

**С.А. Бабори́га, ст. викл.**  
*Волинський інститут економіки і менеджменту (м. Луцьк Волинської обл.)*  
**О.Ф. Гордеев, д.т.н., проф.**  
*Луцький державний технічний університет*

### МОНІТОРИНГ І ДІАГНОСТИКА ВІБРАЦІЇ

*Розглянуто питання вібродіагностики та моніторингу. Проаналізовано фактори, які впливають на результати діагностики, та окреслено діапазони характеристик, якими повинні володіти сучасні апаратні засоби, що використані при моніторингу. Наведено класифікацію основних динамічних сил, що діють в машинах роторного типу, збуджуючи їхню вібрацію та шум. Проведено аналіз проблем діагностики вібрації та можливих напрямків їх вирішення.*

В останні роки при відмові від обслуговування і ремонту техніки за регламентом, її виведення у ремонт на практиці здійснюється трьома основними способами:

- робота до відмови;
- виведення техніки в ремонт за результатами експертних оцінок;
- виведення техніки в ремонт за результатами діагностики і прогнозу його технічного стану.

Але значний економічний ефект дає лише третій спосіб. Успішне його використання дозволяє:

- скоротити час, обсяг ремонту і кількість запасних частин більше, ніж на третину;
- зменшити кількість раптових відмов у десятки разів;
- скоротити ушкоджені прибуток через простої в декілька разів.

Для останнього способу необхідна повна діагностика об'єкта, причому бажано виявляти всі дефекти, що впливають на ресурс, щоб підготуватися до ремонту. В механіці, як показує практика, ефективна діагностика машин можлива, в основному, за вібрацією, тому що:

- коливальні сили виникають безпосередньо в місці появи дефекту, а машина "прозора" для вібрації;
- вібрація містить максимальний об'єм діагностичної інформації;
- діагностувати можна на місці, без розбирання і зупинки устаткування.

Але діагностика машин і устаткування за вібрацією – це не тільки методи діагностики й апаратура для виміру та аналізу процесів. Є ще дві обов'язкові складові частини:

- база даних за вимірами для великої кількості устаткування протягом тривалого часу з можливістю оперативного одержувати будь-які дані та проводити їхній аналіз;
- способи прийняття діагностичних рішень.

У першому питанні лідерами завжди були фірми США, що створювали протягом багатьох років ефективні комп'ютерні системи моніторингу, тобто спостереження за процесами, що протікають, у тому числі і за вібрацією машин та устаткування. До складу програмного забезпечення входила база даних із характеристиками контрольованого устаткування і результатами вимірів, зручний користувальницький інтерфейс із можливістю графічного аналізу з побудовою трендів та іншими засобами представлення даних.

Друге питання в більшості систем діагностики вирішувалось одним способом – залученням експерта з діагностики конкретного виду устаткування.

Але існує ще два можливих напрямки вирішення другого питання – це розробка штучного інтелекту. Перший напрямок – навчання штучного інтелекту. Навчання проводить спочатку розроблювач системи, потім користувач доповнює систему потрібними йому правилами. Другий напрямок – самонавчання (адаптивна) системи за жорсткими алгоритмами навчання, заданими розроблювачами.

Вібрація і шум – природні процеси, що протікають у машинах та устаткуванні, і збуджуються вони тими ж динамічними силами, які є причинами зносу і появи різних видів дефектів. Природно, що вібрація і шум трансформуються одна в одну на границях газового і твердого середовища, а людина безпосередньо сприймає звук, і лише в обмеженому низькочастотному діапазоні – вібрацію. За перехід вібрації в шум відповідає коливальна швидкість, що прямо пропорційна звуковому тиску в повітрі біля поверхні, що вібрує. Тому і норми на вібрацію, як правило, обмежують коливальну швидкість машин і устаткування.

Але вібраційний контроль і вібраційна діагностика – різні практичні задачі. У діагностиці дефект визначається коливальною силою, що діє в зоні дефекту, а сила пов'язана лінійно з коливальним прискоренням, а не зі швидкістю. Тому в діагностиці часто користуються вимірами віброприскорення, а для вібраційного контролю машин додатково вимірюють і віброшвидкість, причому лише в обмеженому низькочастотному діапазоні. Є ще одна причина, за якою не рекомендується активно використовувати шум для діагностики машин. Ця причина – необхідність визначення форми коливань об'єкта в безпосередній близькості від місця виникнення дефекту. Тут значний внесок як у вібрацію, так і в шум вносять псевдоскладові складних форм.

Після перетворення сигналу вібрації (шуму) в електричний сигнал, останній необхідно ретельно аналізувати, одержуючи, а не втрачаючи діагностичну інформацію.

До приладів, що аналізують, у діагностиці ставляться самі жорсткі вимоги. До типових операцій, що повинні виконувати прилади, які аналізують вібрацію, варто віднести:

1. Визначення рівня (загального) вібрації в смузі частот, регламентованій стандартами вібраційного контролю.

2. Спектральний аналіз вібрації.

3. Аналіз коливань потужності окремих складової вібрації, попередньо виділених зі сигналу вібрації.

