

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФАЗОВИХ ВИМІРЮВАНЬ В ЛАЗЕРНІЙ ДАЛЕКОМЕТРІЇ

І.О. Брагинець *, канд. техн. наук, **Ю.О. Масюренко** **, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: masjuriv@ied.org.ua.

Підтверджено актуальність розробки прецизійних двоканальних калібраторів фазових зсувів сигналів (КФЗС) в широкому діапазоні частот для експериментальної оцінки апаратних похибок фазовимірювальних пристроїв лазерних далекомірів. Розглянуто можливість побудови КФЗС на базі широко розповсюджених синтезаторів частоти прямого цифрового синтезу. Показано, що в діапазоні високих і дуже високих частот, що характерно для сигналів в фазових лазерних далекомірах, вказані КФЗС через паразитні зв'язки між колами каналів не забезпечують необхідної точності відтворення фазового зсуву між двома синусоїдальними напругами. Задля підвищення точності запропоновано перенести формування сигналів в КФЗС в оптичний діапазон електромагнітних хвиль. Описано принцип побудови відповідного КФЗС та розроблено схему для його практичної реалізації. Проведено розрахунок можливої похибки запропонованого КФЗС, результат якого підтверджує доцільність його застосування для дослідження та перевірки фазовимірювальних пристроїв високоточних лазерних далекомірів. Бібл. 10, рис. 1.

Ключові слова: калібровка, фазовий зсув, оптичний діапазон, лазерний далекомір, фазовимірювальний пристрій.

Однією із важливих задач в сучасному приладобудуванні є створення засобів, які забезпечують відтворення прецизійних пристроїв різниці фаз між двома синхронними гармонічними напругами в широкому діапазоні частот. Вказані засоби, які отримали назву калібратори фази, застосовуються для перевірки вимірювачів різниці фаз, а також для налагодження та дослідження радіоелектронних пристроїв, в яких різні фізичні величини для їхнього визначення перетворюються у фазові характеристики сигналів. Серед таких радіоелектронних пристроїв досить широке розповсюдження для безконтактного вимірювання відстані до контрольованого об'єкту отримали фазові лазерні далекоміри з високочастотною синусоїдальною модуляцією інтенсивності лазерного випромінювання [1]. В фазових далекомірах відстань L_x до контрольованого об'єкта визначається шляхом вимірювання зсуву фаз φ_x модульованих випромінюваного та відбитого від об'єкту світлових потоків за формулою

$$L_x = c\varphi_x / 4\pi f_m, \quad (1)$$

де c – швидкість світла, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; f_m – частота модуляції, яка може складати десятки мегагерц.

Вимірювання фазового зсуву в лазерному далекомірі відбувається з похибкою $\Delta\varphi_x$, яка згідно (1) після перерахування в одиниці довжини не повинна перевищувати заданої похибки визначення відстані ΔL_x

$$\Delta\varphi_x = 4\pi f_m \Delta L_x / c. \quad (2)$$

Так, наприклад, у разі використання фазового лазерного далекоміра в складі безконтактної оптоелектронної вимірювальної системи задля визначення лінійних параметрів об'єктів різного призначення похибка ΔL_x не повинна перевищувати 0,5 мм у разі вимірювання відстані в декілька десятків метрів [2].

© Брагинець І.О., Масюренко Ю.О., 2025

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-9528-5808>; ** <https://orcid.org/0000-0003-4209-1126>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Апаратурні похибки фазовимірювальних пристроїв лазерних далекомірів, крім проведення попередніх розрахунків, повинні остаточно визначатися експериментальним шляхом в процесі їхнього розроблення, дослідження та перевірки під час експлуатації. З цією метою і використовуються вказані вище калібратори фази (КФ). Серед відомих КФ у вигляді окремих розробок та серійних зразків значного поширення набули двоканальні двофазні генератори, в кожному із каналів котрих використовуються синтезатори частоти (СЧ) прямого цифрового синтезу. Частота і фаза сигналів на виході таких СЧ точно відомі та можуть регулюватися програмно з високою роздільною здатністю. В [3, 4] описано особливості архітектури й принцип роботи, наведено характеристики та функціональні можливості СЧ прямого цифрового синтезу, які випускаються фірмою Analog Devices у вигляді мікросхем. Частота вихідного сигналу СЧ розраховується за формулою

