



## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А. Ю. ВАРФОЛОМЕЕВ, А. В. МИКУЛОВИЧ, В. И. МИКУЛОВИЧ, В. Т. ШНИТКО

*Описывается разработанная система диагностики промышленного оборудования, позволяющая проводить детальный анализ его технического состояния по параметрам вибрации и других физических процессов: температуры, давления, деформации и т. п. Аппаратно-программный комплекс успешно прошел опытную эксплуатацию на изделиях авиационной техники и энергетическом оборудовании.*

*A system described is developed for diagnostics of industrial equipment to provide a detail analysis of its technical condition by the physical parameters: temperature, pressure, deformation, vibration, etc. Experimental operation of the developed hard- and software was successfully conducted for the items of aviation and energy-producing equipment.*

Внедрение методов комплексного диагностирования в практику технического обслуживания промышленного оборудования позволяет выявлять дефекты машин и их отдельных узлов на ранней стадии их развития [1].

Опыт зарубежных фирм показывает, что среди многочисленных методов технической диагностики (ТД), наиболее эффективными являются методы, основанные на использовании информации о параметрах процессов, сопровождающих работу машин и механизмов. При этом чаще всего применяется анализ механических колебаний (вибрации).

По данным Американского общества инженеров-механиков до 82 % неисправностей машин с вращающимися узлами может быть определено методами вибрационной диагностики [2].

Практическая реализация данных методов требует обработки чрезвычайно больших объемов входных данных. Успешное решение этой задачи может быть осуществлено на базе применения алгоритмов цифровой обработки выходных сигналов датчиков физических величин и процессов и современных средств вычислительной и электронной техники. Например, использование для этой цели портативных компьютеров типа «Notebook» и цифровых сигнальных процессоров (DSP) позволяет создавать многоканальные диагностические приборы и системы с развитым программным обеспечением, универсальные по назначению, с малыми габаритами и массой.

Однако во многих случаях внедрение методов эксплуатации по состоянию сдерживается отсутствием соответствующих аппаратно-программных средств, а приобретение зарубежной аппаратуры затруднено из-за ее высокой стоимости. Вследствие этого была поставлена задача разработать современный аппаратно-программный комплекс для диагностики практически любого

промышленного оборудования в процессе его эксплуатации и ремонта, по своим функциональным возможностям не уступающий лучшим зарубежным аналогам, но значительно меньшей стоимости.

**Назначение и состав.** Разработанная автоматизированная система диагностики (АСД) предназначена для контроля и диагностики состояния промышленного оборудования различного назначения и их отдельных узлов в процессе эксплуатации и ремонта.

В состав АСД входят: портативная многоканальная система (ПМС-АСД), включающая комплект датчиков с кабелями и механическими приспособлениями для их крепления; стационарная (наземная) система (НС-АСД); программное обеспечение ПМС-АСД и НС-АСД; рабочая конструкторская и эксплуатационная документация.

Портативная многоканальная система (ПМС-АСД) выполнена на основе портативного компьютера типа «Notebook» и предназначена для:

- съема данных с выходов датчиков, установленных на диагностируемых механизмах и их узлах;
- предварительной обработки сигналов с выходов датчиков и экспресс-диагностики контролируемых механических узлов;

- ранней диагностики межроторных и межвальных подшипников авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) в режиме ручной прокрутки;

- анализа входных данных синхронно с изменением оборотов основного вала контролируемых машин, в частности, на режимах их разгона и выбега;

- динамической балансировки несущего и хвостового винтов вертолетов;

- выдачи оператору сообщений об имеющихся опасных отказах;

- краткосрочного прогнозирования работоспособности механических узлов;



передачи входных данных и результатов экспресс-диагностики на стационарную диагностическую систему.

Стационарная (наземная) система (НС-АСД) на основе стационарного компьютера предназначена для решения следующих *основных задач*:

*корректировки итоговых результатов диагностирования;*

*выделения признаков для долговременного прогнозирования технического состояния контролируемых машин и их отдельных узлов;*

*прогнозирования технического состояния контролируемых машин с выдачей информации о необходимых регламентных и ремонтных работах, их объеме и сроках проведения;*

*формирования базы данных по диагностируемым машинам;*

*создания итоговых документов по результатам диагностирования на бумажных носителях.*

**Принцип работы.** Принцип работы системы основан на цифровой обработке выходных сигналов датчиков физических процессов, установленных на отдельных узлах контролируемых машин в выбранных местах. Сигнал от тахометрического датчика обеспечивает синхронизацию работы системы с оборотами основного вала машины.

