

УДК 621.38; 681.5

МАЛОГАБАРИТНИЙ ЦИФРОВИЙ ВІБРОМЕТР¹⁾Василенко В. І., ¹⁾Красовський Т. А., ²⁾Дяченко С. М.¹⁾Київський академічний університет НАН України, Київ, Україна²⁾Інститут проблем моделювання в енергетиці НАН України, Київ, УкраїнаE-mail: vasil26139@gmail.com, taraskras@gmail.com, sergydiachenko@gmail.com

При наукових дослідженнях роботи ультразвукового обладнання в сучасних технологічних процесах необхідне вимірювання амплітуди механічної вібрації робочого інструмента, що на високих частотах має суттєву технічну складність. Визначення величини амплітуди ультразвукової вібрації дає можливість точно дозувати кількість енергії, необхідної для отримання якісної обробки, а також для сталої повторюваності результатів роботи обладнання. Відомі зарубіжні віброметри виробляються цілеспрямовано для конкретних умов використання і характеризуються складністю, громіздкістю та високою вартістю, що являє перешкоду для широкого вжитку. Тому метою даної роботи була розробка бюджетного малогабаритного віброметра з використанням ємнісного методу виміру амплітуди з частотною модуляцією, для якого властива висока чутливість та стійкість до зовнішніх завад. Даний віброметр складається з двох частин: датчика вібрації з електронним перетворювачем високочастотного сигналу в постійну напругу, пропорційну амплітуді вібрації, а також блока живлення та цифрової обробки сигналу і індикації амплітуди в мкм. Датчик віброметра укріплений на шарнірному штативі для зручності установки його в будь-якій площині на відстані ≈ 1 мм від досліджуваної поверхні. Живиться віброметр від мережі 220 В.

У віброметрі забезпечені мікропроцесорна обробка та індикація результатів виміру амплітуди вібрації, а також контроль та індикація величини проміжку між датчиком вібрації і досліджуваною поверхнею, стабілізація показань амплітуди при варіаціях цього проміжку в межах 0.8...1,2 мм. Діапазон вимірювання амплітуди вібрації 0...99 мкм, з роздільною здатністю 1 мкм. Діапазон частоти вібрації 5...50 кГц. Аналоговий сигнал з виходу вібродатчика можна використати в УЗ генераторі, що живить п'єзоелектричний перетворювач, як сигнал зворотного зв'язку, для стабілізації амплітуди механічних коливань випромінювача на потрібному рівні.

Ключові слова: ємнісний датчик; генератор; частотний детектор; мікропроцесорний контролер; цифровий індикатор.

Вступ

У процесі розробки та налагодження ультразвукового устаткування, наприклад, ультразвукових коливальних систем (УЗКС), необхідні спеціальні контрольно-вимірювальні прилади: аналізатори амплітудно-частотних характеристик [1] і вимірювачі амплітуди вібрації. Це дає можливість у процесі його експлуатації якісно виконувати високоточне дозування ультразвукової енергії в технологічних операціях з високою продуктивністю.

Світовими виробниками ультразвукового обладнання розроблено і випускаються складні високотехнологічні промислові віброметри для конкретних умов експлуатації, які через велику вартість та складність сервісного обслуговування повільно впроваджуються на промислових підприємствах України.

Відома велика кількість методів та засобів, що дозволяють вимірювати амплітуду вібрації [2, 3], які можна поділити на дві групи: контактні, що мають механічний зв'язок датчика з досліджуванним об'єктом, і безконтактні. Кожному методу притаманні свої переваги та недоліки. Найбільш простим є контактний метод виміру амплітуди вібрації за допомогою п'єзоелектричних датчиків [4, 5]. Але такий метод непридатний для виміру

амплітуди в широкому діапазоні частот вібрації, оскільки амплітудно-частотна характеристика перетворення п'єзоелектричного датчика значною мірою залежить від частоти вібрації, до того ж і від зусилля притискання.

Відомі безконтактні методи із застосуванням індуктивних (вихрострумових) [6-8], оптичних [9], радіохвильових, лазерних датчиків із застосуванням НВЧ випромінювачів, відеокамер, комп'ютерів [10-11]. Загальним недоліком усіх цих методів є складність, громіздкість, висока вартість обладнання, високі вимоги до якості поверхні досліджуваного об'єкта і до стану атмосфери (запиленість, задимленість і т. п.).

