

УДК 534+531.7+53.082.5 + 621.375.8

Яровой Л.К., к.т.н.,

Лазерний доплерівський віброметр з поточним налаштуванням оптимальних параметрів трихвильового фотозмішування

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 03680, м. Київ, пр-т. Глушкова 4д, e-mail: yarovoi@univ.kiev.ua

L.K. Yarovoi, PhD

The lased Doppler vibrometer with real time adjustment of three-wave interference detection

Taras Shevchenko National University of Kyiv, 03680, Kyiv, Glushkova st., 4d, e-mail: yarovoi@univ.kiev.ua

Запропоновано підхід, який дозволяє в повній мірі використати переваги лазерних доплерівських віброметрів з додатковим опорним каналом, котрі побудовані на принципі т. з. трихвильового фотозмішування (ТХФ). Ідея полягає в фазовій НЧ модуляції додаткової додаткової лазерної хвилі. Обробка отриманого сигналу дозволяє безпосередньо під час експерименту налаштовувати оптимальні параметри віброметра з ТХФ, тим самим зберігаючи високу чутливість до малих амплітуд під час вимірювань. Висновки розрахунків підтверджено за допомогою модернізованого лазерного віброметра. В експерименті продемонстровано можливість підтримання стабільних характеристик системи в межах 5% в умовах, коли умови експерименту непередбачувано змінюються в часі.

Ключові слова: експериментальна механіка, лазерна доплерівська віброметрія, лазерні гетеродинні системи.

We propose the approach, which allows to fully take advantage of laser Doppler vibrometer, which is built on the principle of, so-called, three-wave interference (TWI) realized by introduction of the additional reference channel. Such laser vibrometers improves sensitivity to small amplitude oscillation, but they require current control of specific the amplitudes and the phase's relations between interfering waves. Only for the some optimal relations the vibrometer can reach the advance characteristics. The new idea is to introduction LF phase modulation of the additional laser wave. Appropriate processing of vibrometer signal allows to directly tune the optimal parameters of the measuring system of TWI during the experiment to support high sensitivity to small amplitudes permanently. The calculations were confirmed by using the upgraded laser Doppler vibrometer. The experiment demonstrated the capability to maintain stable vibrometer parameters within 5% in an environment where unpredictable parameters are changed during the experiment unexpectedly.

Key Words: experimental mechanics, Laser vibrometer, nanoscale measurements, laser heterodyne system.

Статтю представив академік НАНУ, д.ф.-м.н., проф. Перестюк М.О.

В сучасному інструментарії прикладної механіки та вимірювальної техніки важливу роль відіграють безконтактні засоби вимірювання параметрів руху суцільних середовищ, зокрема, вібрації та механічних коливань поверхонь, об'єктів та конструкцій. Лазерні доплерівські віброметри (ЛДВ) – це сучасне вимірювальне обладнання, яке дозволяє безконтактно на відстані від мікрон до десятків метрів досліджувати механічні коливання з нанометровою точністю в широкому частотному діапазоні [1]. Саме тому методики лазерної віброметрії з успіхом застосовуються в

неруйнівному контролі [3], дефектоскопії [2] та ін. Розробка нових відходів лазерної віброметрії та конструкцій ЛДВ подовжується і зараз і одним з нових рішень є метод лазерної віброметрії з трихвильовим фотозмішуванням (ТХФ) – новий перспективний метод, який дозволяє виконувати вимірювання коливань з надвисокою чутливістю до малих амплітуд [5, 6]. Особливістю метода ТХФ є залучення до процесу вимірювання додаткової зондувальної хвилі. Шляхом тонкого налаштування амплітуди і фази цієї хвилі відносно таких в основній зондувальній хвилі можна досягти суттєвого покращення чутливості

приладу [6]. Проблемою є те, що під час вимірювань контролювати оптимальну фазову різницю, котра часто змінюється в часі, складно, а подекуди й неможливо. Ці перешкоди обмежують використання переваг ТХФ випадками, коли експериментом жорстко задані та лишаються незмінними фазові співвідношення між взаємодіючими лазерними хвилями. В даній роботі пропонується підхід, який надає можливість контролювати та налаштувати фазову різницю в схемі ЛДВ безпосередньо під час процесу вимірювань.

