



Ключевые слова:
диагностирова-
ние оборудования,
мобильные комплексы
для диагностирова-
ния, виброакустиче-
ская диагностика

Keywords:
diagnostics equipment
mobile complexes
for diagnosis,
vibroacoustic
diagnostics

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Михаил КОЗОЧКИН, Анатолий ГУСЕВ, Артур ПОРВАТОВ

В статье описываются различные методы диагностики состояния базовых узлов шлифовальных станков и мобильные диагностические комплексы.

This article describes various methods of diagnostics of basic nodes grinding machines and mobile diagnostic systems.

В настоящее время в МГТУ «СТАНКИН» по запросам промышленности ведутся исследования и практические разработки средств измерения технических параметров станочных узлов в цеховых условиях по методике, которая позволяет на основе обработки полученных результатов принять взвешенное решение о состоянии заводского оборудования, выявить скрытые дефекты и спрогнозировать возможные неполадки при его эксплуатации. Способность оборудования сохранять показатели точности в течение длительного времени эксплуатации является основным требованием современного производства. Мировые станкостроительные фирмы создали сервисные структуры, поддерживающие в первоначальном состоянии технологическое оборудование потребителя на основе регулярного контроля над важнейшими его узлами (в первую очередь, это требование относится к шпиндельным узлам) с целью своевременного выявления сбоев в их работе. В определенные интервалы времени контролируется набор заданных параметров, которые сравниваются с предыдущими замерами, что помогает оценить риск приближения тестируемого узла к критическому состоянию.

В каждом конкретном случае предлагается решить, какие параметры необходимо контролировать, какие средства использовать для измерения этих параметров в цеховых условиях, создается методика обработки результатов замеров для принятия взвешенного решения о состоянии узла и прорабатываются критерии, по которым эти решения принимаются. Впрочем, широко внедрить подобную практику сервиса оборудования в

заводскую среду сегодня весьма затруднительно. Это связано с тем, что на предприятиях-потребителях не хватает специалистов, способных решать эти задачи.

В МГТУ «СТАНКИН» провели испытания двух шпиндельных узлов шлифовальных станков. Оба узла были признаны годными к эксплуатации, но у второго узла при обкатке в течение часа на скорости 9000 мин⁻¹ температура корпуса в районе переднего подшипника оказалась на 15°С выше. Так как по замеру точности вращения шпинделя нельзя объяснить появление дефекта, было решено применить метод виброакустической (ВА) диагностики [1]. Метод ВА позволяет выявлять дефекты еще на стадии их зарождения, что может помочь принять своевременные меры по обслуживанию узла или отобрать лучший вариант конструкции станка, например, при его закупке.

На *рис. 1* показаны спектры ВА-сигналов, измеренных с помощью датчиков, зафиксированных на корпусах шпиндельных узлов в одинаковых условиях. Видно, что ВА-сигнал шпинделя № 2 (*б*) имеет в своем спектре составляющие, в 5 раз превышающие максимумы спектра шпинделя № 1 (*а*).

Диагностика состояния подшипников шпиндельных узлов традиционно проводится на основе метода спектрального разложения огибающей высокочастотного сигнала [1, 3]. На *рис. 2* представлены спектры виброускорений корпуса шпинделей исследуемых станков при частоте 9000 об/мин. Для построения огибающей с помощью полосового фильтра выделяется составляющая регистрируемого ВА-сигнала в диапазоне от 2,8 до 5,6 кГц. Далее по программе ВА-сигнал разбивается на временные

