

УДК 534+531.7+53.082.5+539.3

Абрамов О.А.<sup>1</sup> провідний інженер,  
Ємельянов В. В.<sup>2</sup> провідний інженер;  
Куценко О. Г.<sup>1</sup>, к. ф.-м. н., доц.,  
Отто Г. К.<sup>1</sup> провідний інженер,  
Отто К.В.<sup>2</sup> начальник відділу,  
Яровой Л. К.<sup>1</sup> к. т. н., с.н.с.

O.A. Abramov<sup>1</sup>,  
V.V. Emelyanov<sup>2</sup>,  
O. G. Kutsenko<sup>1</sup>, Ph.D (Phys.-Math.),  
G. K. Otto<sup>1</sup>,  
K. V. Otto<sup>2</sup>,  
L. K. Yarovoi<sup>1</sup>, Ph.D (Techn. Science)

### Лазерний доплерівський віброметр з можливістю сканування віддалених об'єктів

### Laser doppler vibrometer with remote object scanning capability

<sup>1</sup> Київський національний університет імені  
Тараса Шевченка, 03127, м.Київ, пр-т.  
Глушкова 4е,

e-mail: [yarovoi@univ.kiev.ua](mailto:yarovoi@univ.kiev.ua);

<sup>2</sup> ПРАТ Альтрон, Харків, Україна  
e-mail: [otto0kv@gmail.com](mailto:otto0kv@gmail.com)

<sup>1</sup> Taras Shevchenko National University of Kyiv,  
03127, Kyiv, Hlushkova Avenue, 4e,  
e-mail: [yarovoi@univ.kiev.ua](mailto:yarovoi@univ.kiev.ua);

<sup>2</sup> JS ALTRON, Kharkiv, Ukraine  
e-mail: [otto0kv@gmail.com](mailto:otto0kv@gmail.com)

Створено лазерний доплерівський віброметр (ЛДВ) з можливістю вимірювання вібрацій віддалених об'єктів на відстані до 250 м. З метою автоматичного вимірювання вібрації в масиві точок віброметр забезпечено системою сканування. Керуюча програма здійснює переміщення зондувального променя відповідно до протоколу дослідження, обробку інформації, запис у пам'ять та виведення на екран ПК. Створеним ЛДВ досліджено розподіл амплітуд коливань та розподіл поздовжніх напружень в консольно закріпленій трубі на відстані 22 метра. Результати вимірювань на різних частотах добре збігаються з розрахунками, виконаними за допомогою скінченно-елементного пакету CalculiX. Експериментально продемонстровано зміну форми коливань за наявності дефектів в трубі або навантаженнях її точковими приєднаними масами.

A laser Doppler vibrometer was created with the ability to measure the vibrations of distant objects up to 250 meters away. The vibrometer is provided with a scanning system for automatic vibration measurement in an array of points. The control program moves the probe beam according to the research protocol, processes and store information. To demonstrate the capabilities of the system, we studied of the amplitude distribution of vibrations and the distribution of longitudinal stresses in a cantilevered tube located at a distance of 22 meters. The measurements at different frequencies are in good agreement with the numerical calculations performed by finite element code CalculiX.

Статтю представив д.ф.-м.н., проф. Жук Я.О.

#### Вступ

Лазерні доплерівські віброметри (ЛДВ) – сучасні засоби безконтактного вимірювання вібрації, що користуються великим попитом, як в промисловості, так і в наукових дослідження [1]. За фізичним принципом переважна кількість ЛДВ (назвемо їх "класичними") використовують двопроменеву інтерференцію. В цих приладах один з двох променів спрямовується на досліджуваній об'єкт та відбивається на фотодетектор. Натомість, інший промінь проходить через частотозсувну комірку Бреґга та також потрапляє на детектор.

Частотомодульований сигнал, що детектується фотодіодом, несе інформацію про миттєву швидкість рухомого об'єкту [1]. Подальша демодуляція сигналу дозволяє виділити ці данні [2].

Серед «класичних» віброметрів значною увагою користуються скануючі віброметри, як такі, що надають суттєві переваги в швидкому дослідженні вібрацій у великій кількості точок на поверхні об'єкту. Таким чином, скануючий віброметр може досліджувати в автоматичному режимі розподіл амплітуд коливань складних поверхонь довільних об'єктів при вирішенні

задач акустики, неруйнівного контролю, експериментальної механіки [1, 3].

