

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 53.08:620.178.5

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).2.97-102](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.97-102)

А.П. Стахова, доц., канд. техн. наук, С.Л. Макаровський

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

e-mail: sap@nau.edu.ua

Розробка алгоритмів та програмного забезпечення систем вимірювання та аналізу вібрації

Наведено аналіз у галузі вібраційного контролю, методів та алгоритмів обробки вібраційних даних. Виявлено основні проблеми систем діагностики стану обладнання складних конструкцій, показано напрями їх вирішення. Запропоновано розробку алгоритму та програмного забезпечення для вирішення завдань вібраційного контролю з визначенням амплітудно-фазових параметрів у режимі реального часу та обробки вібраційних даних для оцінки технічного стану механізмів.

вібраційний контроль, система вібраційного контролю, спектральний аналіз, оцінка технічного стану

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку машинного обладнання основним напрямком забезпечення працездатного стану техніки є підвищення ефективності її контролю. Для цього проводиться робота з вивчення технічного стану обладнання та аналізу параметрів його змін.

Більшість несправностей машинного обладнання виражається в підвищенні вібрацій, отже аналіз вібрації є потужним засобом для діагностики обладнання. При цьому кожна несправність або пошкодження має свій вид вібрацій [1-2]. Перевищення допустимого рівня вібрацій при роботі різних видів техніки призводить до зниження надійності та довговічності окремих елементів в цих пристроях. Поява сучасної вібровимірювальної апаратури забезпечує можливість проведення точних вимірювань, реєстрації та подальшого аналізу динамічних процесів, тобто вібраційних сигналів [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зазвичай у структуру систем вимірювання та аналізу вібрації (рис.1), будь то технічні засоби вібраційного контролю та захисту, вібраційного моніторингу або діагностики, включені первинні вимірювальні перетворювачі, узгоджуючі пристрої, лінії зв'язку та засоби (програми) обробки інформації [4]. Всі засоби вимірювання та аналізу вібрації використовують вимірювальні віброперетворювачі, причому найчастіше застосовуються п'єзоелектричні перетворювачі віброприскорення (акселерометри) [5-6], оптичні (лазерні) перетворювачі віброшвидкості [6] та токовихрвові перетворювачі відносного вібропереміщення [7].

Для зв'язку віброперетворювача із засобами аналізу використовуються лінії провідного або бездротового зв'язку та узгоджувальні пристрої. У найпростішому випадку, як узгоджувальні пристрої використовуються попередні підсилювачі сигналу. Так, для п'єзоакселерометрів, в залежності від характеристик лінії зв'язку, можуть використовуватися попередні підсилювачі напруги, заряду або струму, для забезпечення високої стійкості засобів вимірювання та аналізу вібрації. Попередні

підсилювачі вбудовуються в один корпус із акселерометром. У складніших випадках узгоджувальне пристрій може виконувати функції попередньої фільтрації сигналу, комутації ліній зв'язку, перетворення сигналу цифрову форму [8].

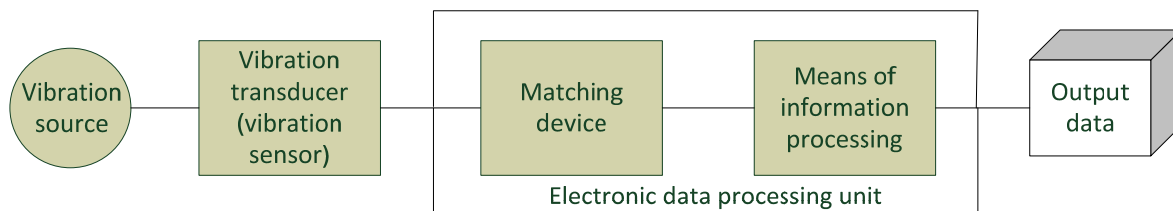


Рисунок 1 - Структура системи вимірювання та аналізу вібрації

Джерело: [8]

Сучасні засоби вимірювання та аналізу вібрації є вузькоспеціалізованими приладами. Як правило, вони запрограмовані на виконання кількох функцій та не мають можливості зміни функціональності користувачем. Для повноцінного використання цих пристроїв застосовується зовнішнє програмне забезпечення на стаціонарному комп'ютері. Простота вимірювань і доступність отриманої інформації дозволяє використовувати ці прилади обслуговуючому персоналу без спеціальної підготовки, а при виявленні нештатної ситуації викликати фахівців для проведення складнішого дослідження стану контролюваного об'єкта.

