

ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ

УДК 681.787:004.3

РОЗРОБЛЕННЯ ФАЗОЗСУВНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДУ ТРИКРОКОВОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ З ДОВІЛЬНИМИ ЗСУВАМИ ОПОРНОГО ПРОМЕНЯ

Л. Муравський^{1,2}, А. Дрималик¹, Г. Гаськевич¹, І. Стасишин¹

¹Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України
вул. Наукова, 5, 79060 Львів, Україна
muravskyleon@gmail.com

²Національний університет “Львівська політехніка”
вул. Степана Бандери, 12, 79000 Львів, Україна

Розглянуто два основні підходи до реалізації процедур покрокового та плавного фазових зсувів одного з променів у двопробеновому оптичному інтерферометрі. Розроблено фазозсувний пристрій, який використовують для реалізації методу трикрокової фазозсувної інтерферометрії з двома довільними фазовими зсувами опорного променя в межах кутового інтервалу $(0, \pi)$. Пристрій містить фазозсувний елемент та електронний блок плавного лінійного переміщення фазозсувного елемента в інтерферометрі. Описано принцип дії макета пристрою та наведено схему експериментальної установки, побудованої на основі інтерферометра Тваймана–Гріна, для формування, реєстрації та опрацювання інтерферограм. З'ясовано, що за нетривалої експозиції інтерферограм, відношення яких до часу зростання напруги в кутовому інтервалі $(0, \pi)$ не перевищують 0,06, функція передавання модуляції інтерферограми, зареєстрованої за плавного фазового зсуву опорного променя, не відрізняється від функції передавання модуляції інтерферограми, отриманої за покрокового зсуву фази.

Ключові слова: фазозсувна інтерферометрія, фазозсувний елемент, інтерферограма, функція передавання модуляції.

Останніми роками досягнуто значних успіхів у розробленні нових високоефективних методів і засобів оптичної інтерферометрії для дослідження поверхонь різноманітних матеріалів та виробів. Інтенсивний розвиток когерентної і некогерентної інтерферометрії зумовлений великою інформаційною ємністю оптичних сигналів, паралельністю опрацювання та реєстрації багатовимірних інформаційних масивів, досягненнями у створенні нових засобів реєстрації зображень, удосконаленням програмно-алгоритмічного забезпечення для опрацювання інтерферограм [1–4].

Серед новітніх методів фазозсувної інтерферометрії (ФЗІ) розрізняють часову і просторову. У часовій ФЗІ для відтворення фазової мапи об'єкта дослідження необхідно у двопробеновому інтерферометрі ввести декілька рознесених у часі фазових зсувів δ_j ($j = 1, 2, \dots, J$) між опорним і предметним хвильовими фронтами. У підсумку в кожній

точці інтерферограми формується змінний у часі сигнал, у якому закодовані всі різниці фаз між опорним і предметним променями, що формувались виконанням J фазових зсувів, зазвичай, опорного хвильового фронту. Сформовану фазову мапу легко перетворити в мапу оптичних різниць ходу у двох плечах інтерферометра. У просторовій ФЗІ зсунуті за фазою інтерферограми об'єкта дослідження або розносять у просторі, або синтезують на основі однієї інтерферограми [1–4]. Оскільки для просторової ФЗІ достатньо лише однієї реєстрації інтерференційної картини, то її використовують під час дослідження швидкоплинних процесів, зокрема, за швидкої зміни положення поверхні об'єкта. Однак роздільна здатність просторової ФЗІ на порядок нижча, ніж часової. Тому для детальнішого і точнішого аналізу рельєфів та профілів поверхні застосовують часову ФЗІ.