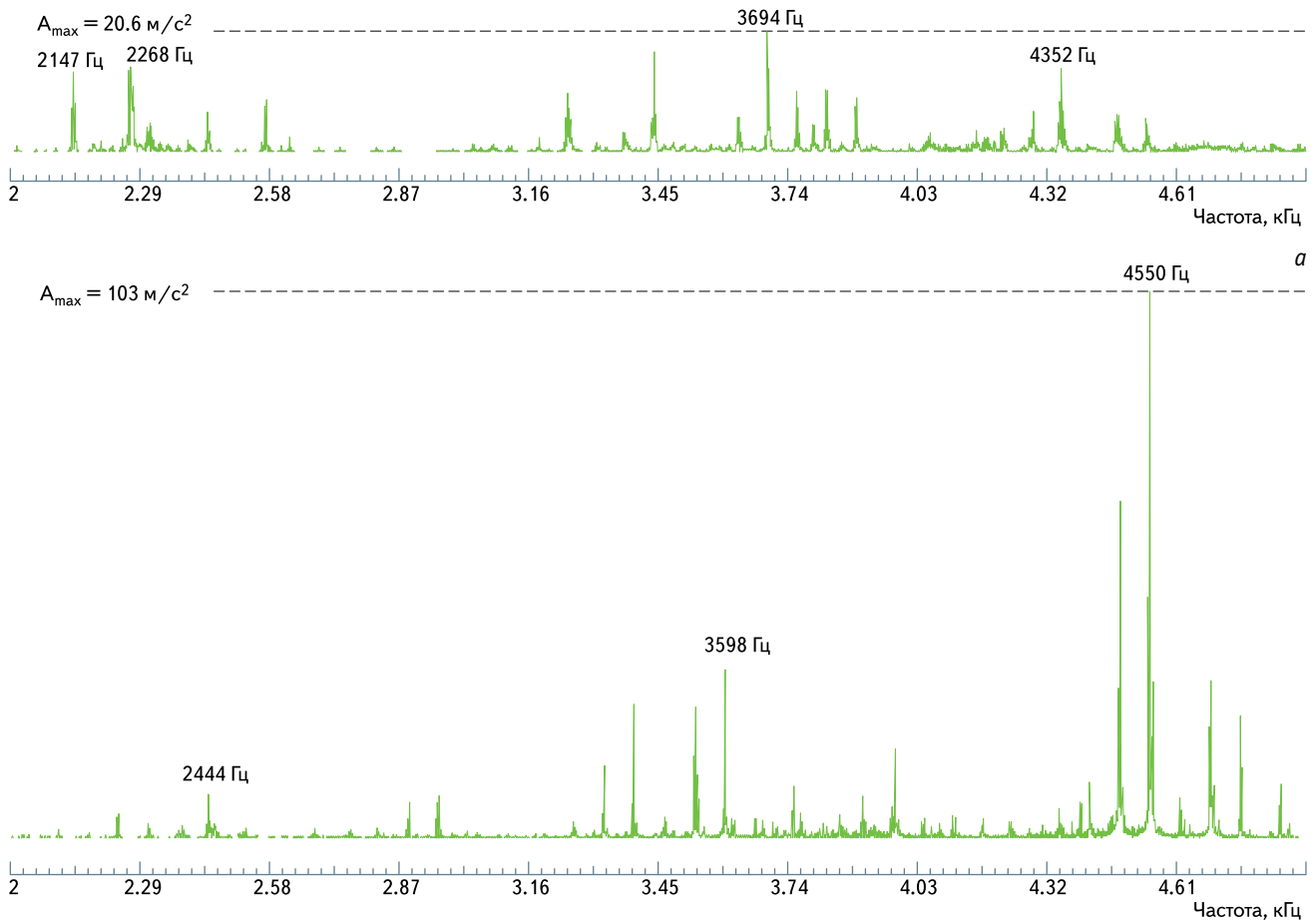


Рис. 1. Спектры виброускорений корпуса шпинделя при частоте 9000 об/мин.:

а — шпиндель № 1; б — шпиндель № 2

интервалы (величина интервала определяется диапазоном частот спектрального разложения).