Работа программы обработки сигналов, поступающих с соответствующих датчиков, инициируется командой с клавиатуры ПК.

**Портативная многоканальная система диагностики.** Структурная схема ПМС-АСД приведена на рис. 1. Она состоит из следующих основных модулей: модуля сбора данных, модуля управления, модуля питания и портативного компьютера типа «Notebook».

Модуль сбора данных (МСД) предназначен для согласования выходов датчиков со входами последующих схем, дополнительного усиления вибрационных или других сигналов, их предварительной фильтрации и преобразования в цифровую форму.

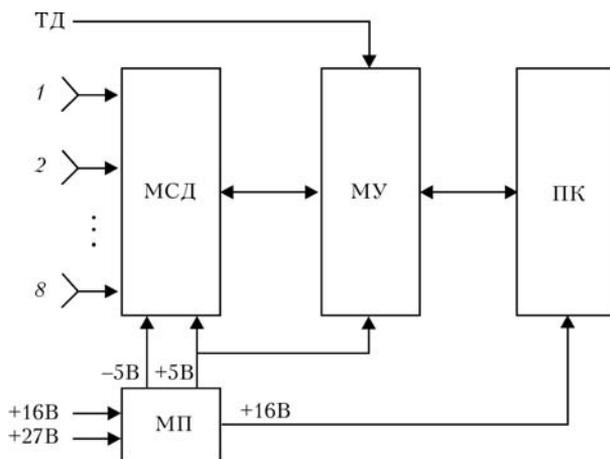


Рис. 1. Структурная схема ПМС-АСД

Модуль управления (МУ) организует работу МСД, преобразует последовательные цифровые данные, поступающие из МСД, в параллельный формат и передает их в портативный компьютер (ПК). Кроме того, МУ обеспечивает ввод выходного сигнала тахометрического датчика (ТД).

Портативный компьютер (ПК) типа «Notebook» осуществляет сбор и первичную обработку поступающих сигналов, отображение результатов обработки на экране дисплея, а также упаковку последних и их хранение на накопителе на жестком магнитном диске для передачи в дальнейшем на стационарный компьютер.

Модуль питания (МП) обеспечивает работу системы от сети постоянного тока напряжением +27 В или сетевого (220 В) блока питания ПК: 1–8 — микрофон, датчики вибрации, температуры и т. п.

**Основные технические характеристики ПМС-АСД в базовом исполнении**

1. Количество независимых каналов сбора данных ..... 5  
в том числе:  
от датчиков вибрации ..... 4  
от датчиков оборотов ..... 1
2. Количество датчиков вибрации, подключаемых к одному каналу ..... 2  
в том числе:  
пьезоэлектрических ..... 1  
с выходом по напряжению ..... 1
3. Рабочий диапазон частот, Гц:  
по входу усилителя заряда .....  $0,7 \dots 2 \cdot 10^4$   
по входу усилителя напряжения .....  $0 \dots 2 \cdot 10^4$
4. Неравномерность амплитудно-частотной характеристики в пределах рабочего диапазона частот, дБ, не более ..... 0,3
5. Диапазон входных сигналов усилителей:  
по заряду, пКл .....  $\pm(0 \dots 1,25 \cdot 10^3)$   
по напряжению, В  
для двуполярного сигнала .....  $\pm(0 \dots 2,5)$   
для однополярного сигнала .....  $0 \dots +5$
6. Диапазон амплитуд измеряемых виброускорений с трехкомпонентным датчиком вибрации AP-38 составляет  $0,01 \dots 1000 \text{ м/с}^2$ .
7. Чувствительность усилителя заряда, мВ/пК .....  $\pm 1 \%$ .
8. Коэффициент передачи входного усилителя,  $0,5 \text{ В/В} \pm 1 \%$
9. Разрядность выходных данных аналого-цифрового преобразователя, бит ..... 16
10. Обмен данными проводится с использованием расширенного параллельного порта (Стандарт IEEE 1284), работающего в режиме ECP
11. Входное сопротивление ПМС-АСД для датчиков с выходом по напряжению, не менее, кОм ..... 30
12. Время непрерывной работы, не менее, ч ..... 8
13. Потребляемая мощность, не превышает, Вт ..... 60
14. Среднее время наработки на отказ, не менее, ч ..... 5000
15. Габаритные размеры, мм .....  $452 \times 360 \times 108$
16. Масса без комплекта принадлежностей, не более, кг ..... 6

**Программное обеспечение ПМС-АСД.** Программное обеспечение (ПО) ПМС-АСД работает в



операционной среде Windows 95/98 и представляет собой интегрированный пакет на основе графического интерфейса пользователя, включающий следующие программные модули:

