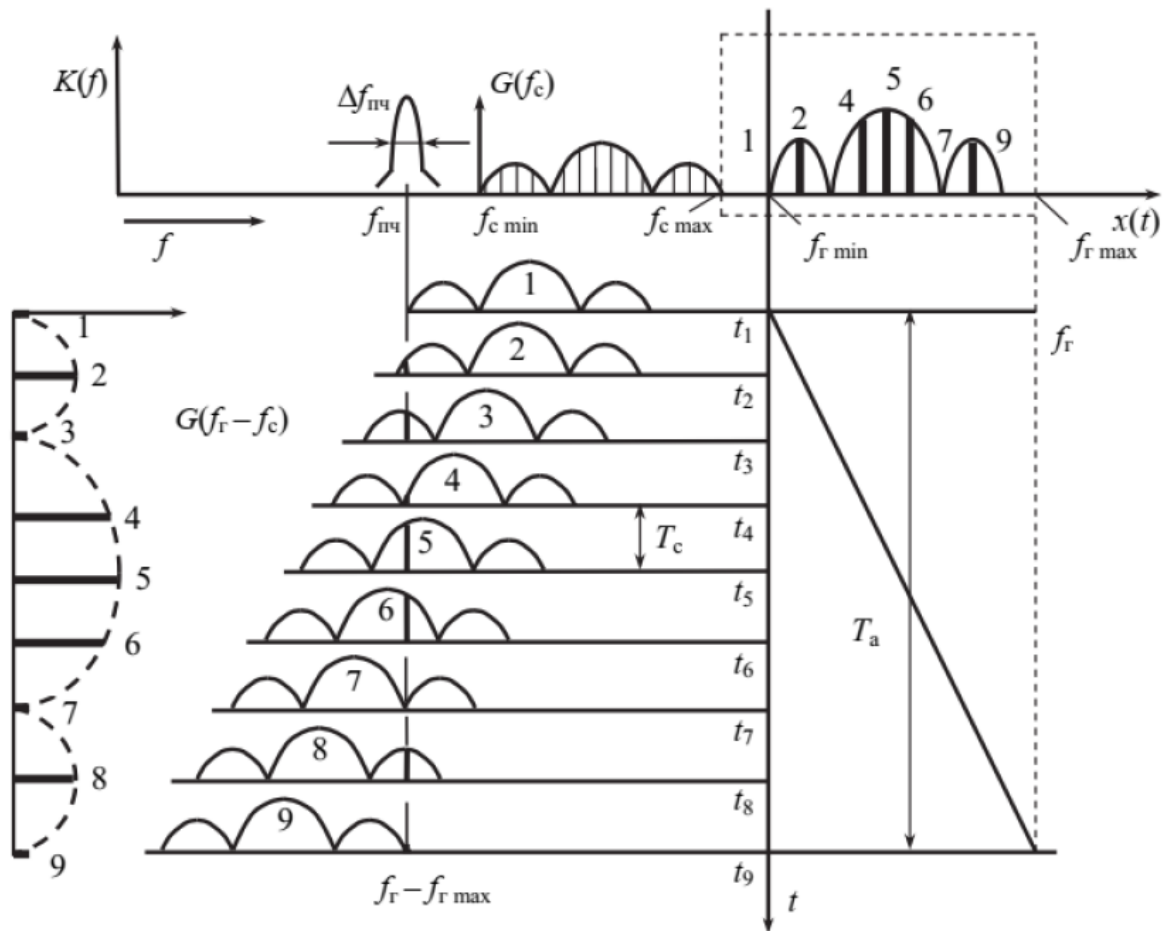


Рис. 1.2 Часові діаграми роботи аналізатора спектра послідовної дії

Для спостереження сигналів у широкому діапазоні амплітуд послідовно з детектором за допомогою перемикача ЛІН/ЛОГ включають підсилювач логарифмічний. У цьому випадку амплітуда спектральних складових на екрані ЕПТ відображається у логарифмічному масштабі.

У свіпуючих аналізаторах залежність потужності від частоти визначають за допомогою перетворення досліджуваного сигналу зі зниженням частоти та його свіпання в межах смуги пропускання фільтра ПЧ, званої смугою дозволу. [6] Детектор, включений за фільтром ПЧ, обчислює амплітуду на кожній частоті вибраної лінії огляду. Таке рішення забезпечує широкий динамічний діапазон, але має недолік – у кожний момент часу амплітуда може бути обчислена лише на одній частоті. Даний

підхід заснований на припущенні, що протягом повного свіпування сигнал, що вимірюється залишається практично незмінним.

Отже, достовірні вимірювання можуть бути отримані лише для стабільних вхідних сигналів.

При різких змінах сигналу можлива перепустка деяких із цих змін. Як показано на рис. 1.3, аналізатор спектру аналізує частотний сегмент F_a , у той час як короткочасна зміна в спектрі відбувається в сегменті F_b (зображення зліва). Коли свіпування досягає сегмента F_b , ця подія припиняється, не будучи виявленою (зображення праворуч).

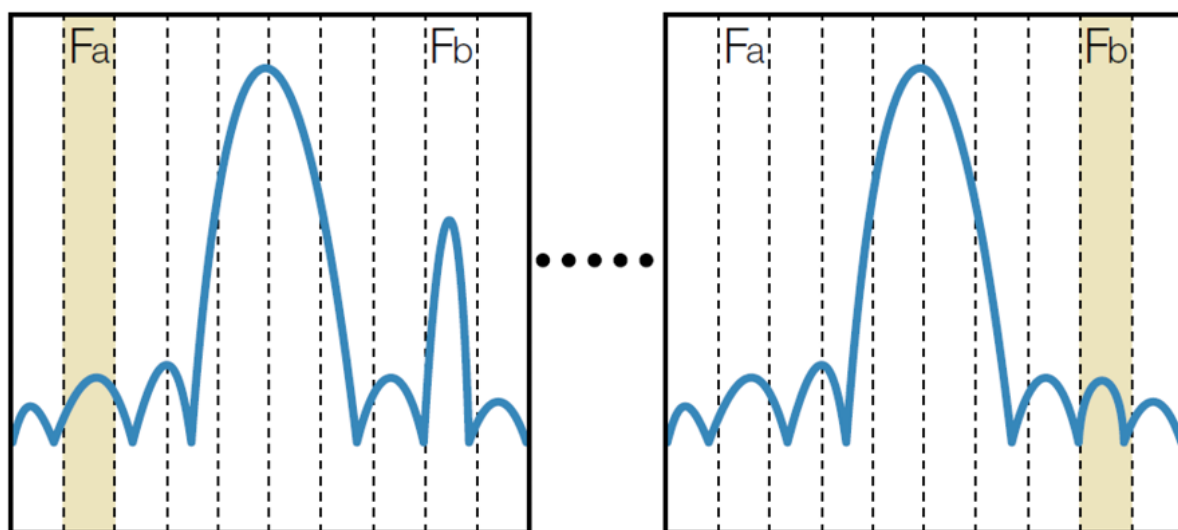


Рисунок 1.3 – Пропуск події під час побудови спектра

Аналізатори спектру послідовного дії що неспроможні надійно реєструвати подібні явища, тому за їх використанні дослідження РЧ сигналів більшості сучасних засобів зв'язку не можна розраховувати високу продуктивність. [13] Крім пропуску короткочасних сигналів, існує ймовірність неправильного представлення спектра імпульсних сигналів, що використовують в сучасних системах радіозв'язку та РЛС. Свіпуючі аналізатори дозволяють отримувати спектр імпульсного сигналу тільки при багаторазовому свіпуванні [4].

При цьому особливу увагу приділяють вибору швидкості співування та смуги роздільної здатності.

1.2.2 Аналізатори спектра паралельної дії

Аналізатори спектра паралельної дії застосовують переважно для аналізу спектрів одиночних імпульсних сигналів. При паралельному аналізі спектра сигналу застосовують n смугових фільтрів Φ , кожен із яких налаштований певну частоту. Структурну схему наведено на рис. 1.4 (а).

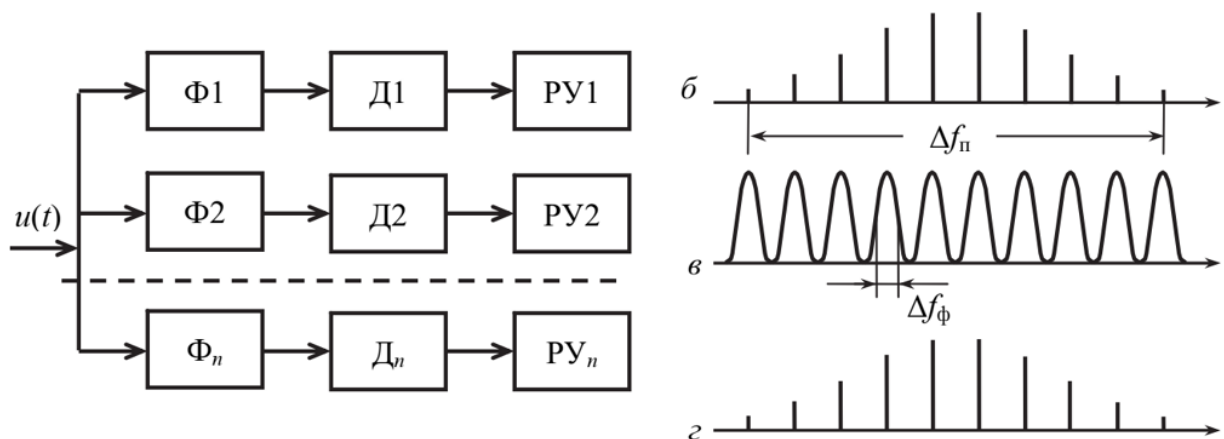


Рис. 1.4 Структурна схема аналізатора спектра паралельної дії (а), спектри сигналів та АХЧ-фільтрів (б-г)

Досліджуваний сигнал $u(t)$, спектр якого розташований у смузі частот Δf_{Π} , подають одночасно на всі фільтри. Фільтри мають ідентичні АЧХ з однаковими смугами пропускання Δf_{Φ} та налаштовані на певні частоти (рис. 1.4 (в)). Сигнали на виході фільтрів визначаються складовими спектру процесу, що аналізують (рис. 1.4 (г)). Далі, спектральні, складові, після детектування в детекторах $Д$, надходять на реєструючі пристрої (РУ).

Смуга пропускання фільтра визначає статичну роздільну здатність аналізатора (за умови час аналізу $T_a \rightarrow \infty$, т. є. T_a – є велике значення).

Роздільна здатність аналізатора - здатність розрізняти складові, спектри з близькими частотами. Чим вужче смуга пропускання фільтра, тим вище роздільна здатність. [5] При широкій смузі пропускання декілька складників не будуть розрізнятися. Якщо оцінювати роздільну здатність смугою частот Δf_p , при якій можливо розрізнення найближчих складових $\Delta f_p = \Delta f_\phi$, то при ідеальній прямокутній АЧХ фільтра можна покласти $\Delta f_p = \Delta f_\phi$. Для реальних фільтрів $\Delta f_p = 2\Delta f_\phi$. Якщо час аналізу T_a є малим, то має місце динамічна роздільна здатність.

Необхідний час аналізу для правильного відтворення роботи спектру можна приблизно оцінити наступним чином. Час аналізу при паралельному дослідженні може бути прийнятим приблизно рівним τ_y – часу встановлення напруги на виході фільтра з прямокутною частотною характеристикою і робочою смугою Δf_ϕ (від рівня 0,1 до рівня 0,9 від встановленого значення). З теорії фільтрів відомо, що час встановлення $\tau_y = 0,86 / (\Delta f_\phi)$, отже, $T_a \approx \tau_y = 1 / (\Delta f_\phi)$. [18]

Швидкість аналізу різко знижується при звуженні смуги пропускання фільтра. Гідність аналізу торів паралельної дії полягає у малому часі аналізу.

Похибка при паралельному аналізі визначають наступні основні фактори : скінченність часу встановлення коливань на виході фільтра і залежності її від смуги пропускання, відмінність характеристик фільтрів, налаштованих на різні частоти.

1.2.3 Векторні аналізатори сигналів

При аналізі сигналів з цифровою модуляцією для отримання інформації про амплітуду і фазі сигналу необхідні векторні вимірювання. Спрощену структурну схему векторного аналізатора сигналів наведено на рис. 1.5.