Більш складні види аналізу реалізуються з допомогою засобів вібраційного моніторингу [9]. Основним призначенням засобів вібраційного моніторингу є виявлення незворотних змін вібрації обладнання та прогнозування швидкості їх розвитку [9]. До додаткового завдання, яке може вирішуватися засобами моніторингу, можна віднести визначення причин виявлених змін. Це завдання вирішується експертом, який аналізує результати моніторингу, у тому числі із застосуванням спеціальних експертних програм.

Функціональні можливості систем вібраційного моніторингу при обробці та аналізі сигналів визначаються складом та можливостями програмного забезпечення. За функціональними можливостями системи моніторингу та діагностики можна розділити на два основні класи – системи масового діагностичного обслуговування з програмами автоматичної діагностики та прогнозу стану типового обертового обладнання і розширені системи моніторингу, в тому числі і з експертними програмами, розрахованими те що, що діагностику виконує підготовлений експерт. Аналіз існуючих систем моніторингу показує, що їх основні функціональні можливості визначаються складом і складністю застосовуваного програмно-алгоритмічного забезпечення.

Серед завдань вібраційного моніторингу та діагностики зустрічаються такі, вирішення яких потребує проведення спеціальних досліджень. Ряд приладобудівних фірм випускає технічні засоби для розширеного аналізу сигналів [10-11], які передбачають попередній запис цих сигналів на згадку про прилад з подальшим його багаторазовим аналізом.

Аналіз існуючих методів та алгоритмів обробки віброметричних даних показав, що основними методами та алгоритмами, що застосовуються, є методи формування діагностичних ознак, чутливих до конкретних видів дефектного стану, для певних елементів механізму. У зв'язку з цим актуальна розробка методів та алгоритмів виявлення діагностичних ознак для оцінки технічного стану механізмів, для яких немає нормальних параметрів.

Постановка завдання. Отже, для забезпечення працездатного стану машинного обладнання неможливо без вирішення завдань введення, обробки та аналізу

вібраційних сигналів у режимі реального часу. На сьогодні залишається актуальним питання розробки математичного та програмного забезпечення, що дозволяє вирішувати завдання вібраційного контролю у режимі реального часу. Одним із напрямів подальшого розвитку програмного забезпечення для вирішення завдань віброконтролю є розширення функціональних можливостей, зокрема, у галузі забезпечення безперервної реєстрації з визначенням амплітудно-фазових параметрів вібрації у багатоканальному режимі роботи.

Виклад основного матеріалу. Основою функціонування систем вібраційного контролю є використання спектрального аналізу. Спектральний аналіз вібрації обладнання дозволяє виявити більше половини з можливих розвинених дефектів і на цій основі не пропустити жодного з дефектів, що швидко розвиваються безпосередньо перед аварією обладнання, що контролюється. Тому системи вібраційного контролю є ефективним засобом запобігання аваріям, а використання в їх складі експертної діагностичної програми дозволяє виявити причини необхідної зупинки обладнання та швидко їх усунути. Функціональні можливості систем вібраційного моніторингу при обробці та аналізі сигналів визначаються складом та можливостями програмного забезпечення.

Найважливішою складовою систем вібраційного контролю є програмне забезпечення. Існуюче програмне забезпечення умовно можна розбити на три основні типи.

1. Програми підтримки технічних засобів вимірювання та аналізу сигналів.
2. Програми моніторингу.
3. Експертні програми діагностики чи програми підтримки прийняття рішень.

До складу системи вібраційного контролю можуть входити десятки алгоритмів обробки даних, а також способів їх відображення. Визначення амплітудних та фазових параметрів вібрації обладнання. Вимірюючи величину цих вібрацій можна судити про величину, джерела та основні причини виникнення збудливих сил і пропонувати способи їх зменшення.

