

APPLICATION OF THE METHOD OF ANALYSIS OF HIERARCHIES TO ASSESS THE SOFTWARE OF COMPLEXES OF AUTOMATION MEANS

Y. Budaretskiy, Y. Shchavinskiy, V. Kuznetsov, S. Nikolayev

The article analyzes the current state of the methods for assessing the software of complexes of automation of fire control of artillery systems supplied to the artillery units of the Ground Forces of the Armed Forces of Ukraine. The actual problem of verification and certification of the developed samples of special software of such complexes is determined, which consists in the absence of established assessment procedures, a large subjective component in the existing methods for assessing software, the inconsistency of their norms in accordance with state and international standards. In the proposed conceptual model for assessing the quality of software, new metrics have been defined that will characterize special software that ensures the functioning of complexes of fire control automation systems for artillery subunits when they perform fire engagement tasks and which reflects the peculiarity of the use of artillery systems. To assess the proposed new metrics, the elements of their assessment and the mathematical apparatus for carrying out calculations are determined and substantiated. To determine the magnitude of the influence of indicators on the overall quality of software, a new approach is proposed, which consists in applying the method of analyzing hierarchies when determining the priority of indicators of elements, metrics, criteria and factors at each level of the hierarchy. The use of multicriteria analysis of the hierarchy analysis method ensures that the subjectivity of experts is avoided when assessing the quality of special software, it makes it possible to identify bottlenecks in the developed tactical and technical requirements for the software of the indicated complexes of automation tools for artillery systems and takes into account the mutual influence of indicators on the overall quality. A certain improved methodology, which more fully covers the software assessment process, will in the future be the basis for creating a quality assurance system for software of automation systems and forming a tool for their certification.

Key words: software, hierarchy analysis method; quality standards; software requirements; criteria for assessing the quality of software; software quality indicators.

УДК: 621.317.37

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.25.2021.12-23>С.О. Тишко¹, О.О. Лаврут², В.Г. Смоляр³, О.Є. Забула⁴, Ю.М. Черніченко⁴

¹ Харківське представництво генерального замовника – Державного космічного агентства України, Харків

² Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

³ Коледж сержантського складу Військового інституту телекомунікації та інформатизації імені Героїв Крут, Полтава

⁴ Національна академія Національної гвардії України, Харків

ЗАСТОСУВАННЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ФАЗОВОГО ЗСУВУ СИГНАЛІВ З РІВНИМИ АМПЛІТУДАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ДВОПІВПЕРІОДНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ХАРАКТЕРИСТИК ОЗБРОЄННЯ

В статті визначено перелік технічних характеристик озброєння та військової техніки (ОВТ), значення яких вимірюється із застосуванням фазових методів. Проведено аналіз відомих методів, що знайшли широке застосування у вимірювальній техніці, яка призначена для визначення технічних характеристик, пов'язаних з вимірюванням фазового зсуву під час розробки, виготовлення та експлуатації ОВТ. На підставі даного аналізу було визначено, що вимірювальні системи, призначені для визначення фазового зсуву двох гармонічних сигналів, у своєму складі мають два канали передачі інформації. Ця архітектура реалізації вимірювальних систем приводить до того, що суттєвий вплив на точність вирішення запропонованої вимірювальної задачі має складова похибки, обумовлена фазовою несиметрією каналів передачі сигналів, а також внутрішні та зовнішні шуми. В якості альтернативного підходу рішення вимірювальної задачі визначення фазового зсуву двох гармонічних сигналів, який дозволить суттєво зменшити складову похибки, обумовлену фазовою несиметрією каналів передачі інформації, запропоновано використовувати сигнал, отриманий при сумуванні гармонічних сигналів після проведення двопівперіодного перетворення з подальшим проведенням його спектрального аналізу. З метою реалізації вищезазначеного підходу проведено постановку завдання з визначення фазового зсуву двох гармонічних сигналів, з використанням спектрального аналізу сигналу, отриманого при сумуванні гармонічних сигналів після проведення їх двопівперіодного перетворення. Визначено перелік припущень,

необхідних для синтезу аналітичних співвідношень, які встановлюють взаємозв'язок між спектрами фаз та амплітуд (потужності) сигналу, отриманого при сумуванні гармонічних сигналів після проведення їх двопівперіодного перетворення та фазовим зсувом двох гармонічних сигналів. Запропоновані аналітичні співвідношення, які встановлюють взаємозв'язок між вищезазначеними характеристиками. Показано, що значення спектра фаз та амплітуд, які розраховані з використанням запропонованих виразів, відрізняються від значень, які отримані при розрахунках з використанням коефіцієнтів ряду Фур'є, не більше ніж на 0,1%.

Ключові слова: фазовий зсув, гармонічний сигнал; спектральний аналіз; двопівперіодне перетворення; похибка вимірювання; фазові вимірювання, спектр амплітуди, спектр фази, військова техніка.

Постановка проблеми

Сучасний етап розвитку озброєння та військової техніки (ОВТ) силових структур України характеризується необхідністю продовження строків служби зразків, які були розроблені та виготовлені у 80-ті або 90-ті роки минулого сторіччя, з одного боку, та необхідністю приймання на озброєння новітніх зразків розроблених підприємствами та установами промислового комплексу держави, з іншого.

Прийняття рішення про можливість продовження ресурсу зразка ОВТ чи постановку новітнього на озброєння приймається на підставі проведення випробувань, шляхом аналізу його технічних характеристик на відповідність нормативним документам (технічні умови, технічне завдання).

Одними з найважливіших характеристик стрілецького, артилерійського та ракетно-артилерійського озброєння є ступінь зносу стволів (напрямних), їх міцність, стан порохнів, ступінь зносу металу та захисних покриттів [1]. Прийняття рішення про можливість продовження строку експлуатації приймається на підставі проведення приймальних випробувань певної партії виробів, з урахуванням умов їх попередньої експлуатації.

Під час розробки та виготовлення новітньої спеціальної колісної військової техніки, такої як БТР-4Е, на Державному підприємстві «Харківське конструкторське бюро машинобудування» важливою характеристикою є міцність корпусів. Важливим фактором забезпечення даної характеристики є використання металевих листів з певними фізико-хімічними властивостями та якістю проведення з'єднувальних робіт. На етапі розробки контроль вищезазначених характеристик проводиться під час лабораторних, приймальних і державних (міжвідомчих) випробувань. Під час виготовлення дослідних або серійних зразків ці вимірювання проводяться під час вхідного контролю комплектуючих і приймально-здавальних випробувань виробу в цілому.

Важливою технологічною операцією проведення модернізації під час капітальних ремонтних робіт гусеничної військової техніки, наприклад, танка Т-64

різних модифікацій на Державному підприємстві «Завод ім. В.О. Малишева», є дефектації. Як відомо, задачею цієї технологічної операції є визначення можливості використання складових зі складу зразка, що підлягає відновленню. Для механічних складових проводиться вимірювання геометричних розмірів, фізико-хімічних властивостей матеріалу.

В основі вимірювання вищезазначених характеристик стрілецької зброї, артилерійського та ракетно-артилерійського озброєння, колісної та гусеничної військової техніки лежать неруйнівні методи контролю. До неруйнівних методів контролю відноситься рентгенографія, ультразвукова дефектоскопія, магніторезонансні методи дослідження тощо. Вимірювальні системи, які реалізують вказані методи вимірювання широко використовують методи фазометрії [2].

Також, фазові методи вимірювання широко використовуються в радіолокації і радіонавігації, авіаційній та космічній техніках, геодезії, машинобудуванні, зв'язку, в системах неруйнівного контролю та багатьох інших галузях. Фазовимірювальне перетворення різних фізичних процесів у фазовий зсув гармонічних сигналів забезпечує високі метрологічні характеристики. Тому фазометрія як метод перетворення і вимірювання давно вийшла за межі традиційного використання в радіотехніці, навігації та зв'язку і з успіхом використовується в експериментальній фізиці, радіофізиці, експериментальній медицині, сучасних сферах науки і техніки при проведенні прецизійних вимірювань [3–8].