Вихідний сигнал лазерного віброметра з ТХВ в наближенні малих амплітуд вібрації

Розглянемо спочатку відмінності ЛДВ з ТХФ від класичного ЛДВ, в якому зондувальна хвиля e_1 , яка відбивається об'єктом та несе інформацію про його рух, взаємодіє з опорною хвилею e_0 [1]. В результаті фотозмішування цих двох хвиль, струм фотодетектора має компонент, миттєва частота $\omega_D(t)$ якого пов'язана з миттєвою швидкістю коливань $v(t)$ співвідношенням

$$\omega(t) = -kX_1\Omega \sin(\Omega t) \cdot \left[1 + \frac{(\eta^2 - 1)}{2\eta \cdot \cos(2kX_1 \cos(\Omega t) + \Delta\phi) + \eta^2 + 1} \right] \quad (1)$$

де $\eta = E_1/E_2$ – відношення амплітуд, а $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ початкова фазова різниця зондувальної e_1 та додаткової e_2 хвиль.

Звернемо увагу, що формула (1) є більш узагальненою порівняно з наведеним вище відповідним співвідношення для класичних двошпроменевих ЛДВ, і зводиться до нього при $E_2 = 0$, та враховуючи, що $v(t) = -X_1\Omega \sin(\Omega t)$. При цьому миттєва частота ω дорівнює доплерівській частоті ω_D коливального процесу.

Як було зазначено в [5] в режимі ТХФ для малих, порівняно з довжиною хвилі лазера, коливань $X_1 < \lambda/2$ при певних співвідношеннях амплітуд і фаз хвиль e_1 та e_2 відбувається суттєве підсилення сигналу миттєвої частоти ω порівняно з ω_D , що спрощує її вимірювання особливо для малих амплітуд коливань. При оптимальних умовах, які впливають з аналізу співвідношення (1), а саме: $\eta \rightarrow 1$ та $\Delta\phi = \pi$ "аномальне підсилення" сигналу на виході ЛДВ

сягає величини $\alpha = \frac{\eta}{\eta - 1}$.

$\omega_D(t) = 2k \cdot v(t)$, де k – хвильовий вектор лазерного випромінювання. Таким чином, миттєва швидкість коливань розраховується, як величина пропорційна ω_D .

В режимі ТХФ три когерентні хвилі e_0 , e_1 та e_2 інтерферують на поверхні фотодетекторі лазерного віброметра та генерують на виході фотодетектора струм, який на частоті гетеродину може бути записаний у вигляді: $i_{\text{det}}(t) = I(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t - \phi(t))$, де f_0 – частота гетеродину, на яку зміщено оптичну частоту опорної хвилі e_0 . Для вимірювання параметрів коливального процесу має значення миттєва фаза $\phi(t)$ (а точніше, миттєва частота, як похідна від фази) сигналу i_{det} . У випадку ТХФ при гармонічного коливання досліджуваного об'єкту $x_1(t) = X_1 \cos(\Omega t)$, де X_1 – амплітуда, Ω – частота досліджуваних коливань, формула для миттєвої частоти має вигляд [4]:

Експериментально було доведено, що контролювати амплітуди (інтенсивності) E_1 та E_2 можливо за допомогою окремих фотоприймачів, або регулювати їх величину оптоелектронними засобами [5]. На відміну амплітудам, початкова фазова різниця $\Delta\phi$, яка є сталим або повільно змінним чинником вихідного сигналу, не може бути отримана інакше, як за допомогою додаткових незалежних засобів і це є певним недоліком практичного застосування ЛДВ з ТХФ.