Запропоновано два основні підходи до реалізації процедури фазових зсувів у часовій ФЗІ [1, 4, 5]. Згідно з першим, зсуви фаз відбуваються покроково. Часовий стрибкоподібний зсув δ_j для кожного j -го кроку можна виконувати як опорним, так і предметним променями, однак технічно простіше і надійніше – опорним. Такий підхід потребує стрибкоподібної зміни фазових зсувів δ_j . Після кожного стрибка фази виникають механічні осциляції фазозсувного елемента (ФЗЕ), які загасають упродовж деякого проміжку часу. Ці осциляції спричиняють неконтрольовані коливання дзеркала або іншого оптичного елемента, який безпосередньо виконує фазовий зсув, унаслідок чого розмір цього зсуву змінюється з часом. Зазначені обставини суттєво сповільнюють процедуру реєстрації серії інтерфограм з фазовими зсувами δ_j . На рис. 1, а показано діаграми стрибкоподібної зміни фази й інтенсивності пікселя матричного фотоприймача, відповідно, у покроковому фазозсувному алгоритмі. У другому підході фазовий зсув δ променя зростає неперервно в часі (зазвичай, за лінійним законом) за подавання на ФЗЕ напруги, що постійно зростає. Тоді кожен інтерфограму реєструють упродовж деякого часового проміжку Δ_t . На рис. 1, б зображено діаграму плавної зміни фази та інтенсивності пікселя матричного фотоприймача, відповідно, у фазозсувному алгоритмі з чотирма інтегрованими фазовими зсувами. В англійській літературі такий підхід називають “integrating-bucket (IB) method” [1,5]. Тому називатимемо його методом часового інтегрування інтерфограми за плавного фазового зсуву, або ІВ-методом.

За малих значень Δ_t ІВ-метод практично не поступається перед методом покрокового (дискретного) зсуву фази. Водночас він має суттєву перевагу, яка полягає в тому, що за плавного зсуву фази хвильового фронту вібрацій, пов'язаних з механічними коливаннями фазозсувного елемента під час його раптової зупинки, нема. Ця перевага особливо важлива під час швидкої реєстрації серії інтерференційних картин, оскільки тут похибки, спричинені випадковими осциляціями фазозсувного елемента після його зупинки, не впливатимуть на зареєстровані інтерфограми.

У фазозсувному інтерферометрі необхідно забезпечити калібрування ФЗЕ, яке давало б змогу виконувати зсув фази опорного променя на заданий кут. У більшості фазозсувних алгоритмів усі послідовні зсуви фаз є однаковими і становлять $2\pi/J$. Для відтворення об'єкта з низьким рівнем завад похибка позиціонування ФЗЕ на повинна перевищувати десятих часток градуса. Тому точність фазового зсуву є одним із визначальних параметрів для комерційних фазозсувних пристроїв (ФЗП), серед яких найбільше поширені п'єзоелектричні (ПЗЕ). Розрізняють два типи ПЗЕ ФЗП [6]. Перший забезпечує лінійну залежність переміщення від поданої напруги завдяки системі керування з закритим зворотним зв'язком і дає змогу досить точно визначити заданий фазовий зсув. Для другого характерна нелінійна залежність переміщення від напруги і він не забезпе-

чує такої точності, як перший. Однак навіть ФЗП другого типу мають досить високу вартість.

Сьогодні розроблено низку дво- і трикрокових фазозсувних методів і алгоритмів, у яких фазові зсуви є довільними в певному кутовому інтервалі (наприклад, від 0 до π) [7–9]. Для їхньої реалізації не потрібне калібрування ФЗЕ і, отже, використання каліброваних комерційних ФЗП. Щоб керувати некаліброваним ФЗЕ під час реєстрації інтерферограм з довільним зсувом фази опорного променя, достатньо лише використати ІВ-метод та розробити програму генерування часових інтервалів реєстрації з довільними моментами їхнього запуску під час переміщення ФЗЕ.