Виходячи з вищенаведеного у [2, 5] визначено перелік параметрів ОВТ, що підлягає перетворенню у фазовий зсув при вимірюванні під час виготовлення зразка та його випробування. До таких параметрів можливо віднести: електро- та магніту провідність, геометричні розміри, параметри руху, мікропереміщення, ємність, індуктивність елементів, рівень рідин, витрати рідини чи газу, кут повороту, швидкість обертання, електричну напругу та струм, температуру, відстань, кут, час затримки.

Але зазначені методи застосовуються, як правило, для застарілої техніки та мають високу вартість. Таким чином, проведення наукових досліджень із метою *пошуку нових принципів визначення фазового зсуву*, які дозволять без зниження якості вимірювання зменшити

вартість виконання робіт з контролю характеристик новітнього та модернізованого озброєння на етапах розробки та виготовлення, є актуальним напрямом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для гармонічних сигналів у вимірвальній техніці використовуються такі поняття, як: фаза, початкова фаза, фазовий зсув і час запізнювання.

Найбільш повна класифікація методів вимірювання фазових зсувів гармонічних сигналів наведена в роботах [2, 5, 9].

За принципом проведення вимірювання методи фазометрії поділяються на компенсаційні і методи перетворення фазового зсуву в інші величини – напруга, часовий інтервал, геометричні параметри осцилографічних зображень досліджуваних сигналів.

Зазначені методи відрізняються один від одного технічною реалізацією, складністю і точністю.

Компенсаційні методи [2, 5–7, 9] ґрунтуються на процесі врівноваження (компенсації) фазового зсуву $\Delta\varphi \in [0, 2\pi]$ між вимірюваними гармонічними сигналами, тобто зведення до нуля фазового зсуву за рахунок регулювання фази одного з сигналів за допомогою регульованого фазообертача (міри фазового зсуву). Цей метод забезпечує досягнення високої точності вимірювання, близька до точності фазообертача.

Методи вимірювання на основі перетворення фазового зсуву в інші сигнали [2, 5–9] дозволяють визначати значення фазового зсуву сигналів після їх перетворення в інші проміжні величини, які зручно використовувати для вимірювання. До таких проміжних величин відносяться: напруга, сила струму, переміщення електронного променя осцилографа, часові величини.

До *недоліків відомих методів* можна віднести [2, 5, 9]:

- суттєвий вплив на точність вимірювання фазового зсуву складової похибки, яка обумовлена фазовою несиметрією каналів передачі сигналів;

- наявність двох каналів проведення аналогово-цифрового перетворення вхідних сигналів, що призводить до необхідності взаємної синхронізації частоти тактового генератора для кожного з каналів;

- суттєвий вплив на точність вимірювання зовнішніх та внутрішніх шумів;

- нелінійних градувальних характеристик.

На теперішній час один із дієвих і розповсюджених способів зменшення впливу зовнішніх та внутрішніх шумів на якість вирішення задач аналізу та обробки сигналів різноманітної природи є використання спектрального аналізу.

Як відомо, періодичний сигнал будь-якої форми можна розкласти на гармонічні сигнали, частоти яких кратні частоті (періоду) сигналу, що аналізується. Подібний метод дослідження називається спектральним аналізом, математичною основою якого є ряд Фур'є [10].

Ряди Фур'є довільних періодичних сигналів можуть містити нескінченно велику кількість членів. Одним із достоїнств перетворення Фур'є є те, що при обмеженні ряду Фур'є до будь-якого кінцевого числа його членів забезпечується найкраще за середньоквадратичної похибки наближення до вихідної функції (для даної кількості членів).

Зручність використання частотного представлення сигналів полягає в тому, що гармонічні функції є власними функціями операцій перенесення, інтегрування, диференціювання та інших лінійних операцій, інваріантних по координатах. Вони проходять через лінійні системи без зміни форми і частоти гармоніки, змінюється тільки початкова фаза та амплітуда коливаль.

У загальному випадку при розкладанні в ряд Фур'є періодичного сигналу з періодом T_c можливо використовувати інтервал $\left[-\frac{T_c}{2}, \frac{T_c}{2}\right]$.

Якщо позначити кутову частоту через ω_c , то оскільки $\omega_c = \frac{2\pi}{T_c}$, тоді для функції $f(t)$ на інтервалі $\left[-\frac{T_c}{2}, \frac{T_c}{2}\right]$, ряд Фур'є має вигляд

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n \{a_k \cos \omega_c k t + b_k \sin \omega_c k t\} \quad (1)$$

Вирази для визначення коефіцієнтів ряду Фур'є a_k і b_k мають вигляд

$$a_k = \frac{2}{T_c} \int_{-\frac{T_c}{2}}^{\frac{T_c}{2}} f(t) \cos \omega_c k t dt \quad (k=0,1,2,\dots,n) \quad (2)$$

$$b_k = \frac{2}{T_c} \int_{-\frac{T_c}{2}}^{\frac{T_c}{2}} f(t) \sin \omega_c k t dt \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

Ряд (1) являє собою розкладання періодичного сигналу $f(t)$ на суму дійсних елементарних гармонічних функцій (косинуса і синуса) з ваговими коефіцієнтами, геометрична сума значень яких (тобто значень a_k і b_k) не що інше як реальні амплітуди відповідних гармонічних коливаль з частотами $k\omega_c$. Сукупність амплітудних значень цих гармонік утворює односторонній фізично реальний (тільки для позитивних частот $k\omega_c$) спектр сигналу.

Мета роботи. Сформулювати принцип визначення фазового зсуву під час спектрального аналізу, який дозволить суттєво знизити вартість вимірювальних робіт, а також складову похибки, обумовлену фазовою несиметрією каналів передачі сигналів і вплив зовнішніх і внутрішніх шумів під час проведення вимірювань характеристик (параметрів) ОВТ.

Виклад основного матеріалу

На даний час найбільший інтерес для фазометрії являє визначення фазового зсуву. Під фазовим зсувом [11, 12] розуміється модуль різниці початкових фаз двох гармонічних сигналів однієї частоти.

В основу проведення вимірювання фазових зсувів сигналів покладена модель гармонічного сигналу, який задається без змін своїх параметрів на нескінченному інтервалі часу. Ця модель є ідеальною, а на практиці використовують модель з фінітним тимчасовим вікном, тобто вимірювання проводяться на кінцевому часовому інтервалі.

Виходячи з вищевикладеного проведемо формулювання задачі з визначенню фазового зсуву з використанням спектрального аналізу сигналу, отриманого в результаті підсумовування двох гармонічних сигналів, які мають однакову амплітуду після проведення їх двопівперіодного перетворення.

Нехай є два гармонічних сигнали $u_1(t)$ та $u_2(t)$, які мають фазовий зсув один щодо іншого, рівний $\Delta\varphi$, який знаходиться в інтервалі від 0 до 2π . Виходячи з того, що вимірювання фазового зсуву відносяться до відносних вимірювань, математичний запис зміни сигналів $u_1(t)$ і $u_2(t)$, можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= U_{m1} \cos(2\pi ft) \\ u_2(t) &= U_{m2} \cos(2\pi ft + \Delta\varphi) \end{aligned} \quad (4)$$

де $U_{m1} = U_{m2}$ – амплітуда сигналів $u_1(t)$ та $u_2(t)$ відповідно; $f = 1/T$ – частота сигналів; T – період сигналів.

З сигналів $u_1(t)$ і $u_2(t)$ видобувається модуль, в результаті чого отримаємо:

$$\begin{aligned} u'_1(t) &= |u_1(t)| = |U_{m1} \cos(2\pi ft)| \\ u'_2(t) &= |u_2(t)| = |U_{m2} \cos(2\pi ft + \Delta\varphi)| \end{aligned} \quad (5)$$

Підсумував сигнали $u'_1(t)$ і $u'_2(t)$, отримаємо:

$$u'_{\Sigma}(t) = |U_{m1} \cos(2\pi ft)| + |U_{m2} \cos(2\pi ft + \Delta\varphi)| = \begin{cases} U_{\min} + (U_{1\max} - U_{\min}) \sin\left(\left(2f - \frac{2\pi f}{\Delta\varphi}\right)t\right) & \text{для } t_1 \leq t < t_2 \\ U_{\min} + (U_{2\max} - U_{\min}) \sin\left(\left(\frac{2\pi f}{\Delta\varphi}\right)t\right) & \text{для } t_2 \leq t \leq T' + t_1 \end{cases} \quad (6)$$

Таким чином, використовуючи вираз (6), є можливість задіяти один канал передачі та цифрової обробки сигналів і тим самим зменшити вплив похибки, яка обумовлена фазовою несиметрією двох каналів передачі, що використовуються у відомих методах.

