

doi: 10.33249/2663-2144-2019-78-5-88-94

УДК 621.829.031

**ДВОКАНАЛЬНИЙ П'ЄЗОПЕРЕТВОРЮВАЧ ВИМІРЮВАННЯ ВІБРОЗМІЩЕННЯ  
ВИЗВАНОВОГО ВІБРАЦІЄЮ ВУЗЛІВ ТА АГРЕГАТИВ СІЛЬГОСПМАШИН****А. П. Войцицький, Ю. П. Гончаренко***e-mail: znau\_dilovod@i.ua*Житомирський національний агроєкологічний університет  
бульвар Старий, 7, м. Житомир, 10008, Україна

*Стаття присвячена розгляду пропозиції застосування двоканального первинного перетворювача для вимірювання віброзміщення з ціллю покращення його точностних характеристик. Зношеність існуючого обладнання та висока вартість нового спонукають підприємства до переходу на обслуговування машин за фактичним станом. Це неможливо без застосування систем діагностики та діагностичного моніторингу, які дозволили б виявляти дефекти на ранніх стадіях їх розвитку. Системи діагностики, в основному, знаходяться на етапі початкових досліджень та експериментальної експлуатації. Найбільший вплив на виникнення вібрації в сільськогосподарських машинах надають сили інерції різних невірноважених мас (молотильних й подрібнюючих барабанів, ріжучих складальних одиниць комбайнів тощо). Вітчизняний і закордонний досвід свідчать, що одним з найважливіших засобів підвищення якості, надійності, довговічності та економічній ефективності використання механічного обладнання є застосування систем вібродіагностування, що усуває своєчасно пошкодження механізмів вузлів та агрегатів.*

*Існує безліч причин, які викликають підвищену вібрацію, що свідчить про наявність пошкоджень вузлів чи агрегатів та є однією з основних причин, що збільшує швидкість зношування й пошкодження складальних одиниць робочих механізмів. За допомогою вібродіагностики стану механічних вузлів і агрегатів сільхозмашин здійснюється безпосередній контроль динамічної силової дії на них – завдяки чому можливо на більш ранній стадії виявити і попередити несправність або дефект. Так, ушкодження окремих елементів агрегатів сільгоспмашини викликає миттєву зміну рівня і частотних характеристик вібраційного спектру віброзміщення. Проаналізувавши викладене, узагальнено методичний підхід до розробки двоканального первинного п'єзоперетворювача вимірювання віброзміщення вузлів та агрегатів сільгоспмашин.*

**Ключові слова:** вібрація, віброзміщення, вібродіагностика, давач, позасмугові завади, операційний підсилювач.

**Постановка проблеми**

Вимоги оцінки технічного стану механізмів сільхозмашин у робочих умовах висувають на перший план саме методи діагностики вібрації як найбільш чуттєві до різних відхилень параметрів технічного стану сільгоспмашин від стандартизованих норм. З-поміж основних параметрів, які описують вібраційний стан об'єктів контролю, базисними є віброзміщення, віброшвидкість та віброприскорення. Згідно з чинними стандартами, перший з названих параметрів визначається як вібраційна складова переміщення, інші ж два – як її перша та друга похідні часу, відповідно [1]. Виходячи з цього, доцільно проводити

періодичну вібродіагностику вузлів та механізмів сільхозмашин, що упередить їх передчасну зношеність.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Проблеми удосконалення методів та технічних засобів вібродіагностики вузлів та агрегатів різних засобів виробництва найшли відображення у вітчизняних та зарубіжних науковців. Зокрема вітчизняні науковці, такі як О. М. Безвесільна, О. Г. Воронцов, С. А. Шевченко, В. О. Повідало, В. В. Кухарчук присвятили свої роботи цим питанням [1,2,9,10]. Великий вклад для створення вимірювальних перет-

ворювачів на базі п'єзоелектричних давачів зробив В. М. Шарапов [6].