Для каждого временного интервала определяют эффективное значение амплитуды и получают дискретное представление огибающей, которое затем разлагается в спектр. На рис. 2 представлены спектры огибающей для шпинделя № 1 (а) и для шпинделя № 2 (б). В каждом спектре наблюдаются три доминанты, которые проявляются на первой, второй и третьей гармониках, определяемых частотой вращения сепаратора относительно наружного кольца. Это свидетельствует или об износе шариков, или о перекосе подшипниковых колец друг относительно друга при сборке шпиндельного узла. Известно, что момент сил сопротивления вращению подшипника аналогичен характеру и амплитудам колебаний, вызываемых заеданием в сепараторе [2]. В приведенном примере в обоих шпинделях проявляются колебания, связанные с вращением сепаратора, однако видно, что у второго шпинделя амплитуда этих гармоник в несколько раз большая, чем у шпинделя № 1.

Ранее для диагностирования состояния опор шпинделя использовали частотные характери-

сти, получаемые экспериментально путем импульсного нагружения, но к самим подшипникам такой метод не применяется. На рис. 3 показаны амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) шпинделя № 2, построенные по двум взаимно перпендикулярным плоскостям — вертикальной (ось Z) и горизонтальной (ось Y). Акселерометр устанавливался на корпусе шпинделя в радиальном направлении. Динамометрическим молотком наносились удары по концу шпинделя в этом же направлении. Вектор импульсного воздействия и ось акселерометра лежали в одной плоскости, проходящей через ось шпинделя (Y), хотя, в принципе, АЧХ не должна существенно зависеть от выбора плоскости расположения ударного импульса и акселерометра. Видно, что в направлении оси Y акустическая податливость, особенно в районе частоты 1257 Гц, значительно выше, чем податливость по оси Z. Это можно трактовать как следствие неравномерного радиального натяга в подшипнике, вызванного искажением геометрической точности наружного кольца при монтаже.

Построение АЧХ дает полезную информацию о состоянии подшипникового узла [3], но такая