$$f_{\text{вих}} = M_{\text{вх}} \cdot f_{\text{т}} / 2^N,$$

де $f_{\text{вих}}$ – частота вихідного сигналу; $f_{\text{т}}$ – тактова частота; $M_{\text{вх}}$ – цифровий код частоти; N – розрядність слова управління в бітах. В роботі [5] розглянуто можливість регулювання фази вихідного сигналу під час цифрового синтезу частот та зроблено відповідні аналітичні розрахунки. Для цього в структуру СЧ вводиться спеціальний регістр фази і додатковий цифровий суматор кодів. Фаза вихідного синтезованого сигналу в даному випадку може бути розрахована за формулою

$$\varphi_{\text{вих}} = \frac{2\pi}{N_{\text{рф}}} \cdot N_{\text{ф}},$$

де $N_{\text{рф}}$ – розрядність спеціального регістру фази; $N_{\text{ф}}$ – код фази, який програмно встановлюється в спеціальному регістрі фази.

Принцип цифрового формування синтезованих сигналів з каліброваним значенням фазового зсуву між ними використано, наприклад, в схемі двоканального калібратора фази, докладно описаного в [6]. Точність під час формування заданих фазових зсувів в КФ за допомогою синтезованих сигналів потенційно може бути досить високою. Однак завдяки паразитним зв'язкам між колами каналів виникає похибка внаслідок часткового проходження сигналів з одного каналу в інший, яка має випадковий характер. Цей ефект особливо підсилюється на високих частотах (більше 1 МГц). В [6] розглядається механізм виникнення похибки від взаємозв'язку каналів та проводиться аналіз можливого її значення. В цьому випадку наявний паразитний зв'язок між каналами враховується уявними колами з комплексними коефіцієнтами передачі між каналами. Якщо вважати канали паразитного зв'язку симетричними, тобто з однаковими коефіцієнтами передачі K , максимальна фазова похибка від зв'язку між каналами наближено оцінюється в радіанах подвійним значенням модуля коефіцієнта передачі між каналами. Так, якщо $K = 10^{-3}$, що характерно для високих частот, то фазова похибка дорівнює приблизно 0,002 рад або $0,11^\circ$. Тому, наприклад, для найбільш точного серійного калібратора фази Н6-2, робота якого заснована на принципі прямого цифрового синтезу частоти [7], похибка відтворення фазових зсувів на низьких частотах (до 100 кГц) складає $\pm 0,01^\circ$, а вже на високих і дуже високих частотах (десятки і сотні мегагерц) основна похибка дорівнює $\pm(0,1^\circ \dots 0,5^\circ)$.

Під час перевірки фазовимірювального пристрою лазерного далекоміра за допомогою КФ відтворюване значення фазового зсуву сигналів приймається за дійсне, і похибка фазовимірювального пристрою визначається однозначно як різниця його показань та показань калібратора. При цьому похибка останнього повинна мати значення, яким можна знехтувати порівняно з похибкою пристрою, що вимірює фазовий зсув. В нашому випадку згідно (2) вимірювання фазового зсуву в лазерному далекомірі в разі його використання в наведеному вище прикладі за $f_{\text{м}} = 50$ МГц повинно відбуватися з похибкою, яка не перевищує значення $\Delta\varphi_{\text{х}} = 4 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} / 3 \cdot 10^8 \approx 10^{-3}$ рад або приблизно $0,06^\circ$. Тобто фазова похибка ($0,1^\circ \dots 0,5^\circ$) калібратора фази Н6-2 на високих частотах перевищує похибку фазовимірювального пристрою далекоміра. Таким чином, можна зробити висновок, що розглянуті вище КФ через недостатньої точності на високих частотах не можуть використовуватися для експериментальної оцінки апаратурних похибок фазовимірювальних пристроїв лазерних далекомірів.