Застосування при вимірюваннях тільки вібровимірювальних перетворювачів дозволяє отримати тільки скалярні параметри вібрації, такі як середнє квадратичне значення, розмах амплітуди коливань, пік фактор, спектральні характеристики і т.п.

На рис. 2 показані зміна в часі прийнятих вібросигналу та сигналу від датчика фазової мітки. Сигнал від датчика фазової мітки наведено у відносних одиницях.

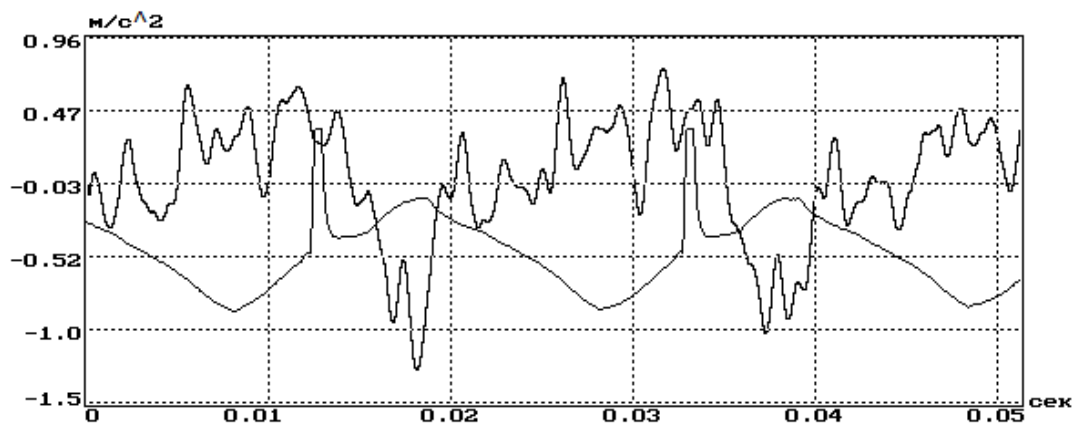


Рисунок 2 – Зміна вібросигналу в часі та сигналу від датчика фазової мітки

Джерело: розроблено автором

Фазові кути для сигналів, представлених в одиницях віброшвидкості або вібропереміщення, більше по відношенню до сигналу, представленого в одиницях віброприскорення відповідно на $\pi/2$ і π , взятих за модулем 2π .

Надалі вважатимемо фронтом спрацьовування наростаючий фронт імпульсу, а значення опорного рівня розраховуватимемо за формулою:

$$U_b = U_{\max} - v(U_{\max} - U_{\min}) \quad (1)$$

де $U_{\max}$, $U_{\min}$ – максимальне і мінімальне значення імпульсу, що формується датчиком фазової мітки, які приймаються для його ідентифікації;

v – відносне значення для фіксації опорного рівня, може знаходитися в діапазоні від 0,35 до 0,7.

Дискретний відлік з номером відповідає моменту спрацьовування датчика фазової мітки, якщо для значень цього сигналу виконується умова:

$$x_i \leq U_b < x_{i+1} \quad (2)$$

де x_i – значення дискретного відліку сигналу від датчика фазової мітки у момент часу i .

Для підвищення точності алгоритму при виділенні моменту спрацьовування вираз (2) може бути модифікований таким чином:

$$(x_{i-1} \leq U_b) \& (x_i \leq U_b < x_{i+1}) \quad (3)$$

Умова (3) застосовується для всіх значень масиву даних, що представляє сигнал від датчика фазової мітки. При цьому фіксуються номери відрахунків, для яких виконується умова (3), окремо виділяється номер першого I_n та номер останнього I_k відліку для аналізованого масиву даних, а також підраховується загальна кількість таких відліків. Якщо загальна кількість таких відліків дорівнює M , то кількість періодів оборотної спектральної складової K , що повністю укладаються на аналізованому масиві, дорівнює:

$$K = M - 1. \quad (4)$$

Запропонований алгоритм визначення амплітудно-фазових параметрів забезпечує обчислення амплітуди оборотної складової з похибкою, що не перевищує 0,2 %, а початкової фази з абсолютною похибкою 1,5 градуса при аналізі сигналів, отриманих при пусках і вибігах механізмів з обертальним рухом.