4. Аналіз форми сигналу вібрації, тобто аналіз тимчасової розгортки сигналу (робота в режимі осцилографа).

Слід зазначити, що далеко не всі з систем, що випускаються промислово, можуть виконувати всі зазначені види аналізу, принаймні, із необхідною для діагностики точністю.

Одна з вимог, які ставляться до приладів контролю, – лінійність. Природно, що межею для дослідження верстатних систем, є лінійність, обмежена динамічним діапазоном 80 дБ, тобто не гірше 0,01 %. На практиці, як правило, вдається досягти в кращому випадку 0,03 %, тобто спотворення з'являються на рівні - 70 дБ і цього цілком достатньо для діагностичних вимірів.

Наступна вимога ставиться до величини частотного діапазону. Типові вимоги – від 2 Гц до 20 кГц, але іноді потрібно збільшення діапазону досліджуваних частот. У ряді випадків необхідно збільшення діапазону зверху до 40 кГц, у деяких галузях промисловості потрібно розширення діапазону частот знизу до 0,3 Гц або навіть до нуля. Критеріїв тут не існує.

І, нарешті, остання вимога – за роздільною здатністю приладів. Типові вимоги – від 100 до 800, але в деяких приладах зустрічається і більша кількість смуг – до 6400 і вище.

У кожній машині діють динамічні сили. Ці сили – джерело не тільки шуму і вібрації, але й дефектів, що змінюють властивості сил і, відповідно, характеристики шуму і вібрації. Можна сказати, що функціональна діагностика машин без зміни режиму їхньої роботи – це вивчення динамічних сил, а не власне вібрації або шуму. Останні просто містять у собі інформацію про динамічні сили, але в процесі перетворення сил у вібрацію або шум частина інформації втрачається. Ще більше інформації втрачається при перетворенні сил і здійсненої ними роботи в теплову енергію. Саме тому з двох видів сигналів (температура і вібрація) у діагностиці перевагу варто віддати вібрації. Основні динамічні сили, що діють у машинах роторного типу, збуджуючи їхню вібрацію або шум, наведені в табл. 1.

З сил *механічної природи* варто виділити:

- відцентрові сили, зумовлені нерівноваженістю обертових вузлів;
- кінематичні сили, зумовлені нерівністю взаємодіючих поверхонь і, насамперед, поверхонь тертя в підшипниках;
- параметричні сили, зумовлені, насамперед, змінами складової жорсткості обертових вузлів або опор обертання;
- сили тертя, що далеко не завжди можна вважати механічними, але майже завжди вони є результатом сумарної дії множини мікроударів із деформацією (пружною) мікронерівностей, що контактують, на поверхнях тертя;
- сили ударного виду, що виникають при взаємодії окремих елементів тертя, що супроводжується їх пружною деформацією.

З сил *електромагнітного походження* варто виділити:

- магнітні сили, зумовлені змінами магнітної енергії у визначеному обмеженому просторі;

- електродинамічні сили, зумовлені взаємодією магнітного поля з електричним струмом;
  - магнітострикційні сили, зумовлені ефектом магнітострикції, тобто зміною лінійних розмірів магнітного матеріалу під дією магнітного поля.
- З сил *гідро- (аеродинамічного) походження* варто виділити:
- піднімальні сили, тобто сили тиску на тіло;
  - сили тертя на межі потоку і нерухомих частин машини (внутрішньої стінки трубопроводу тощо);
  - пульсації тиску в потоці, зумовлені його турбулентністю, зривом вихорів тощо.

Таблиця 1

Типи коливальних сил, що діють у машинах роторного типу

СИЛА	ДЖЕРЕЛО
1. Механічної природи:	
Відцентрова	Незрівноваженість ротора
Кінематична	Нерівність поверхні
Параметрична	Флуктуації жорсткості вала, підшипників тощо
Сили тертя	Вузли тертя кочення і ковзання
Удари	Дефектні поверхні тертя
2. Електромагнітної природи:	
Магнітні	Флуктуації об'єму повітряного зазору в магнітопроводі
Електродинамічні	Перемінного складового струму і потоку
Магнітострикційні	Ефект магнітострикції в магнітопроводі
3. Гідро(асро)динамічної природи:	
Піднімальні (обтікання)	Рух лопасті в неоднорідному потоці або групи неоднакових лопастей в однорідному потоці
Сили тертя	Границя потоку і нерухомих частин
Пульсації тиску	Турбулентність потоку, зрив вихорів, кавітація