Загалом, "класичні" лазерні доплерівські віброметри мають привабливі характеристики за чутливістю до малих амплітуд, діапазону миттєвих швидкостей, частотного діапазону т.і. Їх панування в області лазерної віброметрії певною мірою обмежує чутливість до енергії відбитого (розсіяного) випромінювання. Ця характеристика визначається чутливістю детектора, потужністю лазера, відстанню до об'єкта та відбиваючими властивостями поверхні об'єкта. Оскільки чутливість фотодетекторів має природні обмеження, а потужність лазера обмежується вимогами техніки безпеки, для дослідження на значних відстанях реально переважно у всіх вимірюваннях класичними ЛДВ використовують спеціальні відбиваючі наліпки. Звичайно, використання таких наліпок не завжди можливе.

Цього недоліку позбавлені інші типи лазерних віброметрів, які побудовані на принципі внутрішньорезонаторного підсилення випромінювання, яке повертається від досліджуваного об'єкта (інші назви: "selfmixing vibrometry", "автофотозмішування", "laser feedback inteferometry" [4 - 6]).

Принцип дії таких приладів полягає в тому, що розсіяне віддаленим об'єктом лазерне

випромінювання повертається в активну зону лазера, де підсилюється та взаємодіє з тою частиною випромінювання, котра залишилась в лазерному середовищі. Ці прилади в порівнянні зі звичайними – класичними ЛДВ – дозволяють отримати надзвичайну чутливість, вони можуть працювати на відстані декількох сотень метрів, причому не вимагають, зазвичай, спеціальних оптичних відбиваючих наліпок на поверхні досліджуваного об'єкту.

Поєднання системи сканування з можливостями внутрішньо-резонаторного гетеродинного прийому підіймають на новий рівень дистанційне неруйнівне дослідження коливань віддалених об'єктів.

### Принцип дії та блок-схема віброметра

Українська корпорація «Альтрон» у співпраці з механіко-математичним факультетом Київського національного університету імені Тараса Шевченка розробила надсучасний лазерний віброметр на принципі внутрішньо-резонаторного прийому лазерного випромінювання, який може вимірювати вібрацію в наноамплітудному діапазоні на відстані більше 250 метрів.

Спрощена блок-схема віброметра зображена на рис. 1.

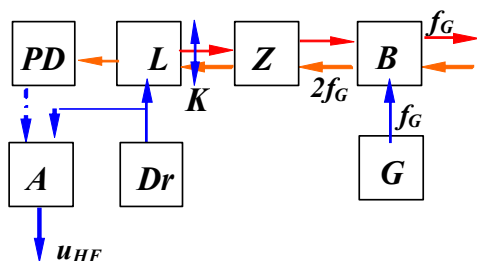


Рис. 1 Блок-схема ЛДВ з внутрішньорезонаторним підсиленням прийнятого сигналу

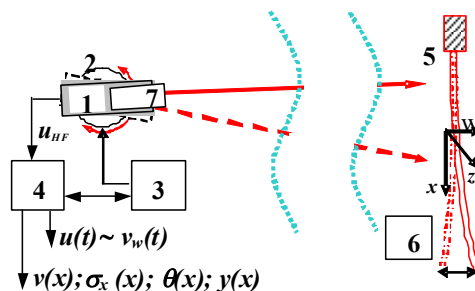


Рис. 2 Схема експериментальної установки дистанційного дослідження коливань

Основний елемент віброметра – лазерний діод L. Для звуження лінії генерації використовується зовнішній резонатор Z. Спеціальна конструкція дозволила збільшити ефективну довжину лазерного резонатора до 560 мм. На відміну від попереднього варіанту віброметра [6], замість вихідного телескопу використано коліматор K.

Комірка Брегга B зсуває частоту випромінювання лазера на частоту  $f_G=27$  МГц гетеродина G. Розсіяне досліджуваним об'єктом випромінювання, рухаючись в зворотному напрямку до лазера, проходить ще раз через комірку Брегга, де його

частота знов зміщується на частоту  $f_G$ . Повертаючись в активне середовище лазера L, розсіяне випромінювання підсилюється та інтерферує з тим, що там циркулює. Інтерференція спричиняє амплітудну та фазову модуляції, яка на несучій частоті  $2f_G$  має доплерівську компоненту, пропорційну миттєвій швидкості  $v(t)$ .

Модуляція оптичної енергії спричиняє модуляцію струму живлення драйвера Dr. Подібним чином також модулюється вихідний струм вбудованого фотодетектора PD. В обох випадках електричний сигнал підсилюється

резонансним підсилювачем А. Обидва шляхи отримання електричного сигналу пропорційного доплерівському зсуву еквівалентні з точки зору подальшої обробки. Демодуляція частотної доплерівської компоненти сигналу та подальша обробка виконується програмними засобами на комп'ютері 4 (див. рис.2).