проверки работоспособности каналов ввода данных с помощью встроенного генератора контрольного сигнала;

калибровки чувствительности входных усилителей для получения результатов измерений в физических единицах;

начального диалога, осуществляющего ввод сигналов с выбранных каналов в ОЗУ портативного компьютера, их оперативное отображение на экране дисплея ПК и при необходимости сохранение в виде файлов, дополненной служебной информацией для последующего протоколирования полученных результатов обработки выходных сигналов датчиков;

цифровой обработки выходных сигналов датчиков физических величин и процессов, сопровождающих работу контролируемых машин, по выбранным алгоритмам;

ранней диагностики межроторных и межвальных подшипников авиационных ГТД;

дробно-октавного (октава, 1/3, 1/12 и 1/24 октавы) анализа входных сигналов;

синхронного (порядкового) спектрального анализа;

экспресс-диагностики;

балансировки несущего и рулевого (хвостового) винтов вертолетов;

вывода результатов обработки на экран дисплея портативного компьютера.

Разработанное базовое программное обеспечение, реализующее современные алгоритмы цифровой обработки сигналов, позволяет получать в частотном диапазоне от 0,7 до 20 кГц следующий набор информативных параметров и функций: пиковое, среднее и среднеквадратическое значения входного сигнала или сигнала в выбранной полосе частот; гистограмму распределения; амплитуду и фазу гармонических составляющих, синхронных с оборотами основного вала машины; огибающую выделенного сигнала; амплитудный спектр с постоянным абсолютным разрешением; амплитудный спектр с постоянным относительным разрешением (1/1, 1/3, 1/12, 1/24 октавы); спектр огибающий; спектр мощности; фазовый спектр; кепстр; корреляционную функцию; взаимную корреляционную функцию двух входных сигналов; взаимную спектральную плотность; взаимный фазовый спектр; функцию когерентности; передаточную функцию.

Анализ входных сигналов может проводиться как на стационарных, так и на переходных режимах работы контролируемой машины. Оценивая отдельные параметры этих характеристик, а также анализируя их изменение в зависимости от режима работы или с течением времени, можно судить

о текущем техническом состоянии контролируемого узла и прогнозировать его изменение в будущем, что осуществляется наземной системой (НС-АСД) диагностики.

Для оперативного контроля состояния отдельных узлов полученные результаты измерения выводятся в графическом виде на дисплей ПК. При необходимости они могут быть сохранены в виде файлов для последующей передачи на НС-АСД.

Используемая технология цифровой обработки сигналов позволяет простым наращиванием программного обеспечения с помощью одних и тех же аппаратурных средств неограниченно расширять возможности системы по реализации новых алгоритмов обработки входных сигналов, исключая при этом возможные потери полученной информации.

При использовании специальной программы система позволяет осуществлять динамическую балансировку несущего винта вертолетов, жестких роторов в собственных опорах и проводить прочностные испытания элементов конструкций машин. ПМС-АСД обеспечивает также проведение порядкового анализа, хранение максимальных и минимальных значений спектра, сравнение спектров, осуществление арифметических преобразований над входными данными и получаемыми результатами, слежение (выделение) отдельной гармоники и отображение ее в трехмерном пространстве, например, при разбеге или выбеге контролируемой машины.

Стационарная (наземная) система диагностики. Портативная система ПМС-АСД, предназначена прежде всего для сбора данных виброизмерений и проведения экспрессанализа вибрационных и других сигналов на месте эксплуатации авиационной техники или любых других машин и механизмов. При этом в первую очередь решаются задачи связанные с определением фактического технического состояния контролируемых объектов. Возможности для детального исследования, например, состава вибрационных характеристик сложного технического изделия в целом, поиску других, быть может, более информативных диагностических признаков в этом случае практически не имеется. Это обстоятельство особенно характерно для изделий авиационной техники, где в настоящее время материально-технические ресурсы, включая и топливные, весьма ограничены.

Задачи детального исследования полученных с помощью ПМС-АСД данных и глубокой диагностики подшипников, зубчатых колес, рабочих колес насосов, компрессоров и турбин, а также электрических машин, включая прогнозирование их состояния по прошлым и текущим значениям диагностических параметров, решаются стационарной (в данном случае НС-АСД) системой.



