

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ВИСОКОТОЧНИХ ЛАЗЕРНИХ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЛІНІЙНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ

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

Показано, що у високоточних оптоелектронних системах для вимірювання лінійних переміщень об'єктів з дифузно-відбиваючою поверхнею, побудованих на базі фазових лазерних далекомірів, задля забезпечення заданої точності необхідно компенсувати вплив на результат вимірювання гармонічної завади. Розглянуто та проаналізовано методи компенсації цього впливу, які засновано на використанні різних алгоритмів вимірювання фазового зсуву, пропорційного відстані, що визначається. Оцінено недоліки та переваги кожного із методів, вироблено рекомендації щодо їхнього застосування. Запропоновано задля компенсації гармонічної завади використання електрооптичних перемикачів. Бібл. 12, рис. 3.

Ключові слова: переміщення, лазер, модуляція, фазовий зсув, гармонічна завада, електрооптичний перемикач.

Моніторинг ряду спеціальних об'єктів, в тому числі електроенергетичного призначення, передбачає проведення безконтактного вимірювання лінійних переміщень об'єкта або його елементів на базовій відстані до 30 м з похибкою не гірше 1,0 мм. Як показує практика, доцільним в даному випадку є використання оптоелектронних вимірювальних систем (ОВС), побудованих на базі лазерних далекомірів. В лазерних ОВС переміщення об'єкта визначається за зміною відстані відносно її базового значення. Як приклад можна привести оптичну вимірювальну систему [1], що створена на базі лазерного радара серії MV300 фірмою Metris (Бельгія) або реалізацію метода лазерної діагностики геометричних параметрів електричних машин [2].

Найбільш доцільним у зазначеному вище застосуванні є лазерний далекомір, побудований на фазовому методі вимірювання відстані [3]. Як відомо, в фазових лазерних далекомірах випромінюється гармонічно модульований високою частотою світловий потік, а відстань L_x визначається шляхом вимірювання зсуву фаз φ_x в межах одного фазового циклу огинаючих випромінюваного та відбитого від контрольованого об'єкту світлових потоків за формулою

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

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

На рис. 1 наведено типову структурну схему фазового лазерного далекоміру.

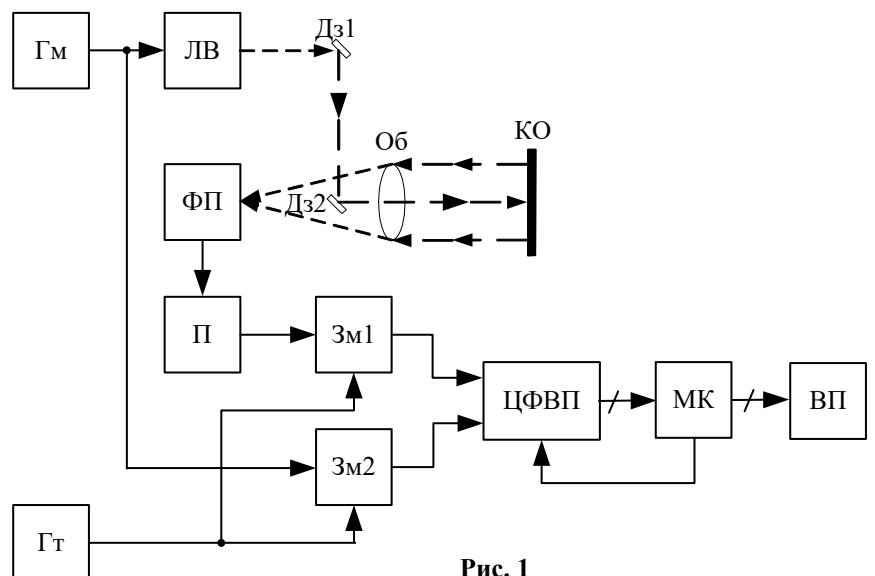


Рис. 1

© Брагинець І.О., Масюренко Ю.О., 2022
 ORCID ID: *<https://orcid.org/0000-0002-9528-5808>; ** <https://orcid.org/0000-0003-4209-1126>