Метою цієї роботи є розробка принципу побудови калібратора фазових зсувів сигналів із заданими метрологічними характеристиками для роботи в широкому діапазоні частот та схеми задля його практичної реалізації.

Враховуючи розвиток сучасних оптичних технологій та створення відповідних компонентів, задля підвищення точності відтворення фазових зсувів в широкому діапазоні частот автори пропонують перенести формування сигналів в оптичний діапазон електромагнітних хвиль. В цьому випадку світловий потік, що випромінюється лазером, модулюється по інтенсивності високою частотою f_0 , яка може складати від ста до тисячі мегагерц. Далі промінь світла, що модулюється, розподіляється по двом напрямкам, причому по одному із напрямків промінь світла розповсюджується через введену оптичну лінію з часовою затримкою τ . Шлях, що проходить промінь світла всередині лінії затримки, можна змінювати з високою точністю за рахунок регулювання положення її оптичних елементів.

Сформовані таким чином промені світла додатково модулюються по інтенсивності високочастотною напругою гетеродина з частотою f_r . В результаті отримаємо світлові промені, що промодульовані частотами f_0 і f_r . Далі промені світла фотоприймачами перетворюються в електричні сигнали, із спектра яких з різними комбінаційними частотами за допомогою фільтрації виділяються вихідні напруги $u_1(t)$ і $u_2(t)$ з частотою $f_k = f_0 - f_r$ [8]. Фаза кожної із напруг $u_1(t)$ і $u_2(t)$ визначається ходом світлових променів до фотоприймачів, а також довжиною хвилі модулюючої напруги частотою f_0 , яка може бути задана з високою точністю. Отже, змінюючи довжину шляху проходження променю через оптичну лінію затримки, можна досить точно задавати приріст фазового кута в одному із сигналів і таким чином встановлювати необхідний фазовий зсув між напругами $u_1(t)$ і $u_2(t)$. В даному випадку приріст фазового кута дорівнює

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot \Delta l / \lambda, \quad (3)$$

де Δl – приріст оптичного шляху, $\Delta l = c \cdot \tau$; λ – довжина хвилі, $\lambda = c / f_0$. Змінюючи значення τ таким чином, щоб $\Delta l = \lambda$, можна отримувати між напругами $u_1(t)$ і $u_2(t)$ регульований фазовий зсув в межах $0^\circ \dots 360^\circ$. При цьому перетворення частоти не змінює різницю фаз між каналами.

Таким чином, перетворення сигналів в оптичному діапазоні та використання високоточної лінії затримки із змінною довжиною оптичного шляху дають можливість за рахунок досягнення електричної розв'язки каналів підвищити точність відтворення прирістів різниці фаз між двома синхронними гармонічними напругами в широкому діапазоні частот.