Мета роботи – створення вітчизняного малогабаритного, бюджетного віброметра для виміру амплітуди вібрації ультразвукових коливальних систем, як при розробці їх, так і при експлуатації на виробництві.

При виконанні проєкту було обрано ємнісний метод вимірювання амплітуди вібрації безконтактним методом, якому властиві висока чутливість, простота схемних рішень та стійкість до зовнішніх завад [4].

Структурна схема вібрметра та опис алгоритму його роботи

На рис. 1 наведено функціональну блок-схему розробленого приладу, який складається з двох частин: 1) ємнісний датчик сигналу вібрації та електронний перетворювач, 2) блок живлення та цифрової обробки сигналу і індикації амплітуди вібрації в мкм. Обидві частини з'єднані 6-жильним кабелем. Ємнісний датчик являє собою плоский

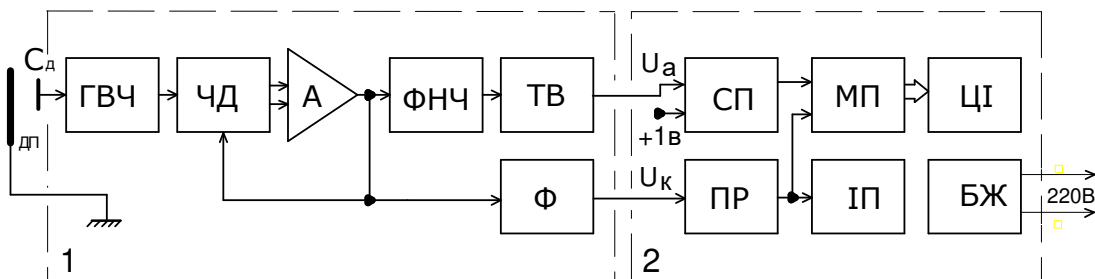


Рис. 1. Функціональна блок-схема вібрметра: C_d – обкладинка ємності датчика; ДП – досліджувана поверхня, що вібрує; ГВЧ – генератор високої частоти; ЧД – частотний детектор; А – підсилювач; ФНЧ – фільтр низької частоти; ТВ – точний випрямляч; Ф – RC-фільтр; СП – сенсорний перемикач; МП – мікропроцесорний контролер; ЦІ – цифровий індикатор; ПР – перетворювач рівня; ІП – індикатор проміжку; БЖ – блок живлення

При вібрації цієї поверхні відбувається періодична зміна проміжку між пластинкою C_d і площиною торця хвилеводу, що, у свою чергу, призводить до зміни ємності такого конденсатора і девіації частоти генератора, яка прямо пропорційна амплітуді вібрації. Електричний сигнал з виходу ГВЧ із середньою частотою $F_c = 38$ МГц надходить на вхід частотного детектора ЧД. На виході детектора утворюється складна парафазна напруга, яка подається на вхід диференціального підсилювача А. Вихідна напруга U_{Σ} останнього є сумою трьох складових:

1) напруги різницевої частоти

$$F_p = F_c - F_r = 1,5 \text{ МГц},$$

де F_r – частота гетеродину,

- 2) напруги з частотою, що дорівнює частоті вібрації,
3) постійної напруги U_k , величина та полярність якої залежать від відхилення величини проміжку d від нормального значення $d_0 = 1$ мм.

Напруга U_{Σ} використовується в ЧД в якості негативного зворотного зв'язку для стабілізації частоти гетеродину, а також надходить до активного фільтра нижніх частот ФНЧ, який пригнічує напругу з частотою F_p , але пропускає та посилює напругу з частотою вібрації в діапазоні від 5 до 50 кГц. Далі ця напруга детектується активним випрямлячем ТВ з фільтром, тобто перетворюється на постійну напругу U_a , пропорційну амплітуді механічної вібрації A_m [2]

$$U_a \approx A_m \cdot \epsilon S_d C_d d^2,$$

де ϵ – відносна діелектрична проникність середовища, S_d і C_d – площа та ємність датчика.