НС-АСД обеспечивает: создание и поддержку базы данных измерений; создание и поддержку базы данных об оборудовании, подлежащем контролю и диагностике, и его отдельных деталях (компонентах); создание и поддержку базы данных дефектов; создание и поддержку базы данных об алгоритмах и критериях диагностирования; автоматическое диагностирование дефектов на базе знаний экспертов; построение трендов параметров вибрации и других процессов, сопровождающих работу контролируемых машин, для каждой точки контроля и прогнозирование остаточного ресурса.

НС-АСД сохраняет вибрационный и другие сигналы, считанные с ПМС-АСД либо импортированные из другой программы виброанализа в базу данных (БД) измерений. В этой же базе данных могут быть сохранены как сами сигналы с выходов соответствующих датчиков физических процессов, сопровождающих работу контролируемых машин, так и их спектры или любые другие информативные параметры и характеристики.

Системы содержат создаваемые технические паспорта машин, где указывается их кинематическая схема, схема расположения точек измерений на машине и описан состав машины. Под составом машины понимается наличие тех или иных вращающихся деталей, предварительно описанных в базе данных компонентов, связь их с точками измерений, а также привод (источник вращения) этих деталей. Описание состава машины позволяет вычислить характеристические частоты дефектов для всех вращающихся деталей. При этом формируется перечень основных частот для всех точек измерений по каждой конкретной машине, которые чаще всего подразделяются на следующие категории: оборотная частота валов; частоты зубчатых колес; частоты вращения электродвигателей; лопастные частоты; частоты подшипников качения; частоты подшипников скольжения.

База данных компонентов содержит описание конструктивных параметров отдельных деталей, например, количество зубьев шестерен, количество и диаметр шариков (роликов) в подшипнике, количество лопаток каждой ступени компрессора или турбины и т. д.

База данных дефектов содержит описание связи между различными дефектами тех или иных деталей с частотными составляющими в соответствующих спектрах. При этом дефекты группируются по конструктивным признакам: дисбаланс, несоосность, механические ослабления; подшипников качения; подшипников скольжения; муфт; зубчатых редукторов; электродвигателей; компрессоров, турбин (насосов).

Детальный анализ состояния машины выполняется автоматически после проведения таких подготовительных операций, как: определение частотного диапазона; определение числа гармо-

ник основных и боковых частот для отдельных видов дефектов; определение числа возможных дефектов.

Результатом процесса диагностики является перечень возможных дефектов.

Перечисленные выше основные принципы реализуются соответствующим программным обеспечением стационарной системы диагностики.

В качестве иллюстрации возможностей разработанной системы ниже приводятся некоторые результаты обработки вибрационных сигналов с выхода датчика вибрации АР38, установленного на главном редукторе одного из вертолетов.

Так, на рис. 2 представлены спектрограммы вибрации вертолета, имевшего высокий уровень вибрации и нормальную соконусность вращения лопастей несущего винта. Традиционными методами контроля, включая балансировку несущего винта, выявить причину неисправностей долгое время не удавалось. Применение 1/12- и 1/24-октавного анализа позволило обнаружить мощные гармонические составляющие в полосе частот от 18 до 19 Гц, которых не было на спектрограммах вибрации исправного вертолета. Установлено, что именно в данной полосе частот расположена первая гармоника вибрации рулевого (хвостового) винта, несбалансированность которого привела к существенному росту ее уровня. После балансировки рулевого винта вибрация вертолета стала соответствовать нормальному уровню (рис. 2).

Следует отметить, что включенный в состав ПМС-АСД программный модуль дробно-октавного анализа является эффективным средством реализации фильтров с любыми заданными характеристиками и, как показали результаты опытной эксплуатации, позволяет расширить функциональные возможности компьютерных систем диагностики, обеспечивая при этом проведение акустических измерений в соответствии с существующими международными стандартами.

В качестве примера на рис. 3, а представлен узкополосный спектр сигнала с выхода датчика вибрации, установленного на наружном контуре между окнами осмотра турбины двигателя АЛ-31Ф, в режиме ручной прокрутки с постоянной частотой вращения с исправным межвальным подшипником, на рис. 3, б — с дефектным подшипником.

Как видно, в частотном диапазоне от 20 до 500 Гц представленные спектрограммы существенным образом отличаются, что подтверждает принципиальную возможность применения данного метода для контроля состояния межвальных и межроторных подшипников авиационной техники без их запуска.