Найпростіша форма вібрації – це гармонійні синусоїдні коливальні рухи. Основні параметри синусоїдного коливання: частота  $f$  (Гц), амплітуда зміщення –  $A$  (м); коливальна швидкість –  $V$  (м/с); прискорення –  $A$  (м/с<sup>2</sup>).

Теоретично для синусоїдних коливань швидкість і прискорення визначають за формулами:

$$V = 2\pi \cdot f \cdot A;$$

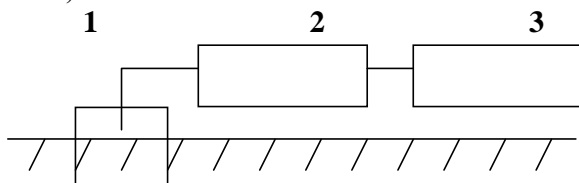
$$A = (2\pi \cdot f)^2 \cdot A, \quad (1)$$

Технічні засоби виміру параметрів вібрації, що випускають серійно, є компонентами автоматизованих систем або універсальними вібровимірювальними приладами [2].

Аграрні підприємства мають потребу в простих, ефективних, надійних, але недорогих у застосуванні вібродіагностичних приладах, функціональні можливості й параметри яких відповідають завданню діагностування сільгоспмашин (особливо в частині автоматизованого аналізу вібрації й виявлення дефектів зубчастих передач, підшипникових складальних одиниць тощо). Таким чином, технічні засоби й технології вібродіагностування, що нині існують, не повною мірою враховують особливості сільгоспмашин як об'єкта діагностування.

Для зменшення негативного впливу вібрації на стан здоров'я людини та покращення показників віброзношення вузлів та агрегатів сільгосптехніки потрібно досконало проаналізувати основні показники вібрації (віброшвидкості і рівень віброприскорення), а для цього потрібно провести достатньо точні вимірювання з відповідною вірогідністю.

Для вимірювання вібраційних складових застосовуються різні ЗВТ (засоби вимірювальної техніки). Різновидів їх дуже багато. Але загальну схему їх можна подати у наступному вигляді (рис. 1):



**Рис. 1. Загальна схема вимірювання вібрації:**  
1 – вимірювальний перетворювач (вібродавач);  
2 – попередній підсилювач; 3 – реєструючий прилад.

Джерело : побудовано на основі [4].

### Мета, завдання та методика досліджень

Мета досліджень полягає у підвищенні точності вимірювання віброзміщення вузлів та агрегатів сільгоспмашин. Для досягнення поставленої мети потрібно чутливий елемент виконати двоканальним, тобто з двома каналами на базі п'єзоелементів.

П'єзоелементи першого та другого каналів вимірювання ідентичні та прикріплені до верху та низу герметичного корпусу аксельметра, відповідно. Але важливу роль в п'єзоелектричному електронному аксельметрі відіграє передпідсилювач, тому його властивості і стають об'єктом досліджень. Він здійснює перетворення високого вихідного імпедансу п'єзоперетворювачів у більш низький імпеданс, що допускає безпосереднє з'єднання перетворювачів з відносно низькоімпедансною аналізуючою або реєструючою апаратурою. До інших завдань передпідсилювачів відносяться:

- узгодження параметрів, що відображають досліджувані механічної величини, з параметрами сигналів (зокрема, чутливістю) використовуваної апаратури;
- фільтрацію оброблюваних сигналів і, отже, виключення непотрібних або небажаних складових цих сигналів.

### Результати досліджень

Результати дослідження поки що зводяться до теоретичного обґрунтування застосування двоканального кварцового вимірювача вібропереміщення.

Велику увагу при проектуванні було приділено питанню «сигнал-завада». До основних причин зниження співвідношення у вимірювальному каналі є інтермодуляційні і гармонійні спотворення, що виникають в умовах дії інтенсивних позасмугових завад за наявності нелінійностей ланок каналу вимірювання.

