

УДК 534 +531.7+53.082.5

Л. Яровой, канд. техн. наук  
КНУ імені Тараса Шевченка, Київ  
Email: yarovoi@univ.kiev.ua

## ВИМІРЮВАННЯ НАНОАМПЛІТУДНИХ МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ ЛАЗЕРНИМ ДОППЛЕРІВСЬКИМ ВІБРОМЕТРОМ З МОДУЛЯЦІЄЮ ЗОНДУВАЛЬНОЇ ХВИЛІ

*Пропонується підвищити чутливість лазерних віброметрів для вимірювання механічних коливань з малими амплітудами шляхом застосування додаткової високочастотної фазової модуляції в одному з оптичних каналів віброметра з трихвильовим фотозмішуванням. Результатом є додаткове підсилення вихідного сигналу віброметра, котре пропорційне частоті та індексу модуляції. Показано, що в наближенні малих амплітуд вихідний сигнал віброметра пропорційний миттєвому переміщенню коливання. Обґрунтовано параметри оптимального режиму вимірювання коливань з надмалими амплітудами. В експерименті підтверджено збільшення чутливості, продемонстровано підвищення відношення сигнал/шум.*

**ВСТУП.** Лазерні доплерівські віброметри (ЛДВ) – це один з сучасних засобів експериментальної механіки. За допомогою ЛДВ розв'язують задачі неруйнівного контролю [7], розподілу напружень [5], вібродіагностики, у тому числі і в об'єктах, які обертаються [8], досліджують акустичні та інші механічні хвильові процеси [4], тощо. Саме для таких завдань можуть бути застосовані ЛДВ з додатковим оптичним каналом – ЛДВ з трихвильовим фотозмішуванням (ТХФ) [6, 9]. Використання ТХФ призводить до аномального збільшення вихідного сигналу ЛДВ без застосування додаткових електронних підсилювачів, створюючи можливість для підвищення чутливості [3]. Так, застосування ТХФ в ЛДВ з довгими світловодними трактами дозволяє критично зменшувати вплив оточуючого середовища на зондувальну хвилю в світловоді, і, таким чином, позбуватися завад, притаманних ЛДВ з світловодами [1].

Але недоліком такого типу лазерного віброметра є те, що чутливість до механічних коливань з малою амплітудою буде тим вищою, чим краще відбувається компенсація зондувального променя протифазною додатковою хвилею. При цьому, зрозуміло, критично зменшується загальний рівень корисного оптичного сигналу, що врешті-решт призводить до зриву роботи електронного процесора ЛДВ [2].

Нами запропоновано підхід, який дозволяє оминати цю вразливу особливість та отримати аномальне підсилення сигналу поза зоною мінімуму оптичного сигналу на фотодетекторі ЛДВ.

**АНАЛІЗ СИГНАЛІВ ЛАЗЕРНОГО ВІБРОМЕТРА З ВЧ МОДУЛЯЦІЄЮ В ЗОНДУВАЛЬНОМУ КАНАЛІ.** Розглянемо гетеродинний спосіб детектування когерентних сигналів, котрий використовується у лазерних доплерівських віброметрах, анемометрах та інших інтерференційних приладах, що досліджують механічні процеси. При гетеродинному прийомі одна з двох хвиль (нехай це буде опорна хвиля), що інтерферують на поверхні фотодетектора, має зсув на частоту гетеродину  $f_G$ . При трихвильовому фотозмішуванні, коли на поверхні фотодетектору інтерферують три когерентні хвилі, **миттєва частота** складової фотоструму  $i_{detG}$  на частоті гетеродину в загальному випадку має вигляд [5]:

$$\omega(t) = \frac{1}{2} \left[ \frac{d}{dt} (\Phi_1(t)) + (\Phi_2(t)) \right] + \frac{\frac{1}{2}(\eta^2 - 1) \cdot \left[ \frac{d}{dt} (\Phi_1(t)) - (\Phi_2(t)) \right]}{2\eta \cdot \cos((\Phi_1(t)) - (\Phi_2(t))) + \eta^2 + 1}, \quad (1)$$

де  $\Phi_1, \Phi_2$  – фази зондувальної та третьої хвилі.

Слід звернути увагу на те, що у цьому співвідношенні відсутні параметри першої хвилі, яка виконує роль гетеродина і лише зміщує спектр сигналу на частоту  $f_G$ .