Для расшифровки и сравнения спектров вибрации, полученных на различных режимах работы силовых установок авиационной и любой другой техники с вращающимися узлами, наиболее при-

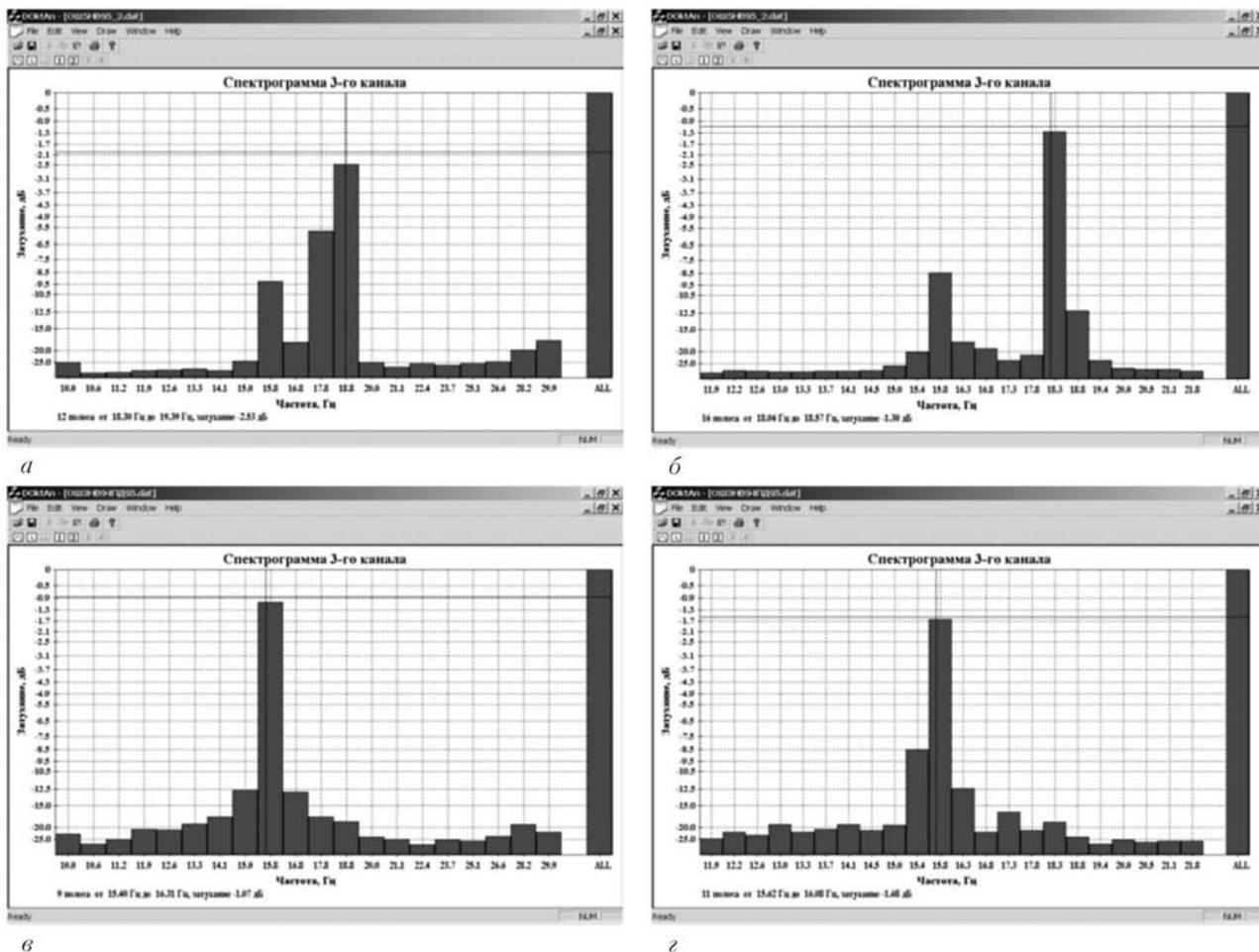


Рис. 2. Спектрограммы вибрации вертолетов; а, б — 1/12- и 1/24-октавные спектрограммы вибрации неисправного вертолета; в, г — 1/12 и 1/24-октавные спектрограммы вибрации исправного вертолета соответственно