Як уже згадувалося, одним з найбільш поширених способів оцінки технічного стану різних механізмів з обертальним рухом є застосування спектрального аналізу. При реалізації цього підходу будується модель досліджуваного механізму та визначаються частоти, що характеризують його стан. Надалі, отримані цих частотах величини порівнюються з еталонними чи емпірично встановленими у процесі експлуатації. Ця методика має такі недоліки як: висока трудомісткість побудови моделі для складних механізмів, невизначеність параметрів, що характеризують об'єкт. Тим не менш, цей метод широко поширений і застосовується для оцінки технічного стану як окремих механізмів, так і груп однотипних механізмів.

На наступному етапі проводиться розбраковування досліджуваних механізмів. $X_{i,min}$, $X_{i,max}$ - виконують роль інформативно значущих параметрів при прийнятті рішення про віднесення об'єкта до певної групи. Механізм j , що має значення вібраційного параметра $X_{i,j}$, відноситься до класу механізмів з хорошим технічним станом за цим параметром, якщо виконується умова:

$$X_{i,j} \leq X_{i,\min} \quad (5)$$

він же відноситься до класу механізмів із середнім технічним станом, якщо виконується умова:

$$X_{i,\min} < X_{i,j} \leq X_{i,\max} \quad (6)$$

і відноситься до класу механізмів з поганим технічним станом, якщо виконується умова:

$$X_{i,j} > X_{i,\max} \quad (7)$$

Подальшим розвитком цього методу є побудова діагностичних алгоритмів, які дозволять визначити причину незадовільного стану механізму.

Висновки. Отримані результати формують теоретичну та практичну базу для розробки програмного забезпечення комп'ютерних систем для вирішення завдань вібраційного контролю в режимі реального часу. Вони можуть бути використані для модернізації та подальшого розвитку існуючих систем.

Розроблені методи та алгоритми аналізу вібраційних сигналів можуть застосовуватися в автоматизованих системах вібраційного контролю та підтримки прийняття рішення для визначення якості виготовлення та складання різних вузлів, оцінки залишкової стійкості та жорсткості, контролю та оцінки стану механізмів та агрегатів з обертовим рухом.

Список літератури

1. Стахова А. П., Квасніков В. П. Автоматизація виявлення дефектів машинного обладнання засобами вібродіагностики. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Технічні науки*. 2021. № 1. С. 32-41.
2. Prudhom A. et al. Time-frequency vibration analysis for the detection of motor damages caused by bearing currents. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017. Т. 84. С. 747-762.
3. Kvasnikov V., Stakhova A. Vibration Measurement Technologies and Systems. *Safety in Aviation and Space Technologies*. Springer, Cham, 2022. С. 53-62.
4. Stakhova A., Kvasnikov V. Development of a device for measuring and analyzing vibrations. *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2021. Т. 11. № 2. С. 48-51.
5. Tian B. et al. Design of a piezoelectric accelerometer with high sensitivity and low transverse effect. *Sensors*. 2016. Т. 16, № 10. С. 1587.
6. Буклагин Д. С. Новые измерительные системы: направления и возможности применения при испытаниях сельскохозяйственной техники. *Техника и оборудование для села*. 2018. № 5. С. 30-35.
7. Chaturvedi V. et al. Demodulation techniques for self-oscillating eddy-current displacement sensor interfaces: A review. *IEEE Sensors Journal*. 2017. Т. 17, № 9. С. 2617-2624.
8. Eidukeviciute, M., Volkovasa, V. Measurement uncertainty in vibromonitoring systems and diagnostics reliability evaluation. *J. of Sound and Vibration*. 2007. Vol. 308, № 3-5. P. 625-631.
9. Ahmed H., Nandi A. K. Condition monitoring with vibration signals: Compressive sampling and learning algorithms for rotating machines. John Wiley & Sons, 2020.
10. Lacey S. The role of vibration monitoring in predictive maintenance. *Asset Management & Maintenance Journal*. 2011. Т. 24. № 1. С. 42-51.
11. Brown D. N., Jorgensen J. C. Machine condition monitoring using vibration analysis. Bruel & Kjaer, Application Note. 1987.