Як правило, фаза  $\Phi_1$  зондувальної хвилі визначається параметрами коливання досліджуваної поверхні. Наприклад, для гармонічного коливання  $x_1(t) = X_1 \cos(\Omega t)$  фаза  $\Phi_1 = 2kX_1 \cos(\Omega t) + \phi_1$ , де  $k$  – хвильовий вектор зондувального випромінювання,  $X_1$  – амплітуда,  $\Omega$  – частота досліджуваних коливань,  $\phi_1$  – початкова фаза зондувальної хвилі. Найбільш досліджена конфігурація ЛДВ з ТХФ така, коли фаза третьої хвилі є сталою величиною  $\Phi_2 = \phi_2$ , де  $\phi_2$  – початкова фаза у третьому каналі [5, 7]. Для цих умов миттєва частота (1) записується, як:

$$\omega(t) = -kX_1\Omega \cdot \left[ 1 + \frac{(\eta^2 - 1)}{2\eta \cdot \cos(2k \cdot X_1 \cdot \cos(\Omega t) + \Delta\phi) + \eta^2 + 1} \right] \sin(\Omega t), \quad (2)$$

де  $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$ ,  $\eta = \frac{E_1}{E_2}$ , а  $E_1, E_2$  – амплітуди зондувальної та додаткової третьої хвилі.

У загальному випадку вихідний сигнал ЛДВ є також періодичним, але його форму деформують нелінійні спотворення. Для певних співвідношень між параметрами процесу, а саме для амплітуд коливань таких, що  $X_1 < 0.2 \cdot \frac{\eta - 1}{k}$ , нелінійні спотворення практично зникають [2]. Поблизу точки  $\Delta\phi = \pi$  амплітуда коливань на виході ЛДВ стрімко зростає при тих же параметрах підсилення доплерівського процесору. В точці  $\Delta\phi = \pi$  величина вихідного сигналу сягає своєї максимальної величини [2]

$$\omega_M = kX_1\Omega \cdot \left[ 1 + \frac{(\eta + 1)}{(\eta - 1)} \right].$$

Варто зауважити, що, хоча вихідний сигнал ЛДВ є напругою, він фактично відображає зміну миттєвої частоти. У "класичному" двопроменевому віброметрі миттєва частота на виході процесора дорівнює доплерівській частоті, яка

пов'язана з миттєвою швидкістю  $v(t)$  співвідношенням  $\omega(t) = \omega_{dop}(t) = 2kv(t)$ . У вібретрі з ТХФ, як свідчать формули (1), (2), це не так. Тому природно розглядати миттєву частоту, як вихідний сигнал ЛДВ, оскільки напруга на виході доплерівського процесора пропорційна саме миттєвій частоті. При періодичному процесі амплітуда вихідного сигналу буде пропорційна девіації миттєвої частоти. Щоб не вводити незвичне словосполучення "девіація вихідного сигналу", ми будемо надалі використовувати термін "амплітуда вихідного сигналу ЛДВ" у розумінні максимального відхилення миттєвої частоти.

На рис.1А зображено залежність (2) для умов, коли  $\Delta\phi = \pi$  (неперервна лінія), та  $\Delta\phi = 2.89$  радіан. На рис.1Б представлено розрахунок амплітуди  $I_G$  складової фотоструму на частоті гетеродина  $I_G = \alpha E_0 E_2 \sqrt{2\eta \cdot \cos(2k \cdot X_1 \cdot \cos(\Omega t) - \Delta\phi) + \eta^2 + 1}$ . Ця величина впливає на стабільність роботи доплерівського процесора, тому її критичне зменшення при досягненні найкращих умов для підсилення сигналу при  $\Delta\phi = \pi$  (рис. 1Б) може зашкодити роботі вимірювача. Тому не слід встановлювати початкову фазову різницю рівною  $\Delta\phi = \pi$ , хоча це і зменшую чутливість системи.

Щоб компенсувати втрату чутливості можна підняти підсилення за допомогою параметра  $\eta$ . Але це матиме наслідком знов таки зменшення амплітуди сигналу гетеродина  $I_G$ , що може призвести до зривів в роботі доплерівського процесору. Зауважимо також, що при наближенні  $\eta$  до одиниці разом з підсиленням зростають і нелінійні спотворення вихідного сигналу.