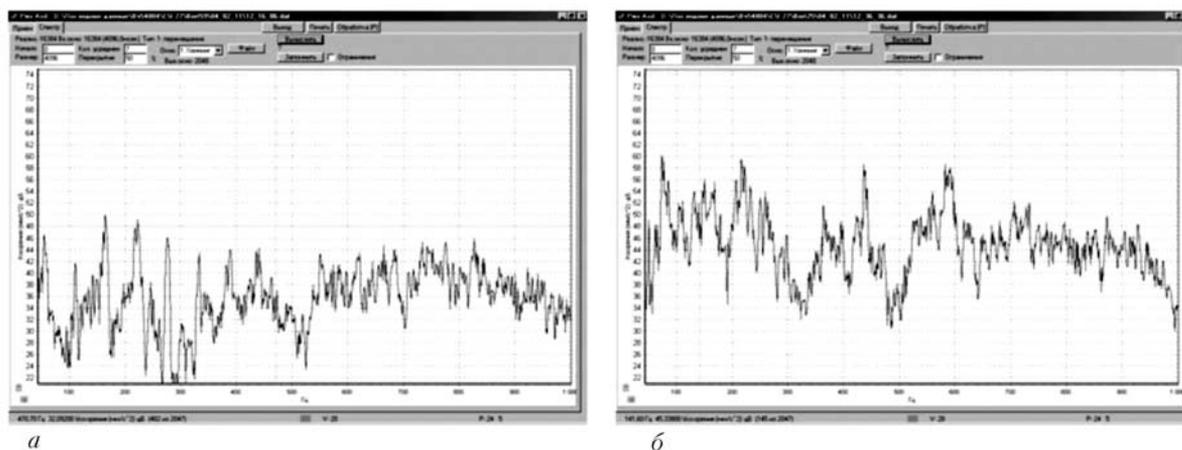


Рис. 3. Узкополосный спектр вибрации межвального подшипника: а — в исправном состоянии; б — с дефектом

емлем так называемый синхронный (порядковый) анализ. Для подтверждения сказанного на рис. 4, а, в приведены узкополосные спектры вибрации корпуса главного редуктора одного из эксплуатируемых вертолетов при 55 и 95 % оборотов несущего винта (зависимость ускорения ( $\text{мм}/\text{с}^2$ ) от частоты), а на рис. 4, б, г — те же спектры, но в зависимости ускорения ( $\text{мм}/\text{с}^2$ ) от порядка роторных гармоник. Видно, что во втором случае

сравнение полученных результатов спектрального анализа в значительной степени упрощается по сравнению с результатами обычного спектрального анализа.

На рис. 5 представлены результаты измерения уровня первой и второй роторных гармоник от оборотов для компрессора высокого давления, подтверждающие возможность практического применения ПМС-АСД на режимах разгона и выбега газотур-