Враховуючи, що $C_d = \epsilon S_d / d$, отримаємо:

$$U_a \approx A_m \cdot K / d, \quad (1),$$

повітряний конденсатор, одна обкладинка якого – металева пластинка C_d діаметром 6 мм, розташована на кінці друкованої плати, що виступає з корпусу вібрметра. Пластинка C_d підключена до контуру високочастотного генератора ГВЧ, а інша "обкладинка" – металева досліджувана поверхня ДП, електрично з'єднана з корпусом вібрметра, наприклад торець УЗКС. Нормальний проміжок між цими "обкладинками" $d_0 = 1$ мм.

де K – коефіцієнт пропорційності (V/μ).

Якщо амплітуда вимірюваних коливань мала порівняно з величиною проміжку d , то нелінійність передавальної характеристики можна знехтувати. Ємність C_d підключена паралельно до індуктивності коливального контуру в ГВЧ, що має малий реактивний опір для низькочастотних завад. Ця обставина забезпечує малу чутливість до низькочастотних електромагнітних наведень. Вся високочастотна частина вібрметра зосереджена в корпусі датчика 1. Через з'єднуючий кабель передаються тільки постійні напруги U_a , U_k та напруги живлення мікросхем.

У вимірювальному блоку 2 постійна напруга U_a через електронний сенсорний перемикач СП надходить на вхід 1 мікропроцесорного контролера МП для вимірювання амплітуди вібрації і подальшого відображення її на цифровому індикаторі ЦІ в мікронах. Сенсорний контакт виведено на передню панель приладу.

З формули (1) видно, що напруга U_a залежить від величини проміжку d , тому необхідно контролювати його величину, що є недоліком даного методу. Для того, щоб усунути цю залежність, використана постійна складова U_k напруги U_{Σ} на виході диференціального підсилювача А, яка залежить від величини проміжку d подібно до U_a (рис. 2).

Фільтр Ф виділяє з напруги U_{Σ} постійну складову U_k , яка надходить на вхід перетворювача рівня ПР. Останній зсуває цю знакозмінну напругу в область додатних значень (оскільки діапазон вхідної напруги МП знаходиться в межах $0 \dots +2$ В).

Вихідна напруга ПР $U_k' = U_0 - \alpha \cdot (\pm U_k)$ надходить на вхід 2 мікропроцесора МП, що перемно-

жує, для корекції його коефіцієнту передачі по виходу 1. $U_0=+1$ В.

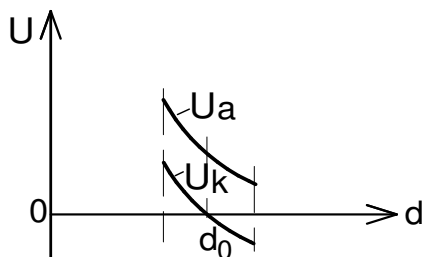


Рис. 2. Характер залежностей напруг U_a і U_k від величини проміжку d .

Коефіцієнт $\alpha < 1$ (реалізується за допомогою потенціометра) обраний емпірично – при первинному налаштуванні вібрметра так, щоб при постійній амплітуді A_m і при варіаціях d в межах $d=0,8\dots 1,2$ мм добуток $U_a \cdot U_k$ і відповідно показання цифрового індикатора ЦІ не змінювалися. При зменшенні d напруги U_a збільшується, U_k зменшується, а добуток залишається незмінним.

Напряга з виходу ПР надходить також на вхід вимірювача-індикатора ПІ величини проміжку d . Ця динамічна індикація реалізується допоміжним мікросхемним стовпчиком світлодіодних рисок, розташованим праворуч від ЦІ. Крім того, за допомогою сенсорного перемикача СП на перший вхід мікропроцесорного контролера МП замість напруги U_a може бути подано напругу $U_0=+1$ В. У цьому випадку індикатор ЦІ покаже більш точну величину проміжку d в мм (три значущих цифри).

Калібрування вібрметра проводилося за допомогою оптичної мікрометричної установки, а також за допомогою механічного стрілочного мікрометричного датчика. Похибка вимірювання амплітуди вібрації оцінюється як 1 мк, що здебільшого для роботи УЗ устаткування – достатньо.