До основних ланок структури, які визначають якість функціонування каналу, є вхідний давач і первинний диференційний підсилювач вимірювального сигналу вібропереміщення. У якості давача доцільно застосувати п'єзоелектричний первинний перетворювач, а в якості вимірювального каналу застосувати пристрій за двоканальною (диференційною схемою). Диференційна схема підсилювача значно зменшить позасмугові завади.

Вибір матеріалу п'єзоелектричного давача визначається допустимою величиною температурної похибки. Використання цирконато-тита-

нових керамік забезпечує роботу датчика з похибкою  $\pm 20\%$  в діапазоні  $200,250^\circ\text{C}$ , за похибки  $\pm 5\%$  температурний діапазон зменшується до  $40\dots 60^\circ\text{C}$ .

При використанні кварцу забезпечується похибка  $\pm 2\%$  і діапазоні до  $400^\circ\text{C}$ . Для вимірювання вібрації в зоні температур нижче  $100^\circ\text{C}$  високу точність дає використання титанату цирконію або барію [1,6].

Для виключення непотрібних або небажаних синфазних складових цих сигналів потрібно застосувати в якості передпідсилювача – диференціальний операційний підсилювач (ДОП). Диференціальний підсилювач – призначений для посилення різниці сигналів, що подаються на його входи. Використання диференціального принципу вимірювань дозволяє істотно знизити вплив перешкод (вплив тиску, електромагнітних полів, температур тощо), компенсуючи за рахунок ідентичності п'єзоелементів систематичний зсув частоти, обумовлений змінами їх фізичних властивостей.

В основі розрахунків всіх схем з операційними підсилювачами лежать два основних положення, що характеризують ідеальний операційний підсилювач:

1. ОП має нескінченно великий вхідний опір і, як наслідок, – нескінченно маленький вхідний струм. Простіше кажучи – вхідний струм при розрахунках вважають рівним нулю.

2. ОП має нескінченно великий коефіцієнт посилення і, як наслідок, різниця потенціалів між його входами в схемах з достатньо негативним зворотнім зв'язком дорівнює нулю.

Це пояснюється тим, що напруга на виході дорівнює різниці напруг на входах ОП, помно-

женої на коефіцієнт посилення ОП [8]. Щоб щось помножити на нескінченно велику кількість і отримати кінцеве число (напруга на виході – вона ж кінцеве число) – це щось має бути нескінченно маленьким. Це відноситься тільки до схем зі зворотнім зв'язком (рис. 2) тому що, якщо немає зворотного зв'язку – у ОП немає ніякої можливості вплинути на напругу на своїх входах.

У цьому випадку на виході повинно було б встановитися нескінченно велике значення позитивної чи негативної напруг, але в реальності вихідна напруга ОП не може вийти за межі позитивної і негативної напруг живлення (навіть ще менше через внутрішні втрати) і на виході встановлюється одна з цих граничних напруг (ОП працює у якості компаратору). Зворотній зв'язок обов'язково повинен бути негативним, тому що тільки у цьому випадку система може прийти до стану стійкої рівноваги. Фактично через зворотній зв'язок напруга на інвертуючому вході підтягується до напруги на неінвертуючому вході. На напругу на неінвертуючому вході зворотній зв'язок не впливає [8]. Чутливий елемент пристрою 3 розміщений у герметичному корпусі 4 і виконаний з двома каналами, в кожному з яких встановлено по одному п'єзо-елементу 1, що є ідентичними і виконані у вигляді п'єзопластин, а інерційна маса 2 через пружину прикріплена до низу п'єзопластин п'єзоелемента одного каналу та через іншу пружину прикріплена до верху п'єзопластин п'єзоелемента другого каналу. Виходи п'єзопластин обох каналів з'єднані з входами операційного підсилювача 5, вихід якого з'єднаний з аналогово-цифровим перетворювачем.