Для діагностики машин і устаткування при виборі частотної області вібрації варто враховувати властивості вібрації різної частоти. Так в області інфранизких частот вібрація може збуджуватись навіть не самою контрольованою машиною, а, наприклад, іншими машинами, що працюють поруч, і, у тому числі, транспортом, що проходить на порівняно великій відстані. Особливість вібрації на низьких частотах полягає в тому, що вона слабо згасає в просторі, а отже, у точку установки датчика доходить вібрація від усіх вузлів контрольованої машини, від сполучених із нею інших машин та від сусіднього устаткування. Тому при аналізі вібрації на низьких частотах виникає проблема локалізації дефектного вузла і проблема перешкодостійкості. На цих частотах (у діапазоні частот до 3–5 гармоніки частоти обертання) машина коливається як єдине ціле, тому потрібні великі сили і великі дефекти, щоб розгойдати всю машину. На середніх частотах у будь-якій точці контролю вібрація збуджується, в основному, коливальними силами, що діють у найближчих до неї вузлах машини. У спектрі вібрації спостерігається велика кількість гармонійних складових різної частоти, але через численні резонанси співвідношення амплітуд цих складових сильно відрізняються від співвідношень розмірів збуджуючих їх коливальних сил. Вібрація ультразвукових частот збуджується, в основному, мікроударами, але поширюється тільки на однорідному середовищі (метал без зварних швів тощо). До оптимальної точки її виміру, якщо це не трубопровід, часто важко або неможливо добратися.

У світовій практиці зустрічається два основних поняття, що пов'язані з оцінкою стану машин за їхньою вібрацією:

1. Вібраційний моніторинг, під яким розуміється спостереження за змінами вібраційного стану машини й аналіз причин цих змін.
2. Вібраційна діагностика, коли виявляються та ідентифікуються (визначається вид і розмір) дефекти, які діагностують об'єкти.

Існуючі методи діагностики вузлів обертючих машин передбачають визначення відхилення діагностичних параметрів від їхніх еталонних значень. У зв'язку з цим постають дві головні взаємозалежні проблеми діагностики – вибір оптимальних діагностичних параметрів і побудова еталону для кожного з параметрів.

Другу проблему, яка є загальною для всіх напрямків технічної діагностики, вирішують такими способами:

1. Еталон бездефектної машини можна побудувати трьома способами: вимірявши кожен діагностичний параметр у групи бездефектних машин, визначити його середнє значення і межі допустимих відхилень (еталон за групою);

2. Прослідкувавши за змінами діагностичного параметра на початковій стадії експлуатації конкретного об'єкту, визначивши тренд для цього параметра і допустимі відхилення, використовувати ці значення як еталона цього параметра для даного об'єкта на час подальшої експлуатації (еталон за історією);

3. Проробивши ту ж роботу в початковій стадії конкретного виміру діагностичного параметра, використовувати еталон на другу частину одного виміру (миттєвий еталон).

На кафедрі верстатів Луцького державного технічного університету протягом декількох років проводяться дослідження високоточних шпиндельних вузлів з гідростатичними опорами. Особлива увага надається підвищенню роботоздатності та надійності на стадії проектування, в основу яких покладені вищевказані принципові підходи для вирішення поставлених цілей дослідження.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Бабориґа С.А., Гордєєв О.Ф.* Відшування шляхів раціонального підвищення надійності та роботоздатності верстатних систем за посередництвом сучасних методів технічної діагностики: Наук. нотатки (серія машинобудування). Вип. 2. – Луцьк, 1995. – С. 80.
2. *Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю.* Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. Рекомендации для пользователей систем диагностики. – Издательство АО ВАСТ, Санкт-Петербург, 1997.
3. *Гордєєв А.Ф.* Гидростатическая смазка – эффективное средство повышения точности и надежности неразъемных подвижных соединений / *Technologia i automatyzacja montazu.* – № 1. – 1974. – Warszawa. – S. 29–31.
4. *Гордєєв А.Ф.* Оптимизация параметров гидростатических опор на стадии проектирования по демпфирующей способности / *Вестник НТУУ "КПИ".* – 1999. – № 34. – С. 160–163.
5. *Гордєєв А.Ф., Захаров П.А.* Новые способы смазки подшипников шпинделей для высокоскоростной обработки / *Труды Государственного аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ".* – Вып. 10. – Харьков. – С. 37–44.

БАБОРИґА Сергій Анатолійович – старший викладач кафедри “Менеджмент” Волинського інституту економіки і менеджменту, м. Луцьк Волинської обл.

Наукові інтереси:

– прогнозування роботоздатності складних систем;

– питання прецизійної обробки деталей машин.

роб. адреса: м. Луцьк, вул. Львівська, 75 ЛДТУ

дом. адреса: м. Луцьк, вул. Львівська, 73, кв. 9

роб. (03322) 7-05-68

дом. (03322) 6-29-89

[viem@lutsk.ukrpack.net](mailto:viem@lutsk.ukrpack.net)

ГОРДЄЄВ Олександр Федорович – доктор технічних наук, професор кафедри “Верстати” Луцького державного технічного університету, м. Луцьк Волинської обл.

Наукові інтереси:

– дослідження високошвидкісних шпиндельних вузлів з гідростатичними опорами;

– прецизійна обробка деталей машин.

роб. адреса: м. Луцьк, вул. Львівська, 75 ЛДТУ

дом. адреса: м. Луцьк, вул. Світла, 3, кв. 46

роб. (03322) 68-0-68

дом. (03322) 4-92-86

[mrv@a256.lutsk.ua](mailto:mrv@a256.lutsk.ua)