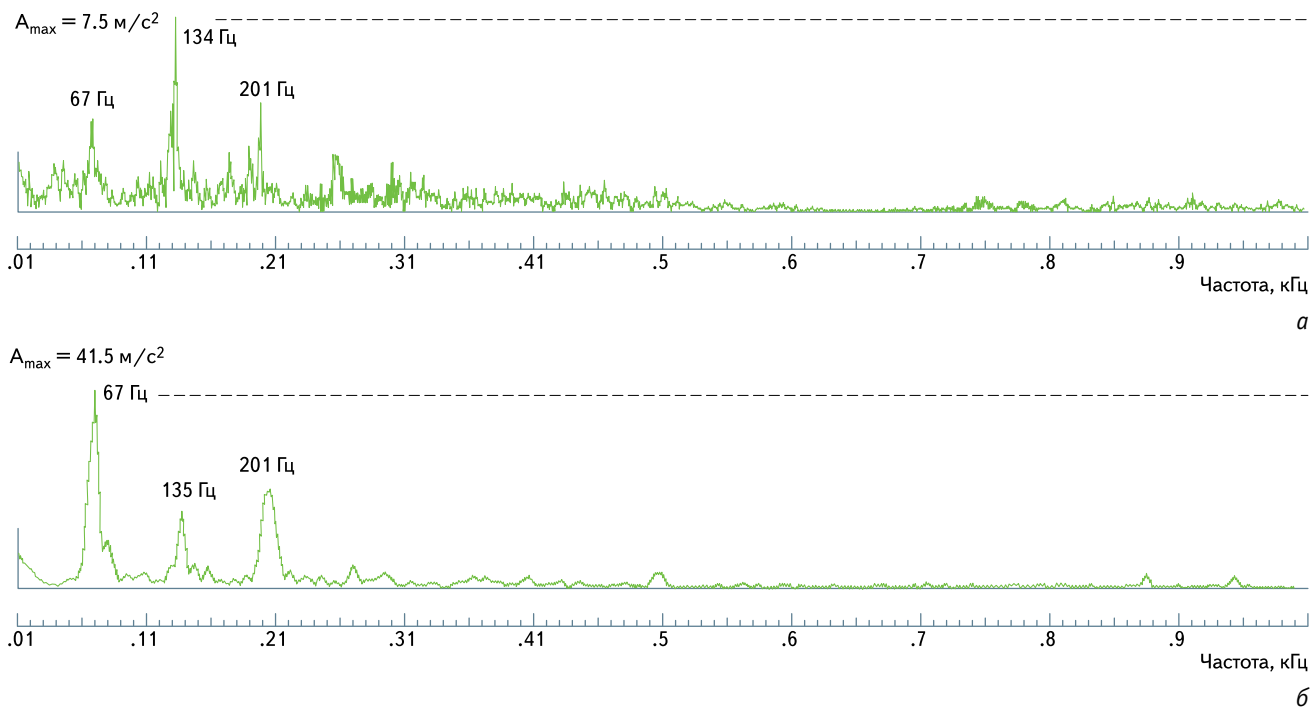


Рис. 2. Спектры огибающей ВА-сигнала шпинделя № 1 (а) и шпинделя № 2 (б) в октавной полосе со средней геометрической частотой (СГЧ) 4 кГц

методика связана с необходимостью применения динамометрического молотка, который не всегда есть на предприятии.

Информацию о качестве работы шпинделя можно получить, подключая к стенду для обкатки шпинделя не один, а два или три акселерометра, установленных по направлению координатных осей. С их помощью отслеживаются векторы виброускорения, виброскорости или виброперемещения. Рис. 4 представляет собой объемное изображение распределения векторов вибраций при холостом вращении шпинделей с частотой 9000 об/мин. На рис. 4, а показано объемное изображение колебаний в октаве с СГЧ 4 кГц для шпинделя № 1 (ось Y расположена горизонтально, а ось Z – перпендикулярно к ней, ось X совпадает с осью шпинделя). В центре выделено ядро распределения. В этих ячейках пространства вектор колебаний присутствует

основное время. В других частях пространства, обозначенных точками, вектор колебаний тоже бывает, но реже. Для сравнения на рис. 4, б отображена аналогичная картина для шпинделя № 2.

Обращает на себя внимание тот факт, что пространственное изображение колебаний шпинделя № 2 имеет больший (почти в 2 раза) разброс позиций вектора в пространстве и большую вытянутость распределения вдоль оси Y. Это подтверждает вывод, сделанный с помощью анализа АЧХ. Таким образом, большая акустическая податливость порождает большой разброс высокочастотных колебаний. Соответственно, по форме и размаху пространственного изображения можно судить о ряде недостатков, которые могут наблюдаться при диагностике любого шпиндельного узла.

На рис. 5 показаны формы представления колебаний, полученных с двух акселерометров, стоя-