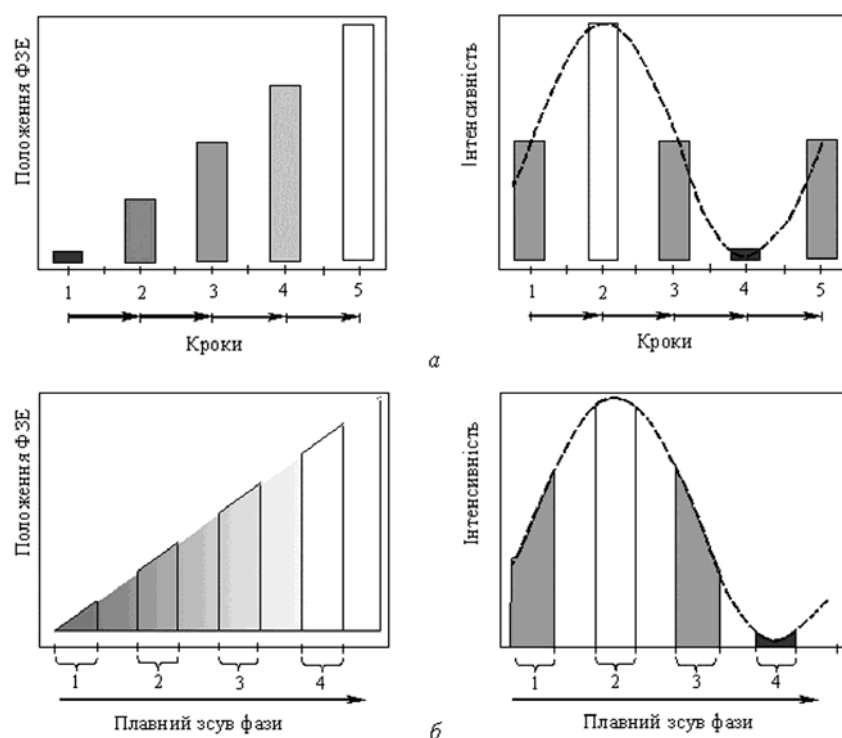


Рис. 1. Приклади покрокового (а) і плавного (б) зсувів фази для часового фазозсувального алгоритму.

Для реалізації інформаційної технології трикрокової ФЗІ з двома довільними фазовими зсувами опорного променя в межах кутового інтервалу $(0, \pi)$ [9, 10] створено макет ФЗП, що містить ФЗЕ з прикріпленим до нього дзеркалом та електронний блок плавного лінійного переміщення ФЗЕ (рис. 2). Завдяки створеному макету можна використовувати ІВ-метод для автоматичної реєстрації трьох інтерферограм об'єкта дослідження, що відрізняються між собою лише довільними фазовими зсувами хвильового фронту опорного променя. Електронний блок керує плавним зсувом ФЗЕ із дзеркалом, який уводять у плече опорного променя фазозсувального інтерферометра, побудованого за схемою Тваймана–Гріна. Плавний зсув ФЗЕ із дзеркалом спричиняє плавний фазовий зсув хвильово-

го фронту опорного променя. Блок-схема макета електронного блока зображена на рис. 3. Діаграми плавної зміни фази для двох довільних (сліпих) фазових зсувів показані на рис. 4.



Рис. 2. Макет електронного блока.

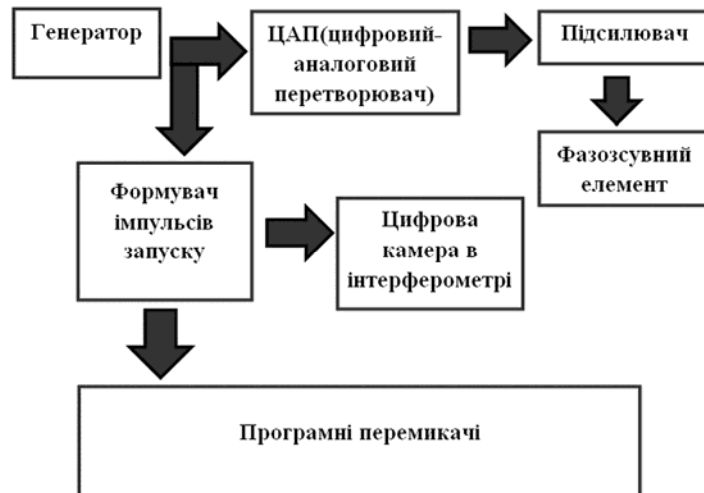


Рис. 3. Блок-схема макета.