Розглянемо порядок формування запропонованого принципу більш детально.

Синтез часових діаграм, які описують порядок формування сигналу $u'_{\Sigma}(t)$, використовуючи співвідношення (4) та (5), було проведено у середовищі Matlab з використанням інструментального додатка Simulink. Для цього синтезовано схему, яка наведена на рис. 1.

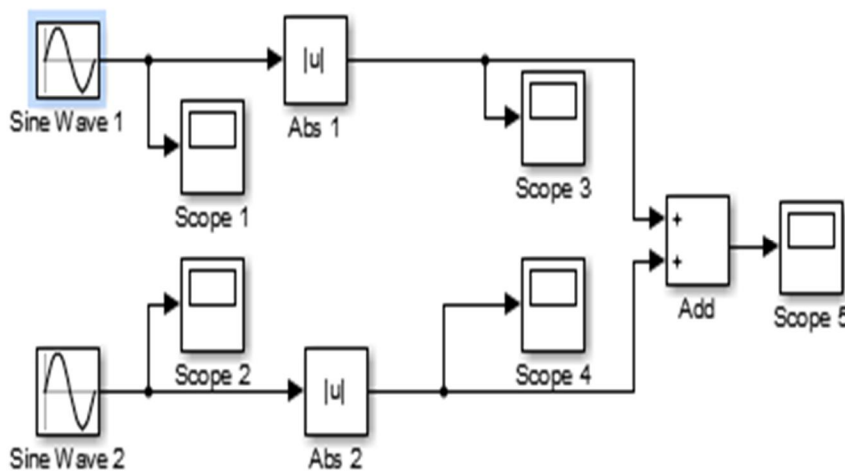


Рис. 1. Структурна схема перетворення сигналів $u_1(t)$ та $u_2(t)$ у сигнал $u'_{\Sigma}(t)$

У схемі синтез сигналу $u_1(t)$ проводиться генератором гармонічних сигналів «Sine Wave 1», а сигналу $u_2(t)$ генератором «Sine Wave 2». З виходу «Sine Wave 1» сигнал поступає на блок «Abs 1» та осцилограф, позначений «Score 1», який призначений для формування часової діаграми сигналу $u_1(t)$. Відповідно з виходу «Sine Wave 2» сигнал поступає на блок «Abs 2» та осцилограф позначений «Score 2», який призначений для формування часової діаграми сигналу $u_2(t)$. На виході блока «Abs 1» формується сигнал $u_1'(t)$, який надходить на перший вхід пристрою підсумування «Add» та «Score 3». «Score 3» формує часову діаграму сигналу $u_1'(t)$. Аналогічно на виході блока «Abs 2» формується сигнал $u_2'(t)$, який надходить на другий вхід пристрою підсумування «Add» та «Score 4». «Score 4» формує часову діаграму сигналу $u_2'(t)$. На виході блока «Add» отримуємо сигнал $u_{\Sigma}'(t)$. Сигнал $u_{\Sigma}'(t)$ надходить на «Score 5», який сформує його часову діаграму.

На рис. 2 наведені часові діаграми сигналів $u_1(t)$ і $u_2(t)$, $u_1'(t)$ і $u_2'(t)$, та $u_{\Sigma}'(t)$ при значенні $\Delta\varphi = 0$, а також вкладка налаштування генератора «Sine Wave 2».

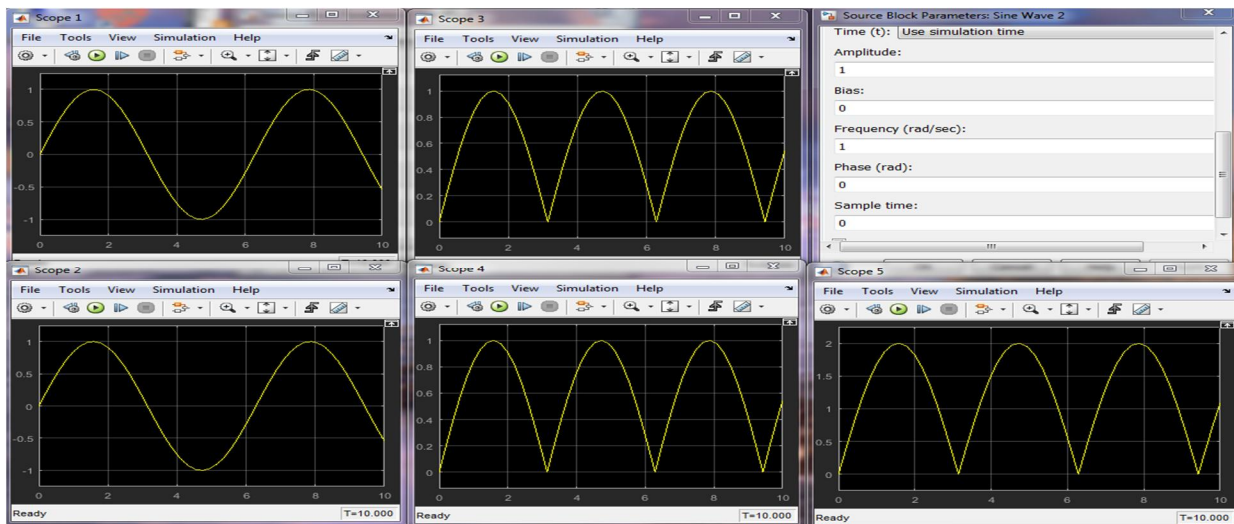


Рис. 2. Часові діаграми сигналів $u_1(t)$ і $u_2(t)$, $u_1'(t)$ і $u_2'(t)$, та $u_{\Sigma}'(t)$ при значенні $\Delta\varphi = 0$

Відповідно до вкладки налаштування, генератор «Sine Wave 2» формує синусоїдальний сигнал з амплітудою, рівною 1, постійна складова сигналу дорівнює 0, частота сигналу 1 рад/с, початкова фаза сигналу складає 0 рад, час квантування мінімальний для даного пристрою, тобто 0 на вкладці.

Часова діаграма, наведена на «Score 2», повністю підтверджує налаштування на вкладці.

Порівнявши часову діаграму, наведену на вкладці «Score 2», з часовою діаграмою, наведеною на вкладці «Score 1», видно, що вони ідентичні. Виходячи з цього можливо зробити висновок, що налаштування генераторів «Sine Wave 2» та «Sine Wave 1» однакові.

Часові діаграми для сигналів $u_1'(t)$ і $u_2'(t)$ наведені на вкладках «Score 3» та «Score 4». Аналіз даних часових діаграм показує, що вони мають період рівний π с, максимальні значення рівні 1. Отримані результати відповідають порядку проведення дворівневого перетворення гармонічних сигналів.

Часові діаграми для сигналу $u_{\Sigma}'(t)$ наведені на вкладці «Score 5». Аналіз даної часової діаграми показує, що сигнал $u_{\Sigma}'(t)$ має період, рівний π с, максимальне значення рівне 2, мінімальне значення рівне 0. Отримані результати відповідають порядку проведення підсумування двох однакових гармонічних сигналів після проведення їх двопівперіодного перетворення.

На рис. 3 наведені часові діаграми сигналів $u_1(t)$ і $u_2(t)$, $u_1'(t)$ і $u_2'(t)$, та $u_{\Sigma}'(t)$ при значенні $\Delta\varphi = 0,5$ рад, а також вкладка налаштування генератора «Sine Wave 2».

Відповідно до вкладки налаштування, генератор «Sine Wave 2» формує синусоїдальний сигнал з амплітудою, рівною 1, постійна складова сигналу дорівнює 0, частота сигналу 1 рад/с, початкова фаза сигналу складає 0,5 рад, час квантування мінімальний для даного пристрою, тобто 0 на вкладці.

Порівнявши часову діаграму, наведену на вкладці «Scope 1» на рис. 2, з часовою діаграмою, наведеною на вкладці «Scope 1» на рис.3, видно, що режими

налаштування генератора «Sine Wave 1» залишилися незмінними.