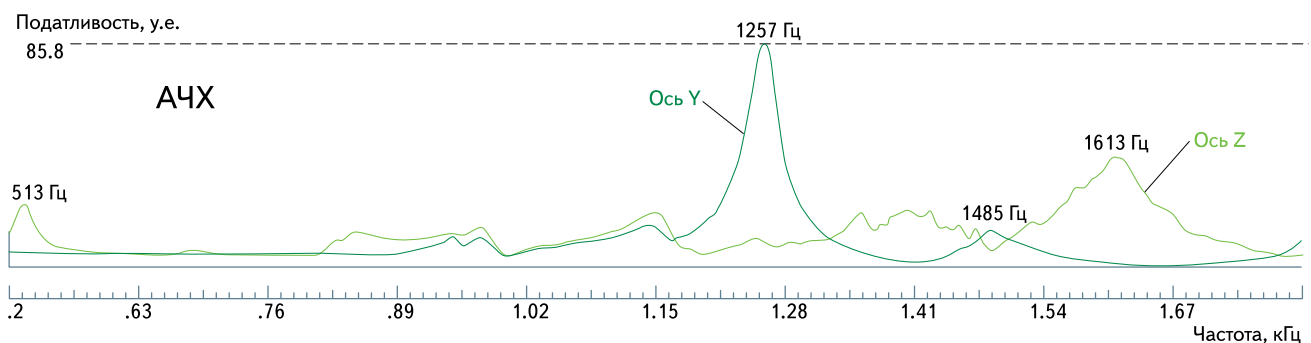


Рис. 3. АЧХ шпинделя № 2 по осям Z и Y

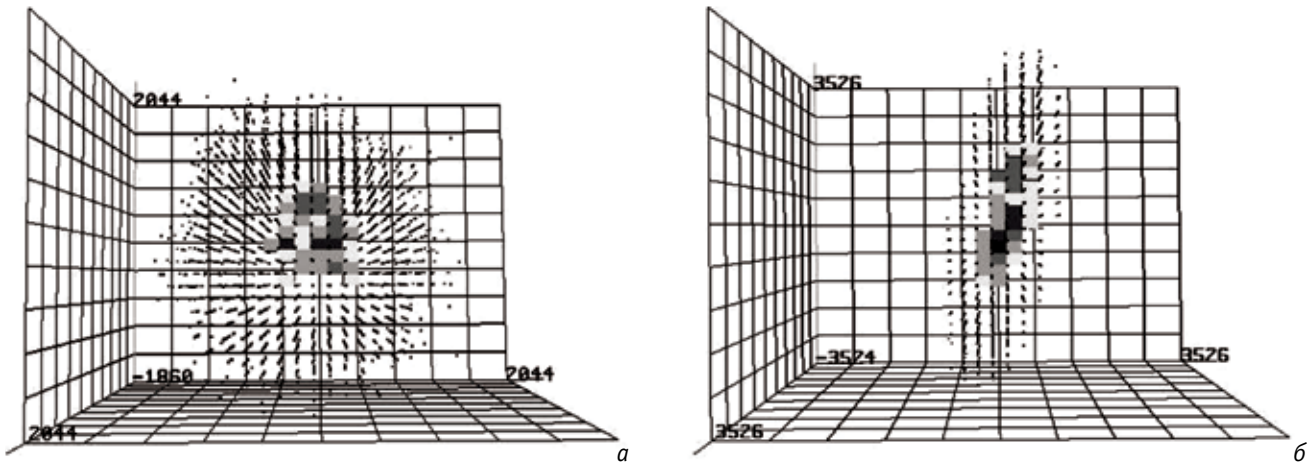


Рис. 4. Объемное изображение колебаний в октаве с СГЧ 4 кГц со стороны оси Z:

а — шпиндель № 1; б — шпиндель № 2

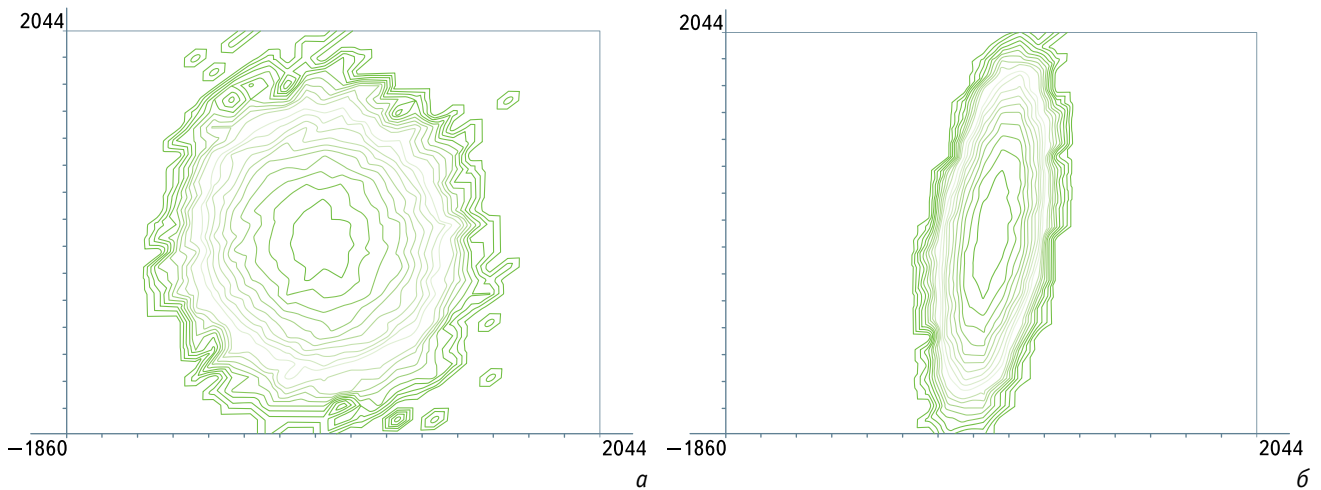


Рис. 5. Распределение колебаний в точках плоскости XY:

