

УДК 69.002.5

DOI: 10.15587/2312-8372.2019.188059

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ СКЛАДНОЇ СТРУКТУРИ НА ОСНОВІ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

Назаренко І. І., Дєдов О. П.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Назаренко И. И., Дедов О. П.

INVESTIGATION OF COMPLEX STRUCTURE SYSTEMS BASED ON SPECTRAL ANALYSIS

Nazarenko I., Dedov O.

Об'єктом досліджень є процес обробки результатів руху віброуцілюючих машин будівельної індустрії. Однією з проблем при дослідженні вібраційних машин технологічного призначення є визначення параметрів просторового руху робочих органів машини та встановлення відповідності їх з розрахунковими, які отримані в результаті розрахунків чи чисельного моделювання. А також при встановленні технічного стану конструкцій під дією складного динамічного впливу. Труднощі, які виникають при дослідженні динамічних процесів, викликані визначенням природи і фактичних значень дисипативних сил, впливом невідомих випадкових величин, в тому числі, завад і недосконалостей вимірювальної техніки.

Підхід, який пропонується у даній роботі, базується на гіпотезі про розгляд системи складної структури, що має динамічний вплив, як єдиної системи із відповідними їй динамічними характеристиками. Реалізація такого підходу може бути здійснена шляхом визначення динамічних параметрів системи з подальшим спектральним аналізом та встановленням основних частот коливань, які обумовлені зовнішнім впливом, а також виявлення та чіткої ідентифікації вищих гармонік. Для визначення необхідного ефективного методу представлення результатів були використані записи безперервної фіксації вібраційного процесу із відомою частотою зовнішнього впливу. Подальша обробка таких результатів на основі спектрально-кореляційного методу дозволила визначити ефективний спосіб визначення основної частоти, виявити вплив вищих гармонік та сторонніх частот, які непритаманні досліджуваному процесу. Розглянуті спектри коливань в лінійній та логарифмічній шкалі за прискоренням та спектральною потужністю. За результатами дослідження встановлено, що застосування саме спектральної потужності рівня сигналу є ефективним методом визначення динамічного процесу та виконання інтегральної оцінки загальної системи.

Отримані результати досліджень можуть бути використані при дослідженні систем із складним рухом при невідомих параметрах зовнішнього впливу при виконанні діагностування та оцінки технічного стану машин технологічного призначення, коливань несучих і огорожувальних конструкцій споруд.

Ключові слова: *спектр коливань, власні частоти коливань, динамічне навантаження, вібраційна діагностика, спектральна потужність.*

Объектом исследований является процесс обработки результатов движения виброуплотняющих машин строительной индустрии. Одной из проблем при исследовании вибрационных машин технологического назначения является определение параметров пространственного движения рабочих органов машины и установление соответствия их расчетным, полученным в результате расчетов или численного моделирования. А также при установлении состояния конструкций под действием сложного динамического воздействия. Трудности, которые возникают при исследовании динамических процессов, вызваны определением природы и фактических значений диссипативных сил, влиянием неизвестных случайных величин, в том числе, помех и несовершенством измерительной техники.

Подход, который предлагается в данной работе, базируется на гипотезе о рассмотрении системы сложной структуры, имеет динамическое воздействие, как единой системы с соответствующими ей динамическими характеристиками. Реализация такого подхода может быть осуществлена путем определения динамических параметров системы с последующим спектральным анализом и установлением основных частот колебаний, которые обусловлены внешним влиянием, а также выявления и четкой идентификации высших гармоник. Для определения необходимого эффективного метода представления результатов были использованы записи непрерывной фиксации вибрационного процесса с известной частотой внешнего воздействия. Дальнейшая обработка таких результатов на основе спектрально-корреляционного метода позволила определить эффективный способ определения основной частоты, выявить влияние высших гармоник и посторонних частот, присущих изучаемому процессу. Рассмотрены спектры колебаний в линейной и логарифмической шкале по ускорению и спектральной мощности. По результатам исследования установлено, что применение именно спектральной мощности уровня сигнала является эффективным методом определения динамического процесса и выполнения интегральной оценки общей системы.