Для того, щоб вирішити цю проблему, розглянемо залежність амплітуди  $\omega_M(\Delta\phi)$  вихідного сигналу ЛДВ від фазової різниці в каналах 1 та 2. При умові  $X_1 < 0.2 \cdot \frac{\eta-1}{k}$ , коли сигнал на виході процесорі ЛДВ залишається підсиленим, але неспотвореним, з формули (2) витікає співвідношення для амплітуди вихідного сигналу ЛДВ з ТХФ [6]:

$$\omega_M(\Delta\phi) = -2kX_1\Omega\eta \cdot \left( \frac{\eta + \cos(\Delta\phi)}{1 + 2\eta \cdot \cos(\Delta\phi) + \eta^2} \right). \quad (3)$$

На рис. 2А зображено залежність (3) для  $\eta = 1.3$ ,  $\Omega = 2\pi \cdot 120 \text{ Hz}$  та двох амплітуд коливань  $X_1 = 3.15 \text{ nm}$  ( $X_1 < 0.2 \cdot \frac{\eta-1}{k} \approx 6.0 \text{ nm}$ , для сигналу зберігається лінійний режим підсилення) та  $X_1 = 6.3 \text{ nm}$ . Криву для  $X_1 = 15.75 \text{ nm}$ , що знаходиться за межами лінійного режиму, отримано шляхом аналізу співвідношення (2).

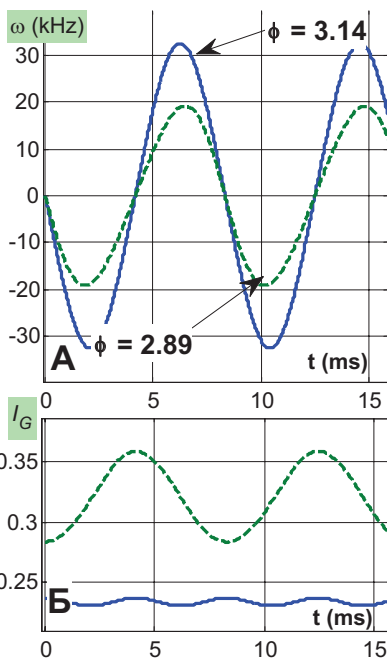


Рис. 1. Розрахунок вихідних сигналів ЛДВ з ТХФ: А – сигнали миттєвої швидкості; Б – амплітуда складової фотоструму на частоті гетеродина

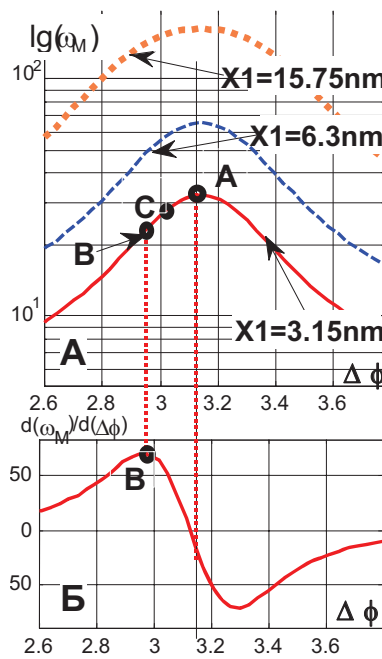


Рис. 2: А – залежність аномального підсилення як функція фазової різниці; Б – похідна аномального підсилення від фази  $\Delta\phi$

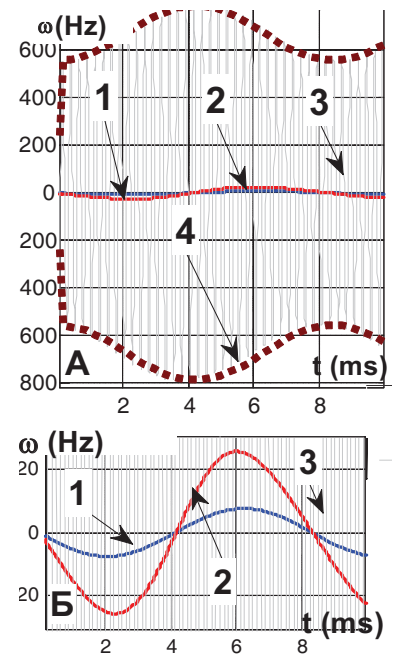


Рис. 3. Розрахунок: А – вихідні сигнали ЛДВ з ТХФ та ВЧ модуляцією; Б – збільшена область поблизу вісі абсцис