На схемі прийнято такі умовні позначення: Γ_m – генератор модуляційної напруги; Γ_t – гетеродин; ЛВ – лазерний випромінювач; Дз1, Дз2 – дзеркала; КО – контрольований об’єкт; Об – об’єктив; ФП – фотоприймач; П – підсилювач; Зм1, Зм2 – змішувачі; ЦФВП – цифровий фазовимірювальний пристрій; МК – мікро-контролер; ВП – відліковий пристрій. Для спрощення на схемі не показано систему оптичного калібрування, яка використовується для стабілізації характеристик далеко-міра. Також на схемі відсутні блоки для вимірювання фазових зсувів на другій частоті модуляції з метою забезпечення однозначного визначення відстані до 30 м. Під час побудови ЦФВП доцільно використовувати принцип ортогональної обробки досліджуваного сигналу [4, 5].

Під час вимірювання відстані модульоване високою частотою випромінювання ЛВ через Дз1 та Дз2 направляється на контрольований об’єкт КО. Відбите від КО світлове випромінювання фокусується на вході фотоприймача ФП. Вихідний електричний сигнал ФП після підсилення за допомогою П подається на один із входів змішувача Зм1. Одночасно на один із входів змішувача Зм2 подається модуляційна напруга з виходу Γ_m . Другі входи Зм1 та Зм2 підключено до гетеродину Γ_t , частота вихідної напруги якого відрізняється від частоти Γ_m на значення проміжної частоти $f_{пр}$. Сформовані вихідні напруги Зм1 та Зм2 частоти $f_{пр}$, фазовий зсув між якими треба визначити, надходять на входи ЦФВП. Далі мікроконтролер МК по даним вимірювання ЦФВП за формулою (1) обчислює значення відстані L_x , яке виводиться на табло ВП.

Частота модуляції в фазових далекомірах вибирається в залежності від значення припустимої похибки вимірювання відстані ΔL_x та від похибки ЦФВП δ_ϕ . Сучасні цифрові фазометри у разі їхнього використання в структурі далекоміра можуть забезпечити вимірювання зсуву фаз з похибкою порядку $0,1^0$. Використовуючи формулу (1), можна знайти значення f_m , враховуючи, що $\delta_\phi = 0,1^0$, а ΔL_x має максимальне значення і дорівнює 1 мм

$$f_m = \frac{c\delta_\phi}{4\pi\Delta L_x} = 20 \text{ МГц.}$$

В фазових лазерних далекомірах як джерело випромінювання найчастіше використовуються напівпровідникові лазери. За таких високих частот модуляції (десятки МГц) і доволі сильних струмах накачки для забезпечення необхідної вихідної оптичної потужності лазера однією із домінуючих завод, які впливають на точність вимірювання відстані, є гармонічна завада. Остання обумовлена електричною наводкою із передавального каналу далекоміра в приймальний канал та «паразитним» відбиттям світла від конструктивних елементів оптико-механічного блоку далекоміра. Дія цієї завади посилюється тою обставиною, що під час контролю об’єктів з дифузним оптичним відбиттям, що має місце в даному випадку, амплітуда відбитого оптичного сигналу на виході фотоприймача через його низьку інтенсивність має малий рівень. З цієї причини значення похибки від впливу гармонічної завади залежить від відношення амплітуди досліджуваного сигналу до амплітуди гармонічної завади $\rho = U_s/U_p$ і визначається формулою

$$\Delta L_x = \lambda_e / 2\pi\rho, \quad (2)$$

де λ_e – еквівалентна довжина хвилі моделюючої напруги, $\lambda_e = c/2f_m = 3 \cdot 10^8 / 2 \cdot 2 \cdot 10^6 = 7500$ мм.