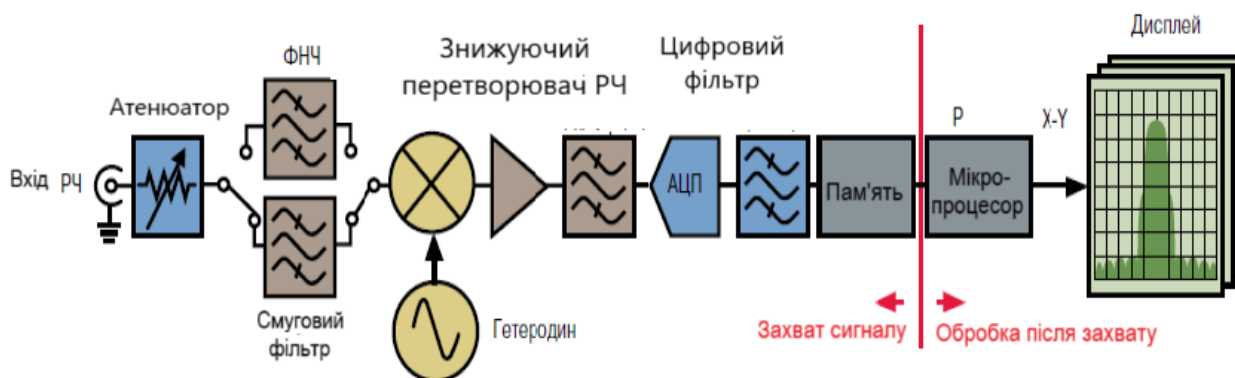


Рис 1.5 Структурна схема векторного аналізатора

Векторний аналізатор перетворює вхідний РЧ сигналу пропуску в цифрову форму в цифрову форму приладу та записує на згадку про інформацію про амплітуду та фазу перетвореного сигналу, котра використовується цифровим сигнальним процесором відображення результатів вимірювань АЦП, що входить до складу векторних аналізаторів сигналу, оцифровує широкосмуговий сигнал ПЧ, після чого перетворення із зниженням частоти, фільтрація та детектування виконують цифровим способом. Алгоритми швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) застосовують для перетворення з часової області в частотну. Векторний аналіз вимірює параметри модуляції, наприклад, девіацію частоти ЧС сигналу, потужність у кодовій області, амплітуду вектору помилки (EVM) та констеляційну діаграму. Крім того, за допомогою векторного аналізатора сигналів можна відобразити потужність в каналі, залежність потужності від часу і спектрограми.

Незважаючи на можливість збереження осцилограм у пам'яті, векторний аналізатор має обмежені функції аналізу короточасних перехідних процесів. У режимі автоматичної розгортки, звичайному для таких аналізаторів, захоплені сигнали перед обробкою повинні бути занесені в пам'ять. При послідовній обробці пакетів даних прилад не реагує

на події, що з'являються між моментами реєстрації даних. Це затрудняє і навіть робить неможливим виявлення одиночних або рідкісних подій. Для виділення цих подій у пам'яті можна використовувати запуск за такими неперіодичними подіями. Однак векторні аналізатори сигналів мають обмежені можливості запуску. Зовнішній запуск можливий тільки за наявності попередньої інформації про розглянуту подію, одержання якої практично нереально. При запуску за рівнем ПЧ, що виконується на основі, вимірної зміни загальної потужності сигналу ПЧ, слабкі сигнали не можуть бути виділені при наявності сильних, а також коли змінюється не амплітуда, а частота сигналів. Обидва вказані випадки характерні для сучасного динамічного радіочастотного спектру.

1.2.4 Основні характеристики аналізаторів торів

Діапазон частот характеризує граничні значення частотного інтервалу, в якому аналізують спектри сигналів. У випадку аналізу спектру радіоімпульсів ця характеристика дає уяву про діапазони несучі частот сигналів, спектри яких можуть бути досліджені приладом. При зіставленні, виконанні характеристики приладу і досліджуваного радіоімпульсу слід враховувати і ширину спектру, так як остання іноді має велике значення [3].

Робочий діапазон частот визначається основним чином діапазоном перебудови частоти коливача гетеродину (або середньої частоти смугового фільтра). Практично область робочих частот аналізатора може бути розширеною в результаті використання гармонік гетеродину.

Роздільна здатність визначає мінімальну відстань по осі частот між двома складовими спектра, при якому можуть бути виділені відокремлені лінії і виміряні їх рівні. При аналізі суцільних спектрів від роздільної здібності залежить ширина ділянки, що «вирізають».

Строго кажучи, повне розрізнення сусідніх складових недосяжно. Воно завжди в якійсь мірі умовно. Це видно на прикладі аналізу спектра, що

складається з двох ліній (рис.1.6). У резонаторі одночасно збуджуються коливання двох частин і виникають биття з розносною частотою. Напруга, фіксується моє індикатором, має вигляд двогорбої кривої.

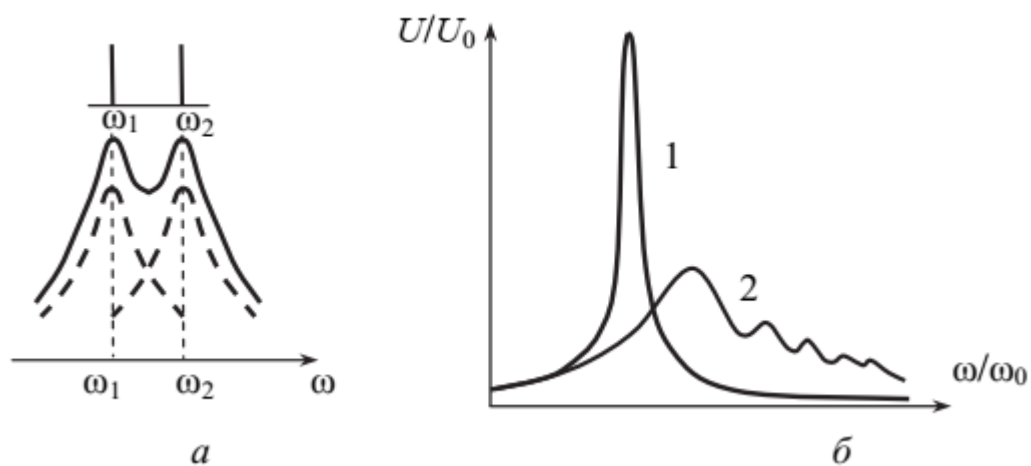


Рисунок 1.6 – Роздільна здатність

Роздільна здатність, що є функцією лише параметрів смугового фільтра, називають статичною. Від неї відрізняють динамічну рішучу здатність, яка залежить не тільки від пари метрів обираючої системи, але і від часу. Динамічна роздільна здатність, що є істинною роздільною здатністю аналізатора, визначається динамічної характеристикою (резону борної системи) виборчої системи.

Тривалість аналізу. При одночасному аналізі його тривалість визначається часом встановлення коливань, яке є обернено пропорційним смузі пропускання Δf одиночного смугового фільтра. У разі послідовного аналізу, його тривалість прямо пропорційна ширині досліджуваного спектру F і обернено пропорційна квадрату смузи пропускання виборчої системи.

Таким чином, тривалість послідовного аналізу виходить у $n = F / \Delta f$ разів більшою, ніж одночасного, і її можна визначити за формулою [5] :

$$t_{\text{посл}} = \frac{A}{\Delta f} \cdot \frac{F}{\Delta f} = A \frac{F}{\Delta f^2} \quad (1.14)$$

Швидкість аналізу. У багатьох випадках дослідження спектру потрібна висока швидкість послідовного аналізу. Однак при збільшенні швидкості зміни частоти роздільна здатність падати так, так як стають значнішими відмінності динамічної характеристики 2 (рисунок 1.6 (б)) аналізатора від статичної 1.

Основні відмінності полягають у наступному:

- зменшується коефіцієнт передачі і тим значнее, чм швидше змінюється частота;
- виходить зсув максимуму резонансної кривої як за частотою, так і за часом, що збільшується при зростанні швидкості зміни частоти
- відбувається розширення резонансної кривої, викликане тим, що при підході до резонансу амплітуда наростає плавно, а убуває з коливаннями, що прискорюються з часом, це обумовлено биттями між вільними коливаннями фільтра і збуджуючими його коливаннями;
- виходить тупіша резонансна крива, причому вибірковість погіршується зі збільшенням швидкості зміни частоти.

Чутливість. Аналізатори спектру є приладами з високою чутливістю, оскільки часто використовуються для дослідження слабких сигналів. Чутливість низькочастотних осцилографічних аналізаторів виражають у мілівольтах. Чутливість аналізаторів надвисоких частот (НВЧ) характеризують такими ж величинами, як чутливість приймачів НВЧ. У паспорті зазвичай вказують чутливість до монохроматичних сигналів. При

дослідженні спектрів імпульсних сигналів чутливість є значно меншою і залежить від тривалості імпульсу.

1.3 Огляд існуючих програмно-технічних засобів

У лабораторних умовах використовується аналізатор спектру у складі осцилографа АКТАКОМ АСК-2041. А також віртуальний прилад аналізатор спектру NI ELVIS Dynamic Signal Analyzer (DSA) у середовищі LabView. Прилади мають недоліки, про які будуть описані нижче. Для порівняння технічних характеристик та функціональних можливостей буде розглянуто аналізатор спектру Tektronix RSA603A.

1.3.1 Осцилограф АКТАКОМ АСК-2041

Осцилограф цифровий АКТАКОМ АСК-2041 призначено для дослідження форми електричних сигналів шляхом візуального спостереження на рідкокристалічному індикаторі та вимірювання їх амплітудних та тимчасових характеристик.



Рис 1.7 Зовнішній вигляд осцилографа АКТАКОМ АСК-2041

Принцип дії осцилографів заснований на аналого-цифровому перетворенні вхідного сигналу з частотою вибірки, що задається, реєстрації цифрових даних в запам'ятовуючому пристрої для подальшої цифрової обробки і відображення на рідкокристалічному матричному кольоровому або монохромному дисплеї [7] . Програмне забезпечення (ПЗ) осцилографа управляє режимами роботи, обробки цифрових даних, їх відображення на дисплеї, передачі на USB-накопичувач. ПЗ забезпечує виконання наступних функцій обробки цифрових даних:

- автоматичних вимірювань (до 24 параметрів);
- курсорних вимірів;
- математичної обробки, включаючи функцію швидкого перетворення Фур'є (ШПФ).

Основні технічні характеристики осцилографа АКТАКОМ АСК-2041 наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Технічні характеристики АСК-2041

Характеристика	Значення
Параметри каналів вертикального відхилення	
Межі допустимої відносної похибки коефіцієнта відхилення, %: - 3 пробником X1 (1:1); - із пробником X10 (1:10)	± 4 ± 5
Діапазон встановлення коефіцієнта відхилення кожного каналу	від 2 мВ/дел до 5 В/дел
Смуга пропускання (-3 дБ), МГц	0-40
Число розрядів АЦП	8
Параметри каналу горизонтального відхилення	
Межі відносної похибки коефіцієнта розгортки, що допускається, %	$\pm 0,5$
Максимальна частота дискретизації, МГц:	200 реальна, 20000 еквівалентна

Наявність функції БПФ фактично дозволяє проводити аналіз спектра за допомогою осцилографа. БПФ може застосовуватися, якщо необхідно виміряти коефіцієнт гармонік або провести аналіз коливань, виміряти шумові характеристики джерел живлення тощо.

Цифровий осцилограф пропонує 5 вікон для БПФ.

Вікно БПФ визначає область даних (точки вибірок осцилографа), якими воно здійснюється. Теорія БПФ виходить з припущення про періодичний сигнал і для ідеального перетворення необхідно виділити один

або кілька періодів сигналу, що для реального сигналу зробити точно ніколи не вдається. Це призводить до розривності вихідної функції та спотворення (розширення) розрахункового частотного спектра.

Віконна функція БПФ використовується для придушення крайових ефектів розривності реальних функцій шляхом введення вагових коефіцієнтів для вибірки даних у вікні, що забезпечують зниження амплітуд крайових точок (старту та стопу) і, в результаті, поліпшення результатів [8]. Однак треба розуміти, що цими діями вносяться спотворення досліджуваного сигналу.

1.3.2 Аналізатор спектру DSA

Віртуальний прилад DSA є частиною платформи NI ELVIS.

Фізично платформа складається з робочої станції та DAQ-пристрою, що виконує функцію введення – виведення. Робоча станція забезпечує підключення досліджуваних об'єктів та визначає функціональність лабораторної установки.