Дослідимо спектр функції (1) для довільних величин фази $\Delta\phi \neq \pi$. Для отримання аналітичного результату обмежимося практично важливим випадком, а саме $kX_1 \ll 1$. Для цієї умови можна вважати, що $\cos(2k \cdot X_1 \cdot \cos(\Omega t)) \approx 1$, а $\sin(2k \cdot X_1 \cdot \cos(\Omega t)) \approx 2k \cdot X_1 \cdot \cos(\Omega t)$. Тоді знаменник у формулі (1) можна записати, як $1 + 4\eta k X_1 / (2\eta \cdot \cos(\Delta\phi) + 1 + \eta^2) \cdot \cos(\Omega t)$. І дали розкладемо дріб у формулі (1), виділяючи малу змінну в знаменнику. В результаті отримаємо співвідношення:

$$\omega(t) = -2\eta kX_1 \Omega \sin(\Omega t) \cdot \left[\frac{\cos(\Delta\phi) + \eta}{2\eta \cos(\Delta\phi) + (\eta^2 + 1)} + \frac{kX_1(\eta^2 - 1)\sin(\Delta\phi)\cos(\Omega t)}{[2\eta \cos(\Delta\phi) + (\eta^2 + 1)]^2} \right] \quad (2)$$

З формули, що надана вище, отримуємо амплітуди першої та другої гармонік сигналу:

$$\omega_I = \left| \frac{2\eta kX_1(\cos(\Delta\phi) + \eta)}{2\eta \cos(\Delta\phi) + (\eta^2 + 1)} \right| \quad (3A)$$

$$\omega_{II} = \left| \frac{\eta k^2 X_1^2 (\eta^2 - 1) \sin(\Delta\phi)}{[2\eta \cos(\Delta\phi) + (\eta^2 + 1)]^2} \right| \quad (3B)$$

Слід зауважити, що електричний сигнал на виході ЛДВ є пропорційним миттєвій частоті, саме цьому контексті і слід розуміти вживання терміну «відхідний сигнал ЛДВ» по відношенню до частоти $\omega(t)$.

На малюнку рис.1 наведені графіки залежності модуля амплітуд першої та другої гармонік від фазової різниці $\Delta\phi$. Як можна бачити, при умові $\eta < 1$ існують принаймні два видимих мінімуми функції ω_I . Насправді, в точках $\Delta\phi_z$ існує не мінімум функції $\omega_I(\Delta\phi)$, а

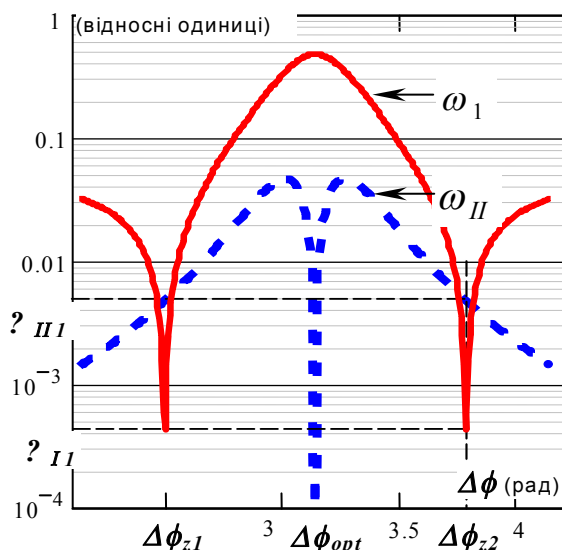


Рис.1 Теоретична залежність першої та другої гармонік сигналу ЛДВ з ТХФ від фази $\Delta\phi$.

вона змінює знак, що означає зміну фази сигналу на π . Ці точки відповідають рішенням $\omega_I(\Delta\phi) = 0$ рівняння (3A):

$$\Delta\phi_z = \pi \pm \arccos(\eta) \quad (4)$$

Аналіз також проказує, що по-перше, зв'язок $\Delta\phi_z(\eta)$ між фазою $\Delta\phi$ та параметром η не залежить від частоти коливання Ω та амплітуди коливання X_1 (за умови $kX_1 \ll 1$).

По-друге, для застосування у вимірюванні визначальним є те, що в околі точки $\Delta\phi_z$ амплітуда другої гармоніки видимо перевищує амплітуду першої $\omega_{II} \gg \omega_I$.

На підставі проведеного аналізу пропонується експериментально знаходити фазу, при якій амплітуда сигналу ЛДВ досягає мінімального значення, і на основі цієї величини змінювати оптичну різницю між пучками e_1 та додаткової e_2 таким чином, щоб $\Delta\phi_{opt} = \pi$.