Принцип дії макета полягає в поданні плавної напруги на ФЗЕ, що призводить до його деформації, зокрема, зміни розмірів. Завдяки цьому дзеркало, прикріплене до торця ФЗЕ, пересувається, а опорний хвильовий фронт, який у інтерферометрі Тваймана–Гріна

падає на дзеркало перпендикулярно до його площини, за переміщення дзеркала на відстань δl пересувається на відстань $2\delta l$, тобто відбувається плавна зміна фази хвильового фронту $\delta\varphi=4\pi(\delta l)/\lambda$, де λ – довжина хвилі випромінювання лазера в інтерферометрі.

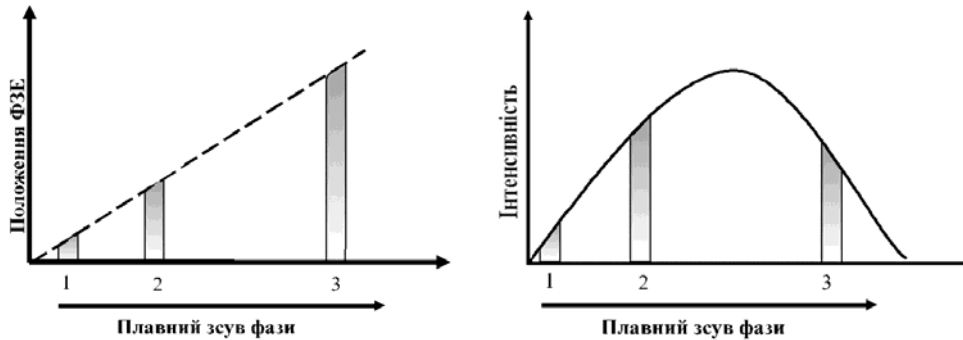


Рис. 4. Діаграми плавної зміни фази для двох довільних фазових зсувів.

Генератор формує імпульси для узгодженої роботи цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) і формувача імпульсів для запуску цифрової камери в інтерферометрі Тваймана–Гріна, яка реєструє інтерферограми досліджуваного об'єкта у вихідній площині інтерферометра. Імпульс цифрового коду формується у генераторі за допомогою подільників частоти. ЦАП перетворює імпульси цифрового коду на пилоподібну аналогову напругу в межах від 0 до 12 В. Пилоподібну напругу після ЦАП подають на підсилювач, у якому відбувається її згладжування, підсилення й обрізання пилки для досягнення лише одного циклу плавної зміни напруги. Плавна зміна напруги на виході підсилювача має діапазон від 0 до 48 В. Напругу з підсилювача подають безпосередньо на ФЗЕ. Імпульси запуску з формувача імпульсів також надходять на програмні перемикачі, які встановлюють момент запуску. Завдяки цьому переміщення дзеркала у ФЗЕ синхронізується з часом запуску цифрової відеокамери. Формувач імпульсів створює імпульси для запуску цифрової відеокамери, що реєструє інтерферограми. Моменти запуску задає оператор за допомогою програмних перемикачів.

Для формування, реєстрації та подальшого опрацювання інтерферограм певної ділянки гладкої або наношорсткої поверхні зразка розроблено експериментальну установку, побудовану на основі інтерферометра Тваймана–Гріна (рис. 5). Вона містить ФЗП, що складається з ПЗЕ ФЗЕ 7, прикріпленого до нього дзеркала 4 та блока керування фазозсувним елементом 8, спеціальний кондуктор для точного позиціонування й утримання досліджуваного зразка, цифрову ПЗЗ-камеру 6 (SONYXCD-SX910 Fireware Camera) і ПК 12 для опрацювання інтерферограм та побудови зображень рельєфу поверхні за розробленою інформаційною технологією трикрокової ФЗІ з двома довільними фазовими зсувами опорного променя [9]. В установці використано одномодовий газовий лазер ЛГН-215 (довжина хвилі випромінювання $\lambda = 633$ нм, потужність – 50 мВт). Під час формування інтерферограм з довільними зсувами фаз $\alpha_{21} = \alpha_2 - \alpha_1$ і $\alpha_{31} = \alpha_3 - \alpha_1$ з блока керування 8 на фазозсувний елемент 7 подавали напругу U_{ph} у межах $0 < U_{ph} \leq 24$ В, унаслідок чого формували опорний пучок, зсунутий за фазою відносно свого початкового стану $\alpha_1 = 0$ на кути α_{21} і α_{31} від 0 до π .