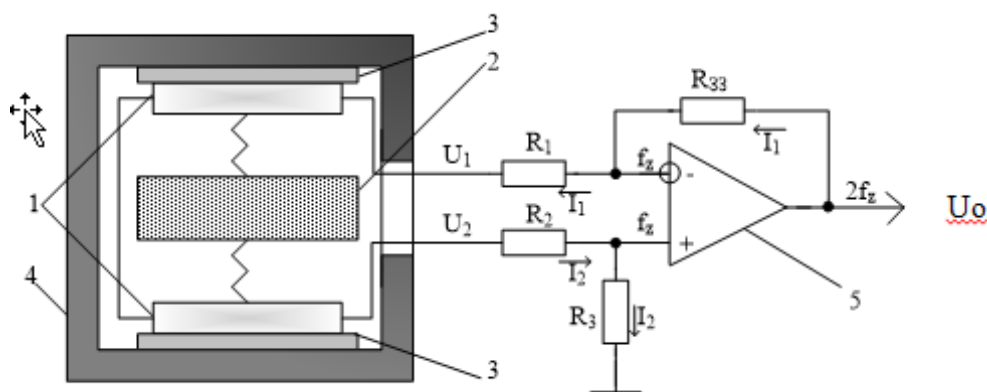


Рис. 2. Конструктивне рішення ДПП:

1 – п'єзоелементи; 2 – інерційна маса; 3 – ізолятор; 4 – корпус; 5 – диференціальний підсилювач.  
Джерело : власна розробка

За схемою (рис. 2) складаємо систему із знаходимо  $I_1$ , а з третього і четвертого чотирьох рівнянь, після чого з перших двох знаходимо  $I_2$

$$\begin{cases} U_1 + I_1 R_1 = U_B & U_1 + I_1 R_1 = U_0 - I_1 R_{33} \Rightarrow I_1 = \frac{U_0 - U_1}{R_1 + R_{33}} \\ U_0 - I_1 R_{33} = U_B \\ U_2 - I_2 R_2 = U_B & U_2 - I_2 R_2 = I_2 R_3 \Rightarrow I_2 = \frac{U_2}{R_1 + R_3} \\ I_2 R_3 = U_B \end{cases} \quad (3)$$

Далі з рівнянь (3) складаємо нове рівняння: Підставляємо в нього знайдені раніше вирази для  $I_1$ ,  $I_2$  і перетворимо наступним чином:

$$\begin{aligned} U_1 + \frac{U_0 - U_1}{R_1 + R_{33}} \cdot R_1 &= U_2 - U_2 \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3} \\ \frac{U_0 - U_1}{R_1 + R_{33}} &= U_2 \cdot \frac{R_3}{(R_2 + R_3)R_1} - U_1 \cdot \frac{1}{R_1} \\ U_0 - U_1 &= U_2 \cdot \frac{(R_1 + R_{33})R_3}{(R_2 + R_3)R_1} - U_1 \cdot \frac{R_1 + R_{33}}{R_1} \end{aligned} \quad (5)$$

З останнього виразу (5) знаходимо формулу для визначення вихідної напруги:

$$U_0 = U_2 \cdot \frac{(R_1 + R_{33})R_3}{(R_2 + R_3)R_1} - U_1 \cdot \frac{R_{33}}{R_1} \quad (6)$$

Перетворимо множник перед  $U_2$  наступним чином:  $R_1$  перенесемо зі знаменника у чисельник, а що залишилися у знаменнику в дужках помножимо і розділимо на  $R_2$ . Отримаємо наступне співвідношення:

$$\frac{\frac{(R_1 + R_{33})}{R_1} R_3}{\frac{(R_2 + R_3)}{R_2} R_2} = \frac{(1 + \frac{R_{33}}{R_1})}{(1 + \frac{R_3}{R_2})} \cdot \frac{R_3}{R_2}$$