Програмна частина складається з ПЗ низького рівня, що маршрутизує сигнали в настільній робочій станції та між приладами. А також пакета віртуальних приладів, призначених для вимірювання, генерації та аналізу отриманих сигналів. [27] Прилад DSA використовує аналоговий вхід модуля введення-виведення NI ELVIS. Він відноситься до цифрових аналізаторів паралельного типу у вигляді ШПФ-аналізатора, який обчислює спектр за допомогою алгоритмів швидкого перетворення Фур'є.

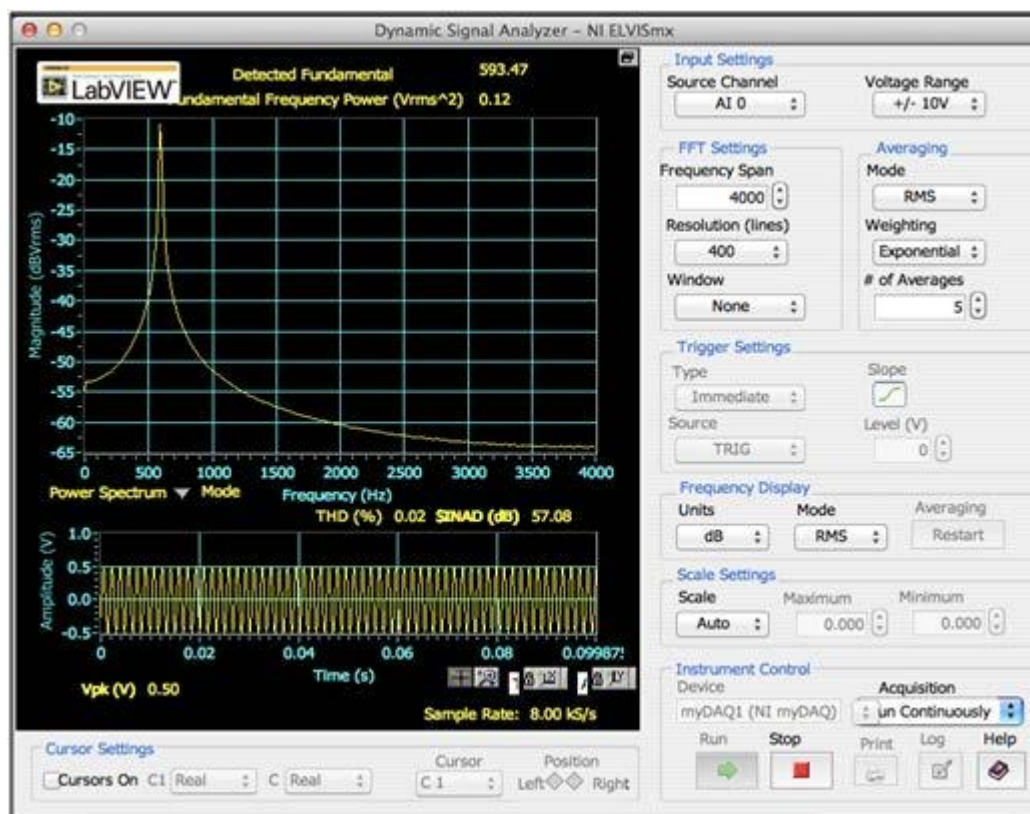


Рис.1.8 Панель віртуального приладу DSA

При виборі верхньої межі частотного діапазону, пристрій автоматично виставляє частоту квантування вхідного сигналу.

Ця особливість виключає можливість одночасного використання аналізатора спектра та інших приладів, що використовують аналогове введення сигналів, наприклад осцилографа, тобто виключається можливість одночасного спостереження форми і спектра сигналів.

Крок квантування за частотою алгоритму ШПФ обернено пропорційний тривалості сигналу. [10] Для аналізу DSA задається верхня межа частотного діапазону і кількість точок в спектрограмі, таким чином, крок квантування визначається відстанню між двома точками в спектрограмі. Визначення часу аналізу здійснюється автоматично.

Алгоритм ШПФ розбиває весь діапазон частотного аналізу на рівні відрізки, таким чином, роздільна здатність приладу не залежить від частоти

аналізу і визначається кроком квантування по частоті і не може бути збільшена через відсутність можливості завдання конкретного діапазону частот для аналізу.

Для ШПФ необхідно використовувати лише сигнали певної довжини, конкретно – довжина сигналу у вибірках має бути ступенем двійки.

Таким чином, ШПФ коректно працює з масивом з 1024 (або 512 або 2048) точок сигналу, але не з масивом з 1000 (або 500 або 2000) точок. В результаті, звичайний калібрувальний сигнал частотою 1 КГц, знятий на частоті дискретизації 10 МГц, неможливо піддати БПФ на його довжині періоду, який в цих умовах становитиме 1000 точок, доведеться або використовувати для аналізу область трохи більше - 1.024 періоду сигналу (і тим самим гарантовано спотворити спектр сигналу, адже перетворення Фур'є має проводитися рівно на ділянці періоду сигналу або кратному йому), або попередньо провести передискретизацію тисячоточкового сигналу на віртуальну частоту дискретизації 10,24 МГц, і, можливо, спотворити в результаті інтерполяції, що застосовується, форму сигналу, що в результаті також призведе до спотворень спектра [12]. Недоліки наявних у лабораторії засобів безпосередньо пов'язані з тим, що засновані на алгоритмі ШПФ, з особливостями описаними вище.

Крім того, у функціоналі DSA відсутні необхідні інструменти:

- відсутня вибір шкали відображення (лінійної / логарифмічної);
- недоступність вибору часу аналізу сигналу;
- неможливість завдання конкретного діапазону частот аналізу;
- необхідність глибокого розуміння обчислення ШПФ, завдання початкових умов, безпосередньо які впливають коректність побудови спектру.

Висновки по першому розділу

У розділі проаналізовано джерела інформації та систематизовано інформацію щодо теоретичних основ спектрального аналізу вимірювальних сигналів, розглянуто теоретичні основи побудови спектру сигналу. Проаналізовано структурні схеми аналізаторів спектру різних принципів дії та наведено їх основні характеристики.

РОЗДІЛ 2

ВІРТУАЛЬНИЙ ПРИЛАД "АНАЛІЗАТОР СПЕКТРУ"

2.1 Технічне завдання

Система розробки віртуального приладу (ВП) «Аналізатор спектру» - LabView.

Призначення приладу, що розробляється - застосування в лабораторних умовах при виконанні вимірювань.

Необхідний функціонал приладу:

- зчитування вхідного сигналу через DAQ-пристрій М серії NI 6251;
- вибір частоти отримання вибірки сигналу;
- побудова спектра сигналу, з можливістю ручного встановлення завдання часу аналізу, дозволу, діапазону аналізу частот;
- відображення спектра в логарифмічному та лінійному масштабах;
- розрахунок амплітуд та частот гармонік;
- розрахунок коефіцієнта гармонік;
- можливість збереження оцифрованого масиву спектра сигналу.

Необхідні технічні характеристики:

- діапазон частот вхідного сигналу від 1 до $5 \cdot 10^3$ Гц;
- максимальна амплітуда вхідного сигналу 5 ст.

2.2 NI USB 6251

DAQ – пристрій М серії NI USB 6251 призначений для здійснення функціоналу модуля введення виводу для середовища розробки LabVIEW.

Пристрій має наступні технічні характеристики:

- 16 каналів аналогового входу;
- 2 канали аналогового виходу;

можливостей. Основним завданням нашого ВП є аналіз періодичних і не періодичних сигналів, що надходять на аналогове введення пристрою.

Якість аналізу безпосередньо залежить від того, як точно сигнал був переданий у середу LabVIEW. Тому зупинимося докладніше на технічному пристрої системи аналогового введення та можливості її використання.

Схема пристрою каналу аналогового введення наведено на рис.2.2.

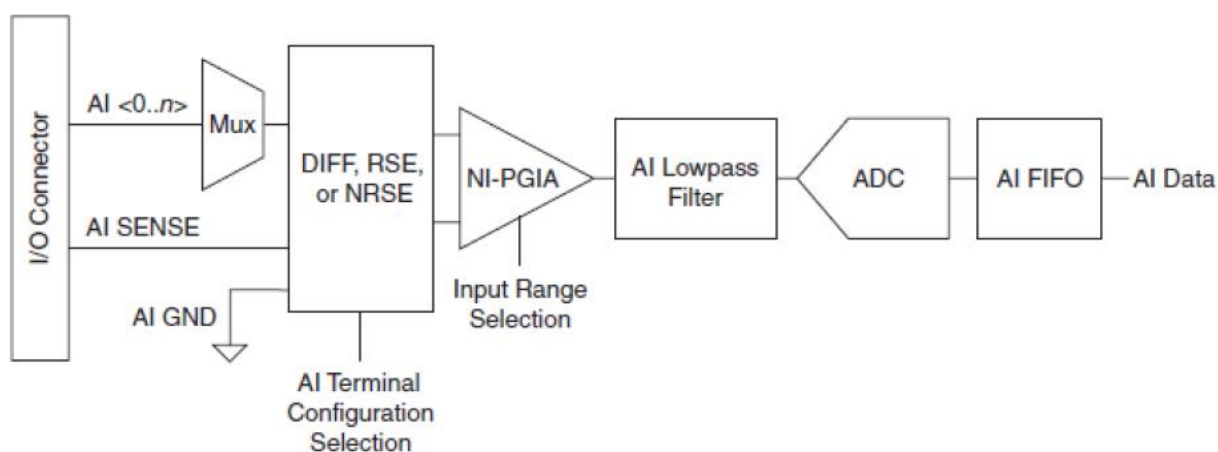


Рисунок 2.2 - Підсистема аналогового введення

Як видно зі схеми основними елементами зчитування аналогового сигналу складається з наступних принципових вузлів:

- I/O Connector - роз'єм введення-виводу (фізичне підключення);
- Mux - мультиплексор, що по черзі подає сигнали з кожного каналу аналогового введення;
- DIFF, RSE or NRSE - система конфігурації підключення каналу;
- NI-PGIA - інструментальний вимірювальний підсилювач з програмованим коефіцієнтом підсилення – мінімізує час встановлення для всіх діапазонів вхідного сигналу;
- AI Lowpass Filter - низькочастотний фільтр, при потягу відсікає частоти вище заздалегідь конфігурованої;

- ADC - АЦП перетворює сигнал на цифрову форму;
- AI FIFO – буфер аналогового введення типу «черга».

NI USB 6251 може виконувати як багаторазові так і одиночні аналого-цифрові перетворення із завданням нескінченної або кінцевої кількості відліків. Щоб уникнути втрат даних FIFO-буфер великого об'єму зберігає дані в процесі вимірювань аналогового вхідного сигналу. Також реалізований функціонал багаторазових аналого-цифрових перетворень з режимом прямого доступу до пам'яті (ПДП), за допомогою програмованого введення-виводу або переривань.

Діапазон амплітудних значень аналогового введення є рядом вхідних напруг, перетворених на цифрову форму із заданим допуском. На роздільну здатність каналу аналогового введення, яка являє собою напругу, що відповідає одному кванту АЦП, безпосередньо впливає заданий діапазон вхідного вимірювання. У нашому випадку 16-розрядний АЦП перетворює аналогові вхідні сигнали в одну з $65536 = 2^{16}$ кодових комбінацій, таким чином одне з 65536 можливих чисел, рівномірно розподілених по діапазону [20]. Отже, для діапазону вхідного сигналу від -5 до 5 В кожному кванту 16-розрядного АЦП відповідає напруга 160 мкВ.

Широкі можливості керування дозволяють проводити вимірювання аналогових величин як з апаратною синхронізацією, так і з програмною.

При програмній синхронізації збору даних частотою дискретизації керує програмне забезпечення. Для того, щоб ініціювати чергове аналого-цифрове перетворення, ПЗ посилає пристрої збору даних спеціальну команду. У NI-DAQmx режим програмної синхронізації збору даних називають синхронізацією на вимогу (on-demand). Цей режим також називають безпосереднім або статичним режимом і зазвичай використовується для отримання одного відліку даних. При апаратної синхронізації збору даних – частотою дискретизації управляє апаратно-формований цифровий сигнал AI Sample Clock, який може або генеруватися

самим пристроєм збору даних, або подаватися на нього із зовнішнього генератора.

Апаратна синхронізація в порівнянні з програмною має наступні переваги:

- є можливим завдання значно меншого інтервалу дискретизації;
- інтервал часу між відліками є детермінованим;
- є можливим використання апаратного запуску.

2.3 Реалізація ВП

2.3.1 Основний алгоритм розрахунку спектра сигналу

Для отримання конкурентних переваг порівняно з програмно-технічними засобами, що використовуються, було вирішено відмовитися від типової побудови спектра на основі алгоритмів ШПФ.