Застосовуючи формулу (2), знайдемо похибки ΔL_x за різних значень ρ : 100, 500 і 1000. Обраховані значення похибки ΔL_x складатимуть відповідно 12 мм, 2,4 мм і 1,2 мм. Як показала практика експериментальних робіт, значення ρ в фазовому далекомірі, який працює в описаному режимі, складає приблизно 400. Тому для отримання зазначеної вище точності вимірювання відстані необхідно застосовувати методи компенсації впливу гармонічної завади.

Метою даної роботи є проведення огляду та аналізу методів зменшення впливу гармонічної завади в фазових лазерних далекомірах, вироблення рекомендацій щодо їхнього застосування з урахуванням досягнень у створенні електрооптичних перемикачів світлового випромінювання.

У роботі [6] розглядається алгоритм вимірювання фазового зсуву в далекомірі з додатковим визначенням квадратурних складових гармонічної завади задля зменшення її впливу під час визначення відстані. Крім того, у разі застосування цього алгоритму компенсуються похибки квадратурних каналів фазовимірювального пристрою та комутаційні похибки. Однак введення для цього додаткових тактів суттєво збільшує час вимірювання відстані та посилює вплив випадкових похибок. Це пояснюється тим, що тривалість процесу визначення квадратурних складових завади задля зменшення загальної випадкової похибки відстані вибирається більшою, ніж час вимірювання параметрів досліджуваного сигналу.

Більш перспективними для компенсації впливу гармонічної завади є два алгоритми вимірювання фазових зсувів в далекому: з модуляцією амплітуди відбитого оптичного сигналу та з модуляцією часової затримки оптичного сигналу.

В першому випадку в далекому, схему якого наведено на рис. 1, вводиться оптичний атенуатор, який розміщується в фокусі об'єктива Об поблизу фотоприймача. При цьому вимірювання фазового зсуву проводиться в два такти за різних значень коефіцієнта ослаблення n оптичного сигналу. За результатами двох вимірювань обчислюється фазовий зсув, на значення якого вплив амплітуди гармонічної завади суттєво зменшується. Практичну реалізацію описаного алгоритму наведено в [7-9]. Проаналізуємо вимірювальні процеси, які проходять під час застосування описаного алгоритму, а також встановимо, яким чином обчислюється вимірювальна відстань.

Сигнал на виході фотоприймача далекого буде представляти собою суму двох сигналів: дистанційного $U_s = A_s \sin(\omega t + \varphi_x)$ та гармонічної завади $U_p = A_p \sin \omega t$, де A_s і A_p – амплітуди відповідних сигналів.

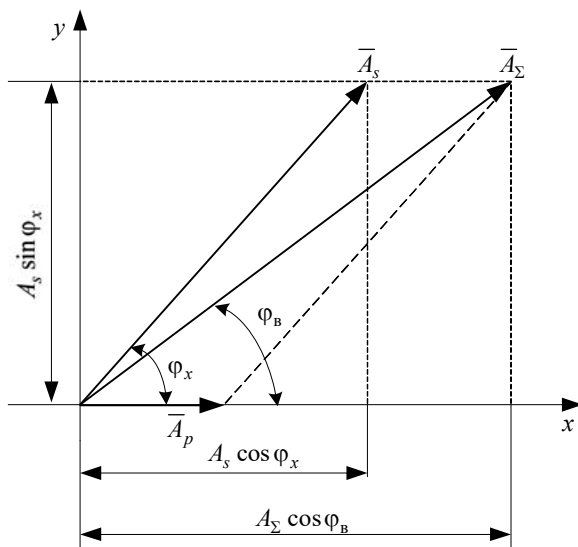


Рис. 2

На рис. 2 зображено векторну діаграму напруг на виході фотоприймача далекого за поточного часу $t = 0$, де \vec{A}_s – вектор напруги дистанційного сигналу, \vec{A}_p – вектор напруги завади, \vec{A}_Σ – вектор напруги сумарного сигналу. Згідно цієї діаграми, використовуючи відомі тригонометричні перетворення, можна записати