З цього співвідношення очевидно, якщо у нашій схемі  $R_{oc}/R_1 = R_3/R_2$ , то множник перед  $U_2$  можна замінити на  $R_3/R_2$  або на  $R_{oc}/R_1$ . Тоді формулу (6) можна перетворити до виду:

$$U_0 = (U_2 - U_1) \cdot \frac{R_{33}}{R_1} \quad (6)$$

Для здійснення процесу додавання двох сигналів необхідно з'єднати виходи п'єзопластин таким чином, що одна з напруг буде від'ємною, інша додатною. У такому випадку механізм формування вихідного сигналу математично описується наступним виразом:

$$U_o = (U_2 - U_1) \cdot \frac{R_{33}}{R_1} \quad (5)$$

Якщо напруга  $U_1$  від'ємна, то формула набуває вигляду:

$$U_o = (U_2 + U_1) \cdot \frac{R_{33}}{R_1} = (2U_1) \cdot \frac{R_{33}}{R_1} \quad (6)$$

До недоліку такого схемотехнічного рішення можна віднести різні вхідні опори операційного підсилювача DA1, що негативно позначиться на формуванні вихідного сигналу [6,8].

Пропонуємо вдосконалити вимірювальний підсилювач DA1 (рис. 1) і зібрати його на трьох операційних підсилювачах.

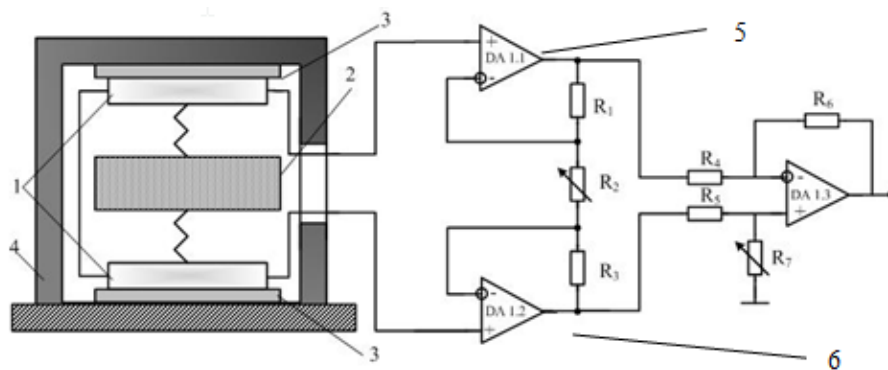


Рис. 2. Конструктивне та схематичне рішення вдосконаленого ДПГ:

1 – п'єзоелементи; 2 – інерційна маса; 3 – ізолятор; 4 – корпус;

5 – буферні каскади; 6 – диференційний підсилювач.

Джерело : власна розробка.

Застосування буферних каскадів ДА1.1, ДА1.2 (рис. 2). дозволить зробити ідеальне узгодження високоімпедансних вихідних ємнісних опорів п'єзоелементів з базовим диференційним підсилювачем ДА1.3. Це, у свою чергу, покращить точнісну характеристику підсилювача [11].

Для спрощення та аналізу схеми відзначимо, що вимірювальний підсилювач фактично складається з диференціального підсилювача (ДА1.3) з буферними каскадами (ДА1, ДА1.2) з'єднаними з базовим диференціальним підсилювачем (рис. 2).

Операційний підсилювач ДА1.3 зі своїми чотирма навісними резисторами, що мають рівні опори  $R$ , утворює диференційний підсилювач з коефіцієнтом підсилення, рівним 1.

У даній схемі повинні бути узгоджені тільки резистори, з'єднані з ДА 1.3. Резистор попередньої регулювання схеми  $R_2$  можна виконати у вигляді змінного резистора, щоб збалансувати будь-яку синфазну напругу. Коефіцієнт підсилення задається всього одним резистором  $R_2$  у залежності за виразом:

$$\frac{U_{\text{вих}}}{U_1 - U_2} = 1 + \frac{2}{\kappa},$$

де  $\kappa = R_1/R_2$ .

Вихідна напруга не залежить від синфазної напруги, а залежить тільки від різниці вхідних напруг. Якщо на вході підсилювача будуть діяти синфазні сигнали негативних збурень, то їх результуюча на виході підсилювача буде дорівнювати 0. Це допоможе із складного вимі-

рюваного сигналу виділити необхідний для подальшої обробки. Результуючий корисний електричний сигнал буде пропорційним сигналу прискорення сили тяжіння [4].