Формулу (1.12) для процесу обмеженого в часових рамках можна подати у вигляді: [21]

$$S(f) = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} U(t) \cdot e^{-i2\pi f t} dt. \quad (2.1)$$

де t_1, t_2 - межі інтервалу часу сигналу, для якого визначається спектр;

$U(t)$ – миттєве значення сигналу на момент часу t ;

f – поточна частота, на яку розраховується спектр.

Однак, працюючи при зчитуванні сигналу, ми отримуємо набір дискредитованих за рівнем і часом значень, що отримуються після АЦП. Для наближеної реалізації інтегрування у дискретній формі є низка алгоритмів, таких як метод прямокутників та метод трапецій. Оскільки кількість відліків у загальному випадку використання приладів досить

велика, для чисельного розрахунку виходячи з оптимізації ресурсів будемо використовувати метод прямокутників. У такому разі інтеграл буде представлений такою сумою:

$$S(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \cdot e^{-j2\pi f_i dt} dt, \quad (2.2)$$

де $dt = \frac{1}{f_k}$ – крок квантування сигналу за часом;

f_k – частота квантування сигналу;

N – кількість вибірок у вхідному буфері сигналу.

У розрахунку даної форми частота квантування задається початковими умовами, і обмежена максимальною частотою отримання вибірок з NI USB 6521. Кількість вибірок у вхідному буфері сигналу є прямо пропорційною часу аналізу та частоті квантування і обернено пропорційна кроку квантування за часом. Таким чином, кількість відліків буфера обчислюється як:

$$N = \frac{t_2 - t_1}{dt} \quad (2.3)$$

Для розрахунку спектрограми за формулою (2.2) необхідно кожної ітерації збору даних для нескінченного малих відрізків частоти необхідно повністю обчислювати інтеграл Фур'є. У реальних завданнях необхідно аналізувати спектр у заздалегідь відомому діапазоні частот.

Крім того, цей діапазон можна розбити відрізки з необхідною дискретністю значень. Для цього необхідно створити масив для збереження даних спектрограми довжиною, що дорівнює кількості інтервалів в

аналізованій смузі частот. Знаючи такі параметри розрахунку як верхня та нижня частоти діапазону, довжина масиву для збереження спектрограми, крок квантування за часом, число ітерацій миттєвих значень сигналу (довжина вхідного буфера), а також знаючи миттєве значення оцифрованого сигналу, можна розрахувати спектр без використання вхідного буфера для збереження даних сигналу, проводячи аналіз у реальному часі.

Повну суму можна отримати рекурсивно шляхом підсумовування результатів розрахунку в даний момент часу з попереднім результатом розрахунку:

$$(S_i) = S \cdot \frac{N - 1}{N} + S_i \cdot \frac{1}{N} \quad (2.4)$$

За вищеописаним методом розроблено алгоритм розрахунку спектрограми.

2.3.2 Реалізація алгоритму у середовищі LabVIEW

У програмній частині основне зчитування сигналу здійснюється за допомогою звернення до функціоналу пакету драйверів NI-DAQmx. Блок-діаграма основного алгоритму приладу відображена на рис. 2.3.

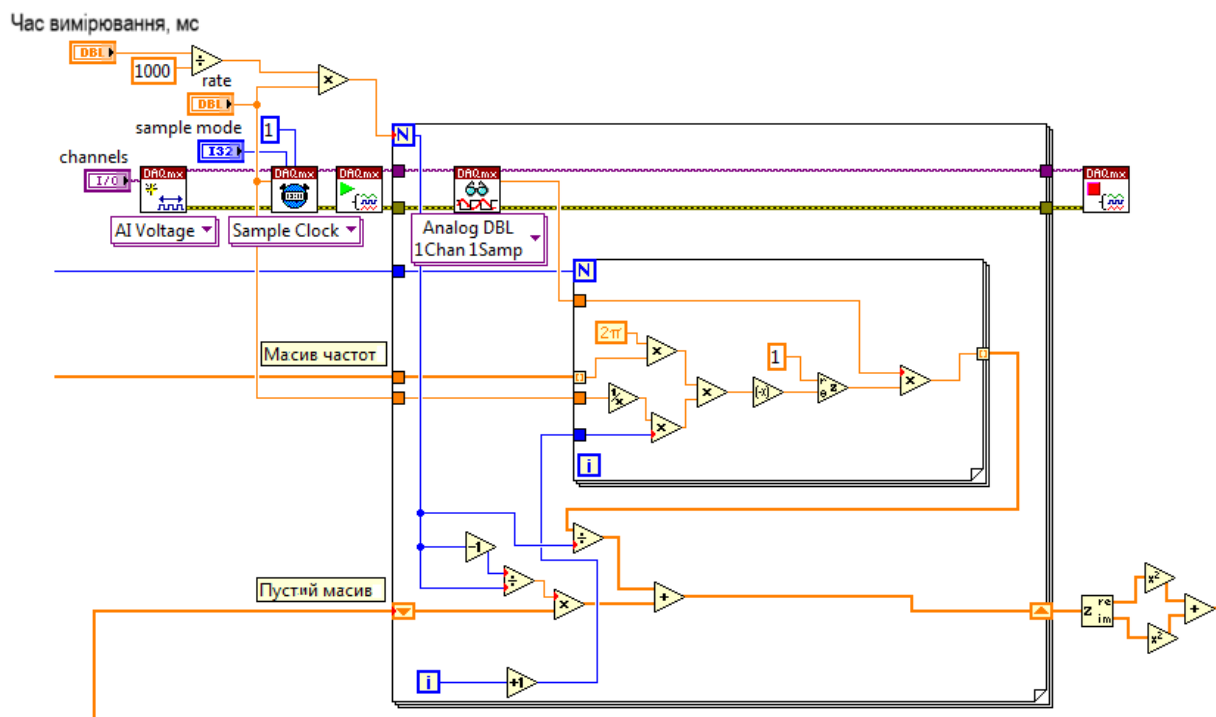


Рисунок 2.3 – Розрахунок спектра сигналу

Для отримання сигналу спочатку блок DAQmx Create Virtual Channel створює віртуальний канал для вимірювання напруги, асоціюючи його з фізичним каналом NI USB 6251. Далі через блок DAQmx Timing встановлюється кількість відліків зчитування. Тип тактування визначається вибором варіантів. Додаткові параметри тактування налаштовуються у властивостях цього віртуального приладу (ВП) та додаткових опціях. Значення констант Samples per Channel і Rate визначають, скільки буде братися відліків для каналу і частотою дискретизації. У нашому випадку налаштування блоків створення задачі зчитування дозволяють нам отримувати по 1 значенню в кожний момент часу із заданою частотою Rate. Частота обмежена фізичними можливостями пристрою, а так само при її виборі необхідно розуміти, що більш високе значення збільшить обчислювальні навантаження, але значення не може бути нижче подвоєного

значення частоти сигналу, що знімається, для того щоб відповідати теоремі Котельникова. Насправді це значення краще ставити втричі – чотири рази більше частоти досліджуваного сигналу, щоб одержати релевантних результатів. Після створення початкових умов та конфігурування системи аналогового введення блок VI DAQmx Read знімає квант стану сигналу, що обробляється циклом розрахунку спектральних складових. Розрахунок відбувається для кожної частоти з діапазону, що цікавить, з заданим дозволом аналізу. Результати додаються у загальну суму спектрограми у комплексній формі.

Справжні значення спектра розраховуються після завершення заданого часу аналізу.

Частотний масив для осі X при тимчасовому відображенні сигналу, формується відліком ітерацій циклу, з поправкою на раніше задану частоту зчитування сигналу.

2.4 Функціонал ВП «Аналізатор спектру»

Основне вікно віртуального приладу «Аналізатор спектра» наведено на рис. 2.4.

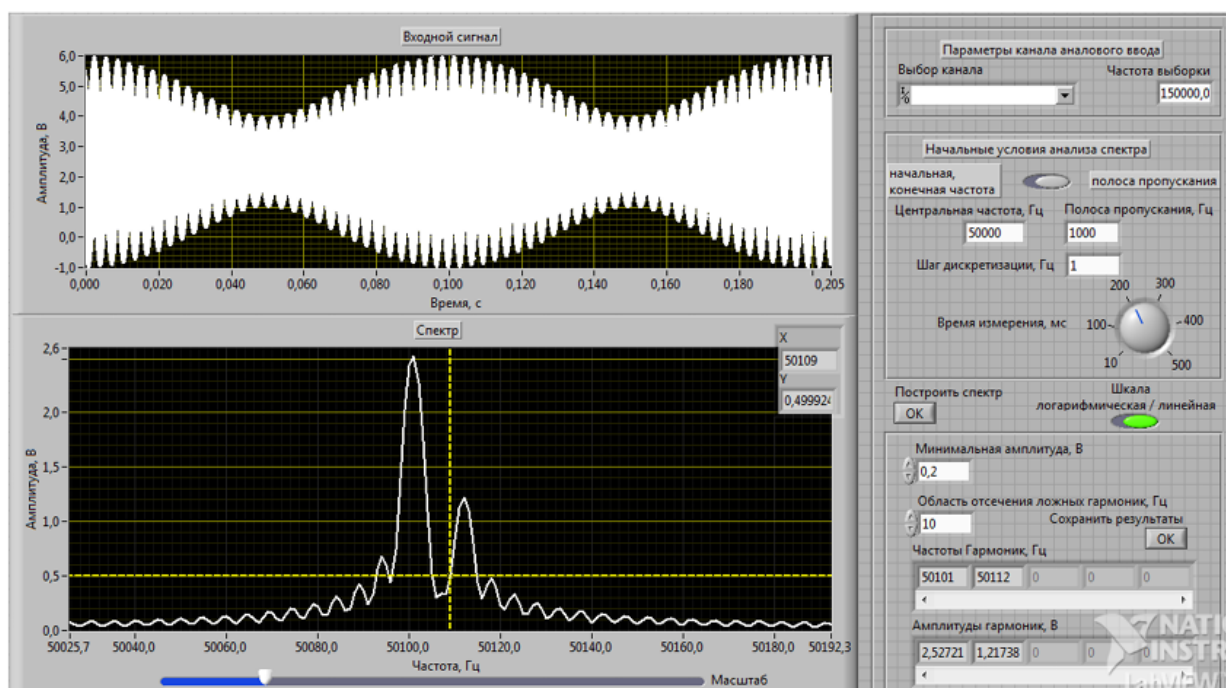


Рис. 2.4 Вікно віртуального приладу «Аналізатор спектру»

Як видно, у процесі аналізу сигнал відображається у часовій та частотній складових. Побудова спектра здійснюється після завдання початкових налаштувань, таких як канал вимірювання, частота вибірки, частотний діапазон аналізу та роздільна здатність. Після подачі на аналоговий канал сигналу із завдання початкових налаштувань необхідно натиснути кнопку "Побудувати спектр" для отримання спектрограми.

При побудованій спектрограмі реалізовано функціонал аналізу:

- переміщення курсору з прив'язкою до графіка та відображенням координат;
- масштабування осі частот щодо положення курсору;
- виведення чисельних значень частот та амплітуд гармонік, з обмеженням точності за частотою відсікання хибних гармонік та мінімальною амплітудою;
- збереження масиву гармонік у файл на персональному комп'ютері;
- розрахунок коефіцієнтів нелінійності сигналу.

Також реалізовано вибір відображення спектра в логарифмічному чи лінійному масштабах. Логарифмічний масштаб розраховується за такою формулою:

$$A = 20 \log_{10} \frac{S_i}{S_{min}}, \quad (2.5)$$

де A – розрахункове значення посилення у дБ;

S_i – амплітуда i -ої частотної складової;

S_{min} – мінімальне значення амплітуди спектрограми.

Розглянемо докладніше реалізацію функціоналу віртуального приладу.

2.4.1 Завдання діапазону частот

Одним із основних параметрів аналізу є завдання діапазону аналізованих частот та кроку дискретизації даного діапазону. У віртуальному аналізаторі спектра реалізовано два варіанти задачі даних початкових умов:

- центральна частота та смуга пропускання;
- мінімальна та максимальна частота.

Для того, щоб не захаращувати основну блок діаграму аналізатора спектра даний функціонал винесений в прилад, що підключається «Range to array». Блок-діаграму представлено на рис. 2.5.