$$U_s + U_p = A_\Sigma \sin(\omega t + \varphi_\Sigma), \quad (3)$$

$$\text{де } A_\Sigma = \sqrt{(A_s \cos \varphi_x + A_p)^2 + (A_s \sin \varphi_x)^2};$$

$$\varphi_\Sigma = \arctg \frac{A_s \sin \varphi_x}{A_s \cos \varphi_x + A_p}.$$

Згідно з (3) маємо

$$\text{ctg} \varphi_\Sigma = \text{ctg} \varphi_x + \frac{A_p}{A_s} \cdot \frac{1}{\sin \varphi_x}. \quad (4)$$

Інформація про відстань до контрольованого об'єкта міститься у фазі дистанційного сигналу φ_x . Фазовимірювальний пристрій фіксує фазу сумарного сигналу φ_Σ , яка пов'язана з фазовим зсувом φ_x формулою (4) і відрізняється від неї тим більше, чим менше відношення сигнал-завада.

Під час реалізації алгоритму, що розглядається, для кожного із тактів роботи згідно формули (4) маємо

$$\text{ctg} \varphi'_\Sigma = \text{ctg} \varphi_x + \frac{A_p}{A_s} \cdot \frac{1}{\sin \varphi_x}; \quad \text{ctg} \varphi''_\Sigma = \text{ctg} \varphi_x + \frac{nA_p}{A_s} \cdot \frac{1}{\sin \varphi_x}. \quad (5)$$

Вирішення системи рівнянь (5) відносно φ_x має вигляд

$$\text{ctg} \varphi_x = \frac{n \text{ctg} \varphi'_\Sigma - \text{ctg} \varphi''_\Sigma}{n - 1}. \quad (6)$$

Використовуючи формулу (6), можна розрахувати справжнє значення фазового зсуву φ_x за результатами двох вимірювань фази сумарного сигналу φ'_Σ і φ''_Σ за різних значень амплітуди дистанційного сигналу A_s та nA_s . При цьому виключається вплив на результат визначення відстані за формулою (1) гармонічної завади.

Недоліком описаного методу є той факт, що в порівнянні з результатами безпосереднього вимірювання φ'_Σ і φ''_Σ , за рахунок введення в одному із тактів вимірювання послаблення відбитого оптичного сигналу збільшується випадкова похибка. Як показали розрахунки, проведені в [9], у разі послаблення оптичного сигналу в 2 рази випадкова похибка може збільшитися в $\sqrt{5}$ раз.

Вказаний недолік усувається під час реалізації запропонованого алгоритму вимірювання фазового зсуву, який теж передбачає два такти роботи приладу. При цьому в одному із тактів

здійснюється часова затримка відбитого від контрольованого об'єкту сигналу на величину $\tau = \varphi_d / (2\pi \cdot f_m) = 0,5 \cdot f_m^{-1}$. Це відповідає додатково внесеному фазовому зсуву $\varphi_d = \pi$. Часову затримку τ може бути сформовано у спосіб, який наведено в [9]. При цьому в схемі далекоміра на відміну від тієї, що наведено на рис. 1, відбитий оптичний сигнал за допомогою двох світловодів почергово направляється на вхід фотоприймача Φ . Торці світловодів закріплено в переміщуваній обоймі, яку розміщено у фокусній площині об'єктива Об. В кожному із тактів вимірювання електромеханічним засобом (за допомогою електромагнітного кулісного пристрою) в фокусі Об розміщується то один, то інший торець світловода. Довжина світловодів вибирається таким чином, щоб часові затримки в них відрізнялися на величину τ .