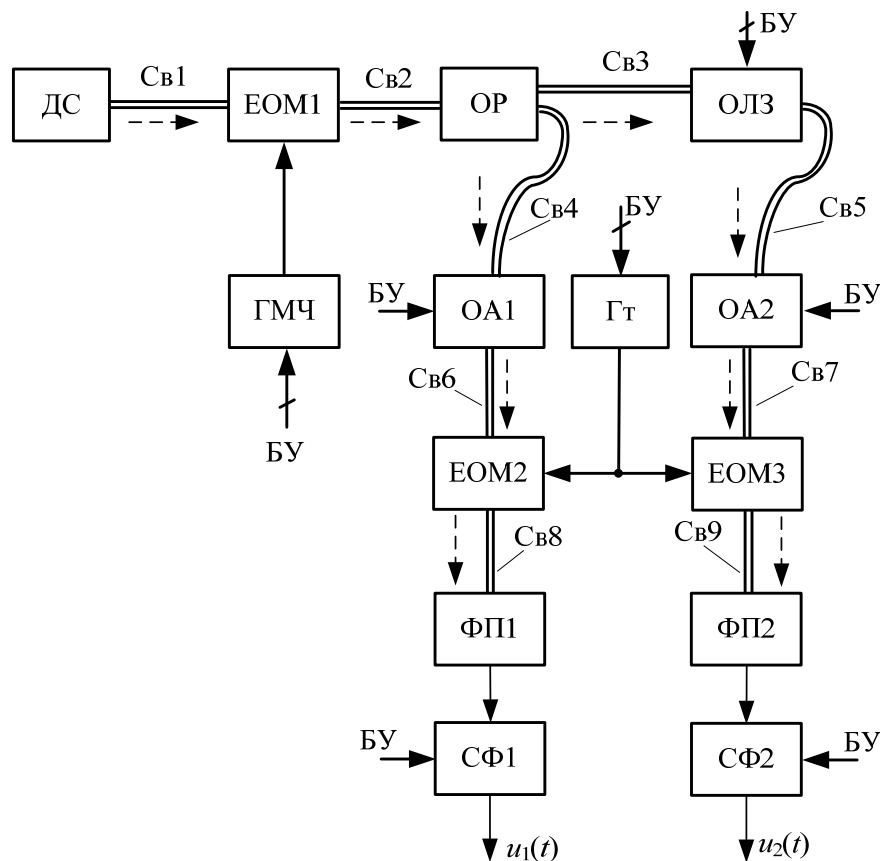
Задля практичної реалізації описаного принципу побудови калібратора фази розроблено структурну схему, яку наведено на рисунку. На схемі прийнято такі умовні позначення: ДС – джерело світла (лазер); ЕОМ1...ЕОМ3 – електрооптичні модулятори; ГМЧ – генератор модуляційної частоти; ОР – оптичний розгалужувач; ОЛЗ – оптична лінія затримки, що перебудовується; ОА1, ОА2 – оптичні атенюатори; Гт – гетеродин, що перебудовується; ФП1, ФП2 – фотоприймачі; СФ1, СФ2 – смугові фільтри, що перебудовуються; Св1...Св9 – оптоволоконні світловоди; БУ – блок управління; $u_1(t)$, $u_2(t)$ – вихідні напруги калібратора.

Робота калібратора здійснюється наступним чином.

Промінь світла від ДС по світловоду Св1 направляється на вхід електрооптичного модулятора ЕОМ1, за допомогою якого він модулюється по інтенсивності напругою від генератора ГМЧ з частотою f_0 . Далі промінь світла, що промодульований, через світловод Св2 попадає на вхід оптичного розгалужувача ОР, в якому розподіляється по двом напрямкам: одна частина світла по світловоду Св4 направляється на вхід оптичного атенюатора ОА1, а друга – через світловод Св3 попадає на оптичну лінію затримки ОЛЗ, довжина оптичного шляху якої може змінюватися під електричним управлінням БУ з високою точністю.

Світло, що вийшло із ОЛЗ, по світловоду Св5 попадає на вхід оптичного атенюатора ОА2. Проміні світла, які пройшли через ОА1 і ОА2, направляються по світловодам відповідно Св6 і Св7 на додаткові електрооптичні модулятори ЕОМ2 і ЕОМ3. Останні зв'язані з виходом загального гетеродина Гт, який за командою БУ може перебудовуватися по частоті. Тому на виходах ЕОМ2 і ЕОМ3 отримуємо світло, яке промодульовано частотою ГМЧ (f_0) і частотою гетеродина Гт (f_r). Далі промені світла поступають на фотоприймачі ФП1 і ФП2, за допомогою яких перетворюються в електричні сигнали. Останні подаються на смугові фільтри СФ1 і СФ2, які за командами БУ синхронно перебудовуються по частоті разом зі зміною частоти гетеродина Гт. Смугові фільтри виділяють із сигналів фотоприймачів ФП1 і ФП2 необхідні складові $u_1(t)$ і $u_2(t)$ з частотою $(f_0 - f_r)$. Як показано вище, змінюючи за відповідними командами значення часу затримки світлового променю в ОЛЗ, можна отримувати між напругами $u_1(t)$ і $u_2(t)$ фазовий зсув, регульований в межах $0^\circ \dots 360^\circ$. Задля спрощення на схемі не показано мікроконтролерний блок управління роботою калібратора та відліковий пристрій.