Полученные результаты исследований могут быть использованы при исследовании систем со сложным движением при неизвестных параметрах внешнего воздействия при выполнении диагностики и оценки технического состояния машин технологического назначения, колебаний несущих и ограждающих конструкций зданий.

Ключевые слова: *спектр колебаний, собственные частоты колебаний, динамическая нагрузка, вибрационная диагностика, спектральная мощность.*

1. Вступ

Вібраційні машини і процеси займають суттєве місце в різних галузях народного господарства. Поряд з дослідженням динамічних явищ, які протікають безпосередньо при реалізації технологічного процесу, актуальним завданням є оцінка впливу такого обладнання на сусідні конструкції. В загальному випадку мова йде про систему, яка підкорена загальним законам руху. Але поряд з тим, враховуючи складність системи, кількість її структурних елементів та варіації можливих їх коливань, дослідження параметрів таких систем є досить складною задачею.

Поведінку коливальних систем, схильних до дії випадкових сил, необхідно вивчати однаковими методами уявлення як самих випадкових впливів, так і випадкових реакцій коливальних систем на ці впливи. Вібраційний аналіз є одним із експериментальних методів оцінки технічного стану і виявлення дефектів динамічних систем. Як правило, при застосуванні такого методу використовується спектральний аналіз на основі перетворення Фур'є, за допомогою якого визначаються частоти коливань. А на основі значень отриманих частот коливань здійснюється подальша оцінка про технічний стан досліджуваного об'єкту та наявність дефектів. Труднощі, які виникають при дослідженні складних технічних систем таким методом, пов'язані з встановленням природи випадкових впливів та однозначну інтерпретацію результатів аналізу. Так як поряд з дійсними фізичними процесами, які притаманні досліджуваній системі мають місце і хибні результати аналізування, пов'язані з помилками математичного апарату, недосконаlostями вимірювальних приладів та впливом зовнішніх факторів випадкового характеру.

Експериментальні дослідження на основі вимірювань прискорень наведені у роботі [1, 2]. У цих роботах на основі побудованого спектру коливань визначаються власні частоти коливань. Викладена методика може бути використана при дослідженні більш складних динамічних систем. Вимірювання динамічних характеристик систем з метою діагностики та моніторингу існуючих дефектів у металоконструкціях представлені в роботі [2]. Подана методика застосування експериментальних досліджень вібрації та їх обробка. Запропоновано вдосконалення розрахункової моделі на основі отриманих динамічних характеристик.

Вимірювання динамічних характеристик систем з метою виявлення дефектів в конструктивних елементах присвячені роботи [3, 4]. В цих роботах подана методика застосування експериментальних досліджень вібрації та їх обробка. Автори зазначають про наявність шумових явищ, які заважають проведенню оцінки, і врахування цих явищ пропонується реалізовувати за допомогою математичної обробки. Робота [5] присвячена застосуванню методу до нелінійних систем контролю активної вібрації. Як зазначають автори, перевагою такого інтегрального методу є те, що немає необхідності знати параметри системи, такі як маса, затухання та коефіцієнти жорсткості, які зазвичай отримуються методами скінченних елементів. Щодо вимірювання коливань то, як правило, застосовують датчики вимірювання прискорення. Але поряд з тим існують альтернативні рішення. Дистанційне вимірювання