На рис. 2Б, зображено похідну від функції  $\omega_M(\Delta\phi)$ , яка в точці В досягає свого максимуму. У цій точці система найбільш чутлива до зміни фази вхідного сигналу, похідна  $\frac{d(\omega_M(\Delta\phi))}{d(\Delta\phi)}$  в її околі сягає величини 80 Гц/рад. У той же

час, при відхиленні фази від точки А ( $\Delta\phi = \pi$ ) до точки В ( $\Delta\phi = 2.95$ ) амплітуда вихідного сигналу втрачає лише 1.4 від максимально можливої величини.

Таким чином, якщо, в точці В амплітуда сигналу (максимальне відхилення миттєвої частоти) приблизно 23 Гц, то в точці С, що відстоїть від В приблизно на 0.1 рад, амплітуда сигналу вже буде складати 27 Гц. Приріст 4 Гц – це небагато, але слід звернути увагу, що амплітуда вихідного сигналу ЛДВ лінійно залежить від частоти  $\Omega$  (3). Хоча, частотою досліджуваного механічного коливального процесу ми керувати не можемо, але можна ввести додаткову високочастотну фазову модуляцію, що дозволить опосередковано керувати підсиленням сигналу.

Покажемо, як за допомогою ВЧ модуляції можна впливати на рівень вихідного сигналу. Для цього розрахуємо вихідний сигнал у випадку, коли в одному з каналів, що інтерферують (нехай це буде зондувальний канал), існує додаткова ВЧ модуляція:  $\phi_m(t) = m \cdot \cos(\Omega_m t)$ , де  $m$  – індекс,  $\Omega_m$  – частота ВЧ модуляції. У цьому випадку фаза зондувальної хвилі  $\Phi_1 = 2kX_1 \cos(\Omega t) + \phi_m(t) + \phi_1$ , а вихідний сигнал віброметра набуває вигляду

$$\omega'(t) = -\left(kX_1\Omega \sin(\Omega t) + \frac{m}{2}\Omega_m \sin(\Omega_m t)\right) - \frac{(\eta^2 - 1) \cdot \left(kX_1\Omega \sin(\Omega t) - \frac{m}{2}\Omega_m \sin(\Omega_m t)\right)}{2\eta \cdot \cos(2kX_1 \cos(\Omega t) - m \sin(\Omega_m t) - \Delta\phi) + \eta^2 + 1}. \quad (4)$$

Для симуляції вихідного сигналу виберемо ті ж параметри досліджуваного процесу, як і в попередньому випадку:  $\eta = 1.3$ ,  $X_1 = 3.15 \text{ mm}$ ,  $\Omega = 2\pi \cdot 120 \text{ Hz}$ . Задамо також початкову фазову різницю  $\Delta\phi - \pi = 0.19$  (точка В на діаграмі рис. 2А). Для високочастотної модуляції виберемо  $m = 0.1$  та  $\Omega_m = 2\pi \cdot 4k \text{ Hz}$ .

На рис. 3 зображено епюри вихідних сигналів віброметра для таких випадків: 1 – сигнал вібрації без ТХФ (класичний двоканальний віброметр); 2 – сигнал вібрації при наявності аномального підсилення в режимі ТХФ; еюра 3 – це вихідний сигнал віброметра з ТХФ при наявності додаткової високочастотної модуляції; 4 – обвідна сигналу високочастотної модуляції, що і є шуканий вихідний сигнал в досліджуваному випадку.

З цих результатів бачимо, що максимальна величина продетектованого сигналу ЛДВ на виході частотного дискримінатора (епюра 4) складає 112 Hz, що в чотири з половиною рази перевищує "амплітуду" вихідного сигналу без модуляції (23 Hz) і майже в 15 разів перевищує вихідний сигнал віброметра без ТХФ. Таким чином, завдяки додатковій модуляції досягається підсилення в 23.5 дБ, що на 10 дБ більше ніж в ЛДВ з ТХФ без модуляції, але за умови  $\Delta\phi = \pi$ . Слід зауважити, що таке підсилення досягається лише за рахунок особливої конфігурації системи віброметра, без застосування додаткових ланцюгів електронного підсилення. Це означає, що і рівень електронних завод в новій схемі буде залишатися таким же, як і в класичному ЛДВ, і, таким чином, чутливість до коливань з малою амплітудою буде покращуватися. Зазначимо, що при цьому амплітуда складової фотоструму на частоті гетеродина не досягає критично малої величини.