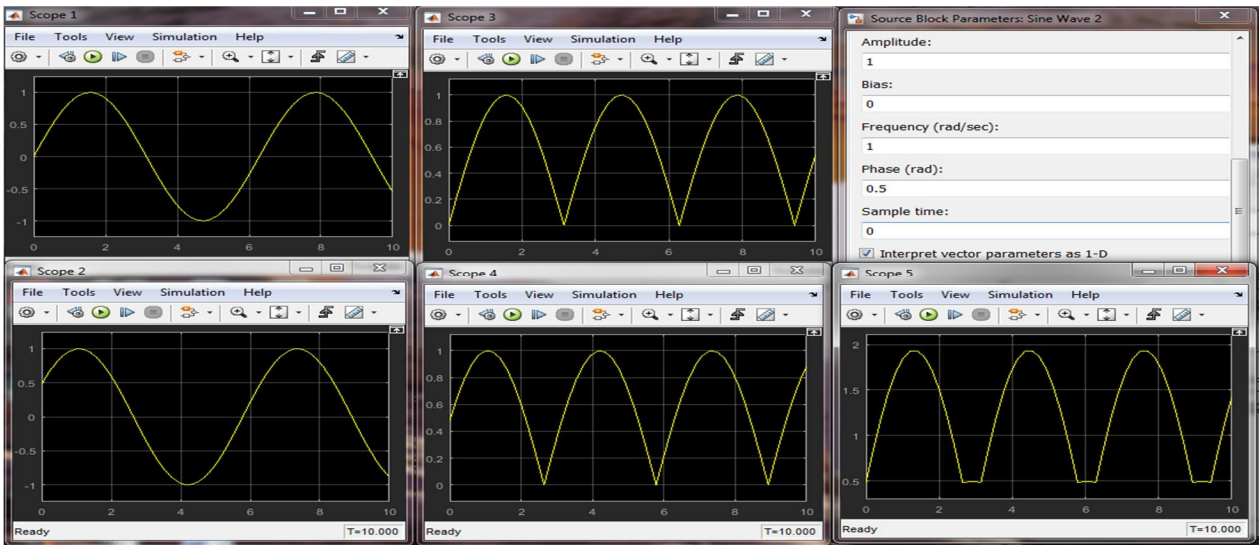


Рис. 3. Часові діаграми сигналів $u_1(t)$ і $u_2(t)$, $u_1'(t)$ і $u_2'(t)$, та $u_{\Sigma}'(t)$ при значенні $\Delta\varphi = 0,5$ рад

Часові діаграми для сигналів $u_1'(t)$ і $u_2'(t)$ наведені на вкладках «Scope 3» та «Scope 4». Аналіз даних часових діаграм показує, що вони мають період, рівний π с, максимальні значення рівні 1, однак сигнал $u_2'(t)$ випереджає сигнал $u_1'(t)$ близько 0,5.

Часові діаграми для сигналу $u_{\Sigma}'(t)$ наведені на вкладці «Scope 5». Аналіз даної часової діаграми показує, що сигнал $u_{\Sigma}'(t)$ має період, рівний π с. На часовому

інтервалі від 0 до $(\pi - 0,5)$ с максимальне значення дорівнює приблизно 1,95, мінімальне значення рівне 0,5. На часовому інтервалі від $(\pi - 0,5)$ до π максимальне значення дорівнює приблизно 0,55, мінімальне значення рівне 0,5.

На рис. 4 наведені часові діаграми сигналів $u_1(t)$ і $u_2(t)$, $u_1'(t)$ і $u_2'(t)$, та $u_{\Sigma}'(t)$ при значенні $\Delta\varphi = 1,4$ рад, а також вкладка налаштування генератора «Sine Wave 2».

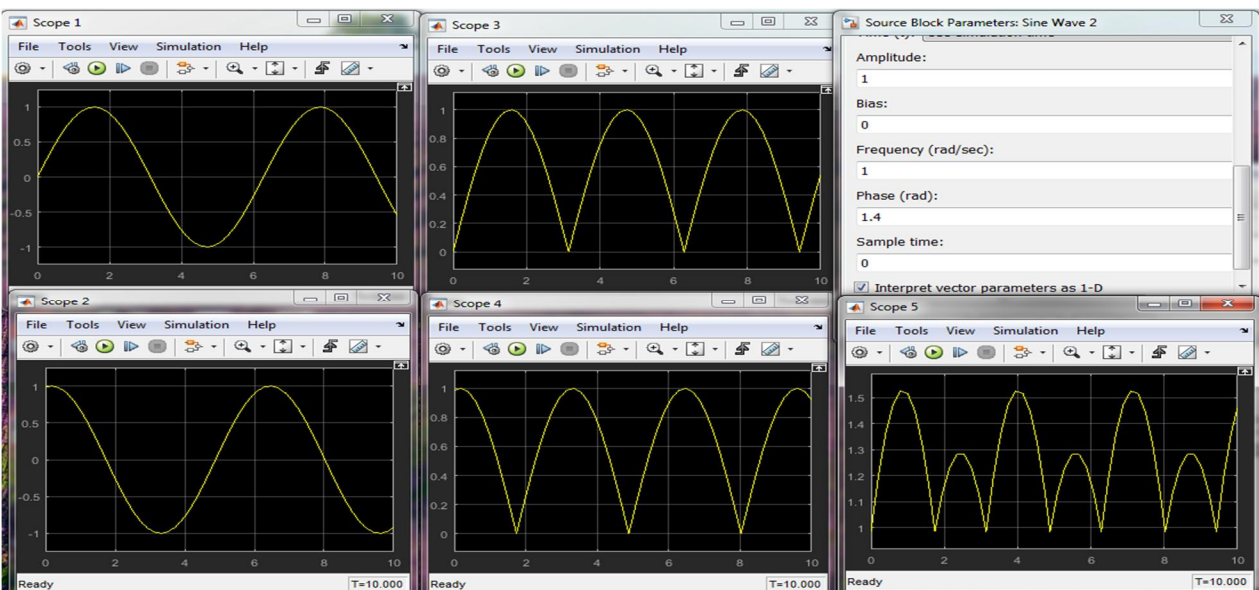


Рис. 4. Часові діаграми сигналів $u_1(t)$ і $u_2(t)$, $u_1'(t)$ і $u_2'(t)$, та $u_{\Sigma}'(t)$ при значенні $\Delta\varphi = 1,4$ рад

Відповідно до вкладки налаштування, генератор «Sine Wave 2» формує синусоїдальний сигнал з амплітудою, рівною 1, постійна складова сигналу дорівнює 0, частота сигналу 1 рад/с, початкова фаза сигналу складає 1,4 рад, час квантування мінімальний для даного пристрою, тобто 0 на вкладці.

Порівнявши часову діаграму, наведену на вкладці «Score 1» на рис. 2, з часовою діаграмою, наведеною на вкладці «Score 1» на рис.4, видно, що режими налаштування генератора «Sine Wave 1» залишилися незмінними.

Часові діаграми для сигналів $u_1'(t)$ і $u_2'(t)$ наведені на вкладках «Score 3» та «Score 4». Аналіз даних часових діаграм показує, що вони мають період, рівний π с, максимальні значення рівні 1, однак сигнал $u_2'(t)$ випереджає сигнал $u_1'(t)$ близько 1,4.

Часові діаграми для сигналу $u_{\Sigma}'(t)$ наведені на вкладці «Score 5». Аналіз даної часової діаграми показує, що сигнал $u_{\Sigma}'(t)$ має період, рівний π с. На часовому інтервалі від 0 до $(\pi-1,4)$ максимальне значення дорівнює приблизно 1,55, мінімальне значення приблизно дорівнює 0,95. На часовому інтервалі від $(\pi-1,4)$ до π максимальне значення дорівнює приблизно 1,29, мінімальне значення приблизно дорівнює 0,95.