Зворотній зв'язок обов'язково повинен бути негативним тому, що тільки у цьому випадку система може прийти до стану стійкої рівноваги. Фактично через зворотній зв'язок напруга на інвертуючому вході підтягується до напруги на неінвертуючому вході. На напругу на неінвертуючому вході зворотній зв'язок не впливає.

### Висновки та перспективи подальших досліджень

Завдяки використанню додатково введеного другого каналу вимірювання та вдосконалення первинного перетворювача, забезпечується:

- відсутність у вихідному сигналі похибок від залишкової неідентичності конструкцій однакових п'єзопластин та їх мас;
- зменшення складової впливу зміни температури;
- зменшення впливу вологості та тиску зовнішнього середовища (тобто інструментальних похибок), які можуть бути значними;
- зведення практично до нуля синфазних сигналів негативних збурень.

Використання операційних підсилювачів та аналогово-цифрового перетворювача реалізують підсилення вихідних аналогових сигналів обох каналів п'єзодавача та перетворення їх у цифровий код, відповідно.

Подальші дослідження будуть спрямовані на виготовлення діючого макету п'єзодавача та опробування його в реальних умовах, тобто на сільхозмашинах.

## References

1. Bezvesilna, O. M. (2008). Vymiriuvannia pryskoren [Measuring accelerations]. Kyiv : Lybid (in Ukrainian).
2. Vorontsov, O. H. (2011). Doslidzhennia modeli vymiriuvalnogo kanalu systemy vibroakustychnoi diahnostyky tykhokhidnykh rotornykh mashyn [Investigation of the model of the measuring channel of the system of vibration acoustic diagnostics of slow-moving rotary machines]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnogo instytutu*, 6, 23–27 (in Ukrainian).
3. Goldin, A. S. (2000). Vibratsiya rotornykh mashin [Vibration rotary machines]. Moskva : Mashinostroyeniye (in Russian).
4. Genkin, M. D. & Sokolova, A. G. (1997). Vibroakusticheskaya diagnostika mashin i mekhanizmov [Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms] Moskva : Mashinostroyeniye (in Russian).
5. Sergeev, A. G. (1980). Tochnost i dostovernost diagnostiki avtomobiley [Accuracy and accuracy of car diagnostics]. Moskva: Transport (in Russian).
6. Sharapov, V. M. (2006). Pyeoelektricheskiye datchiki [Piezoelectric sensors]. Moskva: Tekhnosfera (in Russian).
7. Shevchenko S.A. (1999). Kontrol tekhnicheskogo sostoyaniya selskokhozyaystvennoy tekhniki vibratsionno-diaagnosticheskim metodom [Control of the technical condition of agricultural machinery by the vibration-diagnostic method]. *Vestnik Kharkovskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*, 55, 33–35 (in Russian).
8. Voitsytskyi, A. P. & Voitsytskyi, M. A. (2018). Elektronika i mikroshemotekhnika [Electronics and Microchips] (2 th ed.). Kherson : Oldi Plus (in Ukrainian).
9. Povidailo, V. O. (2004). Vibratsiini protsesy ta obladnannia [Vibration processes and equipment]. Lviv : Nats. Universytet “Lviv. Politekhnik” (in Ukrainian).
- Kukharchuk, V. V., Katsyv, S. Sh., Madiarov, V. H., Usov, V. V. & Vedmitskiy Yu. H. (2014). Monitorynh, diahnostuvannia, ta prohnozuvannia vibratsiinoho stanu hidroahrehativ [Monitoring, diagnosis, and forecasting of vibration state of hydro aggregates]. Vinnytsia : VNTU (in Ukrainian).
11. Levshyna, E & Novitsiy, P. (1993). Izmeritelnye preobrazovateli [Measure Converted]. L.: Energoatomizdat (in Russian).