Задля встановлення абсолютних значень фазових зсувів між напругами $u_1(t)$ і $u_2(t)$ необхідно компенсувати початковий фазовий зсув, обумовлений різними за значеннями сумарними довжинами оптичних шляхів в каналах калібратора, створеними оптоволоконними світловодами. Для компенсації цієї адитивної похибки можна використати сам фазовимірювальний пристрій, що повіряється. За допомогою останнього вимірюється початковий фазовий зсув калібратора φ_n , який перераховується в значення часової затримки за формулою $\tau_i = \varphi_i \cdot \lambda / 2\pi \cdot \tilde{n}$. Останню приймають як ту, що відповідає нульовому фазовому зсуву між вихідними сигналами калібратора. Знайдене значення τ_n повинно відніматися від часової затримки, яка вводиться в оптичній лінії затримки у разі встановлення заданих кутів фазових зсувів.



Оцінимо точність відтворення фазових зсувів в розробленому калібраторі фази.

В даному випадку сумарна похибка відтворення фазових зсувів $\delta\varphi$ згідно (3) залежить від точності та стабільності частоти f_0 і точності заданої часової затримки τ . Задля визначення $\delta\varphi$ зупинимося на виборі генератора модуляційної частоти ГМЧ та оптичної лінії затримки ОЛЗ, які присутні в структурі запропонованого калібратора фази. Серед сучасних часових ліній затримки відомі електрокеровані високоточні оптоволоконні лінії затримки різної конструкції і призначення, які описано в [9]. Серед них, наприклад, лінія затримки VDL-SG-1500-1064, яка забезпечує максимальну затримку $\tau = 1500$ пс, роздільну здатність по затримці 6,5 фс, похибку визначення затримки $\Delta\tau = 33,5$ фс. При цьому задля забезпечення регулювання фазового зсуву в межах $0^\circ \dots 360^\circ$ значення тактової частоти f_0 вибирається за умови $\lambda = \Delta l = c \cdot \tau = 3 \cdot 10^8 \cdot 1,5 \cdot 10^{-9} = 0,45$ м. Тоді $f_0 = c/\lambda \approx 667$ МГц.

Використовуючи (3), знаходимо значення похибки відтворення фазових зсувів в залежності від точності τ за формулою

$$\delta\varphi' = \frac{360^\circ}{\lambda} \cdot c \cdot \Delta\tau, \quad (4)$$

де $\Delta\tau$ – похибка визначення часової затримки.

Після підстановки в (4) відповідних чисельних даних маємо

$$\delta\varphi' = \frac{360^\circ}{0,45} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 33,5 \cdot 10^{-15} \approx 0,008^\circ.$$

Похибка відтворення фазових зсувів в залежності від точності і стабільності частоти f_0 на основі (3) дорівнює

$$\delta\varphi' = 360^\circ \cdot \tau \cdot f_0 \cdot \delta f_0, \quad (5)$$

де δf_0 – відносне значення відхилення частоти f_0 .