Аналітичне дослідження сигналу ЛДВ з ТХФ і модуляцією (скорочено ТХФМ) у загальному випадку – формула (4) – громіздка задача. Але, якщо аномальне підсилення віброметра знаходиться в межах лінійного режиму підсилення  $m < 0.4(\eta - 1)$ , а частота ВЧ модуляції набагато вища, ніж можлива частота коливання об'єкту, то замість формули (4) можна застосовувати формулу (3). У цьому випадку фазова різниця  $\Delta\phi$ , яка відповідає розташуванню на контурі підсилення початкової фази (дивись рис. 2Б) є фазою оптичного сигналу зондувального каналу  $\Phi_1(t)$ , яка змінюється повільно і пов'язана з миттєвим зміщенням досліджуваного об'єкту  $\Phi_1 = 2kx(t) + \phi_1$ :

$$\omega_M = -m\Omega_m \eta \cdot \left( \frac{\eta + \cos(2kX_1 \cos(\Omega t) + \phi_1)}{1 + 2\eta \cdot \cos(2kX_1 \cos(\Omega t) + \phi_1) + \eta^2} \right). \quad (5)$$

На перший погляд співвідношення (5) майже співпадає з (3), але суттєвою відмінністю є те, що множники перед дужками відносяться не до параметрів коливання, а до параметрів модуляції.

У припущенні малих фаз під знаком косинуса формулу (5) можна спростити. Для цього розкладемо в ряд функцію  $\omega_M(\Delta\phi)$  за  $\Delta\phi$  в точці В (див. рис. 2) та обмежимося першим лінійним членом. Тоді (5) запишеться, як:

$$\omega_M = -\frac{m}{2}\Omega_m \left[ \frac{\eta + \cos(\Delta\phi_B)}{1 + 2\eta \cos(\Delta\phi_B) + \eta^2} + \frac{2\eta(\eta^2 - 1)}{(1 + 2\eta \cos(\Delta\phi_B) + \eta^2)} (2kX_1 \cos(\Omega t) + \phi_1) \right]. \quad (6)$$

Аналізуючи формулу (6) бачимо, що величина вихідного сигналу прямо пропорційна частоті  $\Omega_m$  ВЧ модуляції, тобто сигнал також можна підсилити за рахунок підвищення частоти модуляції. Теж саме стосується індексу модуляції. Зауважимо, що сукупний індекс модульованого коливання залишався в межах  $m + 2kX_1 < \Delta\phi(A) - \Delta\phi(B)$ . Співвідношення (6) також свідчить, що вихідний сигнал ТХФМ є пропорційним миттєвому зміщенню  $x(t)$  коливального процесу  $x(t) = X_1 \cos(\Omega t)$ , а не його миттєвій швидкості  $v(t) = -X_1 \Omega \sin(\Omega t)$ , як це притаманно класичним ЛДВ. Це пояснюється тим, що саме миттєва фаза коливального процесу  $\phi(t) = 2kx(t)$  спричиняє рух робочої точки по контуру підсилення  $\omega_M(\Delta\phi)$  (рис.2А) і впливає таким чином на підсилення амплітуди ВЧ модулюючого сигналу. Епюри на рис.3 підтверджують, що обвідна 4 (продетектований сигнал) ВЧ модуляції і сигнал миттєвої швидкості (як в звичайному віброметрі так і в віброметрі з ТХФ) зміщені один відносно одного на чверть періоду (рис. 3).

Важливо зауважити, що в багатьох задачах експериментальної механіки, наприклад, при визначенні деформацій [5, 7], є необхідним саме переміщення об'єкту. Тому вихідний сигнал ЛДВ, що є еквівалентним, як відомо,

миттєвій швидкості, інтегрують апаратними або програмними засобами, що вносить додаткову похибку. Таким чином, високоточний лазерний віброметр, що вимірює безпосередньо миттєве переміщення, буде ефективним вимірювальним засобом.