а — шпиндель № 1; б — шпиндель № 2

щих на корпусе шпинделя по осям Y и Z. Здесь разброс позиций вектора в пространстве изображен линиями равного уровня (изоклинами). По сути, это изображение проекций распределения, представленного на рис. 4 в плоскости YZ. Здесь так, как и на рис. 4, виден рост размаха колебаний и их вытянутость по оси Y у шпинделя № 2 (б) по сравнению со шпинделем № 1 (а).

Пример непосредственной записи ВА-сигналов с акселерометров, установленных на корпусе в районе передней опоры шпиндельного узла при вращении шпинделя с частотой 2267 об/мин, приведен на рис. 6.

На рис. 6 проявляется мелькание шариков (на 2 оборота — 15–16 ударов). Модуляция всего сигнала, вызываемая работой шариков, в свою очередь, модулирована четырехкратной частотой вращения сепаратора. Это может свидетельствовать о

неравномерном радиальном натяге и об искажении формы наружного кольца.

Опираясь на результаты приведенных выше методов диагностики по выявлению зарождающихся дефектов и других подобных исследований, описанные в специальной литературе [1, 4], можно определить минимальный набор средств, которые помогут провести мониторинг шпиндельных узлов в малоприспособленных для этого условиях заводского цеха.

Отвечающий требованиям простоты в эксплуатации мобильный диагностический комплекс должен содержать 2–3 акселерометра, датчик оборотов и средства измерения температуры. В ряде случаев, если известны доминирующие признаки дефектов, будет достаточно и двух акселерометров. Большое значение в цеховых условиях имеет независимость диагностических комплексов от