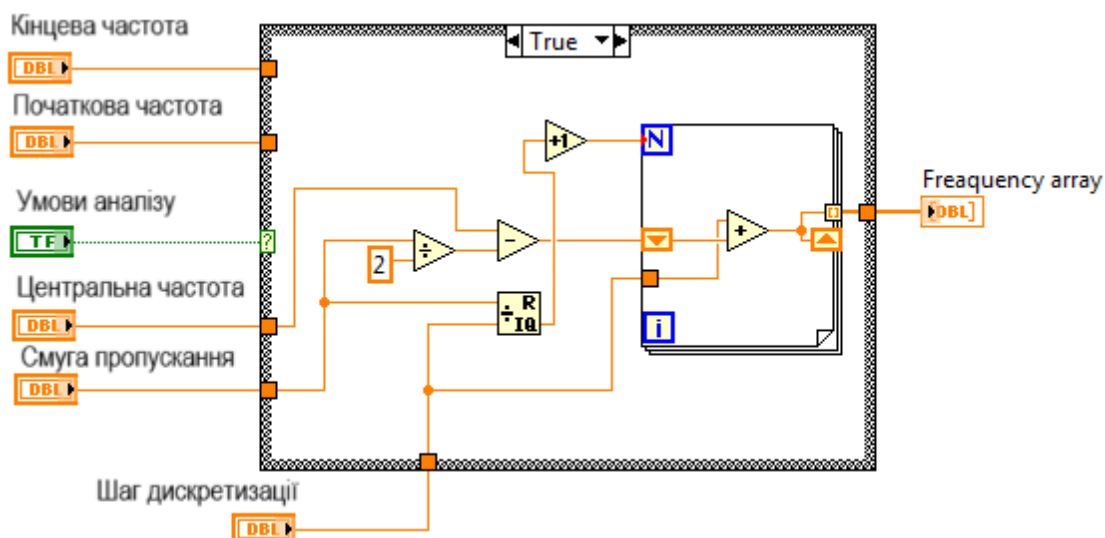


Рис. 2.5 Блок – схема віртуального під-приладу Range to array

При зміні способу завдання сигналу поля введення, які не задіяні в поточному способі, автоматично ховаються для підвищення зручності використання ВП.

2.4.2 Розрахунок гармонік

Класично аналіз отриманого спектра сигналу проводився візуально, використовуючи розмірну сітку і масштаб поточних значень на вертикальній і горизонтальній осях екрана аналізатора. Для імітації функціонала реалізована можливість зчитування координат курсора, а також зміни масштабу по осі частот, для можливості побачити поділ отриманих близьких піків сигналів на широкій смузі частот. Також реалізована можливість перемикання масштабу шкали амплітуд на логарифмічний для можливості аналізу сигналу з гармоніками, амплітуда яких різняться в кілька разів.

Крім цього розроблений віртуальний під-прилад «Harmonic research» здійснює аналіз розрахованого масиву значень спектру, і пошук гармонійних складових сигналу, з обмеженням мінімальної амплітуди або

посиленням і відстані по частоті між гармоніками, для того щоб виключити включення в результат шумових складових. Блок схема віртуального підприладу Harmonic research наведена на рис. 2.6.

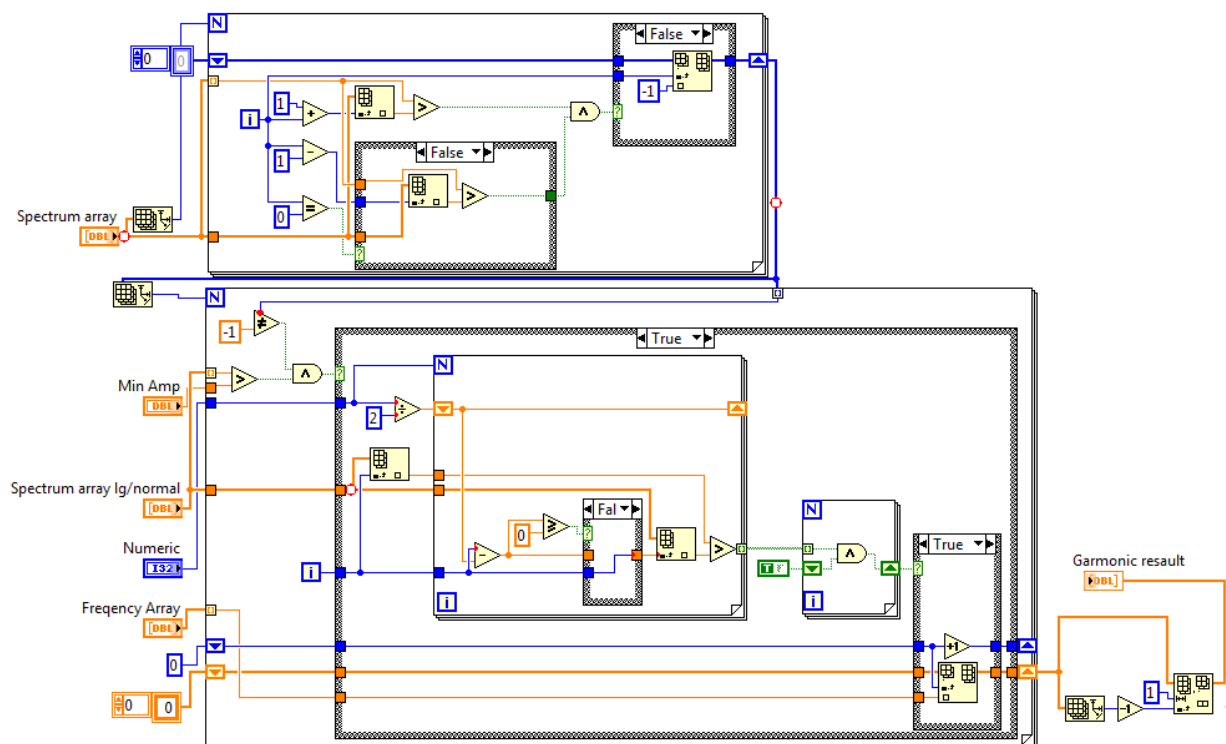


Рис. 2.6 Блок – схема віртуального підприладу «Harmonic research»

Алгоритм блоку пошуку гармонік з допустимою похибкою полягає в поетапному розбитті діапазону на рівні підмасиви. Надалі пошук локальних максимумів у кожному під-масиві, задовольняють умові, що вони більше заданої амплітуди. Після цього навколо знайдених локальних максимумів формуються підмасиви другого етапу, довжиною приватного допустимої похибки і заданим дозволом аналізу. Якщо локальні максимуми є максимумами у створених підмасивах другого етапу, то вони приймаються знайденими гармоніками. Їх значення та індекс у початковому масиві спектрограми записується. Індекс зіставляється зі значенням частоти гармоніки та отримана інформація виводиться на екран.

Отримані значення можна зберегти як двомірний масиву, натисканням на кнопку «Зберегти результати». Збереження реалізовано стандартним функціоналом LabVIEW.

2.4.3 Розрахунок коефіцієнтів гармонік

Важливими параметрами низькочастотних (кілогерцевої області) радіотехнічних сигналів є коефіцієнт нелінійних спотворень гармонік КГС (у зарубіжній літературі використовується термін total harmonic distortions THDf) та коефіцієнт гармонічних спотворень (КГС або THDr).

КГС це величина, що виражає ступінь нелінійних спотворень сигналу, що дорівнює відношенню середньоквадратичного значення всіх вищих гармонік сигналу до напруги першої гармоніки, розраховується за формулою:

$$\text{КГС} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots U_n^2}}{U_1} \cdot 100\%, \quad (2.6)$$

де U_i - амплітуда напруги i -ої гармоніки сигналу.

КНС - величина для кількісної оцінки нелінійних спотворень, що дорівнює відношенню середньоквадратичного значення всіх вищих гармонік сигналу, до середньоквадратичного значення спектральних компонентів всього сигналу крім постійної складової:

$$\text{КНС} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots U_n^2}} \cdot 100\%, \quad (2.7)$$

Для оцінки даних параметрів сигналу розроблено віртуальний під-прилад «THD», що аналізує спектрограму та здійснює обчислення. Блок-схему віртуального під-приладу наведено на рис. 2.7.

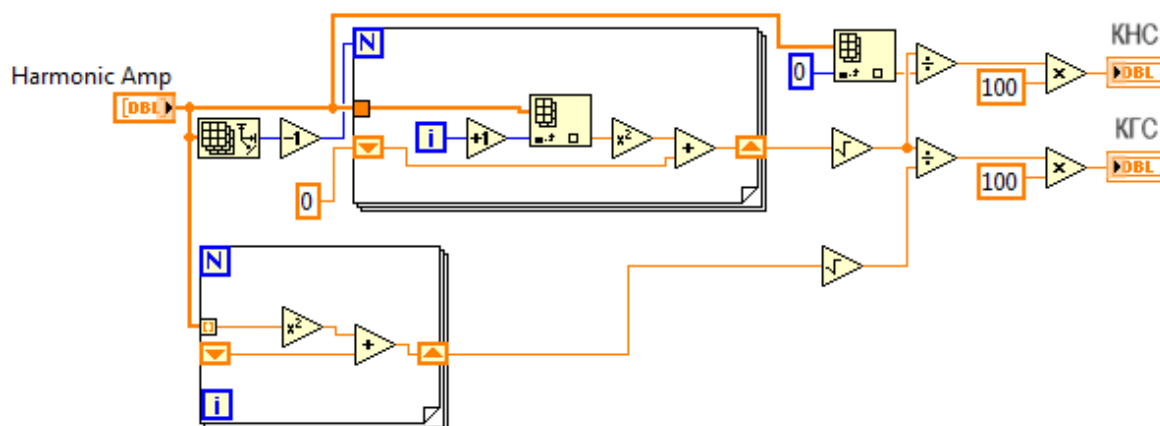


Рис. 2.7 Блок-схема віртуального під-приладу «THD»

Вхідними даними для розрахунку є вже отримані раніше масиви амплітуд і частот гармонік.

Основне вікно блок-схеми віртуального приладу "Аналізатор спектру" наведено у додатку А.

Висновки до другого розділу

У розділі наведено результати розробки технічного завдання та характеристики використовуваного в роботі технічного та програмного забезпечення.

Розроблено і обгрунтовано основний алгоритм розрахунку спектру сигналу без використання швидкого перетворення Фур'є. Проведено вибір та обгрунтування програмного середовища для розробки аналізатора спектру, проаналізовано можливості пакету драйверів використовуваного у роботі. Результатом роботи є розроблений у середовищі LabVIEW

віртуальний прилад «Аналізатор спектру». Аналіз отриманих спектрів сигналів проводився візуально, використовуючи розмірну сітку і масштаб поточних значень на вертикальній і горизонтальній осях екрана аналізатора. Для імітації функціонала реалізована можливість зчитування координат курсора, а також зміни масштабу по осі частот, для можливості побачити поділ отриманих близьких піків сигналів на широкій смузі частот. Також реалізована можливість перемикання масштабу шкали амплітуд на логарифмічний для можливості аналізу сигналу з гармоніками, амплітуда яких різняться в кілька разів.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІРТУАЛЬНОГО ПРИЛАДУ

Для виявлення функціональних можливостей розробленого віртуального приладу було проведено серію експериментів. Проведено випробування працездатності розробленого ВП в умовах лабораторії шляхом порівняння з фізичним аналізатором спектра. Також проведено чисельний експеримент із тестування можливостей розробленого ВП «Аналізатор спектру». Проаналізовано коректність побудови спектральних складових тестових сигналів із відомим спектром.

3.1 Опробування

Тестове випробування було проведено за умов лабораторії. Для цього було використано наступне обладнання:

- ПК із встановленим програмним пакетом LabVIEW із набором драйверів DAQmx;
- DAQ пристрій М серії NI USB 6251;
- генератор сигналу АКТАКОМ AWG-4105 (2 екземпляри); - осцилограф цифровий АКТАКОМ АСК-2041.

Генератор використовувався для завдання періодичних сигналів стандартних форм. Цифровий осцилограф АСК-2041 з можливістю ШПФ використовувався як зразковий засіб вимірювання (ЗВ) під час аналізу спектра.

Зовнішній вигляд експериментальної установки приведено на рис. 3.1.



Рисунок 3.1 – Експериментальна установка

Вихід генератора був паралельно підключений до входу осцилографа АСК-2041 та аналогового входу пристрою NI USB 6251. При генерації використовувалися сигнали різних форм: синусоїда, меандр, пілкоподібний, трикутний. Проводилося порівняння отриманих спектрограм на осцилографі, що використовує алгоритми БПФ, та у ВП «Аналізатор спектру», заснований на інтегралі Фур'є. За результатами випробування було отримано результати працездатності розробленого ВП «Аналізатор спектру».