Описаний спосіб формування τ та його практична реалізація суттєво ускладнює конструкцію далекоміра, знижує швидкість та надійність його роботи. Враховуючи це, автори пропонують для комутації часової затримки τ використовувати швидкодіючі електрооптичні перемикачі світла на два положення. Останні за принципом роботи можна поділити на інтегрально-оптичні (ІОП) та волоконно-оптичні (ВОП) перемикачі. Під час застосування перемикачів в схемі далекоміра торець вхідного світловода перемикача розміщується в фокусі об'єктива, а торці світловодів далекоміра, які забезпечують затримку τ , з'єднано з оптичними виходами перемикача. В ІОП перемикачів світлового потоку здійснюється шляхом подачі на управляючі електроди низьковольтної напруги [10]. Серед ВОП відомо волоконно-оптичні MEMS перемикачі, які детально описано в [11, 12]. Їхнє управління здійснюється подачею постійної напруги 4,5-5 В, швидкість перемикачів 1...3 мс.

Розглянемо вимірювальні процеси в цьому випадку.

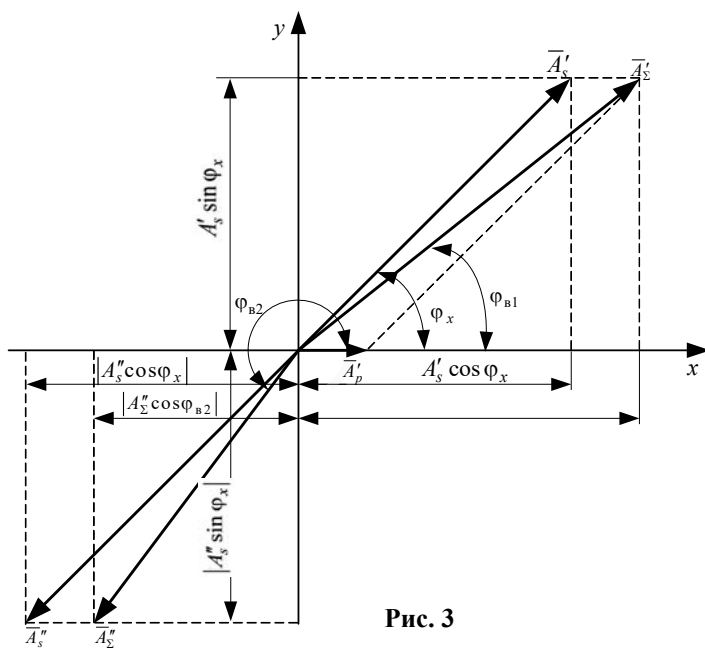


Рис. 3

На рис. 3 приведено векторну діаграму напруг на виході фотоприймача далекоміра у момент часу $t = 0$ в кожному із тактів його роботи.

На діаграмі позначено: \vec{A}'_s , \vec{A}''_s – вектори напруг дистанційного сигналу на виході фотоприймача в 1-му та 2-му тактах вимірювання; \vec{A}_p – вектор напруги завади; \vec{A}'_s , \vec{A}''_s – вектори напруги сумарного сигналу в 1-му та 2-му тактах вимірювання; φ_{b1} , φ_{b2} – фазові зсуви сумарного сигналу в 1-му та 2-му тактах вимірювання.

Згідно з (3) та векторною діаграмою на рис. 3 маємо

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg} \varphi_{b1} &= \operatorname{ctg} \varphi_x + \frac{A_p}{A'_s} \cdot \frac{1}{\sin \varphi_x}; \\ \operatorname{ctg} \varphi'_{b2} &= \operatorname{ctg} \varphi_x - \frac{A_p}{A''_s} \cdot \frac{1}{\sin \varphi_x}, \end{aligned} \quad (7)$$

де $\varphi'_{b2} = \varphi_{b2} - \pi$.