Час подання плавної напруги на ФЗЕ можна регулювати в межах від 0,2 до 90 с. Знаючи проміжок часу Δ_t , за який реєструють інтерферограму за допомогою матричного фотосенсора, можна оцінити, як впливає функція передавання модуляції на її зміну порівняно з інтерферограмою, зареєстрованою за покрокового зсуву фази. Як відомо, фундаментальне рівняння для однохвильової часової ФЗІ під час плавного фазового зсуву опорного хвильового фронту, тобто рівняння, яке описує просторовий розподіл інтенсивностей $I(x, y)$ в інтерферограмі, має такий вигляд [1]:

$$I(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y)\gamma(\Delta_t) \cos[\varphi(x, y) + \delta(t)], \quad (1)$$

де $I'(x, y) = I_o(x, y) + I_r(x, y)$ – середня (фонова) інтенсивність інтерферограми у будь-якій точці площини (x, y) ; $I_o(x, y)$, $I_r(x, y)$ – інтенсивності предметної та опорної хвиль; $\psi(x, y) = \psi_o(x, y) - \psi_r(x, y)$ – шукана фаза хвильового фронту; $\psi_o(x, y)$ – розподіл фаз у предметному хвильовому фронті; $\psi_r(x, y)$ – розподіл фаз у опорній хвилі; $I''(x, y) = 2\sqrt{I_o(x, y)I_r(x, y)}$ – функція видності; $\delta(t)$ – часовий фазовий зсув опорного променя; $\gamma(\Delta_t)$ – функція передавання модуляції (ФПМ). Зазначимо, що ФПМ для плавного зсуву фази має вигляд

$$\gamma(\Delta_t) = \text{sinc}(\Delta_t / 2), \quad (2)$$

де $\text{sinc}(u) = \sin u / u$, а для покрокового зсуву фази $\gamma(\Delta_t) = 1$.

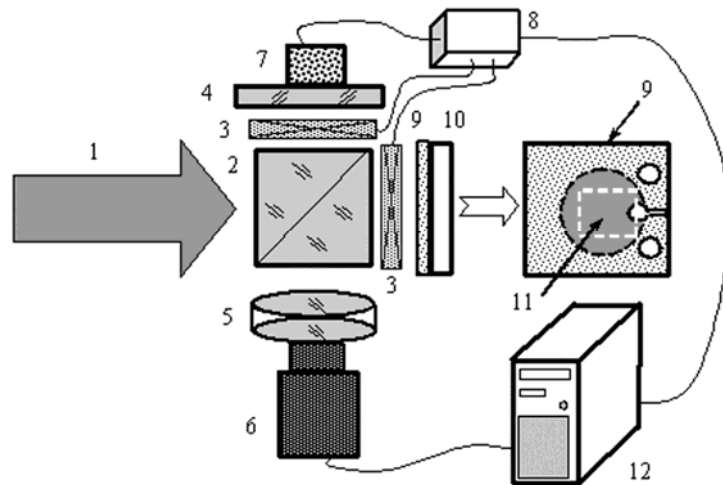


Рис. 5. Експериментальна установка для формування, реєстрації та опрацювання інтерферограм: 1 – розширений лазерний пучок ($\lambda = 633$ нм); 2 – світлоподільник; 3 – закриви; 4 – дзеркало в плечі опорного променя інтерферометра Тваймана-Гріна; 5 – об'єктив; 6 – цифрова камера; 7 – фазозсувний п'єзокерамічний елемент; 8 – блок керування фазозсувним пристроєм; 9 – об'єкт; 10 – кондуктор; 11 – досліджувана ділянка поверхні об'єкта; 12 – комп'ютер.