Також під час випробування було проведено аналіз розрахунку коефіцієнтів спотворення. Для цього на вхід були подані сигнали меандр і пілкоподібний. КДІ (КНІ) для ідеальних сигналів відомий і дорівнює для меандру 48% (43%), для пілкоподібного 80% (63%).

Аналіз проводився для сигналів частотою 500 Гц, діапазоні частот від 0 до 15000 Гц з кроком дискретизації 1 Гц. Побудовану спектрограму пілкоподібного сигналу в логарифмічному масштабі наведено на рис. 3.2.

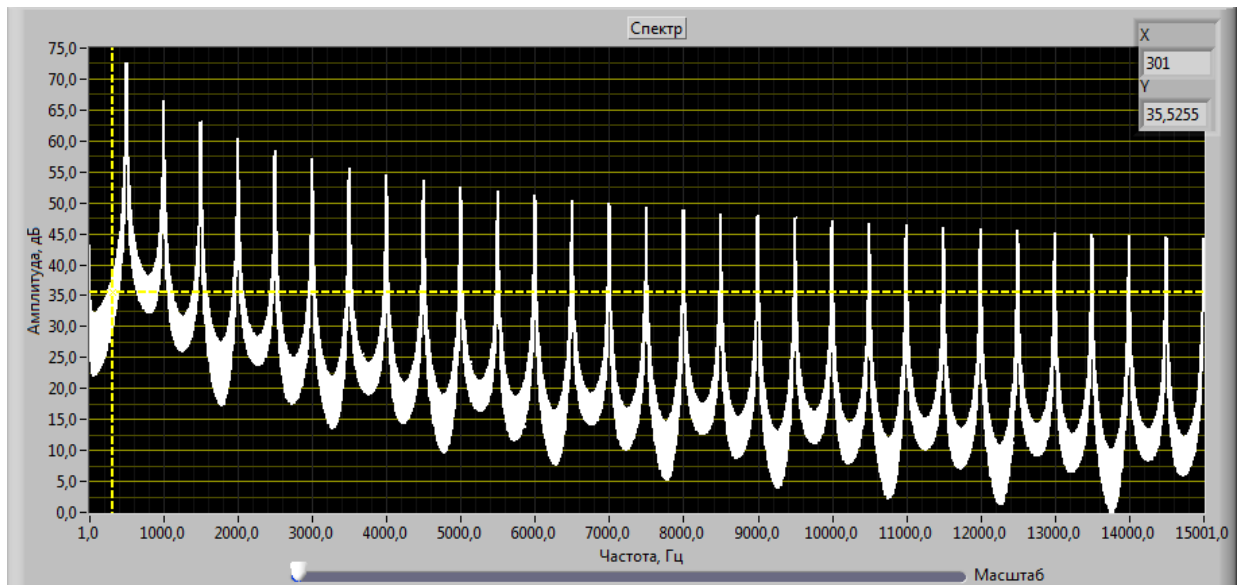


Рис. 3.2 Спектрограма пилоподібного сигналу

Розрахунок коефіцієнтів віртуальним приладом проводився після завдання параметрів пошуку гармонійних складових. Результати наведено на рис. 3.3.

КГС, %	КНС, %
47,4507	42,8693
Провести розрахунок	
OK	

а) меандр

КГС, %	КНС, %
78,5219	61,7581
Провести розрахунок	
OK	

б)

Рис.3.3 Розраховані ВП коефіцієнти спотворень :

а) меандр б) пилоподібний

Як видно, результати близькі до ідеальних значень. Відмінності пояснюється тим, що при отриманні розрахункового значення сигнал аналізується на нескінченному діапазоні частот, при реальному аналізі діапазон частот обмежений, і до уваги потрапляють лише гармоніки до нього вхідні.

3.2 Визначення технічних характеристик

Чисельний експеримент здійснювався поза умовами лабораторії.

Для цього до віртуального приладу було додано віртуальний під-прилад «Generate.vi» генератор тестового сигналу з наступним функціоналом:

- формування вибірки відповідної сигналу різних форм, з можливістю завдання частоти, амплітуди та частоти дискретизації, зміщення щодо нуля;
- підключення підмішування другого сигналу з різними від першого параметрами (форма, частота, амплітуда);
- підключення підмішування «білого шуму» в згенеровану вибірку.

Блок-схему під-приладу наведено на рис. 3.4.

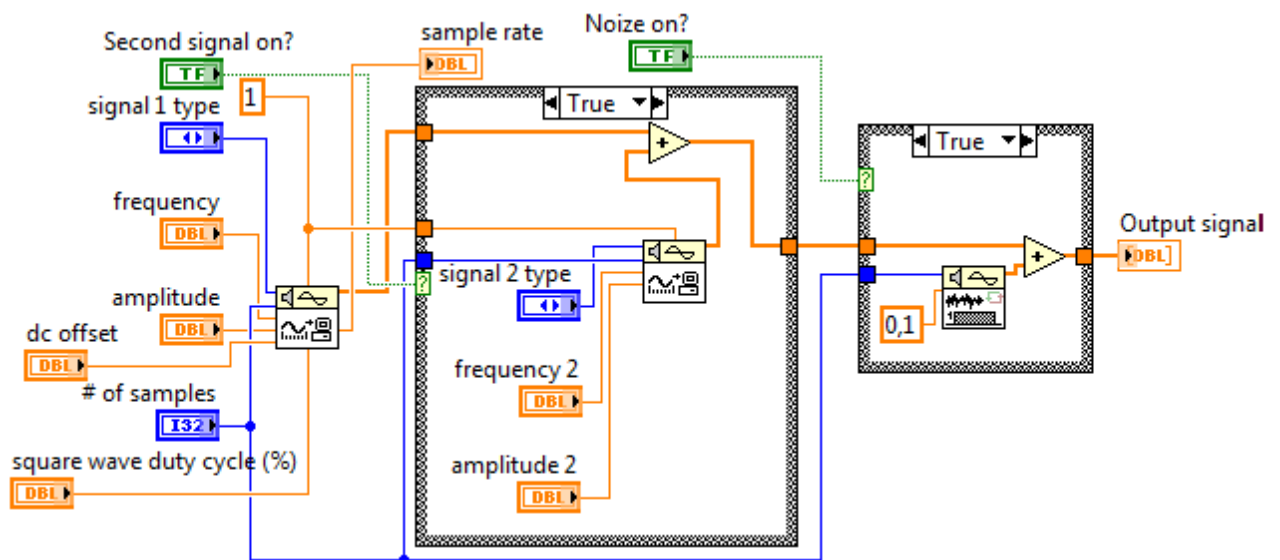


Рис. 3.4 Блок-схема ОП «Generate.vi»

Мета експерименту: підтвердження функціоналу, відображеного у технічному завданні.

Для планування експериментів необхідно визначити фактори, що впливають на результат. До таких віднесено:

- форма аналізованого сигналу;
- частота одержуваної вибірки сигналу;
- час аналізу.

3.2.1 Експеримент № 1: Визначення дозволу аналізу у верхніх межах діапазону

Метою даного експерименту є підтвердження високої роздільної здатності розробленого ВП у верхній частині діапазону частот, а також порівняння отриманих результатів зі стандартним ОП «Spectral Measurement» середовища LabVIEW.

Для цього за допомогою віртуального генератора, було створено вибірку з частотою отримання значень 150000 с, відповідна сумі двох синусоїдальних сигналів з параметрами:

Сигнал 1:

- частота 50101 Гц;
- амплітуда 2,5В;

Сигнал 2:

- частота 50111 Гц;
- амплітуда 1 ст.

Початкові умови аналізу спектра:

- центральна частота 50000 Гц;
- смуга пропускання 2000 Гц;
- крок дискретизації діапазону 1 Гц.

У першому випадку час аналізу був заданий мінімальним, і становив 10 мс. При цьому віртуальний пристрій побудував спектрограму з великим розмиттям по частоті. Спектрограму за часу аналізу 10 мс наведено рис. 3.5.

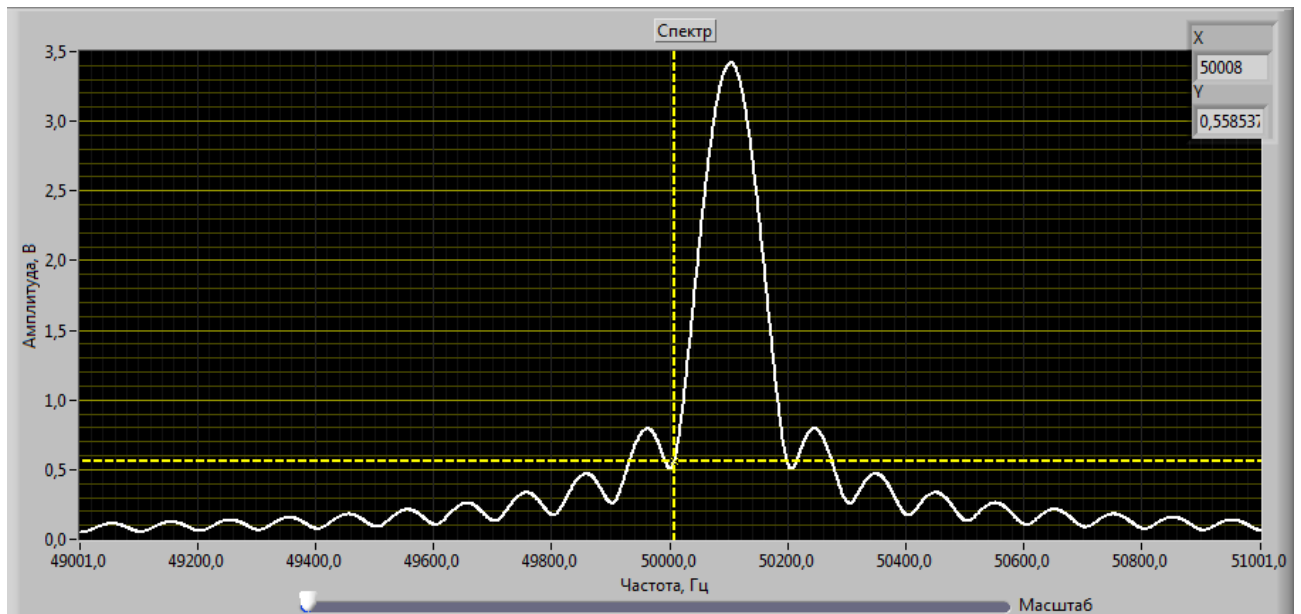


Рис 3.5 Спектрограма биття за часу аналізу 10 мс

Як бачимо, спектрограму побудовано некоректно. Це обумовлено тим, що заданий сигнал має форму биття з періодом близько 11 мс. Під час аналізу ми зчитуємо менше одного періоду вхідного сигналу.

Скористаємося реалізованим функціоналом і збільшимо час аналізу до 100 мс, підвищивши точність визначення спектру. Побудовану спектрограму за часу аналізу 100 мс наведено на рис. 3.6.

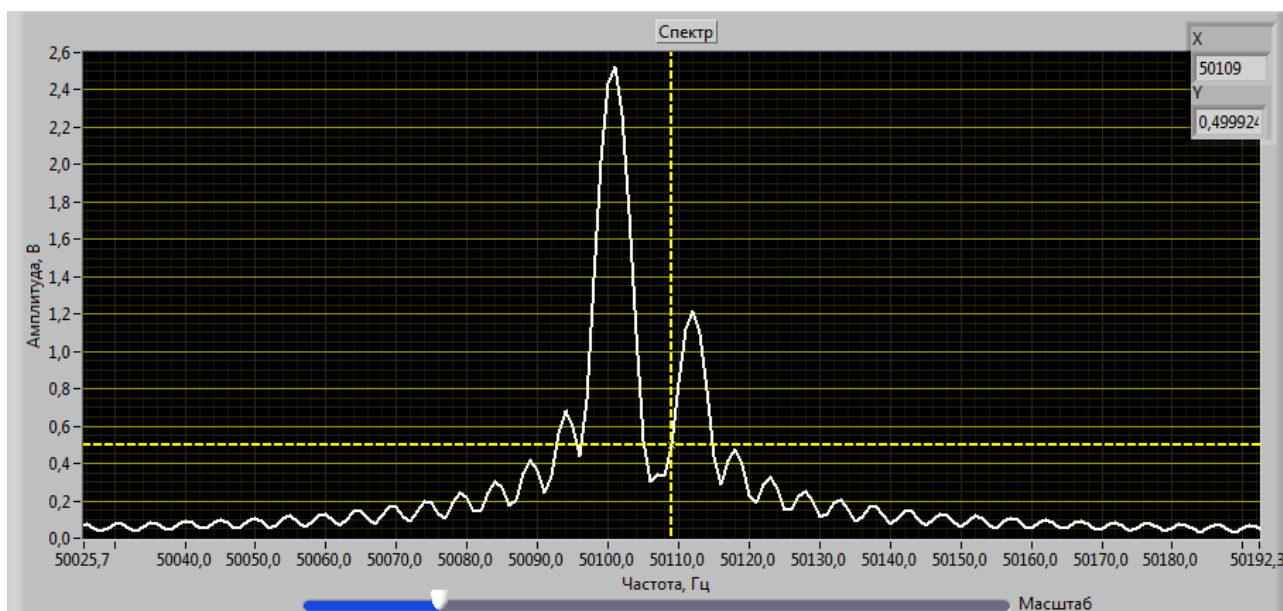


Рис. 3.6 Спектрограма биття при аналізі 100 мс

Дану спектрограму побудовано коректно. Є дві частотні складові, що відповідають початковим умовам. Скориставшись масштабом осі частот, можна докладніше розглянути спектрограму, побудовану на великому діапазоні.