З рис. 2...4 видно, а також в [13, 14] показано, що $u_{\Sigma}'(t)$ в залежності від значення $\Delta\varphi$ вхідних сигналів $u_1(t)$ і $u_2(t)$:

- є періодичним сигналом, з періодом $T' = \frac{1}{2f} = \frac{T}{2}$;

- має два локальних максимуми $U_{1\max}$ та $U_{2\max}$, які відповідають моментам часу $t_{1\max}$, $t_{2\max}$, та два розриви $U_{1\min} = U_{2\min} = U_{\min}$, які відповідають моментам часу t_1 , t_2 відповідно;

- зміна значення кута фазового зсуву $\Delta\varphi$ приводить до зміни значень $U_{1\max}$, $U_{2\max}$, U_{\min} та часових параметрів $t_{1\max}$, $t_{2\max}$ та t_2 .

Зміна значень вищезазначених характеристик сигналу $u_{\Sigma}'(t)$ приводить до зміни його форми, що в свою чергу приведе до зміни значень коефіцієнтів a_k та b_k ряду Фур'є в залежності від зміни величини фазового зсуву $\Delta\varphi$.

При проведенні спектрального аналізу використовуються такі поняття, як спектр амплітуд, спектр потужності і спектр фаз.

Під спектром амплітуд розуміється множина абсолютних величин коефіцієнтів C_k ($k=0,1,2,\dots,n$), які визначаються за відомими значеннями a_k і b_k співвідношенням

$$|C_k| = \frac{\sqrt{a_k^2 + b_k^2}}{2} \quad (7)$$

Величина $|C_k|$ вказує на значення амплітуди k -го гармонічного сигналу при розкладанні в ряд Фур'є.

Під спектром потужності розуміється множина аргументів величин $|C_k|^2$.

Під спектром фаз розуміється сукупність аргументів $\angle C_k$ ($k=0,1,2,\dots,n$), які визначаються за відомими значеннями a_k і b_k співвідношенням

$$\angle C_k = \arctg \frac{b_k}{a_k} \quad (8)$$

Величина $\angle C_k$ вказує на значення початкової фази k -го гармонічного сигналу при розкладанні в ряд Фур'є.

Тоді виходячи з вищевикладеного, сформулюємо завдання визначення фазового зсуву з використанням розкладання в ряд Фур'є як синтез аналітичних співвідношень, які описують взаємозв'язок зміни спектра амплітуд (потужності) і спектра фаз сигналу $u_{\Sigma}'(t)$ в залежності від зміни $\Delta\varphi$.

Як видно з (4), сигнал $u_{\Sigma}'(t)$ утворений шляхом підсумовування двох сигналів $u_1'(t)$ і $u_2'(t)$. Дані сигнали утворені сигналами $u_1(t)$ і $u_2(t)$, у яких рівні амплітуди, але мають фазовий зсув між собою на кут $\Delta\varphi$.

Тоді можна стверджувати, що сигнал $u_1(t)$ випереджає сигнал $u_2(t)$ на певний часовий інтервал τ , тобто $u_2(t) = u_1(t - \tau)$. За відомими значеннями $\Delta\varphi$ і T визначається часовий інтервал τ за співвідношенням:

$$\tau = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} T \quad (9)$$

Як показано в [15], зсув сигналу у часовій області на деякий інтервал τ призводить до зміни спектра фаз, але спектр амплітуд сигналу залишається незмінним.

Для випадку, коли $\Delta\varphi = 0$, справедливо твердження, що $u_1(t) = u_2(t)$, при цьому кутова частота вказаних сигналів дорівнює ω , відповідно з урахуванням [10, 11], ряд Фур'є для $u_1'(t)$ та $u_2'(t)$, має вигляд:

$$u_1'(t) = u_2'(t) = \frac{a_0'}{2} + \sum_{k=1}^n \{a_k' \cos 2\omega kt + b_k' \sin 2\omega kt\}.$$

Тоді ряд Фур'є для сигналу $u_{\Sigma}'(t)$ буде мати вигляд

$$u_{\Sigma}'(t) = a_0' + 2 \sum_{k=1}^n \{a_k' \cos 2\omega kt + b_k' \sin 2\omega kt\}$$

Для випадку, коли $\Delta\varphi \neq 0$, за умови, що $U_{m1.k}$ та $U_{m2.k}$ значення амплітуд k -их гармонік визначені з використанням співвідношення (7) сигналів $u_1'(t)$ і $u_2'(t)$ відповідно, а $\varphi_{1.k}$ та $\varphi_{2.k}$ значення початкових фаз k -их гармонік визначені з використанням співвідношення (8) сигналів $u_1'(t)$ і $u_2'(t)$ відповідно, ряд Фур'є для сигналу $u_{\Sigma}'(t)$ буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} u_{\Sigma}'(t) &= U_{m1.0} + \sum_{k=1}^n [U_{m1.k} \sin(2\omega kt + \varphi_{1.k})] + \\ &+ U_{m2.0} + \sum_{k=1}^n [U_{m2.k} \sin(2\omega kt + \varphi_{2.k})] = \\ &= [U_{m1.0} + U_{m2.0}] + \\ &+ [U_{m1.1} \sin(2\omega t + \varphi_{1.1}) + U_{m2.1} \sin(2\omega t + \varphi_{2.1})] + \\ &+ [U_{m1.2} \sin(4\omega t + \varphi_{1.2}) + U_{m2.2} \sin(4\omega t + \varphi_{2.2})] + \dots \\ &\dots + [U_{m1.n} \sin(2n\omega t + \varphi_{1.n}) + U_{m2.n} \sin(2n\omega t + \varphi_{2.n})] \end{aligned}$$

Обґрунтування значення амплітуди $U_{m\Sigma 1}'$ першої гармоніки сигналу $u_{\Sigma}'(t)$ за відомими значеннями амплітуд перших гармонік $U_{m1.1} = U_{m2.1}$ сигналів $u_1'(t)$ і $u_2'(t)$ при наявності фазового зсуву рівного $\Delta\varphi$ сигналів $u_1(t)$ і $u_2(t)$, проведемо з урахуванням наступного:

- при підсумовуванні двох гармонічних сигналів однієї частоти, які мають однакову амплітудою U_m , та фазовий зсув між собою $\Delta\varphi$, отримаємо гармонічний сигнал, амплітуда якого визначається співвідношенням [2]

$$U_{m.\Sigma} = 2U_m \cos \frac{\Delta\varphi}{2}, \quad (10)$$

при цьому початкова фаза даного гармонічного сигналу дорівнює $\Delta\varphi/2$;

- відомо, що частота першої гармоніки сигналу дорівнює частоті сигналу;

- відповідно, до аналізу рис. 2...4, а також у [12, 13] показано, що $u_1'(t)$, $u_2'(t)$ і $u_{\Sigma}'(t)$ мають період у два рази менший, ніж $u_1(t)$ і $u_2(t)$;

- можна стверджувати, що $u_2(t) = u_1(t - \tau)$ та $u_2'(t) = u_1'(t - \tau)$, тобто часовий інтервал зсуву τ між

сигналами $u_1'(t)$ та $u_2'(t)$, часовий інтервал зсуву τ між сигналами $u_1(t)$ та $u_2(t)$ однаковий;

- виходячи зі співвідношення (9) та вищевказаних зауважень видно, що значення фазового зсуву перших гармонік сигналів $u_1'(t)$ і $u_2'(t)$ буде дорівнювати $2\Delta\varphi$, при наявності фазового зсуву, рівного $\Delta\varphi$ сигналів $u_1(t)$ і $u_2(t)$

Таким чином, значення амплітуди $U_{m\Sigma 1}'$ першої гармоніки сигналу $u_{\Sigma}'(t)$ за відомими значеннями амплітуд перших гармонік $U_{m1.1} = U_{m2.1}$ сигналів $u_1'(t)$ і $u_2'(t)$ при наявності фазового зсуву, рівного $\Delta\varphi$ сигналів $u_1(t)$ і $u_2(t)$, визначається співвідношенням

$$U_{m\Sigma 1}' = 2U_{m1.1} \cos \Delta\varphi. \quad (11)$$

При цьому початкова фаза першої гармоніки сигналу $u_{\Sigma}'(t)$ дорівнює $-\Delta\varphi$, за умови, що початкова фаза сигналу $u_1(t)$ дорівнює 0, а початкова фаза сигналу $u_2(t)$ дорівнює $\Delta\varphi$.