Вирішення системи рівнянь (7) відносно φ_x буде мати вигляд

$$\operatorname{ctg} \varphi_x = \frac{1}{2} \cdot (\operatorname{ctg} \varphi_{b1} + \operatorname{ctg} \varphi'_{b2}). \quad (8)$$

Використовуючи формулу (8), можна розрахувати справжнє значення фазового зсуву φ_x за результатами двох вимірювань фази сумарного сигналу φ_{b1} і φ_{b2} . При цьому значення $\varphi_d = \pi$ визначається в процесі оптичної калібровки далекоміра, коли вплив гармонічної завади досить незначний. У разі застосування описаного алгоритму згідно формули (8) виключається вплив на результат визначення відстані гармонічної завади. Оскільки значення $\operatorname{ctg} \varphi_{b1}$ і $\operatorname{ctg} \varphi'_{b2}$ відрізняються між собою незначно, то в даному випадку практично не погіршується завадостійкість системи вимірювання фазового зсуву із-за впливу випадкової похибки вимірювання.

Висновки. 1. Застосування методу компенсації, заснованого на додатковому вимірюванні квадратурних складових гармонічної завади для її оцінки та обліку в остаточному результаті вимірювання фазового зсуву, суттєво збільшує час визначення відстані та посилює вплив випадкових похибок. Разом з тим, вказаний метод дає змогу одночасно усунути вплив неідентичності та нестабільності характеристик каналів фазового детектора. Тому, якщо відсутні жорсткі вимоги до швидкодії далекоміра, з урахуванням осереднення результатів багатократних вимірювань цей метод може забезпечити високу точність вимірювання відстані.

2. Більш перспективними для компенсації впливу гармонічної завади є алгоритми безпосереднього вимірювання фазових зсувів в далекомірі, які не призводять до збільшення загального часу вимірювання. У числі останніх найбільшої уваги заслуговує алгоритм з модуляцією часової затримки оптичного сигналу. Для його практичної реалізації запропоновано більш просту та надійну, порівняно з відомими, схему далекоміра, в якій для комутації часової затримки τ використовуються швидкодіючі інтегрально-оптичні та волоконно-оптичні перемикачі світла на два положення.

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. Бесконтактная измерительная система на базе лазерного радара серии MV 300. URL: <https://nevatec.ru/wp-content/uploads/2017/03/mv300.pdf> (дата доступу 22.05.2022)
2. Круглова Т.Н., Ярошенко И.В., Мельников М.А., Работалов Н.Н. Метод лазерной диагностики динамической формы ротора гидрогенератора. *Инженерный вестник Дона. Сетевое издание*. 2015. № 1. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_39_Kruglova.pdf_30d454bee1.pdf (дата доступу 14.05.2021).
3. Михеечев В.С. Геодезические светодальномеры. М.: Недра, 1979. 222 с.
4. Куц Ю.В., Щербак Л.М. Статистична фазометрія. Тернопіль: Видавництво Тернопільського Державного технічного університету імені Івана Пулюя, 2009. 385 с.
5. Чмых М.К. Цифровая фазометрия. М.: Радио и связь, 1993. 143 с.
6. Кононенко А.Г., Кромпляс Б.А., Масюренко Ю.А., Ниженский А.Д., Орнатский И.А., Сидорчук В.Е. Оптимальный преобразователь фаза-код для высокоточных фазовых светодальномеров. *Техническая электродинамика*. 1999. № 3. С. 66-70.
7. Козлов В.Л., Кузьмин К.Г., Чубаров С.И. Светодальномер. Патент РБ №6490, 2004.
8. Козлов В.Л. О повышении точности измерений фазовых дальномеров. *Вестник Белорусского государственного университета. Серия 1*. 2010. № 2. С. 145-146.
9. Брагинец И.А., Евдокимов М.С., Кононенко А.Г., Масюренко Ю.А. Ниженский А.Д. Самокорректирующийся лазерный измеритель расстояний до диффузно-отражающих поверхностей. *Технічна электродинаміка. Тем. вип. Проблеми сучасної електротехніки*. Ч. 2. 2002. С.113-116.
10. Кирчанов В.С. Физические основы нанотехнологий фотоники и оптоинформатики. Пермь: Из-тво Перм. нац. иссл. политех. ун-та, 2019. 221 с.
11. MEMS Fiber Optical Switches. URL: <https://agiltron.com/category/optical-switches/mems-optical-switches-etmems/> (дата доступу 15.06.2022).
12. Волоконно-оптические переключатели. URL: <https://lenlasers.ru/perm/catalog/volonno-opticheskie-pereklyuchateli/> (дата доступу 12.05.2022).