Для визначення чисельних значень гармонік поставимо початкові умови щодо аналізу: мінімальна амплітуда 0,2 В і область відсікання 10 Гц (відповідає відсіканню максимумів спектрограми в діапазоні від мінус 5 Гц до плюс 5 Гц від знайденого екстремуму). Результат аналізу наведено на рис. 3.7.

Максимальна амплітуда, В

0,2

Область відсікання хибних гармонік, Гц

10

Зберегти результати

Частоти гармонік, Гц

50101 50112 0 0 0

Амплітуди гармонік, В

2,52721 1,21738 0 0 0

OK

Рис. 3.7 Оцінені гармоніки

Знайдені частоти гармонік у допуску на етапі дискретизації аналізу (± 1 Гц). Абсолютна похибка визначення амплітуди першої гармоніки склала 0,03 В, другий: 0,22 В. Похибка при обчисленні амплітуди другої гармоніки пояснюється тим, що при проведенні аналізу спектра перша гармоніка через близькість по частоті істотно впливає на розрахунок.

Порівняємо отримані результати зі спектром на виході стандартного ОП "Spectral Measurement" пакету LabVIEW. У налаштуваннях цього ВП було включено вікно типу Hamming. Результати стандартного ВП наведено на рис. 3.8.

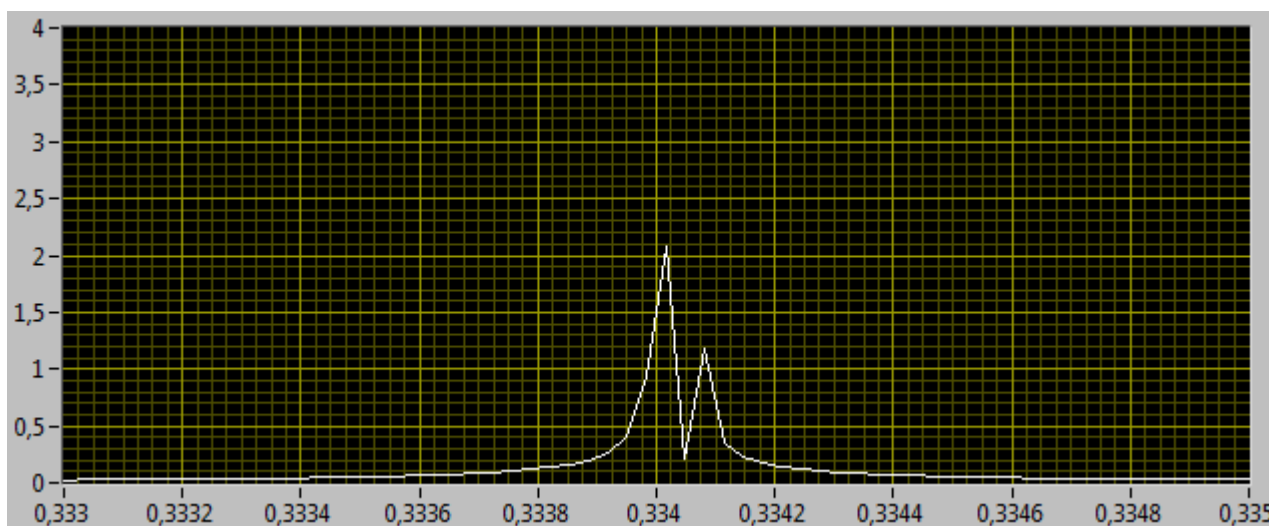


Рис. 3.8 Спектр биття стандартного ОП «Spectral Measurement»

Як видно амплітуду першої гармоніки на спектрі зі стандартного ВП розраховано некоректно і дорівнює значенню близько 2,1, амплітуда другої гармоніки є близькою до значення 1,2 В.

В даному експерименті проаналізовано роздільну здатність розробленого ВП у верхній частині шкали частот. Також зазначено, що зі збільшенням часу аналізу точність також зростає. Порівняно зі стандартним ОП «Spectral Measurement» дані щодо амплітуди отримані коректніші.

3.2.2 Експеримент № 2: Визначення спектра не періодичних сигналів

Однією з переваг застосування інтеграла Фур'є в порівнянні з алгоритмами ШПФ є можливість повчання коректного спектра не періодичного сигналу.

Ціль експерименту: оцінити можливості побудови спектрів неперіодичних сигналів. Зробити порівняння з результатами стандартного ВП.

Для можливості формування одиночних імпульсів у віртуальний під-прилад було внесено необхідні зміни, що обнулюють не цікаві частини вибірки сигналу.

Для першого сигналу було обрано одиночний прямокутний імпульс тривалістю $\tau = 0,1$ с і амплітудою $A = 5$ В.

Неперіодичний сигнал, як впливає з розділу 1, має суцільний спектр. Спектр одиночного прямокутного імпульсу розраховано за такою формулою:

$$S(\omega) = A\tau \left| \frac{\sin \frac{\omega\tau}{2}}{\frac{\omega\tau}{2}} \right|. \quad (3.3)$$

Розрахунковий спектр прямокутного імпульсу наведено рис. 3.9.

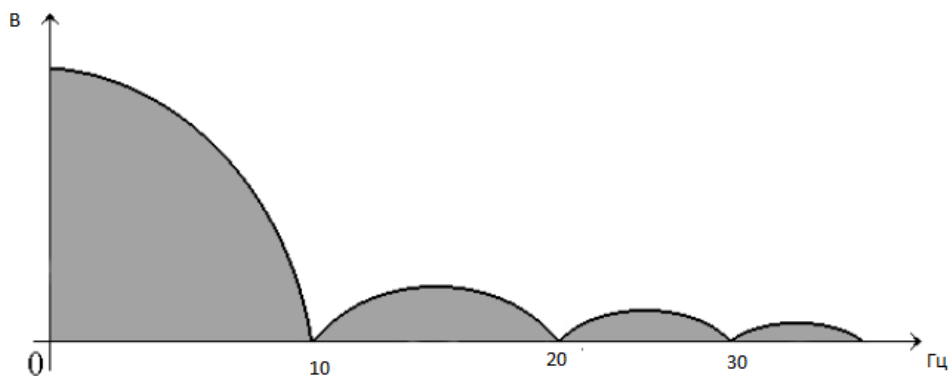
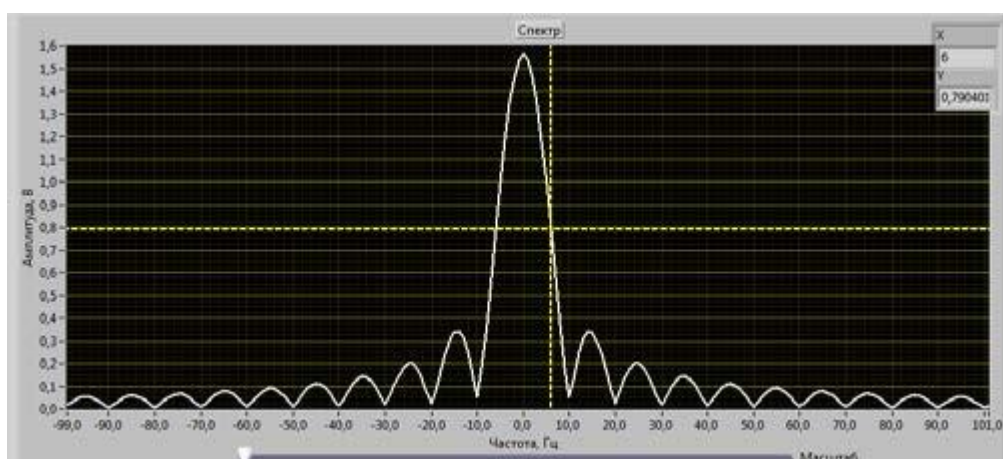
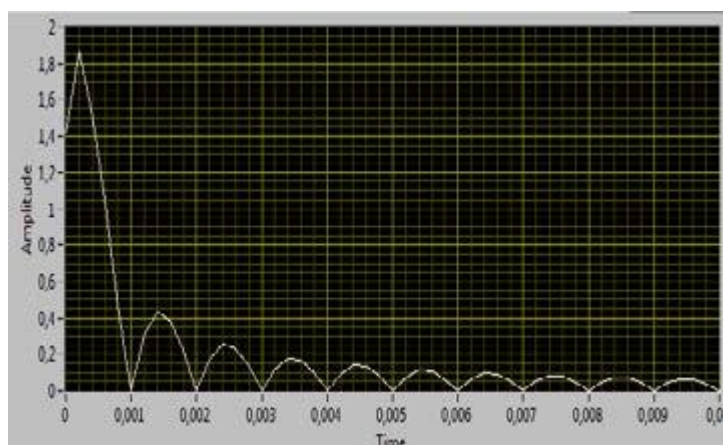


Рис. 3.9 Розрахунковий спектр прямокутного імпульсу

Проведемо аналіз спектру діапазоні від мінус 100 до плюс 100 Гц, крок дискретизації 1 Гц, час аналізу 500 мс. Результат аналізу відображено на рис. 3.10.



а)

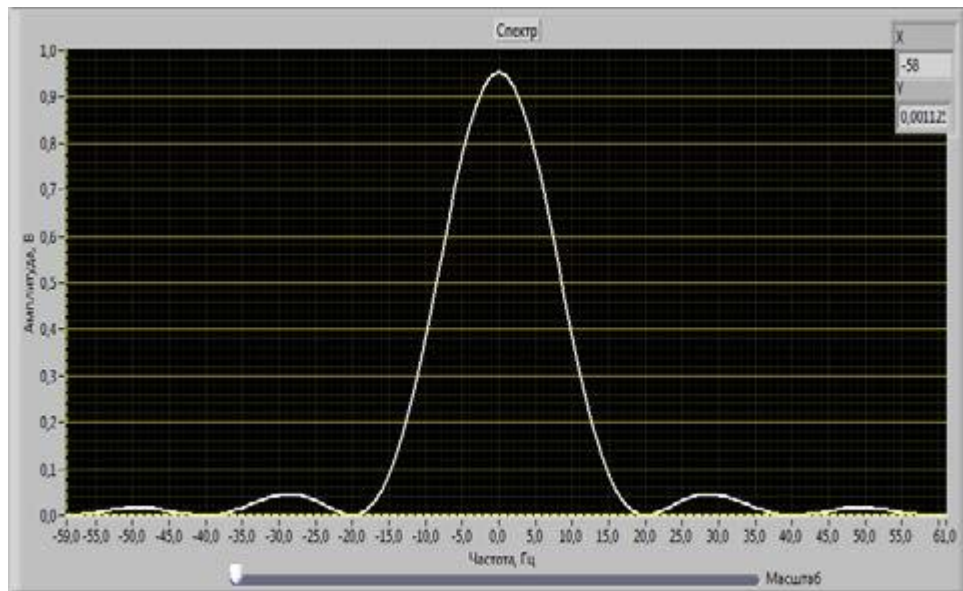


б)