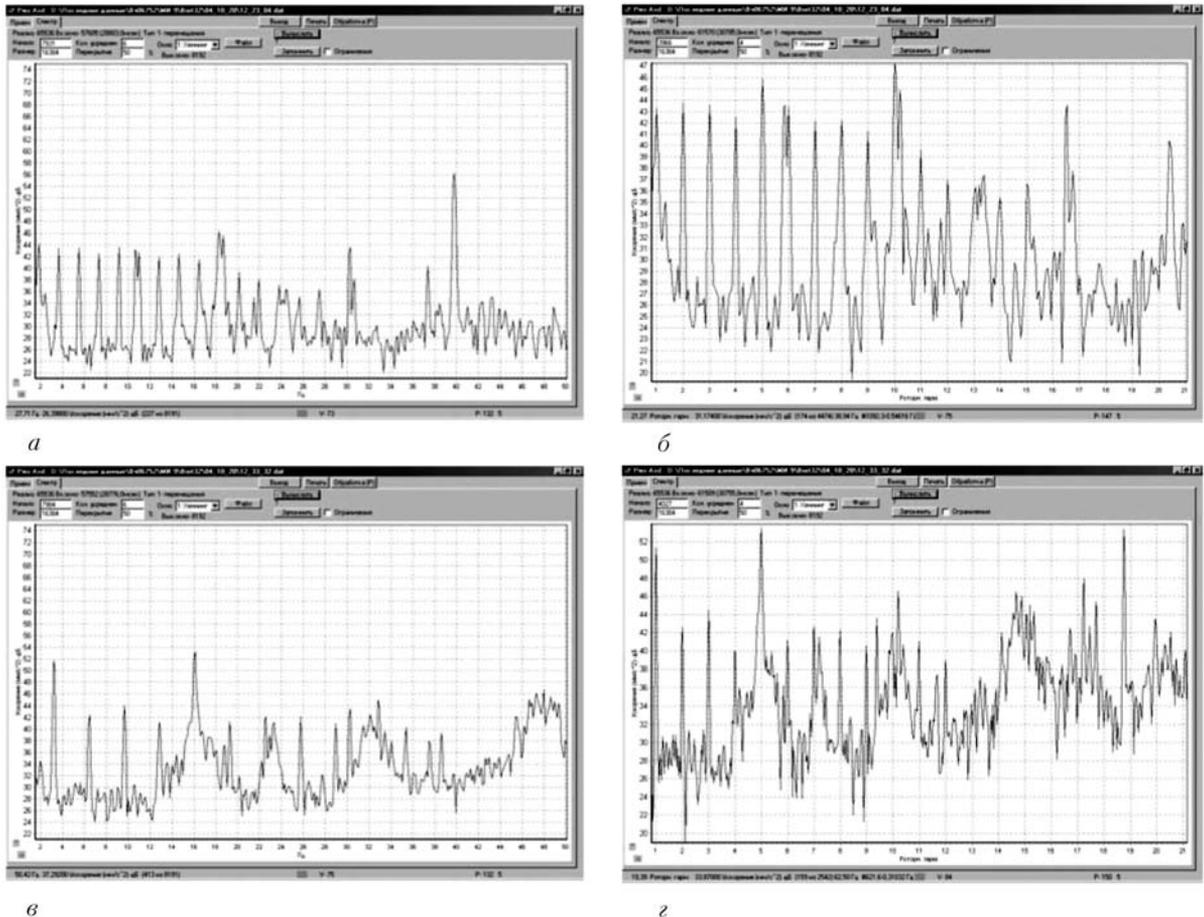


Рис. 4. Спектры вибрации главного редуктора вертолета: а, б — спектр вибрации и порядковый спектр вибрации соответственно главного редуктора вертолета (обороты несущего винта — 55 %); в, г — спектр вибрации и порядковый спектр вибрации главного редуктора вертолета (обороты несущего винта 95 %)

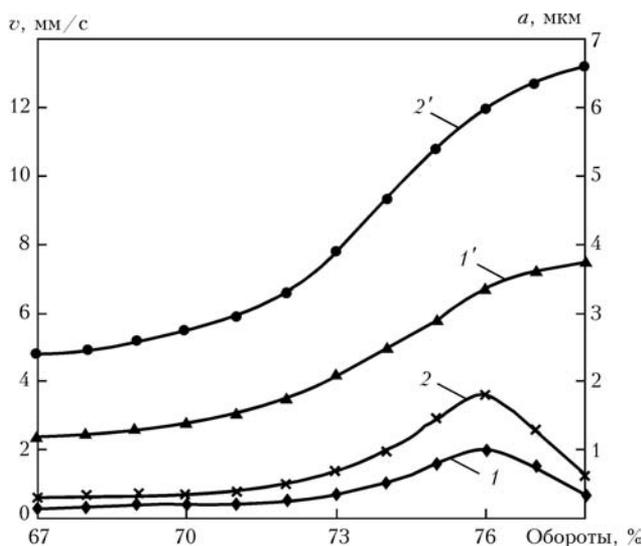


Рис. 5. Зависимость уровня первой и второй роторных гармоник от оборотов для КВД (датчик — средний, вертикальный): 1, 2 — виброскорость; 1', 2' — вибросмещение

бинных двигателей как для решения задач контроля их состояния, так и при доводке в условиях опытно-конструкторского производства.

Одним из эффективных методов решения диагностических задач является спектральный анализ огибающей, позволяющий обнаруживать дефекты, регистрация которых с помощью амплитудного спектра часто бывает практически невозможной.

Так, в случае незначительного дефекта на внутренней поверхности наружного кольца подшипника качения амплитудный спектр (рис. 6, а) не позволяет обнаружить гармонику, соответствующую данному дефекту (частота 32,5 Гц). На спектре же огибающей эта составляющая заметна достаточно хорошо (рис. 6, в).

Однако спектральный анализ огибающей не является универсальным методом, позволяющим регистрировать все виды неисправностей. Например, гармоника, характеризующая несбалансированность несущего винта вертолета (частота 18,2 Гц) легко обнаруживается на амплитудном спектре (рис. 6, б), в то время как на спектре огибающей она отсутствует (рис. 6, г).

В связи с этим важным является исследование и внедрение новых методов обработки сигналов с целью выявления диагностических признаков.