Блок живлення БЖ виробляє стабілізовану напругу +5 В і -5 В для живлення мікросхем та індикаторів, а також регульовану напругу +12 В, що подається на варикапи в ЧД для установки частоти гетеродина (при початковому налаштуванні приладу), за якої напруга $U_k=0$ при $d=d_0=1$ мм. Зовнішній вигляд вібрметра показаний на рис. 3, з якого видно, що блок датчика 1 встановлений на шарнірному штативі з магнітним кріпленням до металевої (сталеві) поверхні.

При ввімкненні живлення приладу ЦІ відображує величину проміжку d в мм. Обережно пересуваючи штатив з датчиком, необхідно встановити це число в межах 0,9...1,1 мм. За допомогою світлодіодної лінійки пікового детектора ПІ проводиться візуалізація процесу. Режим вимірювання амплітуди вібрації вмикається за допомогою сенсорного перемикача 6. При подачі вібрації ЦІ показує амплітуду в мкм – три значущих цифри, а зелений світлодіод відображає режим вимірювання амплітуди. Слід зазначити, що цифри на ЦІ висвічуються по черзі,

періодично, тому на рис. 3 (фото з короткою експозицією) видно тільки дві цифри.

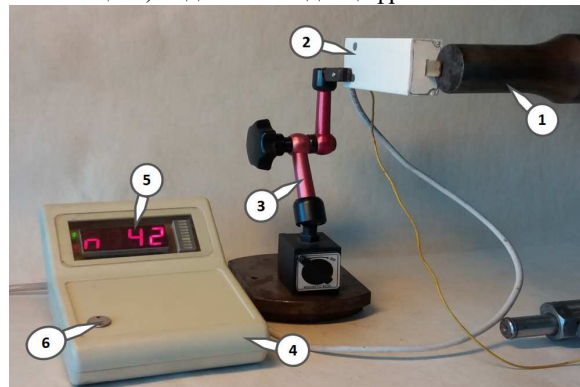


Рис. 3. Зовнішній вигляд вібрметра: 1 – ультразвуковий випромінювач; 2 – датчик вібрації; 3 – штатив; 4 – вимірювальний блок; 5 – табло ЦІ; 6 – сенсорний перемикач режимів

Прилад може вимірювати амплітуду вібрації будь-якої поверхні в горизонтальній чи вертикальній площині. Поверхня може бути навіть неметалевою. Але в останньому випадку для утворення робочої ємності C_d необхідно перед вимірюванням у досліджуваній точці наклеїти металеву пластинку (фольгу), діаметром не менше 12 мм і електрично з'єднати її з корпусом датчика.

Висновки

Для наукових досліджень та забезпечення якісної роботи промислового ультразвукового обладнання розроблено бюджетний малогабаритний цифровий вібрметр для безконтактного вимірювання та індикації амплітуди поздовжньої вібрації УЗКС в межах від 0 до 99 мкм із роздільною здатністю 1 мкм в діапазоні частот вібрації від 5 до 50 кГц. В приладі забезпечено стабілізацію показань при варіації величини проміжку між датчиком і досліджуваною поверхнею в межах 0,75...1,15 мм.

Порівняно з відомими вібрметрами розроблений вібрметр має наступні переваги: 1) працює автономно, без комп'ютера та інших додаткових приладів, 2) не містить дорогих компонентів, собівартість його менше 1000 у.о., 3) малогабаритний, легкий та зручний в роботі, дозволяє вимірювати амплітуду вібрації поверхні в будь-якій площині; габарити вібрдатчика 70x35x16 мм, 4) аналоговий сигнал з виходу вібрдатчика за потреби легко застосувати в УЗ генераторі, що живить п'єзоелектричний перетворювач, як сигнал зворотного зв'язку для стабілізації амплітуди механічних коливань випромінювача на потрібному рівні.

Проведені успішні лабораторно-промислові випробування (в ТОВ «Путек Україна»). Подальшою перспективою розвитку даного технічного рішення є переробка аналогової частини приладу в більш сучасну цифрову схемотехніку з відповідним програмним забезпеченням, (щоб зменшити похибку вимірів від зміни температури навколиш-

нього середовища), а також перетворення лабораторного зразка в промисловий, придатний для малосерійного виготовлення.