наведене в роботі [6] базується на застосуванні лазерних та оптичних приладів. А застосування датчика коливань на основі оптичного волокна пропонується в роботі [7]. Звичайно, такі системи збору даних володіють високою точністю та чутливістю. В роботі [8] наведені результати експериментальних досліджень роликів конвеєра на основі Wavelet аналізу, який є ефективним при дослідженні нестационарних процесів із зміною частотних характеристик. Отримані результати теоретичних [9] і експериментальних [10] досліджень формують поверхню вібраційної машини технологічного призначення засвідчують про складний рух такої системи, і автори рекомендують застосування спектрального аналізу для обробки отриманих даних. Незважаючи на велику кількість публікацій за даною тематикою питання оцінки динамічних характеристик є актуальним, так як в більшості випадків залежить від конкретної досліджуваної системи та умов застосування вимірювальної апаратури. Таким чином, *об'єктом досліджень* є процес обробки результатів руху віброуцілюючих машин будівельної індустрії. *А метою роботи* є визначення ефективного методу ідентифікації динамічного процесу та виконання інтегральної оцінки загальної системи.

2. Методика проведення досліджень

Експериментальні дослідження виконувались на створеній експериментальній моделі [10] із відомими параметрами збудження просторових коливань, які реалізовані за допомогою відцентрового збуджувача коливань. Частота прикладеної сили контролювалась датчиком положення дебалансу і складала 17,5 Гц.

Для вимірювання параметрів коливань застосований трьохвісний акселерометр, який входить в комплект сейсмостанції ZET 048С (Росія). Реалізація спектрального аналізу виконана за допомогою програмного забезпечення ZETLAB SEISMO, методом обробки безперервних записів динамічного процесу дискретним перетворенням Фур'є.

3. Результати досліджень та обговорення

На основі проведених експериментальних досліджень отримано ряд віброграм, що характерні для досліджуваної системи. Записи безперервної фіксації параметрів динамічної дії безпосередньо на формують поверхню при частоті зовнішньої сили 17,5 Гц наведені на рис. 1.

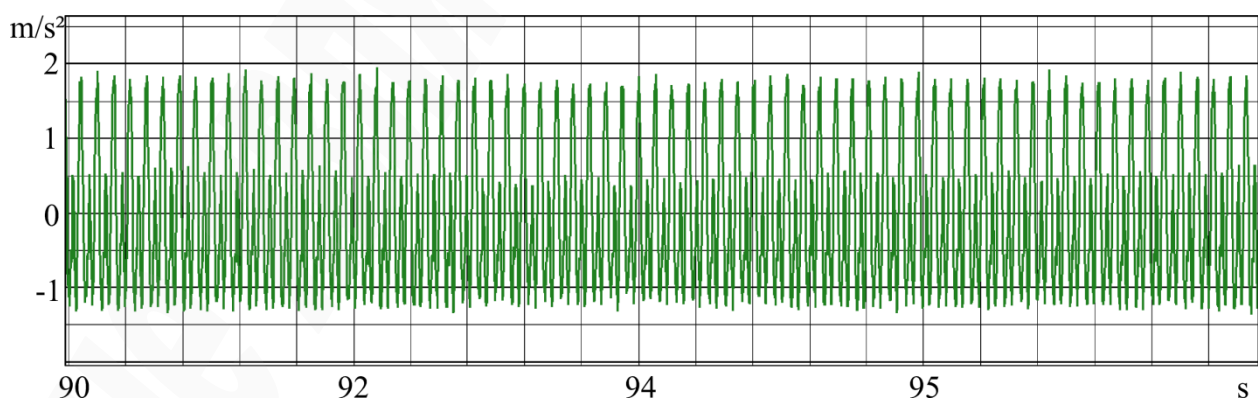


Рис. 1. Віброграма досліджуваного процесу

Як видно з віброграми на рис. 1, наявні і інші частоти коливань, які відмінні за числовим значенням від основної.

Отриманий спектр середньоквадратичного значення вимірюваного параметру наведеної віброграми (рис. 2) свідчить про наявність вищих гармонік. Варто відмітити, що другий пік на спектрі (35 Гц) має більше числове значення, ніж перший (17,5 Гц). Тому у випадку невідомого числового значення основної частоти можна було б отримати хибний результат, прийнявши другий пік за основну частоту, а перший за її субгармоніку. Наявність піків при більш високих частотах теж є сумнівним. Так, чіткий пік на частоті 50 Гц є наслідком впливу зовнішнього шуму від електромереж. Інші значення частот можуть бути як супергармоніками основної частоти, так і наслідком математичної обробки.