Тоді значення амплітуди $U_{m\Sigma k}'$ k -й гармоніки сигналу $u_{\Sigma}'(t)$ за відомими значеннями амплітуд $U_{m1.k}$ та $U_{m2.k}$ k -их гармонік сигналів $u_1'(t)$ і $u_2'(t)$ при значенні фазового зсуву рівного $\Delta\varphi$ сигналів $u_1(t)$ і $u_2(t)$ розраховується з використанням співвідношення

$$U_{m\Sigma k}' = 2U_{m1.k} \cos(k\Delta\varphi) \quad (k=0,1,2,\dots,n) \quad (12)$$

З урахуванням (9), для k -й гармоніки початкова фаза φ_k на інтервалі $[-\pi/2, \pi/2]$ сигналу $u_{\Sigma}'(t)$ буде дорівнювати

$$\varphi_k = -k\Delta\varphi, \quad (13)$$

за умови, що початкова фаза сигналу $u_1(t)$ дорівнює 0, а початкова фаза сигналу $u_2(t)$ дорівнює $\Delta\varphi$.

Синтез аналітичних співвідношень для розрахунку значень $U_{m1.k}$ проведемо в наступному порядку.

Визначимо спектр амплітуд для сигналу $u_1'(t)$ за умови $U_{m1} = 1$. Співвідношення для розрахунку коефіцієнтів ряду Фур'є $a_{1.k}$ і $b_{1.k}$ сигналу $u_1'(t)$ мають вигляд вид:

$$a_{1.k} = \frac{2}{T'} \int_{-\frac{T'}{2}}^{\frac{T'}{2}} U_{m1} \cos(\omega t) \cos(2\omega kt) dt \quad (k=0,1,2,\dots,n) \quad (14)$$

$$b_{1,k} = \frac{2}{T'} \int_{-\frac{T'}{2}}^{\frac{T'}{2}} U_{m1} \cos(\omega t) |\sin(2\omega k t) dt \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (15)$$

$$U_{m(1),k} = \frac{\sqrt{a_{1,k}^2 + b_{1,k}^2}}{2} \quad (16)$$

По відомих величинах $a_{1,k}$ и $b_{1,k}$ значення $U_{m(1),k}$ розраховується співвідношенням

Розрахунок значень $U_{m(1),k}$ проводиться з використанням універсального математичного пакета MathCAD, який на відміну від Simulink має більшу точність обчислень, результати надані в таблиці 1.

Таблиця 1

Значення $U_{m(1),k}$ для $U_{m1}=1B$

k	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{m(1),k}$ (B)	0,637	0,212	0,042	0,018	0,01	6.4×10^{-3}	4.447×10^{-3}	3.265×10^{-3}	2.496×10^{-3}	1.97×10^{-3}
k	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$U_{m(1),k}$ (B)	1.595×10^{-3}	1.306×10^{-3}	1.306×10^{-3}	9.431×10^{-4}	8.13×10^{-4}	7.08×10^{-4}	6.22×10^{-4}	5.51×10^{-4}	4.915×10^{-4}	4.411×10^{-4}

Скориставшись властивістю лінійності ряду Фур'є, співвідношення для визначення значення амплітуди $U'_{m\Sigma k}$ k -й гармоніки сигналу $u'_{\Sigma}(t)$ за відомими значеннями амплітуд $U_{m1}=U_{m2}$ при значенні фазового зсуву початкових сигналів $u_1(t)$ і $u_2(t)$, яке дорівнює $\Delta\phi$, розраховується з використанням співвідношення:

$$U'_{m\Sigma k} = 2U_{m(1),k}U_{m1} \cos(k\Delta\phi) \quad (k=0,1,2,\dots,n) \quad (17)$$

Розглянемо можливість використовувати отримані співвідношення для синтезу спектра амплітуд і фаз сигналу $u'_{\Sigma}(t)$. Для цього порівнюємо спектр амплітуд і фаз сигналу $u'_{\Sigma}(t)$, отриманого з використанням співвідношень (16) і (12) і нижченаведених виразів:

$$a_k = \frac{2}{T'} \int_{-\frac{T'}{2}}^{\frac{T'}{2}} [U_m \cos(\omega t) + |U_m \cos(\omega t + \Delta\phi)|] \cos 2\omega k t dt \quad (k=0,1,2,\dots,n) \quad (18)$$

$$b_k = \frac{2}{T'} \int_{-\frac{T'}{2}}^{\frac{T'}{2}} [U_m \cos(\omega t) + |U_m \cos(\omega t + \Delta\phi)|] \sin 2\omega k t dt \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (19)$$

$$U_{m,k} = \frac{\sqrt{a_{1,k}^2 + b_{1,k}^2}}{2} \quad (20)$$

$$\angle C_k = \arctg \frac{b_k}{a_k} \quad (21)$$

Розрахунок значень $U_{m,k}$ і $\angle C_k$ проводиться в універсальному математичному пакеті MathCAD.

Як показник наближення спектра фаз використовуємо різницю між значенням величин φ_k отриманих з використанням співвідношення (13), і значенням величин $\angle C_k$ на інтервалі $[-\pi/2, \pi/2]$, розрахованого з використанням співвідношення (18, 19, 21).

Результати порівняння для деяких значень $\Delta\phi$ представлені на рис. 5. Дані результати показують, що відносне відхилення спектра фаз, отриманого з використанням (13), відрізняється від значень спектра фаз, отриманого з використанням (18, 19, 21), менш ніж на 0,1%

$\Delta\phi := 0.1$	$\Delta\phi := 1.0$	$\Delta\phi := 1.5$
0	0	0
$1.91 \cdot 10^{-5}$	$3.916 \cdot 10^{-6}$	$4.18 \cdot 10^{-6}$
$8.608 \cdot 10^{-5}$	$2.667 \cdot 10^{-5}$	$-8.714 \cdot 10^{-7}$
$2.904 \cdot 10^{-4}$	$1.647 \cdot 10^{-4}$	$4.446 \cdot 10^{-4}$
$1.321 \cdot 10^{-3}$	$5.127 \cdot 10^{-5}$	$4.131 \cdot 10^{-4}$
$2.025 \cdot 10^{-3}$	$2.964 \cdot 10^{-4}$	$5.978 \cdot 10^{-4}$
$6.397 \cdot 10^{-6}$	$1.288 \cdot 10^{-3}$	$-9.269 \cdot 10^{-4}$
$-2.049 \cdot 10^{-4}$	$9.584 \cdot 10^{-5}$	$4.934 \cdot 10^{-3}$
$8.334 \cdot 10^{-5}$	$1.542 \cdot 10^{-3}$	$-8.821 \cdot 10^{-4}$
$2.658 \cdot 10^{-5}$	$4.032 \cdot 10^{-3}$	$-4.889 \cdot 10^{-4}$
$4.055 \cdot 10^{-5}$	$1.826 \cdot 10^{-4}$	$-7.265 \cdot 10^{-4}$

Рис. 5. Різниця між значенням величин φ_k та $\angle C_k$

Аналогічно як показник наближення спектра амплітуд використовується різниця між значеннями величин $U'_{m\Sigma k}$, отриманих з урахуванням співвідношення (17) і значеннями величини $U_{m,k}$, розрахованими за допомогою співвідношень (18...20).

Результати порівняння для деяких значень $\Delta\varphi$ і $U_m = 2$ представлені на рис.6. Дані результати показують, що відносне відхилення спектра амплітуд, отриманого з використання (12), відрізняється від значень спектра амплітуд, отриманого з використанням (18, 19, 21) менш ніж на 0,1%..