В даному разі за ГМЧ можна вибрати цифровий синтезатор частоти, побудований на основі мікросхеми із переліку, наданому в [3]. Як відомо, цифровий синтезатор прив'язаний за частотою та фазою до сигналу опорного генератора і, відповідно, має таку ж точність та стабільність. Якщо як опорний генератор для цифрового синтезатора застосувати кварцовий генератор M15T5 40 МГц [10], то в інтервалі робочих температур $-40^\circ\text{C} \dots +85^\circ\text{C}$ відносне відхилення опорної частоти синтезатора складає 2,5 ppm. Тоді похибка $\delta\varphi''$ після підстановки в (5) чисельних даних дорівнює

$$\delta\varphi' = 360^\circ \cdot 1,5 \cdot 10^{-9} \cdot 667 \cdot 10^6 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} \approx 0,001^\circ.$$

Враховуючи обчислені значення похибок $\delta\varphi'$ та $\delta\varphi''$, знайдемо сумарну похибку відтворення фазових зсувів в розробленому калібраторі фази

$$\delta\varphi = \delta\varphi' + \delta\varphi'' = 0,009^\circ.$$

Таким чином, обчислена похибка $\delta\varphi$ суттєво менше похибки вимірювання фазового зсуву в лазерному далекомірі ($0,06^\circ$), що дає змогу використовувати калібратор в процесі розробки, дослідження та перевірки фазових лазерних далекомірів.

Висновки. Розроблено принцип побудови калібатора фази, під час реалізації якого за рахунок перетворення сигналів в оптичному діапазоні та використання регульованої високоточної оптичної лінії затримки можна забезпечити задану точність відтворення приростів різниці фаз між двома синхронними гармонічними напругами в широкому діапазоні частот. Це пояснюється тією обставиною, що підвищуючи частоту генератора ГМЧ до сотень МГц і використовуючи високоточні оптоволоконні лінії затримки як оптичні фазообертувачі, вдається отримувати досить високі точності відтворення фазових кутів. Застосування електрооптичних модуляторів як змішувачів дає змогу домогтися електричної розв'язки між каналами, що досить складно реалізувати в звичайних калібраторах фази. При цьому гетеродин Гт, який можна перебудовувати в широкому діапазоні частот, дає можливість отримувати калібровані із заданою точністю значення фазових зсувів сигналів на різних частотах. Ще однією перевагою розглянутого калібатора фази є застосування оптичних атенуаторів, які дають змогу змінювати рівні вихідних сигналів, не змінюючи при цьому їхньої фази. Це особливо важливо під час зняття амплітудно-фазових характеристик фазовимірювальних пристроїв. Треба відмітити, що в відомих калібраторах розробка безреактивних атенуаторів на широкий діапазон частот викликає значні труднощі. Перераховані обставини дають можливість використовувати запропонований прилад для метрологічного забезпечення фазових вимірювань в лазерній далекометрії.

Роботу виконано за рахунок держбюджетної теми «Розширення функціональних можливостей та підвищення метрологічних характеристик засобів вимірювання в системах моніторингу і діагностування в електроенергетиці» (шифр «Параметр-Д»), державний реєстраційний номер теми 0122U000136, КПКВК 6541030.

1. Михеечев В.С. Геодезические светодальномеры. М.: Недра, 1979. 222 с.
2. Брагинець І.О., Масюренко Ю.О. Лазерні вимірювальні системи з волоконно-оптичними сенсорами для контролю лінійних параметрів механічних об'єктів. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 5. С. 76-82. DOI: <https://doi.org/10.15407/technded2021.05.076>.
3. Макаренко В.В. Синтезаторы частоты прямого цифрового синтеза. *Электронные компоненты и системы*. 2004. № 1. С. 3-7.
4. DDS: прямой цифровой синтез частоты-Leoniv. URL: <http://www.Leoniv.diod.club/articles/pdf/dds.pdf> (дата доступу 31.03.2025).
5. Червинский Е.Н. Регулировка фазы при цифровом синтезе частот. *Радиоэлектроника*. 2007. Вып. 2. С. 30-36.
6. Куц Ю.В., Щербак Л.М. Статистична фазометрія. Тернопіль: Видавництво Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, 2009. 383 с.
7. Electronpribor KZ. H6-2 – калібратор фази. URL: <https://lep.kz/catalog/metrologiya/kalibratory-megaommetrov-i-testerov/n6-2/#product-2> (дата доступу 31.03.2025).

8. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Сов. радио, 1977. 608 с.
9. OPEAK[®]. URL: <http://www.opeak.com.cn/qbcp/guangxianzujian/guangxianyanchixian/8/> (дата доступу 31.03.2025). (CN)
10. Філур Електрик. Генератор кварцовий O-40,000-2.5ppm-TXO MEC. URL: <https://filur.net/ua/generator-o-40-000-2-5ppm-txo>. (дата доступу 31.03.2025).

METROLOGICAL SUPPORT OF PHASE MEASUREMENTS IN LASER RANGE-METRY

I.O. Brahynets, Yu.O. Masjurenko

**Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskyi Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.**

E-mail: masjuriv@ied.org.ua.

The relevance of developing precision two-channel signal phase shift calibrators (SFCs) in a wide frequency range for experimental assessment of hardware errors of phase measuring devices of laser rangefinders is confirmed. The possibility of constructing a SFC based on widespread direct digital synthesis frequency synthesizers is considered. It is shown that in the range of high and very high frequencies, which is typical for signals in phase laser rangefinders, the specified SFCs, due to parasitic couplings between the channel circuits, do not provide the required accuracy of reproducing the phase shift between two sinusoidal voltages. To increase the accuracy, it is proposed to transfer the formation of signals in the SFCs to the optical range of electromagnetic waves. The principle of constructing the corresponding SFCs is described and a scheme for its practical implementation is developed. The calculation of the possible error of the proposed SFCs is carried out, the result of which confirms the feasibility of its use for research and testing of phase measuring devices of high-precision laser rangefinders. References 10, figures 1.

Keywords: calibration, phase shift, optical range, laser rangefinder, phase measuring device.

1. Mikheev V.S. Geodetic rangefinders. Moskva: Nedra, 1979. 222 p. (Rus)
2. Brahynets I.O., Masjurenko Yu.O. Laser measuring system s with fiber-optical sensors for control of linear parameters of mechanical objects. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2021. No 5. Pp. 76-82. DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2021.05.076>. (Ukr)
3. Makarenko V.V. Frequency synthesizers of direct digital synthesis. *Elektronnye komponenty i sistemy*. 2004. No 1. Pp. 3-7. (Rus)
4. DDS: Direct Digital Synthesis. URL: <http://www.leoniv.diod.club/articles/pdf/dds.pdf> (accessed at 31.03.2025). (Rus)
5. Chervinskyi Ye.N. Phase control in digital frequency synthesis. *Radioelektronika*. 2007. Vyp. 2. Pp. 30-36. (Rus)
6. Kuts Yu.V., Shcherbak L.M. Statistical phase measurement. Ternopil: Vydavnytstvo Ternopilskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu imeni Ivana Puliuiia, 2009. 383 p. (Ukr)
7. Electronpribor KZ. H6-2 – phase calibrator. URL: <https://lep.kz/catalog/metrologiya/kalibratory-megaommetrov-i-testerov/n6-2/#product-2> (accessed at 31.03.2025). (Rus)
8. Gonorovskii I.S. Radio engineering circuits and signals. Moskva: Sov. radio, 1977. 608 p. (Rus)
9. OPEAK[®]. URL: <http://www.opeak.com.cn/qbcp/guangxianzujian/guangxianyanchixian/8/> (accessed at 31.03.2025) (CN)
10. Filur Elektrik. Quartz generator O-40,000-2.5ppm-TXO MEC. URL: <https://filur.net/ua/generator-o-40-000-2-5ppm-txo> (accessed at 31.03.2025). (Ukr)

Надійшла 09.04.2025
Остаточний варіант 15.05.2025