Легко довести, що за малих значень Δ_t впливу ФПМ на вихідний сигнал практично нема. Наприклад, за плавної зміни $\delta(t)$ для $\Delta_t = 90^\circ$ маємо $\gamma = 0,9$, а для $\Delta_t = 45^\circ$ одержуємо $\gamma = 0,97$ [5]. Якщо налаштувати ФЗІ так, щоб час плавного зростання напруги, що

пересуває ФЗЕ від 0 до 180° , становив $T = 3$ с, а час реєстрації j -ї інтерферограми $\tau_j = 0,18$ с, то у цьому випадку $\gamma = 0,9985$, тобто γ практично не відрізняється від ФПМ для покрокових зсувів фази. Отже, за відношення $\mu = \tau_j/T < 0,06$ ніякої різниці між ФПМ для плавного і покрокового зсувів фаз немає.

На рис. 6–8 показано три інтерферограми плоскої наношорсткої поверхні, перша з яких отримана без подання напруги (0 В), друга – за напруги 12 В, а третя – за напруги 20 В. Під час експерименту час плавного зростання напруги $T = 3,0$ с, а час експозиції $\tau_j = 0,001$ с. Згідно з формулою (2) маємо $\gamma = 1,00$, тобто ФПМ для плавного зсуву фази за таких малих експозицій є таким, як і для покрокового зсуву.

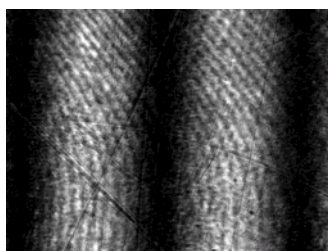


Рис. 6. $U = 0$ В.

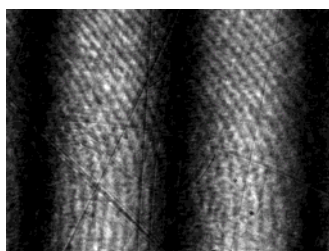


Рис. 7. $U = 12$ В.

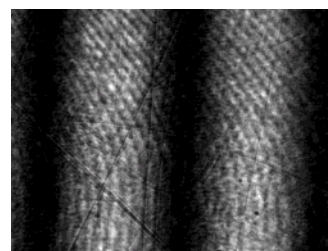


Рис. 8. $U = 20$ В.

Отже, розроблено ФЗП для плавного переміщення опорного променя у фазозсувальному інтерферометрі. Завдяки створеному пристрою, що містить ФЗЕ та електронний блок для його плавного лінійного переміщення, реалізовано метод трикрокової ФЗІ з довільними фазовими зсувами опорного променя. Описано принцип роботи ФЗП у фазозсувальному інтерферометрі Тваймана–Гріна. З'ясовано, що за нетривалій експозиції інтерферограм ($\mu < 0,06$) їхня ФПМ за плавного фазового зсуву опорного променя не відрізняється від МПФ за покрокового зсуву фази.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Creath K.* Phase-measurement interferometry / K. Creath, J. Schmit; eds. B.D. Guenter [et al.] // *Encyclopedia of Modern Optics*. – San Diego, CA : Elsevier Academic Press, 2005. – Vol. 2. – P. 364–374.
2. *Optical Shop Testing, Third Ed.* / ed. D. Malacara. – Hobocen, NJ : John Wiley & Sons, Inc., 2007. – 862 p.
3. *Sirohi S. R.* Optical Methods of Measurement: Whole field Techniques, Second Ed. / S. R. Sirohi. – Boca Raton, FL : Taylor & Francis, 2009. – 290 p.
4. *Муравський Л. І.* Лазерна інтерферометрія поверхні для потреб технічної діагностики / Л. І. Муравський, Т. І. Вороняк, А. Б. Кметь ; наук. ред. З. Т. Назарчук. – Львів : СПОЛОМ, 2014. – 272 с.
5. *Schreiber H.* Phase shifting interferometry / H. Schreiber, J. H. Brunning ; ed. D. Malacara // *Optical Shop Testing, Third Ed.* – Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2007. – Chapter 14. – P. 547–666.