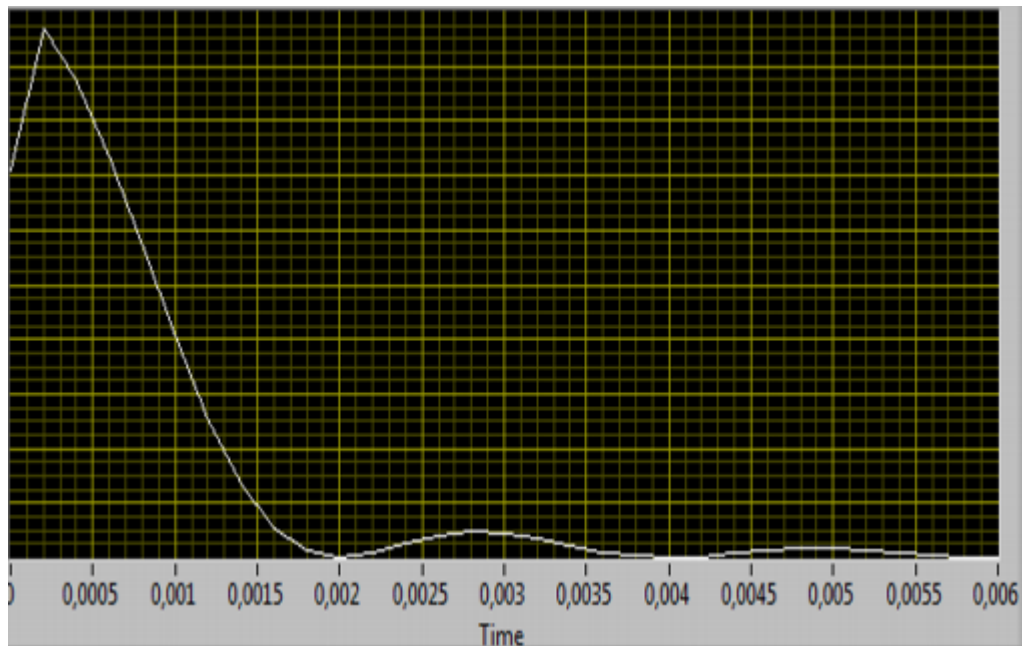
Рисунок 3.10 – Спектр прямокутного імпульсу :

а) ВП «Аналізатор спектру»; б) стандартний ВП

Як видно із побудованої спектрограми частоти згасання обчислені коректно. При порівнянні зі спектрограмою, одержаною стандартним ВП, можна відзначити не коректне відображення спектра на початку шкали частот. Аналогічні результати були отримані під час аналізу спектра трикутного імпульсу. Побудовані спектрограми зображені на рис. 3.11.



а)



б)

Рисунок 3.11 – Спектр трикутного одиночного імпульсу :

а) ВП «Аналізатор спектру» б) стандартний ВП

3.2.3 Експеримент №3: Визначення спектра послідовності прямокутних імпульсів

Коректність роботи ВП «Аналізатор спектру» можна перевірити, використовуючи його для аналізу сигналів складної форми, спектр яких відомий, та параметри спектра можна розрахувати математично.

Спочатку вибрано періодичну послідовність прямокутних імпульсів. Такий сигнал характеризується частотою, шпаруватістю та амплітудою. Знаючи дані параметри, спектр може бути розрахований за відомими формулами.

Для цього експерименту обраний сигнал з параметрами:

- амплітуда $A = 5$;
- частота $f = 500$ Гц;
- шпаруватість 5.

Сигнал у нашому експерименті, для зручності математичного розрахунку симетричний щодо осі амплітуд, для цього під-прилад, що генерує вибірку, встановлено налаштування зміщення фази сигналу на 36 градусів. Вид сигналу отриманий ВП представлено на рис. 3.12.

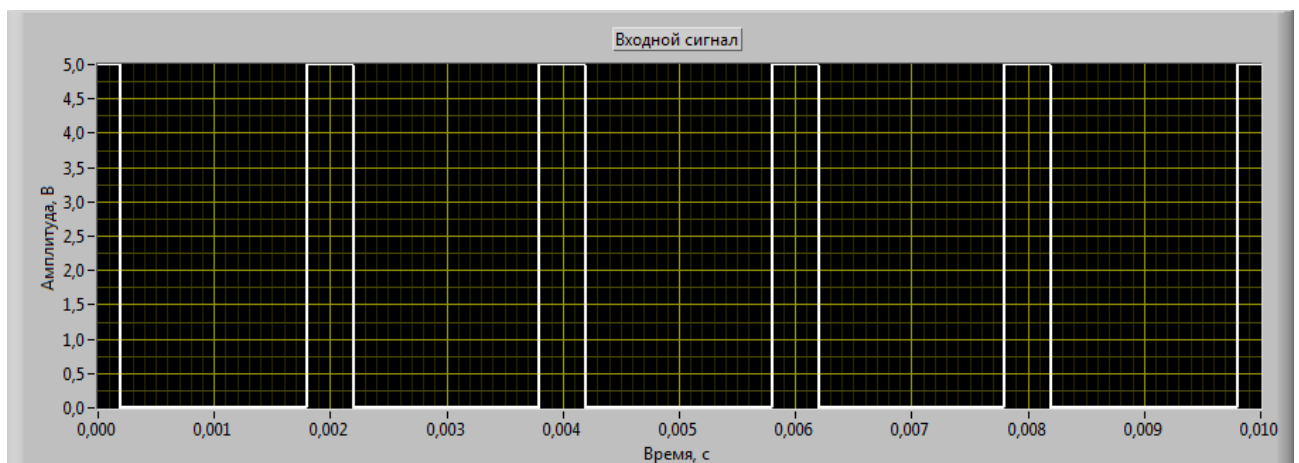


Рис. 3.12 Послідовність прямокутних імпульсів

Спектр цього сигналу розраховано за такою формулою:

$$S_n = \frac{2A}{\pi n} \cdot \left| \sin \left(n\pi \frac{\tau}{T} \right) \right|, \quad (3.3)$$

де S_n – амплітуда гармоніки n ;

$\frac{\tau}{T}$ - скважність сигналу.

Аналіз спектра проводився на діапазоні від 0 до 10000 Гц з роздільною здатністю аналізу в 1 Гц. Розрахункові значення за формулою (3.2) амплітуд гармонійних складових у цьому діапазоні наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Розрахункові значення спектра прямокутного сигналу

Частота гармоніки, Гц	0	500	1000	1500	2000	3000	3500	4000	4500
Амплітуда, В	2,000	1,871	1,514	1,009	0,468	0,312	0,432	0,378	0,208
Частота гармоніки, Гц	5500	6000	6500	7000	8000	8500	9000	9500	
Амплітуда, В	0,170	0,252	0,233	0,134	0,117	0,178	0,168	0,098	

Визначену спектрограму, побудовану за допомогою розробленого ВП «Аналізатор спектра», наведено на рис. 3.13.

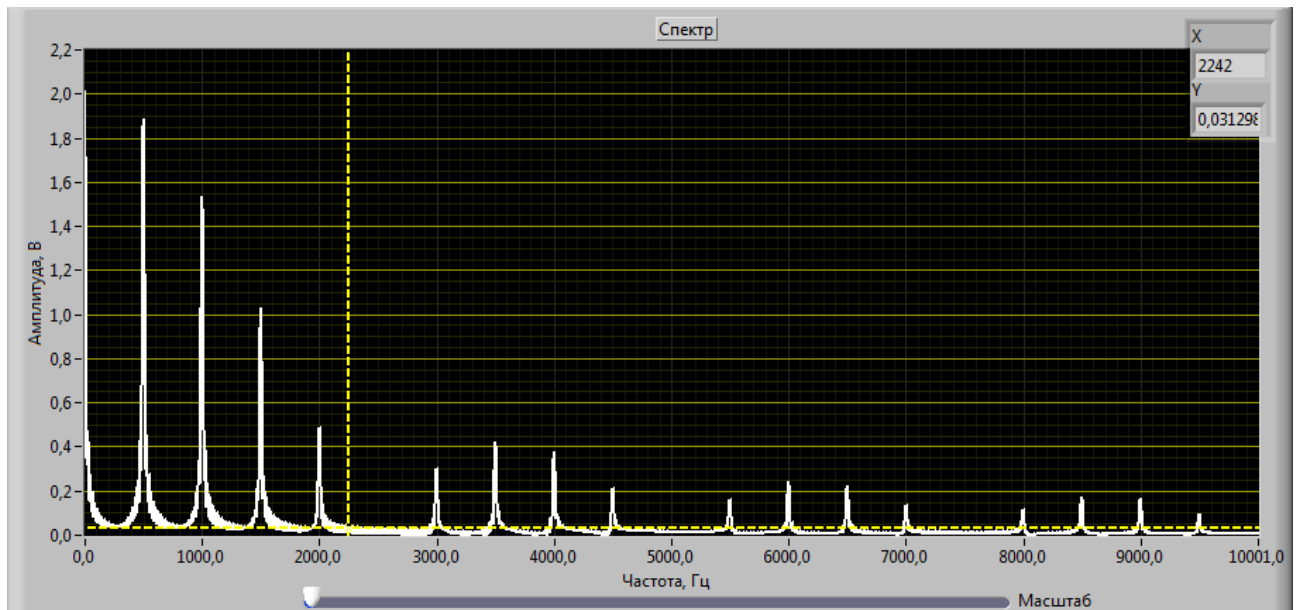


Рис. 3.13 Побудована ВП спектрограма послідовності прямокутних імпульсів

Спектрограма є повністю відповідною для даного типу аналізованого сигналу. Ми бачимо постійну складову та хвилеподібне згасання гармонік. Визначені віртуальним приладом, при значенні мінімальної амплітуди 0,1 В та області відсікання хибних складових 100 Гц, значення гармонік наведено в таблиці 3.

Таблиця 3.2

Визначені ВП значення спектра

Частота гармоніки, Гц	0	500	1000	1500	2001	2999	3499	3999	4499
Амплітуда, В	1,928	1,804	1,460	0,974	0,453	0,303	0,418	0,366	0,201
Частота гармоніки, Гц	5501	6000	6501	7001	7999	8499	9000		
Амплітуда, В	0,165	0,245	0,226	0,130	0,114	0,174	0,164		

Як видно з табл. 3.2 гармоніка з частотою 9500 Гц у вивантаженні не потрапила, тому що не пройшла за критерієм мінімального значення амплітуди. Похибка щодо частоти гармоніки відповідає заданому дозволу аналізу в ± 1 Гц. Відносна похибка при визначенні амплітуди гармонік для даного експерименту близька 3,5% для низьких гармонік з поступовим зменшенням до 2,5% для більш високих.

Висновки по третьому розділу

Розроблено експериментальну установку та проведено випробування працездатності розробленого ВП в умовах лабораторії шляхом порівняння з фізичним аналізатором спектра. Також проведено чисельний експеримент із тестування можливостей розробленого ВП «Аналізатор спектру». Результати аналізу результатів досліджень експериментальних доказали ефективність розробки.

ВИСНОВОК

Роботу присвячено дослідженню алгоритмів, що реалізують функції спектрального аналізу. В роботі проведено побудову та систематизацію алгоритмів, що реалізують функції аналізаторів спектра.

Під час дипломного проєктування було вивчено математичні основи побудови спектра сигналу, описано алгоритми функціонування реальних аналізаторів спектра. Наведено переваги та недоліки існуючих лабораторних програмних та апаратних засобів. Основні недоліки пов'язані із закладеним в основі алгоритму ШПФ, а також недостатнім функціоналом з налаштування початкових даних аналізу.

Отримана інформація стала основою алгоритму побудови спектра сигналу, що базується на розрахунку інтеграла Фур'є в комплексній формі для дискретного сигналу. Алгоритм дозволяє, за необхідності, виконувати аналіз спектра сигналу реальному часі. На основі алгоритму розроблено програмний віртуальний прилад "Аналізатор спектру".

Функціонал віртуального приладу доповнено інструментами аналізу, що дає змогу отримувати чисельні значення параметрів спектра.

У ході випробувань розробленого програмного «Аналізатора спектра» отримано підтвердження необхідних технічних характеристик, коректну побудову спектрів як періодичних, так і не періодичних сигналів.

Віртуальний прилад можна застосовувати під час проведення процесу вимірювань застосовувати у метрологічних лабораторіях на виробництві та у навчальних лабораторіях вишів при проведенні лабораторних практикумів.

Подальший розвиток проєкту полягає у додаванні функціоналу розрахунку фази сигналу, паралельного аналізу двох сигналів, з можливостями математичних операцій із побудованими спектрами.

Віртуальний прилад дозволяє поглибити розуміння частотної складової електричних сигналів, на практиці зіставити розраховані математично та

реальні спектри, а також сформулювати уявлення про дискретизацію аналогових величин.

ПЕРЕЛІК ПОСЛАНЬ