METHODS FOR IMPROVING THE NOISE IMMUNITY OF HIGH-PRECISION LASER OPTOELECTRONIC SYSTEMS FOR MEASURING LINEAR DISPLACEMENTS

I.O. Brahynets, Yu.O. Masjurenko

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: masjuriy@ied.org.ua

It is shown that in high-precision optoelectronic systems for measuring the linear displacements of objects with diffuse-reflecting surface, built on the basis of phase laser rangefinders, to ensure a given accuracy, it is necessary to compensate for the effect on the measurement of harmonic noise. Methods of compensation of this influence which are based on use of various algorithms of measurement of a phase shift proportional to distance which is defined are considered and analyzed. The disadvantages and advantages of each of the methods are evaluated, recommendations for their use are made. It is proposed to compensate for the harmonic interference of the use of electro-optical switches. References 12, figures 3.

Keywords: displacement, laser, modulation, phase shift, harmonic noise, electro-optical switch.

1. Non-contact measuring system based on laser radar MV 300 series. URL: <https://nevatec.ru/wp-content/uploads/2017/03/mv300.pdf> (accessed at 22.05.2022). (Rus)
2. Kruglova T.N., Yaroshenko I.V., Melnikov M.A., Rabotalov N.N. Method of laser diagnostic of dynamic forms of hydraulic generator rotor. *Inzhenernyi vestnik Dona: Setevoe izdanie*. 2015. No 1. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_39_Kruglova.pdf_30d454bee1.pdf (accessed at 14.05.2022). (Rus)
3. Mikhechev V.S. Geodetic light range finders. Moskva: Nedra, 1979. 222p. (Rus)
4. Kuts Yu.V., Shcherbak L.M. Statistical phasometry. Ternopil: Vydavnytstvo Ternopilskoho Derzhavnoho tekhnichnoho universytetu imeni Ivana Puluia, 2009. 385 p. (Ukr)
5. Chmykh M.K. Digital phasometry. Moskva: Radio i Sviaz. 1993. 143 p. (Rus)
6. Kononenko A.G., Kromplias B.A., Masjurenko Yu.A., Nizhenskii A.D., Ornatskii I.A., Sidorchuk V.Ye. High-precision phase laser measuring distance to diffusely reflective surfaces. *Tekhnicheskaiia Elektrodinamika*. 1999. No 3. Pp. 66-70. (Rus)
7. Kozlov V.L., Kuzmin K.G., Chubarov S.I. Light rangefinder. Patent BY No 6490, 2004. (Rus)
8. Kozlov V.L. About of Improving the Measurement Accuracy of Phase Rangefinders. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriiia 1*. 2010. No 2. Pp. 146-146. (Rus)
9. Braginets I.A., Yevdokimov M.S., Kononenko A.G., Masjurenko Yu.A., Nizhenskii A.D. Self-correcting laser measuring distance to diffuse reflective surfaces. *Tekhnichna Elektrodinamika. Tematychnyi vypusk: Problemy suchasnoi elektrotekhniki*. Part. 2. 2002. Pp. 113-116. (Rus)
10. Kirchanov V.S. Physical foundations of nanotechnologies of photonics and optoinformatics. Perm: Izdatelstvo Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo universiteta, 2020. 221 p. (Rus)
11. MEMS Fiber Optical Switches. URL: <https://agiltron.com/category/optical-switches/mems-optical-switches-etmems/> (accessed at 15.06.2022).
12. Fiber Optic Switches. URL: <https://lenlasers.ru/perm/catalog/volokonno-opticheskie-pereklyuchateli/> (accessed at 12.06.2022). (Rus)

Надійшла 31.05.2022
Остаточний варіант 04.07.2022