**TWO CHANNEL PIEZE CONVERTERS  
MEASUREMENT OF VIBRATION  
ACCELERATION CAUSED BY VIBRATION  
OF AGRICULTURAL KNOTS AND UNITS**

**A. Voitsitsky, Y. Goncharenko**

*e-mail: znau\_dilovod@i.ua*

Zhytomyr National Agroecological University  
7, Stary Blvd, Zhytomyr, 10008, Ukraine

*The depreciation of the existing equipment and the high cost of the new one are encouraging enterprises to switch to servicing machines according to their actual condition. This is impossible without the use of diagnostic systems and diagnostic monitoring, which would allow detecting defects in the early stages of their development. Diagnostic systems are mainly at the stage of initial research and experimental operation. The inertia forces of various unbalanced masses (threshing and grinding drums, cutting assembly units of combines, etc.) have the greatest influence on the occurrence of vibration in agricultural machines.*

*Domestic and foreign experience shows that one of the most important means of improving the quality, reliability, durability and economic efficiency of using mechanical equipment is the use of vibration diagnostics systems, eliminating timely damage to the mechanisms of components and assemblies. There are many reasons that cause increased vibration, which indicates the presence of damage to components or assemblies is one of the main causes, increases the rate of wear and damage to the assembly units of the working mechanisms. With the help of vibration diagnostics of the state of mechanical components and assemblies, direct control of dynamic force action is carried out, so that it is possible at an earlier stage to detect and prevent a malfunction or defect. Thus, damage to individual elements of agricultural machinery aggregates causes an instantaneous change in the level and frequency characteristics of the vibration spectrum. The purpose of this article is to propose the use of a two-channel primary transducer for measuring vibration velocity with the aim of improving its accuracy characteristics.*

**Keywords:** *vibration, vibration acceleration, vibration diagnostics, sensor, out-of-band interference, operational amplifier.*

**ДВУХКАНАЛЬНЫЙ  
ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ  
ВИБРОУСКОРЕНИЯ ВЫЗВАННОГО  
ВИБРАЦИЕЙ УЗЛОВ И АГРЕГАТОВ  
СЕЛЬХОЗМАШИН**

**А. П. Войцицкий, Ю. П. Гончаренко**

*e-mail: znau\_dilovod@i.ua*

Житомирский национальный агроэкологический университет,  
бульвар Старый, 7, г. Житомир, Украина, 10008

Изношенность существующего оборудования и высокая стоимость нового побуждают предприятия к переходу на обслуживание машин по фактическому состоянию. Это невозможно без применения систем диагностики и диагностического мониторинга, которые позволили бы выявлять дефекты на ранних стадиях их развития. Системы диагностики, в основном, находятся на этапе начальных исследований и экспериментальной эксплуатации.

Наибольшее влияние на возникновение вибрации в сельскохозяйственных машинах оказывают силы инерции различных неуравновешенных масс (молотильных и измельчающих барабанов, режущих сборочных единиц комбайнов и т.д.).

Отечественный и зарубежный опыт показывают, что одним из важнейших средств повыше-

ния качества, надежности, долговечности и экономической эффективности использования механического оборудования является применение систем вибродиагностирования, что устраняет своевременно повреждения механизмов узлов и агрегатов.

Существует множество причин, вызывающих повышенную вибрацию, что свидетельствует о наличии повреждений узлов или агрегатов, является одной из основных причин, увеличивает скорость износа и повреждения сборочных единиц рабочих механизмов. С помощью вибродиагностики состояния механических узлов и агрегатов осуществляется непосредственный контроль динамической силовой воздействия, благодаря чему возможно на более ранней стадии выявить и предупредить неисправность или дефект. Так, повреждения отдельных элементов агрегатов сельхозмашины вызывает мгновенную смену уровня и частотных характеристик вибрационного спектра.

Целью данной статьи является предложение применения двухканального первичного преобразователя для измерения виброперемещения с целью улучшения его точностных характеристик.

**Ключевые слова:** вибрация, виброускорение, вибродиагностика, датчик, внеполосные помехи, операционный усилитель.