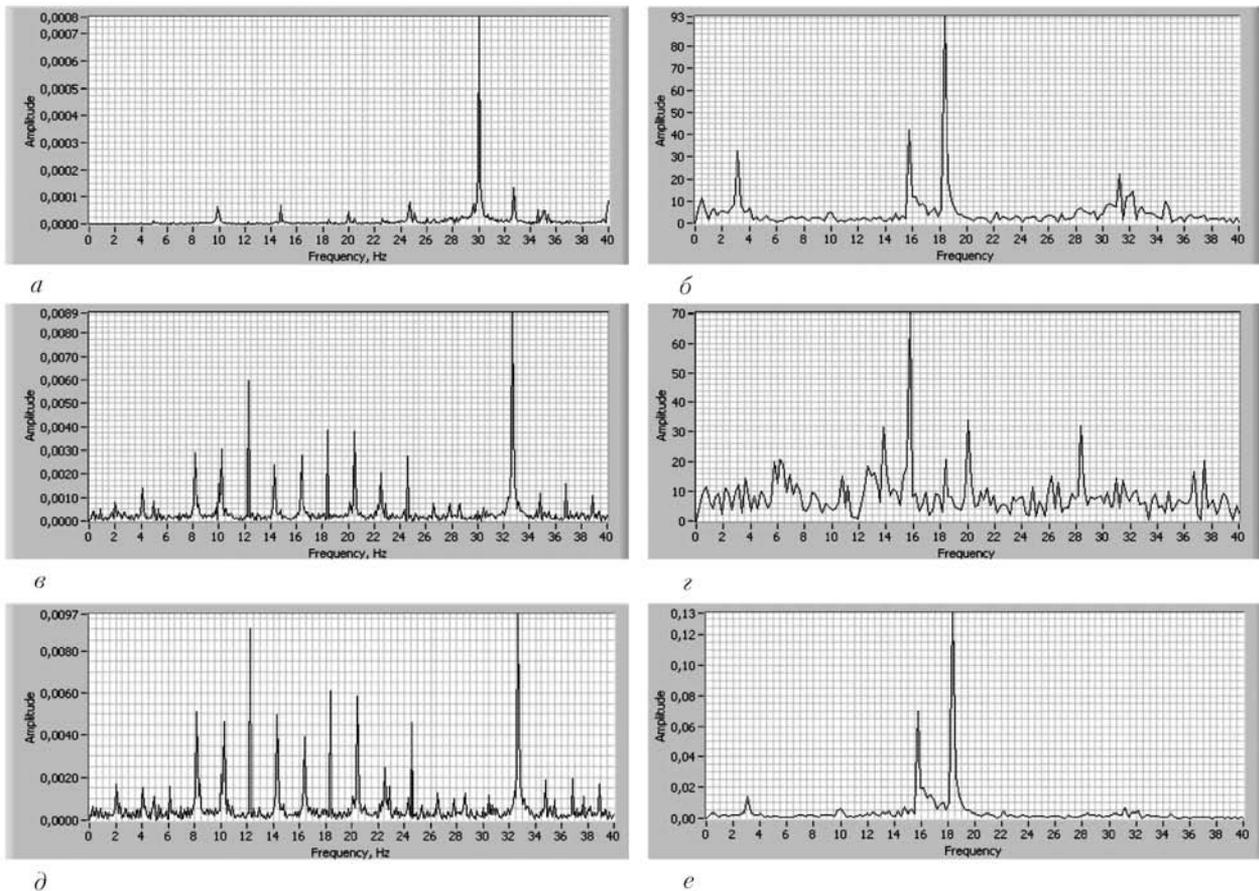


Рис. 6. Амплитудный спектр, спектр огибающей и вейвлет-анализ со спектром огибающей вибрации: а, в, д — подшипника с дефектом; б, г, е — вертолета с несбалансированным винтом

Так, например, совместное использование для анализа вибрации вейвлетов Морлета и спектра огибающей позволяет решать задачи как обнаружения дефектов подшипников (рис. б, д), так и дефекты, вызванные несбалансированностью несущего и рулевого винтов вертолетов (рис. б, е).

1. *Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей: Учеб. пособие* / Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов, К. А. Малиновский, В. Г. Попов. — М.: Высш. шк.; 2002. — 355 с.
2. *Принципы создания компьютеризованных систем вибродиагностики при инспекционном контроле роторного оборудования* / В. А. Босамыкин, Ф. Я. Балицкий, В. Н. Ковальский, А. Д. Текин // *Контроль. Диагностика*. — 1999. — № 5. — С. 49–51.

Беларус. гос. ун-т,  
Минск

Поступила в редакцию  
08.06.2006

### УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Приглашаем Вас разместить рекламную информацию (ч/б или в цвете) в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» в 2007 г.

Редакция журнала принимает активное участие в конференциях по НК и специализированных выставках в качестве отдельного экспонента и распространяет дополнительные тиражи среди участников и посетителей конференций и выставок.

Ждем Ваших предложений.

**Дополнительную информацию можно получить  
по тел.: (044) 271-23-90, 529-26-23; e-mail: journal@paton.kiev.ua**