Практично, це може бути здійснено за допомогою додаткової НЧ модуляції фази в одному з пучків, причому індекс модуляції повинен напевно перевищувати $\Delta\phi_{z2} - \Delta\phi_{z1}$ (див. рис.1). В такому випадку оптимальна фазова різниця буде знаходитись точно посередині між

$$\Delta\phi_{z1} \text{ та } \Delta\phi_{z2}: \Delta\phi_{opt} = \frac{1}{2}(\Delta\phi_{z2} - \Delta\phi_{z1}).$$

Макет лазерного вібрметра зі світловодом та експериментальні дослідження

Макет лазерного вібрметра з ТХФ, блок схема якого зображена на рис.2, складається з ЛДВ CLV-S виробництва Polytec GmbH (Германія), оптична частина котрого еквівалентна інтерферометру Маха-Цандера 1, а джерелом випромінювання є He-Ne лазер 2. Інтерферометр 1 призначений для формування двох оптичних пучків, один з яких (опорний) I_0 залишається в оптичній системі, а інший виводиться назовні. Суттєво важливим елементом оптичної схеми вібрметра CLV-S є комірка Брегга 3, яка зсуває оптичну частоту опорного пучка на частоту гетеродину f_0 .

В класичній схемі ЛДВ оптичний промінь спрямовується на поверхню досліджуваного об'єкту. А в схемі ЛДВ з ТХФ цей промінь потрапляє на вхід другого інтерферометра, що утворений світлоподільним елементом 4 дзеркалом 5 та поверхнею об'єкту 6. В цьому

додатковому інтерферометрі з первинного пучка формуються два вторинних: зондувальний I_1 та другий опорний I_2 (нагадаємо, що оптична частота опорного пучка I_0 зміщена на частоту гетеродину f_0).

Опорні пучки I_0 , I_2 разом з зондувальним пучком I_1 , що розсіяно об'єктом 6, інтерферують на поверхні фотодетектора 7. Результатом їх фотозмішування є фотострум $i_{det}(t)$. Далі сигнал $i_{det}(t)$ потрапляє для обробки в електронний процесор 8 віброметра CLV-S, який включає поза інше ВЧ фільтр на частоті гетеродину f_0 , частотний дискримінатор, вихідні НЧ фільтри та ін.

Частина фотоструму $i_{det}(t)$ відгалужується на амплітудний детектор 9, призначений для індикації інтенсивності суперпозиції оптичних сигналів другого опорного пучка та розсіяного зондувального пучків. Для отримання даних окремо про інтенсивність кожного з них слід по черзі перекривати інший промінь. Хоча індикатор інтенсивності у віброметрі CLV-S не призначений для точного вимірювання оптичних інтенсивностей, вимірювання незалежними оп-

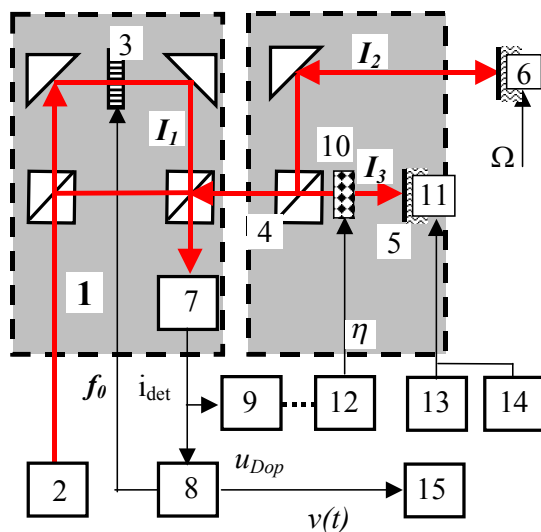


Рис.2 Схема експериментальної установки

тичними засобами підтвердили можливість контролю параметра η з похибкою не гірше 10%.

Додатковими елементами схеми є рідкокришталева комірка 10, яка виконує роль керованого фільтру нейтральної щільності, та фазомодулюючий елемент 11, що виконано у вигляді дзеркала, закріпленого на п'єзоелементі. Ці елементи розташовані у русі пучка I_3 та призначені для налаштування η та $\Delta\phi$. Керування щільністю фільтру 10 виконувалося

вручну шляхом зміни напруги джерелом 12. Для зміна оптичного шляху пучка I_3 також передбачено регульоване джерело напруги 13 та генератор НЧ коливань 14.