Зазначимо також на симетричний вплив другої та третьої хвиль на роботу ЛДВ з ТХФ. Звідси випливає, що результат аналогічний отриманому можна отримати при ВЧ модуляції в третьому, а не в другому каналі.

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.** Для перевірки отриманих результатів було змонтовано експериментальну систему, схема якої зображена на рис. 4. Основа системи – класичний двопроменевий лазерний віброметр CLV-S. Перша – опорна хвиля циркулює всередині лазерної головки віброметра **1**, а друга (зондувальна) виходить назовні. Третій промінь сформовано за рахунок відхилення частини зондувального променя в додатковому інтерферометрі **2**. Зондувальний промінь (друга оптична хвиля) спрямовується на досліджуваний об'єкт **3**, відбиваючись на шляху до нього від дзеркальної поверхні модулятора **4**, котра вібрує з високою частотою, і забезпечує, таким чином, високочастотну модуляцію фази  $\phi_m(t) = m \cdot \cos(\Omega_m t)$ . Поверхня модулятора **4** розташована майже нормально до зондувального променя, щоб звести нанівець його можливий рух в поперечному напрямі. Вздовж зондувального променя розміщено керований рідкокристалічний фільтр нейтральної щільності **5**, за допомогою якого регулюють величину  $\eta$ . Систему фотодетекторів **8**, диференційного підсилювача **9** зі зворотнім зв'язком та фільтра **5** призначено для автоматичного підтримання заданої величини параметра  $\eta$ . Третій промінь спрямовано на відбиваючу поверхню **6**. Тонку скляну пластину **7**, встановлено з можливістю її обертання в проміні на заданий кут, що дозволяє регулювати початкову фазову різницю  $\Delta\phi$ . Для тонкої зміни фази, приблизно в межах 0.3 радіан, застосовано змінну напругу від блоку живлення **12**. Генератори **10** та **11** подають сигнали на об'єкт, що вібрує, та модулятор фази **4**. Сигнали віброметра досліджуються на цифровому осцилоскопі RIGOL 1102E **13**. Детектування сигналу (для визначення обвідної) здійснювалось програмними засобами на комп'ютері **14**.

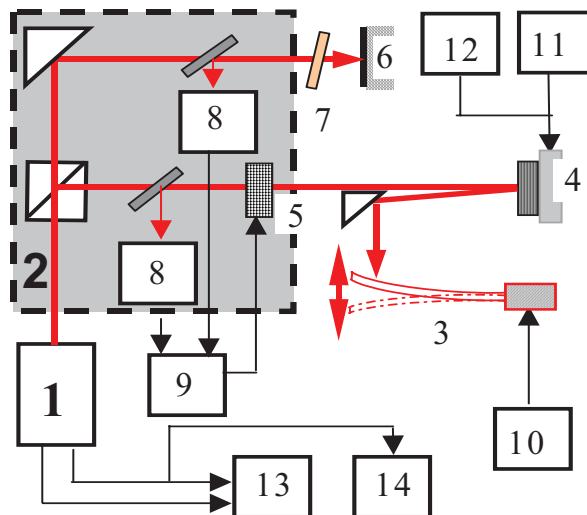


Рис. 4. Оптична схема експериментальної установки модифікованого віброметра з ТХВ

На рис. 5 зображено сигнали осцилоскопу **13** на виході віброметра **1** для випадку коливального процесу з такими параметрами:  $X_1 = 16 \text{ nm}$ ,  $\Omega = 2\pi \cdot 350 \text{ Hz}$ ,  $\Omega_m = 2\pi \cdot 3.9 \text{ kHz}$ ,  $m = 0.3$ . Верхня еюра відображає високочастотну складову сигналу гетеродину, тобто інтенсивність сигналу, котрий поступає з фотоприймача для обробки електронним процесором. Цей сигнал відфільтрований від складової на частоті модуляції  $\Omega_m$ . Як можна бачити з цієї еюри, робота віброметра проходить на схилі кривої аномального підсилення  $\omega_M(\Delta\phi)$ , не заходячи за точку максимального підсилення **A** (рис. 2А).