З метою розширення споживчих можливостей розробленого приладу шляхом забезпечення сканування та збору даних вібрації з декількох точок в автоматичному режимі, авторами була розроблена експериментальна установка ЛДВ (Рис. 2), де 1 – ЛДВ, 2 – керований штатив, 3 – драйвер штатива, 4 – ПК, на якому емульовано доплерівський процесор, а також встановлена програма керування штативом та обробки сигналу. Поперечні коливання експериментального об'єкту, а саме алюмінієвої трубки 5 довжиною 67 мм, зовнішнім діаметром 12 мм та внутрішнім діаметром 9 мм, збуджувалися електромагнітним реле 6. Прив'язка точок спостереження та контроль за скануванням відбувались за допомогою інфрачервоної камери 7 з телескопічним об'єктивом.

Програма керування забезпечує програмоване позиціонування та вимірювання миттєвої швидкості (вздовж координати "x") коливань в наперед заданих точках на поверхні досліджуваного об'єкту та побудову просторової форми коливань. Програма також виконує аналіз отриманих значень швидкості з метою

усереднення та коригування. Сканування може відбуватися в межах  $\pm 10$  градусів за обома координатами.

Для конкретної тестової задачі – дослідження форм коливання трубки – програма також розраховує розподіл повздовжніх напружень  $\sigma_x$ , за методикою викладеною в роботі [7]. Вираз для визначення максимальних повздовжніх напружень має вигляд:

$$\sigma_{повзд} = \mp E \cdot \frac{D}{2 \cdot \Omega} \cdot \frac{d^2 v_0(x)}{dx^2} \quad (1)$$

де  $E$  – модуль Юнга,  $\Omega$  – колова частота коливань,  $D$  – діаметр стрижня,  $v_0$  – амплітуда миттєвої швидкості в точці вимірювання,  $x$  – повздовжня координата.

### Експериментальні дослідження на значній відстані прогину трубки, що вібрує

Експериментально встановлена відстань вимірювання вібрацій амплітудою до 1 нм складає 250 м. Але для того, щоб забезпечити точність наведення променя не гірше ніж  $\pm 1$  мм, експериментальні дослідження виконувались на відстані 22 м.

Було досліджено розподіли амплітуд коливань трубки довжиною  $L=67$  см для різних частот, а також за умови навантаження трубки приєднаною масою 22,5 г ( $L_2=35.5$  см), або наявності дефекту (переріз на глибину 20% від діаметра,  $L_3=35.5$ ).

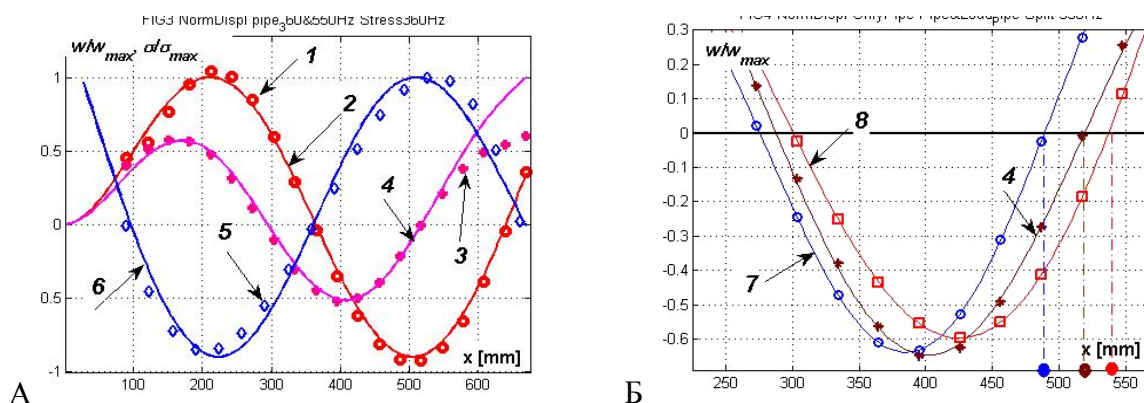


Рис.3 Коливання трубки: 1, 2 – частота коливань 360 Гц ; 3, 4, 7, 8 – частота коливань 550 Гц  
А) суцільна трубка; Б) 4, 7, 8 - суцільна трубка, трубка з дефектом, трубка з приєднаною масою.

Позначками 1 і 3 (коло і кружечок) на рис.3А наведені результати вимірювань максимальних амплітуд прогину вздовж трубки на частотах коливань 360 Гц та 550 Гц. Позначками 5 (ромб) представлені результати обробки експерименту за формулою (1), що показують реальний розподіл повздовжніх напружень. Також на цьому малюнку суцільними лініями наведені розподіли прогинів та

напружень, одержані шляхом тривимірного скінченно-елементного моделювання за допомогою пакету CalculiX, для аналогічних значень параметрів, що і в експерименті. Вказана тривимірна модель складається з 3584 8-вузлових (лінійних) скінченних елементів. Як можна бачити, результати розрахунків та експерименту на частоті 360 Гц співпадають. Що стосується експерименту

на частоті 550 Гц, неузгодженість прогину в найближчих до вільного кінця трубки точках пояснюється, на наш погляд, впливом системи з'єднання збуджуючого вібратора 6 та кінця трубки 5, яка обмежувала амплітуду коливань останнього.