Для спостереження та дослідження вихідного сигналу віброметра використовувався осцилоскоп RIGOL 1102E 15

Першим експериментом було дослідження поведінки вихідного сигналу віброметра з ТХВ в околі точки $\Delta\phi_{z1}$ при умові $\eta < 1$. Епюри на рис.3.А-В отримані для таких умов експерименту: частота коливань 4.3 кГц, $X_1 = 7 \text{ nm}$, $\eta \approx 0.8$. Сигнал на рис.3А, отриманий при фазовій різниці, котра розташована значно ліворуч від точки $\Delta\phi_{z1}$ (див. рис.1), має в своєму складі лише основну гармоніку на частоті 4.3 кГц. При налаштуванні системи ближче до $\Delta\phi_{z1}$ (рис.3.Б) у спектрі сигналу з'являється друга гармоніка сигналу на частоті 8.6 кГц, а при $\Delta\phi = \Delta\phi_{z1}$ перша гармоніка зникає взагалі (рис.3.В).

Для того, щоб продемонструвати можливість одночасного виявлення обох точок $\Delta\phi_z$ на фазомодулюючий елемент 11 було подано гармонічний сигнал частотою $F_{mod} = 0.5 \text{ Гц}$ і амплітудою, яка забезпечила індекс модуляції фази в каналі I_3 $\delta\phi_{mod} = 0.95 \text{ rad}$. Частота та амплітуда коливань досліджуваного об'єкту складають відповідно 31.6 кГц та $X_1 = 12 \text{ nm}$. Параметр η знаходився приблизно в межах 0.7...0.8. Епюра сигналу з виходу віброметра на осцилоскопі 15 наведена на рис. 4. Дві точки мінімуму амплітуди сигналу в моменти часу t_{z1} та t_{z2} відповідають фазам $\Delta\phi_{z1}$ та $\Delta\phi_{z2}$. Максимум сигналу, як і передбачено розрахунками, знаходиться посередині між точками t_{z1} та t_{z2} , що відповідає $\Delta\phi_{opt} \approx 3.14$. Таким чином, запропонований підхід не вимагає необхідності явного розрахунку фазових різниць $\Delta\phi_{z1}$ та $\Delta\phi_{z2}$.

Метод визначення оптимальних параметрів за допомогою додаткової модуляції може також позбавити необхідності вимірювати та підтримувати під час експерименту величину параметра η . Розрахуємо η двома різними методами. З однієї сторони, амплітуда, сигналу, яка відповідає класичному віброметру (канал I_3 перекрито) складає $U_g = 0.5 \text{ V}$, а амплітуда при ТХФ (рис.4) $U_{optTXF} \approx 1.5 \text{ V}$, таким чином

збільшення амплітуди сигналу в вібретрі з
ТХВ складає $\alpha \approx 3$, звідки $\eta' \approx 0.75$.

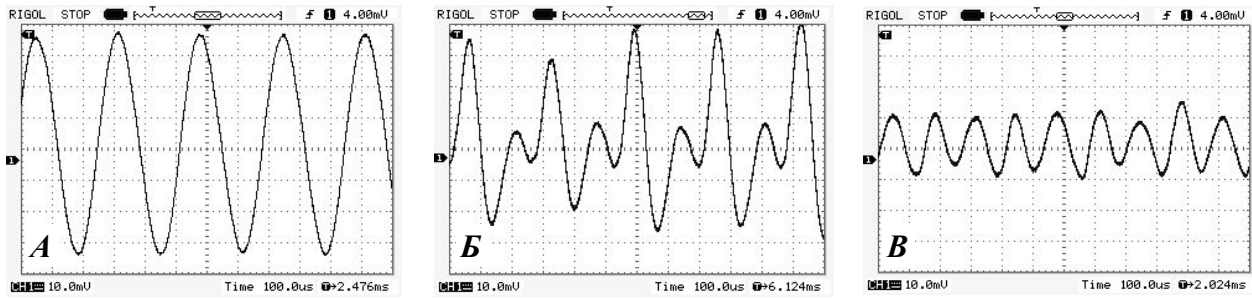


Рис.3 Епюри сигналу ЛДВ з ТХФ та $\eta < 1$. А: $\Delta\phi < \Delta\phi_{z1}$; Б: $\Delta\phi \leq \Delta\phi_{z1}$; С: $\Delta\phi = \Delta\phi_{z1}$