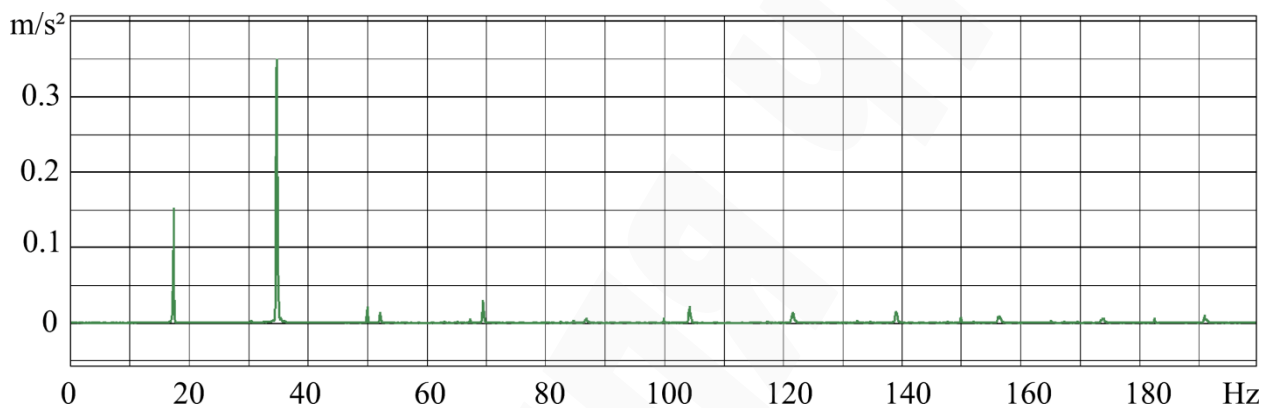


Рис. 2. Спектр коливань (лінійна шкала)

Спектр середньоквадратичного значення вимірюваного параметру у логарифмічній шкалі того ж процесу (рис. 3) має зовсім інший характер. Наявна велика кількість піків як частот, які мають місце у динамічному процесі, так і частот, обумовлені зовнішнім шумом (50, 100, 150 Гц). Тому для процесу, динамічні параметри якого невідомі, досить важко визначити ті значення, які мають місце.

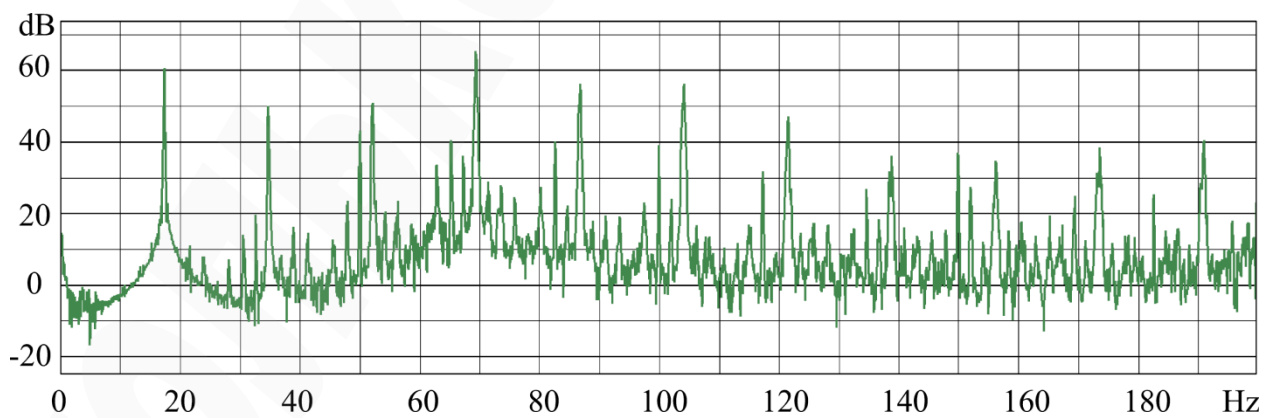


Рис. 3. Спектр коливань (логарифмічна шкала)

На відміну від попередніх спектрів, спектр коливань за параметром спектральної потужності (рис. 4) чітко демонструє наявність всього трьох піків.