Експериментальні залежності на рис. 3Б демонструють вплив неоднорідностей на форму коливань об'єкту, котрий проявляється у зміщенні максимумів та вузлів вздовж трубки.

### Висновки

Створено ЛДВ на принципі внутрішньо резонаторного підсилення відбитого лазерного випромінювання (лазерний віброметр зі зворотним оптичним зв'язком), чутливість до амплітуди коливань якого краще ніж 1 нм, а зареєстрована дальність вимірювань складає 250 м. Причому для роботи

прилад не вимагає накладення спеціальних світловідбиваючих наліпок або фарб.

Програмою передбачено автоматичне сканування поверхні досліджуваного об'єкту в межах  $\pm 100$  точок за обома координатами відповідно до заданої мапи та запис даних миттєвої швидкості в пам'ять з метою подальшої обробки.

Як приклад, реалізовано дистанційне вимірювання розподілу поперечних відхилень та напружень вздовж віброуючих циліндрів (труб) з метою діагностики механічних дислокацій. Результати експерименту порівняно з теоретичними розрахунками прогинів та напружень.

### Список використаних джерел

1. Rothberg S.J. & others An international review of laser Doppler vibrometry: Making light work of vibration measurement / S.J. Rothberg & others // *Opt. Lasers Engin.* – 2017. – 99. – P. 11–22.
2. Siegmund G. Sources of measurement error in laser Doppler vibrometers and proposal for unified specifications / G. Siegmund // *Proc. SPIE.* – 2008. – 7098 – P. 70980Y-1-70980Y-13.
3. Weisbecker H. Surface Strain Measurements Using a 3D Scanning Laser Vibrometer / H. Weisbecker, Ben Cazzolato & other // *Experimental Mechanics.* – 2012. – 52. – P. 805-815.
4. Bosch, T... An Overview of Self-Mixing Sensing Applications / Bosch, T. // *Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices, Proceedings, COMMAD.* – 2005. – P.385 - 392.
5. Donati, Laser diode feedback interferometer for measurement of displacements without ambiguity / Donati, G. Giuliani, S. Merlo // *Quantum Electronics, IEEE Journal.* – 1995. – 31. – P.113-119.
6. Otto K.V. Laser Doppler self-mixing vibrometer with heterodyne detection / K.V. Otto, L.K. Yarovoi and other // *Metrology and Metrology Assurance: XXII National Scientific Symp. with intern. participation, 10-14 September, 2012, Sozopol, Bulgaria: proceedings.* – Sofia. – 2012. – P. 67 – 72.
7. Куценко О.Г. Дослідження впливу неоднорідності на згинні коливання балки методом лазерної віброметрії / О.Г. Куценко, Л.К. Яровой // *Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Сер. Фіз.-мат. науки.* – 2003. – 3. – С. 95–100.

### References

1. ROTHBERG, S.J., others (2017) An international review of laser Doppler vibrometry: Making light work of vibration measurement. *Opt. Lasers Engin.* (99).p. 11–22.
2. SIEGMUND, G. (2008) Sources of measurement error in laser Doppler vibrometers and proposal for unified specifications, in *Proc. SPIE*, vol. 7098, p. 70980Y-1-70980Y-13.
3. WEISBECKER, H. & CAZZOLATO BEN, other (2012) Surface Strain Measurements Using a 3D Scanning Laser Vibrometer *Experimental Mechanics.* (52). p. 805-815.
4. BOSCH T. (2005) An Overview of Self-Mixing Sensing Applications. *Conf. on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices, Proceed., COMMAD.* p.385 - 392.
5. DONATI & GIULIANI, G. & MERLO S. (1995) Laser diode feedback interferometer for measurement of displacements without ambiguity. *Quantum Electronics, IEEE Journal.* (31). p .113-119.
6. OTTO, K.V. & YAROVOI, L.K. & other (2012) Laser Doppler self-mixing vibrometer with heterodyne detection. In *Proc. of XXII National Scientific Symp. with intern. participation Metrology and Metrology Assurance.* Sozopol, 10-14 September, 2012. Sofia. p. 67 – 72.
7. KUTSENKO, O.G. (2013) Investigation of non-homogeneity influence on beam bending vibrations by laser Doppler vibrometer. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Series: Physics & Mathematics.* (3). p. 95–100.

Надійшла до редколегії 09.10.2019