Нижня еюра на рис.5 описує пропорційний миттєвій швидкості сигнал, який містить досліджуваний коливальний процес та додаткову ВЧ модуляцію. Відповідно до розвиненого вище підходу, шуканий підсилений сигнал – це обвідна ВЧ сигналу віброметра. Детектування піковим детектором вихідного сигналу ЛДВ виконується програмними засобами. Результат наведено на еюрі рис. 6А; амплітуда вихідного сигналу складає 65 mV.

На рис. 6Б, з метою порівняння, подано еюру вихідного сигналу віброметра без додаткового каналу, тобто сигнал класичного ЛДВ, який отримано при тих же самих параметрах коливального процесу. Його амплітуда складає лише 7 mV. Таким чином, без додаткових елементів електронного підсилювання досягнуто приріст вихідного сигналу майже в 18 дБ.

Необхідно зазначити, що сигнал прототипу на рис. 6Б має більш високий рівень шумів, ніж сигнал обвідної в ЛДВ з ТХФМ (рис.6А). Ця різниця ще краще стає помітною при зменшенні амплітуди коливань. Дві еюри, котрі наведено на рис.7, відповідають коливанням з амплітудою  $X_1 = 4.5 \text{ nm}$ . Верхня еюра – це сигнал ЛДВ з ТХФМ, а нижня еюра показує сигнал класичного двопроменевого ЛДВ. Додаткове підсилення в цьому експерименті склало близько 20 дБ, але більш важливим є те, що вихідний сигнал ЛДВ з ТХФМ має значно нижчий рівень шумів. Якщо в сигналі двопроменевого віброметра відношення сигнал/шум становить приблизно 3, то у віброметрі з модуляцією відношення сигнал/шум  $\gg 1$ . Це дає можливість точного вимірювання коливань з субнанометровими амплітудами.

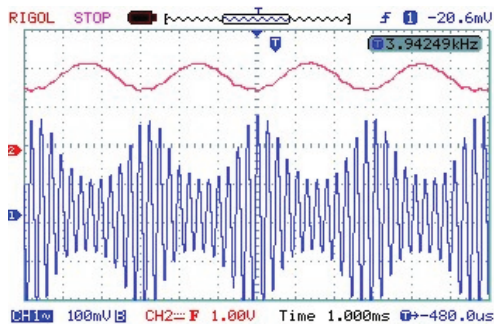


Рис. 5 Осцилограми сигналів ЛДВ з ТХФМ: зверху – амплітуда складової фотоструму на частоті гетеродина; знизу – сигнал миттєвої швидкості

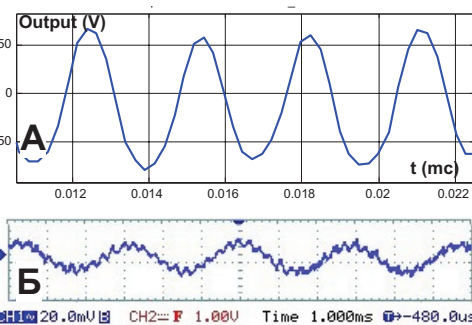


Рис. 6: А – обвідна ВЧ сигналу ЛДВ з ТХФМ (рис.5),  $X_1 = 16 \text{ nm}$ ; Б – осцилограма сигналу миттєвої швидкості у двопробеновому віброметрі

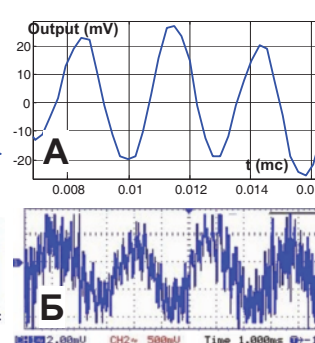


Рис. 7: А – обвідна ВЧ сигналу в ЛДВ з ТХФМ,  $X_1 = 4.5 \text{ nm}$ ; Б – класичний ЛДВ, сигнал миттєвої швидкості

**ВИСНОВКИ.** Проведена робота дозволяє зробити наступні висновки. По-перше, для забезпечення стабільності роботи доплерівського процесору в віброметрі з ТХФ слід вибирати початкову фазу відмінною від  $\Delta\phi = \pi$ , найкраще – в максимумі похідної  $\frac{d(\omega_M(\delta\phi))}{d(\delta\phi)}$ .