Література

- [1] Т. А. Красовський, В. І. Василенко, “Цифровий аналізатор електромеханічних параметрів ультразвукових коливальних систем”, *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування*, Вип. 53(1), 2017.
- [2] П. А. Зрюмов, Ю. В. Селезневі, “Аналитический обзор методов измерения вибрации”, *Ползуновский альманах*, №1, 2014, с.187.
- [3] В. В. Петрухин, С. В. Петрухин, *Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации*. Москва: Инфра-Инженерия, 2010.
- [4] В. Л. Ланин, Н. В. Дежкунов, В. С. Томаль, “Приборное обеспечение измерения параметров ультразвуковых воздействий в технологических процессах”, *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, №2, 2008.
- [5] В. Л. Ланин, И. Петухов, “Измерение амплитуды вибраций в технологических системах”, *Технологии в электронной промышленности*, №4, с. 22-27, 2015.
- [6] А. В. Мовчанюк, А. Ф. Закревський, “Применение метода вариации при вихретоковом измерении параметров вибрации”, *Вестник СевНТУ: сб. наук. пр.* Серия: Автоматизация процессов и менеджмента. Вып. 125, 2012.
- [7] О. Ф. Закревський, “Вимірювання амплітуди механічних коливань ультразвукового частотного діапазону (Огляд)”, *Електроніка та Зв'язок*, № 2(67), с. 41-50, 2012.
- [8] О. Ф. Закревський, “Точність вимірювання амплітуди ультразвукових механічних коливань вихрострумовим методом”, *Електроніка та Зв'язок*, №1, 2013.
- [9] G. V. Leonov, V. N. Khmelev, I. I. Savin, “Automation of the amplitude measurement process of ultrasonic oscillatory systems irradiating surface”, in *6th International Siberian Workshop and Tutorial. EDM*, 2005, session I I, July 1-5, ERLAGOL, p.64-67.
- [10] И. Краснощёков и др. Лазерный виброметр повышенной чувствительности. “ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, технология, бизнес”, №6, с. 98-101, 2008.
- [11] M. Johansmann, G. Wirth, “Laser Doppler vibrometry for measuring vibration in ultrasonic transducers”, Polytec GmbH, Germany. in *Ultrasonic Transducers: Materials and Design for Sensors, Actuators and Medical Applications*. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, 2012, pp. 277-313.

UDC 621.38; 681.5

¹⁾V. I. Vasilenko, ¹⁾T. A. Krasovsky, ²⁾S.M. Diachenko

¹⁾Kyiv Academic University of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²⁾IPME, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

SMALL DIGITAL VIBROMETER

During scientific studies of the operation of ultrasonic equipment in modern technological processes, it is necessary to measure the amplitude of the mechanical vibration of the working tool, which at high frequencies has significant technical complexity. Knowing the magnitude of the amplitude of ultrasonic vibration makes it possible to precisely dose the amount of energy necessary to obtain a high-quality processing product, as well as for constant repeatability of the results of the equipment. Known foreign vibrometers are purposefully produced for specific conditions of use and are characterized by complexity, bulkiness and high cost, which is an obstacle to wide use. Therefore, the purpose of this work is to develop a low-cost, small-sized vibrometer for measuring the amplitude of ultrasonic emitters. For this, a capacitive measurement method with frequency modulation of the carrier frequency is used, which is characterized by high sensitivity and resistance to external interference. This vibrometer consists of two parts: a vibration sensor with an electronic converter of a high-frequency signal into a constant voltage proportional to the vibration amplitude, and a power supply unit and digital signal processing and indication of the amplitude in μm . The vibrometer sensor is mounted on a hinged tripod for ease of installation in any plane at a distance of ≈ 1 mm from the tested surface. The vibrometer is powered by a 220V network. The vibrometer is equipped with microprocessor processing and indication of the results of measurement of the vibration amplitude, as well as control and indication of the gap between the vibration sensor and the tested surface and stabilization of the amplitude readings when this gap varies within 0.7...1.2 mm. The vibration amplitude measurement range is 0...99 μm , with a resolution of 1 μm . The vibration frequency range is 5...50 kHz. The analog signal from the output of the vibrosensor can be used in the ultrasound generator feeding the piezoelectric transducer as a feedback signal to stabilize the amplitude of the mechanical vibrations of the emitter at the required level.

Keywords: capacitive sensor; generator; frequency detector; microprocessor controller; digital indicator.

Надійшла до редакції
28 червня 2022 року

Рецензовано
02 вересня 2022 року



© 2022 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).