При цьому, більшому числовому значенню відповідає саме основна частота збудження коливань (17,5 Гц), її вищі гармоніки (другий і третій пік на спектрі) відповідають реальному фізичному процесу, який зображений на рис. 1.

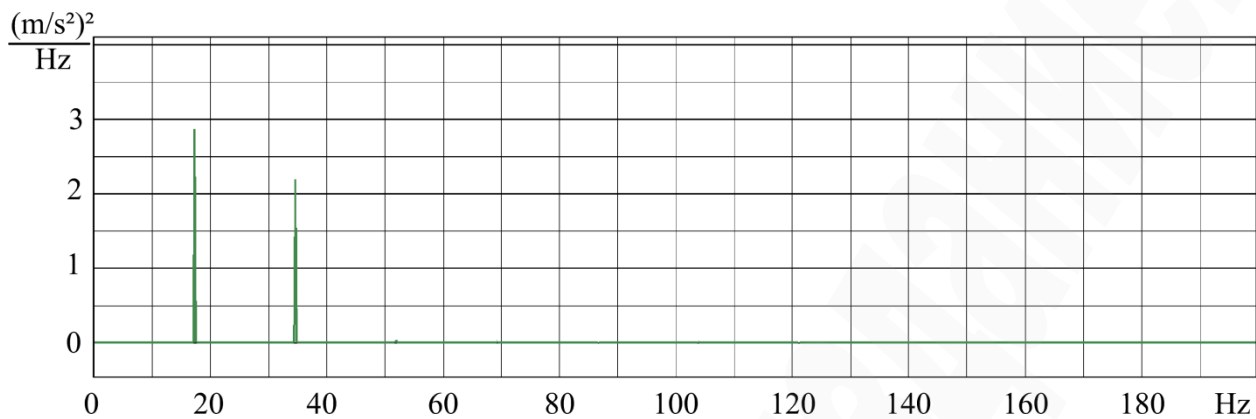


Рис. 4. Спектр коливань (спектральна потужність)

Виконані дослідження підтверджують можливість ефективного застосування спектрального аналізу для оцінки динамічних процесів та можуть бути застосовані при моніторингу технічного стану технічних конструкцій при невідомих параметрах зовнішнього впливу. Критерії оцінки, такі як спектральна потужність та спектральна щільність можуть бути використані для адекватного аналізу, виявлення основних частот коливань, їх гармонік та дозволяють врахувати вплив вищих гармонік на досліджуваний процес.

4. Висновки

У ході дослідження виявлено, що розглянуті спектри коливань в лінійній та логарифмічній шкалі за прискоренням не дають можливості оцінити реальний динамічний процес. Спектр за спектральною потужністю більш адекватно відображає досліджуваний процес та дозволяє оцінити вклад вищих гармонік в динаміку системи.

Отримані результати досліджень можуть бути використані при дослідженні систем із складним рухом при невідомих параметрах зовнішнього впливу при виконанні діагностування та оцінки технічного стану машин технологічного призначення, коливань несучих і огорожувальних конструкцій споруд.