6. *Li P. Z.* Piezoelectric actuated phase shifter based on external laser interferometer: design, control and experimental validation / P. Z. Li, X. D. Wang, Y. X. Sui // *Sensors*. – 2017. – Vol. 17, N 4. – P. 838–1-14.
7. *Muravsky L. I.* Two-frame phase shifting interferometry for retrieval of smooth surface and its displacements / L. I. Muravsky, O. P. Ostash, A. B. Kmet' [et al.] // *Opt. Lasers Eng.* – 2011. – Vol. 49, N 3. – P. 305–312.
8. *Muravsky L. I.* Retrieving the relief of a low-roughness surface using a two-step interferometric method with blind phase shift of a reference wave / L. I. Muravsky, A. B. Kmet', T. I. Voronyak // *Opt. Lasers Eng.* – 2012. – Vol. 50, N 11. – P. 1508–1516.
9. *Muravsky L. I.* Three-step interferometric method with blind phase shifts by use of inter-frame correlation between interferograms / L. I. Muravsky, A. B. Kmet', I. V. Stasyshyn [et al.] // *Opt. Lasers Eng.* – 2018. – Vol. 105. – P. 27–35.
10. *Муравський Л. І.* Метод трикрокової інтерферометрії з довільними зсувами фаз опорного променя / Л. І. Муравський, Т. І. Половинко // *Відбір і обробка інформації*. – 2014. – Вип. 41 (117). – С. 49–54.

Стаття: надійшла до редакції 16.03.2018,
доопрацьована 23.03.2018,
прийнята до друку 23.03.2018.

DEVELOPMENT OF PHASE-SHIFTING DEVICE FOR IMPLEMENTATION OF THREE-STEP INTERFEROMETRIC METHOD WITH ARBITRARY PHASE SHIFTS OF REFERENCE WAVE

L. Muravsky^{1,2}, A. Drymalyk¹, G. Gaskevych¹, I. Stasyshyn¹

¹*Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine,
5 Naukova str., 79060 Lviv, Ukraine
muravskyleon@gmail.com*

²*Lviv Polytechnic National University
Stepan Bandera str., 12, 79000 Lviv, Ukraine*

Two basic approaches to the implementation of procedures of a wavefront stepwise and smooth phase shifts in a two-beam optical interferometer are considered. Advantages and lacks of both procedures are analyzed. It is noted that the smooth phase shift procedure removes the oscillations of a phase shifting element (PSE) that occur during the stepwise procedure. A phase-shifting device that is used to realize the three-step phase shifting interferometry (PSI) method with two arbitrary phase shifts of the reference wave within the angular interval $(0, \pi)$ is developed. This device does not need the calibration procedure, because the three step PSI method allows defining any phase shift angle by calculating the correlation coefficient between two recorded interferograms. The correlation coefficient can be considered as a normalized scalar product of two interferograms that can be represented by centered multidimensional vectors or as a cosine of a phase shift angle between these vectors. Therefore, the developed device is much simpler and cheaper than its calibrated prototypes. It contains a PSE consisting of a piezoelectric transducer (PZT) and a mirror attached to the PZT, and an electronic unit for smooth linear motion of the mirror in the reference beam of the interferometer. Basic characteristics of the

developed electronic unit are considered. The operating principle of the phase-shifting device electronic unit is to provide the smooth rising voltage supply initiated a smooth change of the PZT size. Therefore, the mirror attached to the PZT also moves smoothly. The PSE is located in the reference beam of the two-beam interferometer. If the reference beam in the interferometer enters the mirror in the direction perpendicular to the plane of the mirror, the beam wavefront moves to a distance twice that of the mirror. To verify the reliability of the developed phase-shifting device, we have elaborated the experimental setup dedicated for formation, registration and processing of interferograms of test surfaces and based on the Twyman-Green interferometer architecture. In this setup, the three-step PSI method with arbitrary phase shifts of a reference wave is fulfilled by recording of three interferograms during smooth phase shift of the mirror attached to the PZT. Comparative analysis of stepwise and smooth phase shift procedures for interferograms recording in the experimental setup has shown that their modulation transfer functions (MTFs) are similar for small exposures of interferograms. In particular, it is shown that for interferogram's small exposure times, whose ratio to the voltage increase time in the angular interval $(0, \pi)$ does not exceed 0.06, the MTF of the interferogram recorded with the smooth phase shift of the reference beam does not differ from the interferogram MTF obtained by stepwise phase shift.

Key words: phase shifting interferometry, phase shift, phase shifting element, interferogram, modulation transfer function.