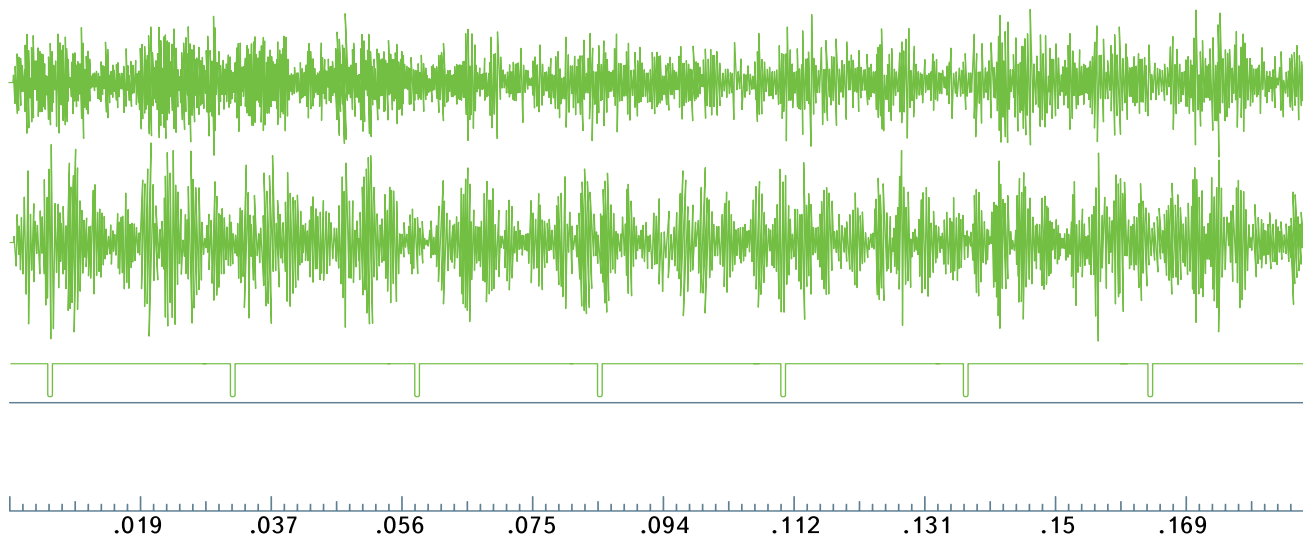


Рис. 6. Пример записи ВА-сигнала от работающего шпиндельного узла

источников питания, что позволяет ускорить процедуру настройки.

На 10-й Европейской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике (ECNDT), прошедшей летом 2010 г. в Москве, МГТУ «СТАНКИН» продемонстрировал портативный мобильный диагностический комплекс, имеющий два измерительных канала для приема и обработки ВА-сигналов. В состав системы вошли:

- модуль аналогового преобразования (МАП), включающий в себя источник питания датчиков;
- фильтр низких частот (ФНЧ) с граничной частотой 22 кГц (на уровне 3дБ, крутизна спада 40 дБ/дек);
- плата сбора данных E14-140 производства компании Л-Кард (Россия);
- специальное программное обеспечение, разработанное при помощи пакета программ NI LabVIEW – 2009.

МАП предназначен для питания, согласования и фильтрации сигналов вибродатчиков со встроенной электроникой ICP (*Integrated Circuit Piezoelec-*

tric) – 2 канала. Он состоит из трех функциональных узлов: импульсного источника питания (ИИП), блока согласования и фильтра низких частот второго порядка. Система получает питание с напряжением 5 В от порта USB персонального компьютера, которое с помощью ИИП повышается до 20 В. ИИП обеспечивает питание датчика через узел согласования сигнала, так как для питания и передачи сигналов датчиков со встроенной электроникой используется один и тот же проводник.

Особенностью устройства является возможность работать от любого источника питания +5В, например, от порта USB персонального компьютера, так как ток потребления не более 200 мА (для USB максимальный ток – 500 мА). Питание ФНЧ осуществляется напряжениями (+15, –15) В от источника, расположенного в системе сбора данных. При необходимости фильтры могут быть отключены при помощи внутренних перемычек. Блок-схема устройства показана на рис. 7, а модуля аналогового преобразования – на рис. 8. Технические характеристики МАП представлены в таблице.