Література

1. Kavyanpoor, M., Shokrollahi, S. (2019). Dynamic behaviors of a fractional order nonlinear oscillator. *Journal of King Saud University – Science*, 31 (1), 14–20. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jksus.2017.03.006>
2. Jia, Y., Seshia, A. A. (2014). An auto-parametrically excited vibration energy harvester. *Sensors and Actuators A: Physical*, 220, 69–75. doi: <http://doi.org/10.1016/j.sna.2014.09.012>
3. Patel, V. N., Tandon, N., Pandey, R. K. (2014). Vibrations Generated by Rolling Element Bearings having Multiple Local Defects on Races. *Procedia Technology*, 14, 312–319. doi: <http://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.08.041>

4. Giagopoulos, D., Arailopoulos, A., Dertimanis, V., Papadimitriou, C., Chatzi, E., Grompanopoulos, K. (2017). Computational Framework for Online Estimation of Fatigue Damage using Vibration Measurements from a Limited Number of Sensors. *Procedia Engineering*, 199, 1906–1911. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.424>
5. Ghandchi Tehrani, M., Wilmshurst, L., Elliott, S. J. (2013). Receptance method for active vibration control of a nonlinear system. *Journal of Sound and Vibration*, 332 (19), 4440–4449. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jsv.2013.04.002>
6. Lezhin, D. S., Falaleev, S. V., Safin, A. I., Ulanov, A. M., Vergnano, D. (2017). Comparison of Different Methods of Non-contact Vibration Measurement. *Procedia Engineering*, 176, 175–183. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.286>
7. Gianti, M. S., Prasetyo, E., Wijaya, A. D., Berliandika, S., Marzuki, A. (2017). Vibration Measurement of Mathematical Pendulum based on Macrobending-Fiber Optic Sensor as a Model of Bridge Structural Health Monitoring. *Procedia Engineering*, 170, 430–434. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.069>
8. Bendjama, H., Bouhouche, S., Boucherit, M. S. (2012). Application of Wavelet Transform for Fault Diagnosis in Rotating Machinery. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 2 (1), 82–87. doi: <http://doi.org/10.7763/ijmlc.2012.v2.93>
9. Nazarenko, I., Gaidaichuk, V., Dedov, O., Diachenko, O. (2017). Investigation of vibration machine movement with a multimode oscillation spectrum. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (1 (90)), 28–36. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118731>
10. Nazarenko, I., Dedov, O., Svidersky, A., Oryshchenko, S. (2018). Experimental studies of forming design at dynamic load. *Technology Audit and Production Reserves*, 6 (1 (44)), 8–13. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.151735>

The object of research is the process of processing the results of the movement of vibration-absorbing machines in the construction industry. One of the problems in the study of technological vibration machines is the determination of the parameters of the spatial motion of the working bodies of the machine and establishing their compliance with the calculated ones obtained as a result of calculations or numerical simulation. And also when establishing the state of structures under the influence of complex dynamic effects. Difficulties arising in the study of dynamic processes are caused by the determination of the nature and actual values of dissipative forces, the influence of unknown random variables, including interference and imperfections in the measuring technique.

The approach proposed in this paper is based on the hypothesis of considering a system of complex structure, has a dynamic effect as a single system with its corresponding dynamic characteristics. The implementation of this approach can be carried out by determining the dynamic parameters of the system with subsequent spectral analysis and the establishment of the main vibration frequencies that are due to external influence, as well as the identification and clear identification of higher harmonics. Recordings of continuous fixation of the vibration process with a known

frequency of external influence are used to determine the necessary effective method for presenting the results. Further processing of such results on the basis of the spectral-correlation method makes it possible to determine an effective way to determine the fundamental frequency, to reveal the influence of higher harmonics and extraneous frequencies inherent in the investigated process. The vibration spectra in the linear and logarithmic scales with acceleration and spectral power are considered. According to the research results, it is found that the use of precisely the spectral power of the signal level is an effective method for determining the dynamic process and performing an integral assessment of the overall system.

The obtained research results can be used in the study of systems with complex motion with unknown parameters of external influence when performing diagnostics and evaluating the technical condition of technological machines, the vibrations of the supporting and enclosing structures of buildings.

Keywords: *vibration spectrum, natural vibration frequencies, dynamic load, vibration diagnostics, spectral power.*