$\Delta\varphi = 0.1$		$\Delta\varphi = 1.0$		$\Delta\varphi = 1.5$	
	0		0		0
0	$-1.238 \cdot 10^{-5}$	0	$2.77 \cdot 10^{-6}$	0	$8.518 \cdot 10^{-5}$
1	$-1.652 \cdot 10^{-6}$	1	$-6.954 \cdot 10^{-7}$	1	$-3.326 \cdot 10^{-6}$
2	$-3.058 \cdot 10^{-6}$	2	$-5.635 \cdot 10^{-7}$	2	$-4.777 \cdot 10^{-5}$
3	$-6.382 \cdot 10^{-6}$	3	$-3.35 \cdot 10^{-6}$	3	$-7.818 \cdot 10^{-6}$
4	$-2.087 \cdot 10^{-5}$	4	$-1.067 \cdot 10^{-6}$	4	$10 \cdot 10^{-6}$
5	$-4.623 \cdot 10^{-5}$	5	$-5.922 \cdot 10^{-7}$	5	$-1.425 \cdot 10^{-5}$
6	$-1.358 \cdot 10^{-7}$	6	$-7.898 \cdot 10^{-6}$	6	$7.167 \cdot 10^{-6}$
7	$-2.681 \cdot 10^{-6}$	7	$-1.5 \cdot 10^{-6}$	7	$1.66 \cdot 10^{-5}$
8	$3.331 \cdot 10^{-7}$	8	$-3.282 \cdot 10^{-7}$	8	$-8.066 \cdot 10^{-6}$
9	$-1.874 \cdot 10^{-6}$	9	$-1.457 \cdot 10^{-5}$	9	$-7.837 \cdot 10^{-6}$
10	$-8.791 \cdot 10^{-8}$	10	$-2.191 \cdot 10^{-6}$	10	$-5.604 \cdot 10^{-6}$

Рис. 6. Різниця між значенням величин $U'_{m\Sigma k}$ та $U_{m,k}$

Висновки

Принципи фазометрії знайшли широке застосування у таких системах, як вимірювачі фазового зсуву, засоби ультразвукового дослідження, засоби вимірювання R, L, C – параметрів, кутоміри, далекоміри, системи та засоби вимірювання геометричних величин під час проведення технічного обслуговування ОБТ.

Аналіз відомих принципів вимірювання фазових зсувів показав, що суттєвий вклад у підсумкову похибку вимірювання фазових зсувів здійснює складова, яка обумовлена фазовою несиметрією каналів передачі сигналів, та вплив зовнішніх і внутрішніх шумів.

В якості альтернативного принципу визначення фазового зсуву запропоновано використовувати сигнал, який отриманий в результаті сумування гармонічних сигналів після проведення їх двопівперіодного перетворення з подальшим проведенням його спектрального аналізу.

Запропоновані аналітичні співвідношення, які встановлюють взаємозв'язок між фазовим зсувом і характеристиками спектра амплітуд і фаз розглянутого сигналу. Дані аналітичні співвідношення, можливо, розглядати як математичну основу для синтезу методів визначення фазового зсуву двох гармонічних сигналів з використанням спектрального аналізу сигналу, отриманого в результаті їх складання після проведення їх двопівперіодного перетворення.

Використання запропонованого принципу визначення фазового зсуву дозволить суттєво зменшити складність вимірювальних систем за рахунок спрощення схемних рішень (необхідність використовувати один тракт передачі та цифрової обробки сигналу) у порівнянні з методами та засобами, що використовуються на теперішній час (цифрова обробка та передача сигналів проводиться для кожного гармонічного сигналу по окремому тракту). А це, в свою чергу дозволить провести економію матеріальних ресурсів на контроль технічних характеристик ОБТ та його частин (близько 10%), під час проведення випробувань на етапах розробки та виготовлення зразка без зниження якості проведення вимірювання.

У подальшому доцільно провести роботи з формування аналітичних співвідношень, які описують взаємозв'язок спектральних характеристик сигналу, що аналізується в залежності від зміни фазового зсуву за умови нерівності амплітуд гармонічних сигналів. Що, в свою чергу, дозволить сформувати такі методи вимірювання, застосування яких зменшує вимоги до вимірювального обладнання без зниження точності вимірювань.

Список літератури

1. Крюков О.М., Мельніков Р.С., Музичук В.А. Метод діагностування технічного стану каналів стволів та боєприпасівна основі ідентифікації характеристик балістичних елементів пострілу. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. 2018. Вип. 2 (32). С. 5-11. DOI: <https://doi.org/10.33405/2409-7470/2018/2/32/-155166>.
2. Куц Ю. В., Щербак Л. М. Статистична фазометрія. *Тернопільський державний технічний університет*. 2009. 384 с.
3. Лаврут О.О., Лаврут Т.В., Климович К.О., Здоренко Ю.М. Новітні технології та засоби зв'язку у Збройних Силах України: шлях трансформації та перспективи розвитку. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2019. Вип. 1 (34). С. 91-101 DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2019.34.13>.
4. Лаврут О.О., Климович К.О., Тарасюк М.Л., Антоноук О.Л. Стан та перспективи застосування сучасних технологій та засобів радіозв'язку в Збройних Силах України. *Системи озброєння і військова техніка: науковий журнал*. 2017. Вип. 1(49). С. 42-49.
5. L. Bohdal, L. Kukielka, S. Legutko, R. Patyk, A. Radchenko. Modeling and Experimental Research of Shear-Slitting of AA6111-T4 Aluminum Alloy Sheet. *Materials*. 2020. Vol. 13, Iss. 14. Article Id: 3175. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13143175>.
6. Bonavolontà F., D'Apuzzo, M., Liccardo, A. and Mieleb, G. Harmonic and interharmonic measurements through a compressed sampling approach. *Measurement*. 2016. Vol. 77. P. 1-15. DOI: [org/10.1016/j.measurement.2015.08.022](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.08.022)
7. Skolnik M.I. Radar Handbook. Third Edition. *The McGraw-Hill Companies*, 2008. 1352 p.

8. Sun G., Wu L., Kuang Z., Ma Z., Liu J. Practical tracking control of linear motor via fractional-order sliding mode. *Automatica*. 2018. Vol. 94. P. 221-235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2018.02.011>.

9. Wang Y., Wang C., Tao Y. Fast Frequency Acquisition and Phase Locking of Nonplanar Ring Oscillators. *Appl. Sci.* 2017. Vol. 7. P. 10-32. DOI: <https://doi.org/10.3390/app7101032>

10. Kihong S. On the Selection of Sensor Locations for the Fictitious FRF based Fault Detection Method. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2019. Vol. 7. Is. 7. P. 569-575. DOI: <https://org/10.30534/ijeter/2019/277112019>.

11. ГОСТ 16465-70 Сигналы радиотехнические измерительные. Термины и определения. *Изд-во стандартов*. 1987. 27 с.

12. Kuts Yu., Protasov A., Lyncenco Y., Dugin O., Bliznuk O., Uchanin V. Using Multidifferential Transducer for Pulsed Eddy Current Object Inspection. *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and computer engineering (Ukrcon). Conference Proceedings*. May 29 –June 2, 2017. Kyiv, Ukraine. P.826–829. DOI: <https://doi.org/1109/UKRCON.2017.8100361>

13. Тышко С.А., Смоляр В.Г., Забула О.Е. Анализ возможности использования двухполупериодного преобразования для измерения фазового сдвига гармонических сигналов с равной амплитудой. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2013. №2 (30). С. 42-44.

14. Губін С.В., Тишко С.О., Забула О.Є., Черниченко Ю.М. Осцилографічний метод вимірювання фазового зсуву на базі двонапівперіодного перетворення. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2019. Вип. 4(2019). С. 47–54 DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2019.4.05>

15. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов: Второе издание. ООО. «Бином-Пресс». 2006. 656 с.

References

1. Kriukov O.M., Melnikov R.S. and Muzychuk V.A. (2018), "Metod diahnostuvannia tekhnichnoho stanu kanaliv stvoliv ta boieprypasivna osnovi identyfikatsii kharakterystyk balistychnykh elementiv postrilu" [Method of diagnosing the technical condition of barrel channels and ammunition based on the identification of the characteristics of ballistic elements of the shot]. *Collection of scientific works of the National Academy of the National Guard of Ukraine*. № 2 (32). pp. 5-11. DOI: <https://doi.org/10.33405/2409-7470/2018/2/32/155166>. [in Ukrainian]

2. Kuts Yu.V. and Shcherbak L.M. (2009), "Statystychna fazometriia" [Statistical phasometry]. *Ternopil State Technical University*. 384 s. [in Ukrainian]

3. Lavrut O.O., Lavrut T.V., Klymowych K.O. and Zdorenko Yu.M. (2019), "Novitni tekhnologii ta zasoby zviazku u Zbroinykh Sylakh Ukrainy: shliakh transformatsii ta perspektyvy rozvytku" [The latest technologies and means of communication in the Armed Forces of Ukraine: the path of transformation and prospects for development]. *Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*. № 1 (34). pp. 91-101 DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2019.34.13>. [in Ukrainian]

4. Lavrut O.O., Klymowych K.O., Tarasiuk M.L. and Antoniuk O.L. (2017), "Stan ta perspektyvy zastosuvannia suchasnykh tekhnologii ta zasobiv radiozviazku v Zbroinykh

Sylakh Ukrainy" [Status and prospects of application of modern technologies and means of radio communication in the Armed Forces of Ukraine]. *Weapons systems and military equipment: a scientific journal*. № 1(49). S. 42-49. [in Ukrainian]

5. L. Bohdal, L. Kukielka, S. Legutko, R. Patyk and A. Radchenko (2020), Modeling and Experimental Research of Shear-Slitting of AA6111-T4 Aluminum Alloy Sheet. *Materials*. Vol. 13, Iss. 14. Article Id: 3175. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13143175>.