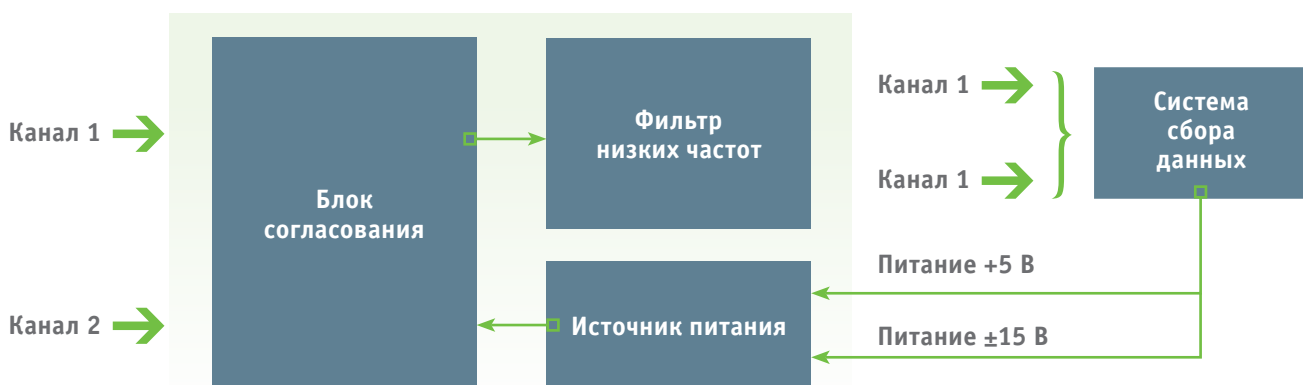


Рис. 7. Блок-схема устройства



Рис. 8
Модуль аналогового преобразования

Система сбора данных представляет собой аналогоцифровой преобразователь (АЦП) сигналов в виде платы E14-140, с возможностью подключения до 16 дифференциальных каналов с максимальной частотой дискретизации 100 кГц (зависит от количества подключенных каналов). В составе разработанного портативного мобильного диагностического комплекса плата E14-140 работает для двух каналов с максимальной частотой преобразования 50 кГц на каждый канал. Плата соединяется с ПК при помощи интерфейса USB 1.1/2.0, по которому и получает питание.

Применение описанных МАП и АЦП позволяет проводить измерения автономно с использованием ноутбука без сетевого питания 220 В.

Специальное программное обеспечение (ПО) для данного диагностического комплекса создано при помощи программного комплекса (может быть, на основе версии LabVIEW2009 и без NI) NI LabVIEW2009, применяемого для разработки промышленных систем измерения и контроля. Для решения конкретной задачи диагностического контроля в ПО предусмотрен протокол, куда автоматически заносятся все параметры узла и контролируемых сигналов, зафиксированные во время теста. Этот протокол хранится в памяти для сравнения с результатами будущих тестов.

При достаточной базе данных выводы по результатам сравнения результатов тестов могут выполняться автоматически с помощью специализированного ПО. По мере накопления статистических данных анализ протоколов смогут проводить специалисты предприятий. Для создания автоматической системы диагностирования должны использоваться дополнительные данные об отказах узлов в результате эксплуатации, результатах контрольных измерений после разборки узла и т.п.

Выводы

Необходимо учитывать, что в основе любой системы диагностирования лежит не ПО и не средства измерения диагностических признаков, а глубокие знания процессов, происходящих в узле станка при его работе и увеличения числа повреждений. Однако наличие удобных и компактных средств, позволяющих регистрировать и анализи-

Таблица. Технические характеристики МАП

Наименование	Значение
Входной сигнал, В	+ (20 ÷ 25) В
Выходной сигнал, В	±5 В
Полоса пропускания (на уровне 3 дБ), Гц	5...20`000
Ток питания датчика, мА	4,7±10%
Напряжение питания датчика, В	+20
Коэффициент пульсаций, В	0,05%
Напряжение питания устройства, В	+5, ±15
Ток потребления, мА	<200
Габариты, мм	110 x 60 x 32
Масса, г	200

ровать сигналы, связанные с процессами в узлах станка или с процессами обработки изделия, позволяют быстрее накапливать необходимые знания и создавать формализованные алгоритмы.

На основании требований к составу и характеристикам могут быть созданы универсальные мобильные диагностические комплексы с различными датчиками, охватывающими большинство задач отраслевого масштаба, или двух-, трехканальные портативные модульные комплексы, легко трансформируемые под контроль сигналов в широком спектре значений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / Учебное пособие. — СПб.: Издательский центр СПбМТУ, 2000. 159 с.
2. Рагульскис К.М., Юркаускас А.Ю., Атступенас В.В. и др. Вибрации подшипников. — Вильнюс: Минтис, 1974. 392 с.
3. Козочкин М.П., Сабиров Ф.С., Суслов Д.Н., Абрамов А.П. Виброакустическая диагностика опор шпинделей станков для высокоскоростной обработки // СТН. 2010. № 6. С. 17–21.
4. Козочкин М.П., Сабиров Ф.С. Роль виброакустической диагностики в исследовании и отладке шпиндельных узлов // Комплект: инструмент, технология, оборудование. 2009. № 1. С. 36–39.

Михаил Павлович КОЗОЧКИН —

доктор технических наук, профессор МГТУ «СТАНКИН»

Анатолий Васильевич ГУСЕВ —

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник МГТУ «СТАНКИН»

Артур Николаевич ПОРВАТОВ —

кандидат технических наук, доцент МГТУ «СТАНКИН»