З іншої сторони, η можна розрахувати за допомогою співвідношення (4), використовуючи експериментальні данні $\Delta\phi_{z2} - \Delta\phi_{z1}$. В свою чергу $\Delta\phi_{z2} - \Delta\phi_{z1} \approx \kappa \cdot (t_{z2} - t_{z1})$, де $\kappa = 2\pi F_{\text{mod}} \cdot \delta\phi_{\text{mod}}$ – крутизна лінійної частини модуляційної характеристики. З епюри на рис.4 отримуємо, що $t_{z2} - t_{z1} = 0.44 \text{ ms}$, таким чином, $\eta'' \approx 0.78$.

Різниця між η' та η'' складає біля 5%, що є прийнятною похибкою для демонстраційного експерименту. Таким чином, формула (4) вірно

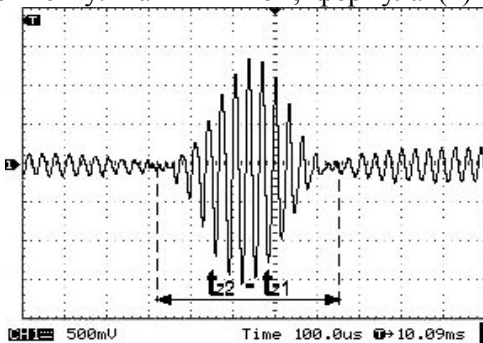


Рис.4 Епюра сигналу ЛДВ з ТХФ та $\eta \approx 0.75$

відображає зв'язок між $\Delta\phi_z$ та η і може бути також використана для знаходження η при інших відомих параметрах експерименту.

Слід зазначити, що при гармонічній модуляції лінійний зв'язок між $\Delta\phi_{z2} - \Delta\phi_{z1}$ та $t_{z2} - t_{z1}$ існує лише в обмеженій області модуляційної характеристики. Але у всякому випадку розрахунок $\Delta\phi_{z2} - \Delta\phi_{z1}$ за $t_{z2} - t_{z1}$ може бути забезпечений в реальному часі електронними або програмними засобами.

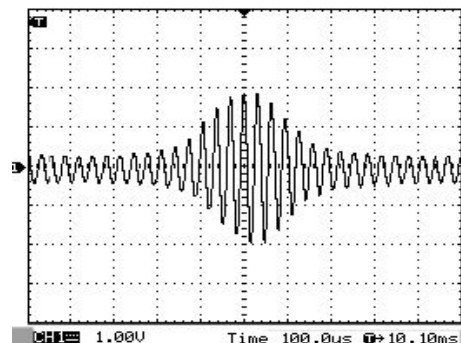


Рис.5 Епюра сигналу ЛДВ з ТХФ та $\eta \approx 1.38$

Для того, щоб підкреслити особливість режиму ТХФ при умові $\eta < 1$ на рис.5 наведено епюру сигналу в експерименті з тими ж самими параметрами за відмінністю того, що $\eta \approx 1.4$. Порівняння епюр на рис.4 та рис.5 демонструє приблизно однакове "аномальне" підсилення сигналу в той же час на рис.5 відсутні точки зникнення основної гармоніки сигналу.

Висновки

Розрахунками показано, що в лазерному вібретрі з трихвильовим фотозмішуванням при

умові, що амплітуда додаткової опорної хвилі перевищує амплітуду зондувальної хвилі існують такі фазові різниці $\Delta\phi_z$ між цими хвилями, при яких амплітуда основної частоти сигналу дорівнює нулю, і в той же час амплітуда другої гармоніки сигналу значно збільшується. Цей результат покладений в основу методу визначення та налаштування в реальному часі оптимальної фазової різниці $\Delta\phi_{\text{opt}}$, при якій позитивний ефект застосування ТХФ досягає максимального значення.