References

1. Stahova, A.P. & Kvasnikov, V.P. (2021). Avtomatizacija vijavlenija defektiv mashinnogo obladnannja zasobami vibrodiagnostiki [Automation of detection of machine equipment defects by vibrodiagnostics]. *Visnik Cherkas'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Tehnichni nauki – Bulletin of Cherkasy State Technological University, 1*, 32-41 [in Russian].

2. Prudhom, A., Antonino-Daviu, J., Razik, H., & Climente-Alarcon, V. (2017). Time-frequency vibration analysis for the detection of motor damages caused by bearing currents. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 84, 747-762.
3. Kvasnikov, V., & Stakhova, A. (2022). Vibration Measurement Technologies and Systems. In *Safety in Aviation and Space Technologies* (pp. 53-62). Springer, Cham.
4. Stakhova, A., & Kvasnikov, V. (2021). Development of a device for measuring and analyzing vibrations. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 11(2), 48-51.
5. Tian, B., Liu, H., Yang, N., Zhao, Y., & Jiang, Z. (2016). Design of a piezoelectric accelerometer with high sensitivity and low transverse effect. *Sensors*, 16(10), 1587.
6. Buklagin, D.S. (2018). Novye izmeritel'nye sistemy: napravlenija i vozmozhnosti primeneniya pri ispytaniyah sel'skhozjajstvennoj tehniki [New measuring systems: directions and possibilities of application in testing agricultural machinery]. *Tehnika i oborudovanie dlja sela – Machinery and equipment for the village*, 5, 30-35 [in Russian].
7. Chaturvedi, V., Nabavi, M. R., Vogel, J. G., & Nihtianov, S. (2017). Demodulation techniques for self-oscillating eddy-current displacement sensor interfaces: A review. *IEEE Sensors Journal*, 17(9), 2617-2624.
8. Eidukeviciute, M., & Volkovas, V. (2007). Measurement uncertainty in vibromonitoring systems and diagnostics reliability evaluation. *Journal of Sound and Vibration*, 308(3-5), 625-631.
9. Ahmed, H., & Nandi, A. K. (2020). Condition monitoring with vibration signals: Compressive sampling and learning algorithms for rotating machines. John Wiley & Sons.
10. Lacey, S. (2011). The role of vibration monitoring in predictive maintenance. *Asset Management & Maintenance Journal*, 24(1), 42-51.
11. Brown, D. N., & Jorgensen, J. C. (1987). Machine condition monitoring using vibration analysis. *Bruel & Kjaer, Application Note*.

Anzhelika Stakhova, Assoc. Prof., PhD Tech. Sci., **Serhii Makarovskiy**

National Aviation University, Kyiv, Ukraine

Development of Algorithms and Software for Vibration Measurement and Analysis Systems

An analysis is presented in the field of vibration control, methods and algorithms for processing vibration data. The main existing problems of systems for diagnosing the state of equipment of complex structures are identified, directions for their solution are shown. The development of an algorithm and software for solving problems of vibration control with the determination of amplitude-phase parameters in real time and processing of vibration data to assess the technical condition of mechanisms is proposed.

The results obtained form the theoretical and practical basis for the development of software for computer systems for solving problems of vibration control in real time, providing continuous recording and determination of amplitude-phase parameters. Features of the input of vibration data in vibration control systems make it possible to accurately determine the moment of their readiness, which, along with the organization of data transmission via a direct memory access channel and a special implementation of the input procedure, allows data to be received in real time. They can be used to modernize and further develop existing systems.

The developed methods and algorithms for the analysis of vibration signals can be used in automated vibration control and decision support systems to determine the quality of manufacturing and assembly of various components, assess the residual resistance and rigidity, monitor and evaluate the state of mechanisms and assemblies with rotational motion. The proposed method for the formation of diagnostic features and the determination of informatively significant parameters for assessing the technical condition of complex mechanisms is based on the use of spectral analysis. Operational and multifunctional analysis of large volumes of experimental data will expand the functionality of vibration control systems.

vibration control, vibration control system, spectral analysis, assessment of technical condition

Одержано (Received) 10.05.2022

Прорецензовано (Reviewed) 20.05.2022

Прийнято до друку (Approved) 30.05.2022