6. Bonavolontà F., D'Apuzzo M., Liccardo A. and Mieleb G. (2016), Harmonic and interharmonic measurements through a compressed sampling approach. *Measurement*. Vol. 77, pp. 1-15. DOI: [org/10.1016/j.measurement.2015.08.022](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.08.022)

7. Skolnik M.I. (2008), Radar Handbook. Third Edition. *The McGraw-Hill Companies*. 1352 p.

8. Sun G., Wu L., Kuang Z., Ma Z. and Liu J. (2018), Practical tracking control of linear motor via fractional-order sliding mode. *Automatica*. Vol. 94, pp. 221-235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2018.02.011>.

9. Wang, Y., Wang, C., Tao and Y. Fast (2017), Frequency Acquisition and Phase Locking of Nonplanar Ring Oscillators. *Appl. Sci.* 7, 1032 DOI: <https://doi.org/10.3390/app7101032>.

10. Kihong S. (2019), On the Selection of Sensor Locations for the Fictitious FRF based Fault Detection Method. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. Vol. 7, Is. 7, pp. 569-575. DOI: <https://org/10.30534/ijeter/2019/277112019>.

11. GOST 16465-70 (1987), "Signaly radiotekhnicheskie izmeritel'nye. Terminy i opredeleniya" [GOST 16465-70 Radio-technical measuring signals. Terms and definitions]. *Standards Publishing House*. 27 p. [in Ukrainian]

12. Kuts, Yu., Protasov, A., Lyncenco, Y., Dugin O., Bliznuk O. and Uchanin V. (2017), Using Multidifferential Transducer for Pulsed Eddy Current Object Inspection. *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and computer engineering (Ukrcon). Conference Proceedings*. May 29 –June 2, Kyiv, Ukraine. pp. 826–829. DOI: <https://doi.org/1109/UKRCON.2017.8100361>.

13. Tyshko, S. A., Smoljar, V. G. and Zabula, O. E. (2013), "Analiz mozhnosti ispol'zovaniya dvuhpoluperiodnogo preobrazovaniya dlja izmereniya fazovogo sdviga garmonicheskikh signalov s ravnoj" [Analysis of the possibility of using two-half-period transformation to measure the phase shift of harmonic signals with equal amplitude] *Collection of scientific works of Kharkiv University of the Air Force*. № 2 (30). pp. 42 - 44. [in Ukrainian]

14. Hubin S.V., Tyshko S.O., Zabula O.Ie. and Chernychenko Yu.M. (2019), "Ostsylohrafichnyi metod vymiriuvannia fazovoho zsuvu na bazi dvonapiiperiodnogo peretvorennia" [Oscillographic method of phase shift measurement based on two-half-period transformation]. *Electronic and computer systems*. № 4. pp. 47–54 DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2019.4.05> [in Ukrainian]

15. Lajons R. (2006), "Cifrovaja obrabotka signalov: Vtoroe izdanie" [Digital Signal Processing: Second Edition]. Ltd. Binom Press. 656 p. [in Russian]

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗОВОГО СДВИГА СИГНАЛОВ С РАВНЫМИ АМПЛИТУДАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХПОЛУПЕРИОДНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ХАРАКТЕРИСТИК ВООРУЖЕНИЯ

С.А. Тишко, А.А. Лаврут, В.Г. Смоляр, О.Е. Забула, Ю.М. Черниченко

В статье определен перечень технических характеристик вооружения и военной техники (ВВТ), значение которых измеряется с применением фазовых методов. Проведен анализ известных методов, нашедших широкое применение в измерительной технике, предназначенной для определения технических характеристик, связанных с измерением фазового сдвига во время разработки, изготовления и эксплуатации ВВТ. На основании данного анализа было определено, что измерительные системы, предназначены для определения фазового сдвига двух гармонических сигналов, в своем составе имеют два канала передачи информации. Данная архитектура реализации измерительных систем приводит к тому, что существенное влияние на точность решения предложенной измерительной задачи вносит составляющая погрешности, обусловлена фазовой несимметрией каналов передачи сигналов, а также внутренние и внешние шумы. В качестве альтернативного подхода решения измерительной задачи определения фазового сдвига двух гармонических сигналов, который позволит существенно уменьшить составляющую погрешности, обусловленную фазовой несимметрией каналов передачи информации, предложено использовать сигнал, полученный при суммировании гармонических сигналов после проведения двухполупериодного преобразования с последующим проведением его спектрального анализа. С целью реализации вышеуказанного подхода проведено постановку задачи по определению фазового сдвига двух гармонических сигналов с использованием спектрального анализа сигнала, полученного при суммировании гармонических сигналов после проведения их двухполупериодного преобразования. Определен перечень предположений, необходимых для синтеза аналитических соотношений, которые устанавливают взаимосвязь между спектрами фаз и амплитуд (мощности) сигнала полученного при суммировании гармонических сигналов после проведения их двухполупериодного преобразования, и фазовым сдвигом двух гармонических сигналов. Предложенные аналитические соотношения, устанавливающие взаимосвязь между вышеуказанными характеристиками. Показано, что значение спектра фаз и амплитуд, рассчитанные с использованием предложенных выражений, отличаются от значений, полученных при расчете с использованием коэффициентов ряда Фурье не более чем на 0,1%.

Ключевые слова: фазовый сдвиг, гармоничный сигнал; спектральный анализ; двухполупериодные преобразования; погрешность измерения; фазовые измерения, спектр амплитуды, спектр фазы, военная техника.

APPLICATION OF SPECTRAL ANALYSIS FOR DETERMINE THE PHASE SHIFT OF SIGNALS WITH EQUAL AMPLITUDES USING FULL-WAVE TRANSFORMATION WHEN MEASURING THE CHARACTERISTICS OF WEAPONS

S. Tyshko, O. Lavrut, V. Smolar, O. Zabula, Y. Chernichenko

The article defines the list of technical characteristics of armaments and military equipment (ARM), the value of which is measured using phase methods. An analysis of known methods that have found wide application in measuring technology, which is designed to determine the technical characteristics associated with the measurement of phase shift during the development, manufacture and operation of weapons. Based on this analysis, it was determined that the measuring systems are designed to determine the phase shift of two harmonic signals in their composition have two channels of information transmission. This architecture of the implementation of measuring systems leads to the fact that a significant impact on the accuracy of the proposed measurement problem, makes a component of the error due to the phase symmetry of the signal transmission channels, as well as internal and external noise. As an alternative approach to solving the measurement problem of determining the phase shift of two harmonic signals, which will significantly reduce the error component due to phase asymmetry of information transmission channels, it is proposed to use the signal obtained by summing harmonic signals after full-wave transformation followed by spectral analysis. In order to implement the above approach, a measurement problem was set to determine the phase shift of two harmonic signals, using spectral analysis of the signal obtained by summing the harmonic signals after their full-wave transformation. A list of assumptions required for the synthesis of analytical relations that establish the relationship between the spectra of phases and amplitudes (power) of the signal obtained by summing harmonic signals after their full-wave transformation and phase shift of two harmonic signals. Analytical relationships are proposed that establish the relationship between the above characteristics. It is shown that the values of the spectrum of phases and amplitudes, which are calculated using the proposed expressions, differ from the values obtained in the calculations using the Fourier series coefficients, not more than 0.1%.

Key words: phase shift, harmonic signal; spectral analysis; full-wave transformation; measurement error; phase measurements, amplitude spectrum, phase spectrum, military equipment.