Спираючись на встановлений факт, що $\Delta\phi_{\text{opt}}$

знаходиться точно посередині між двома сусідніми значеннями $\Delta\phi_z$, запропоновано ввести фазову модуляцію додаткової опорної хвилі з індексом модуляції, що перевищує $\Delta\phi_{z2} - \Delta\phi_{z1}$. Таким чином, максимум сигналу буде автоматично відповідати оптимальному налаштуванню системи віброметра з ТХФ, що позбавляє необхідності спеціально налаштовувати $\Delta\phi_{opt}$ під час експерименту.

Експериментальну перевірку теоретичних висновків було виконано на лазерному віброметрі CLV-S, модернізованому відповідно до схеми ТХФ. Експерименти підтвердили теоретичні висновки. Зокрема продемонстровано існування таких величин $\Delta\phi_z$ (за умови $\eta < 1$),

при яких зникає основна гармоніка вихідного сигналу, або вона значно зменшується порівнянню з другою гармонікою, що суттєво зростає. Також підтверджено зв'язок між фазовими різницями $\Delta\phi_z$ та параметром η , що дозволяє за допомогою додаткової модуляції фази опорної хвилі прямо під час вимірювального процесу визначити також і параметр η . Загалом продемонстровано можливість підтримання стабільних характеристик системи в межах 5% в умовах, коли умови експерименту непередбачувано змінюються в часі.

Список використаних джерел

1. Drain L. E. The Laser Doppler Technique / L. E. Drain (New York: Wiley). 1980. – 241 с.
2. Podzorny T. In-site defectoscopy of granite blocks with a laser vibrometer / T.Podzorny, G. Budzyń., and J.Rzepka // AIP Conf. Proc. Conf. on Vibration Measurements by Laser Techniques, Ancona, Italy. – 2012. – V.1457. – P. 377–385.
3. Staszewsk W.J. Fatigue crack detection in metallic structures with Lamb waves and 3D laser vibrometry / W.J. Staszewsk, B.C. Lee And R. Traynor // Meas. Sci. Technol. – 2007. – V.18. – P. 727–739.
4. Yarovoi L. The effect of three-wave interference in laser Doppler vibrometry / L.Yarovoi, G. Siegmund // Meas. Sci. Technol. – 2004. – V. 15. – P.2150 - 2156.
5. Яровой Л. К. Особливості роботи лазерного доплерівського віброметра з трихвильовим фотозмішуванням в нанометровому діапазоні / Л.К. Яровой // Вісник Київського університету. Серія: Математика. Механіка. – 2011. – Випуск. 26. – С. 39-43..
6. Яровой Л. К. Спосіб вимірювання миттєвої віброшвидкості / Л. К. Яровой. Пат. 94564 Україна G01B 9/02, G01C 3/00: заявник власник патенту Київський національний університет імені Тараса Шевченка. – №201013706 заявл. 18.11.10; друк. 10.05.2011, Бул. № 9.

References

1. DRAIN L. E. (1980) *The Laser Doppler Technique* New York: Wiley.
2. PODŻORNY T., BUDZYŃ G., AND RZEPKA J. (2012) In-site defectoscopy of granite blocks with a laser vibrometer In *AIP Conf. Proc. Conf. on Vibration Measurements by Laser Techniques*, Ancona, Italy. 1457. p. – 377–385.
3. STASZEWSK W.J., LEE B. C. and TRAYNOR R. (2007) Fatigue crack detection in metallic structures with Lamb waves and 3D laser vibrometry. *Meas. Sci. Technol.* .18. p. 727–739.
4. YAROVOI L., SIEGMUND G. (2004) The effect of three-wave interference in laser Doppler vibrometry. *Meas. Sci. Technol.* 15. p.2150 - 2156.
5. YAROVOI L.K. (2011) Some features in LDV with three interacting waves in nanometer range *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv Series Mechnics & Mathematics.* 26. p. 39-43.
6. YAROVOI L.K. (2011) The method for measurement of vibration velocity submit. *Patent office of Ukraine* no. 94564; print. 10.05.2011, Bull. 9.

Надійшла до редколегії 21.02.2015