По-друге, високочастотна фазова модуляція в одному з каналів призводить до додаткового підсилення вихідного сигналу віброметра, яке пропорційне частоті та індексу модуляції. Вихідний сигнал віброметра в цьому випадку розуміється, як обвідна ВЧ модуляції на виході приладу. Третє, вихідний сигнал лазерного віброметра з ТХФ та високочастотною фазовою модуляцією є пропорційним миттєвому переміщенню, а не миттєвій швидкості, як це має місце у класичних лазерних віброметрах. Четверте, експеримент підтвердив наявність підсилення сигналу до 20 дБ і поліпшення відношення сигнал/шум до 10 дБ.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Іващенко Д.О., Яровой Л.К., Розумнюк В.І. Світловодний сенсор механічних коливань з підвищеною чутливістю в нанометровому діапазоні // Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки. – 2012. – Випуск 4. – С. 43–51.
2. Яровой Л. К. Особливості роботи лазерного доплерівського віброметра з трихвильовим фотозмішуванням в нанометровому діапазоні // Вісник Київського університету. Серія: Математика. Механіка. – 2011– Випуск. 26. – С. 39–43.
3. Пат. 94564 Україна МПК G 01 B 9/02 Спосіб вимірювання миттєвої віброшвидкості / Яровой Л. К.; заявник власник патенту Київ Нац. Унів. ім. Тараса Шевченка. – №201013706 заяв. 18.11.10; друк. 10.05.2011, Бюл. № 9.
4. Jianhua Shang, Yan He, Dan Liu. Huaguo Zang and Weibiao Chen. Laser Doppler Vibrometer for real-time speech-signal acquirement // Chinese Optics Letters. – 2009. – V.7. – No.8 // – P. 732–733.
5. Olijnyk A., Robur I. Yarovoi L. Determination of Stress-deformation state of Vibrating Construction by Fiber Laser Doppler Anemometer. Proc. of Third International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques // – 1998. – V.3411. – P. 404–408.
6. Ombeline de La Rochefoucauld, Shyam M., Khana S., Olson E. Recording depth and signal competition in heterodyne interferometry // J. Acoust. Soc. Am. – 2005. – V. 117, № 3. – P. 1267–1284.
7. Pai P.F., Jin S. Locating structural damage by detecting boundary effects // Journal of Sound and Vibration. – 2000 – V. 231, N4. – P. 1079–1110.
8. Vekteris V., Cereska A. Nondestructive vibrodiagnostic of rotors systems with lasers // Proc. SPIE IV Intern. Conf. on Vibration Measurements by Laser Techniques. – 2006. – V.46345. – P. 63450I-1 – 63450I-6.
9. Yarovoi L., Siegmund G. The effect of three-wave interference in laser Doppler vibrometry // Meas. Sci. Technol. – 2004. – V. 15. – P. 2150–2156.

Надійшла до редколегії 07.02.13

Л. Яровой, канд. техн. наук

### ИЗМЕРЕНИЯ НАНОАМПЛИТУДНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ЛАЗЕРНЫМ ДОПЛЕРОВСКИМ ВИБРОМЕТРОМ С МОДУЛЯЦИЕЙ ЗОНДИРУЮЩЕЙ ВОЛНЫ

*Предлагается повысить чувствительность лазерных виброметров для измерения механических колебаний с малыми амплитудами путем использования дополнительной частотной фазовой модуляции в одном из оптических каналов виброметра с трехволновым фотосмещением. Результатом является дополнительное усиление выходного сигнала виброметра, которое пропорционально частоте и индексу модуляции. Показано, что, в приближении малых амплитуд, выходной сигнал виброметра пропорционален мгновенному перемещению колебания. Обоснованы параметры оптимального режима измерения колебаний с сверхмалыми амплитудами. В эксперименте подтверждено усиление чувствительности, продемонстрировано повышение отношения сигнал/шум*

L. Yarovoi, Phd (eng)

### THE MEASUREMENT OF THE NANOSCALE VIBRATION BY THE LASER DOPPLER VIBROMETER WITH THE MODULATED PROBING CHANNEL

*We studied work of the LDV with additional optical channel and HF phase modulation in the probing channel for the situation when phase difference between probing and third waves is close, but is not equal  $\pi$ . For such layout the detected output LDV signal is proportional to instantaneous displacement, instead of instantaneous velocity as in classical two channels LDV.*