

ВИБРАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ СТАНОЧНОМ ОБОРУДОВАНИИ

М. П. КОЗОЧКИН, А. Н. ПОРВАТОВ, Ф. С. САБИРОВ

*Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Москва, Россия, e-mail: fanira5057@yandex.ru*

Рассмотрены вопросы создания диагностических комплексов для анализа состояния технологических систем как на стадии изготовления оборудования, так и на стадии эксплуатации. Приведены сведения о создании диагностических комплексов с телеметрической связью.

Ключевые слова: *вибрационный контроль, технологический процесс, диагностический комплекс, информационно-измерительная система.*

The creation of diagnostic complexes for the state of technological systems analysis both at the manufacturing and operating stages is considered. The information on works on creation of diagnostic complexes with telemetric communication is presented.

Key words: *vibration control, technological process, diagnostic complex, diagnostic of cutting process.*

Любой промышленный объект, эксплуатация которого в течение длительного времени предполагает отсутствие обслуживающего персонала, необходимо оснащать системами диагностики (СД). Особенности конструкции СД определяются решаемыми задачами, требованиями к надежности систем, входящих в состав объекта, и объему негативных последствий, вызванных отказом его элементов. Актуальность использования СД в автоматических системах металлообработки, производственных системах, состоящих из обрабатывающих центров, объединенных транспортными системами заготовок, инструмента, оснастки, постоянно растет. В современных обрабатывающих центрах применяется кабинетная структура ограждения рабочей зоны, которая защищает окружающее пространство от стружки, смазывающе-охлаждающих технологических средств, осколков режущего инструмента (РИ) в случаях его поломки, но не позволяет оператору вести

надежный мониторинг за его состоянием. В этих случаях невозможно обойтись без СД, в которых важную роль имеют входящие в их состав различные информационно-измерительные системы (ИИС). На основании собираемой информации СД выдает заключение о текущем состоянии отдельных узлов оборудования и состоянии РИ. Анализ информации может проходить как по каждому источнику отдельно, так и в виде решения системы уравнений, связывающих все или несколько источников информации одновременно. По полученным результатам о функциональном состоянии процесса резания и отдельных узлов оборудования принимается решение, меняющее режимы обработки и настройки оборудования, дающее команды на замену РИ или остановку работы оборудования [1].

Многообразие технологических процессов обработки порождает различные подходы к построению СД, определяемые видами источников информации, лежащих в основе ИИС. Наибольшее распространение получили источники информации об изменениях силовых параметров, сопровождающих процесс резания. Однако на заключительных этапах при помощи первичных преобразователей, контролирующих деформации или электрические параметры приводов, не всегда удается получить адекватные результаты о состоянии РИ и качестве процесса резания. В этих случаях можно использовать методы виброакустической (ВА) диагностики, основанные на исследовании различных параметров, непосредственно связанных с зоной резания [2], что позволяет подбирать подходящие алгоритмы для мониторинга различных технологических процессов. Особенность ВА-сигналов — способность передавать информацию из самой зоны резания [3, 4].

Большим неудобством промышленного применения первичных преобразователей, включая и акселерометры, является прокладка соединительных кабелей для передачи информации и энергии. Это особенно заметно на объектах большой протяженности, к которым относятся и автоматизированные технологические комплексы. Часто решение о необходимости оснащения технологического комплекса СД принимается уже на стадии эксплуатации оборудования. В этом случае прокладка кабелей по функционирующим станкам становится существенным препятствием и источником сбоев в работе СД и всего технологического комплекса [4].

При большом количестве удаленных друг от друга объектов автоматизации используют так называемую распределенную СД, в кото-

рой все компоненты территориально разнесены и независимы, но каждый из них взаимодействует с остальными для выполнения общей задачи (измерение, анализ, управление). При этом остро встает вопрос передачи результатов измерений непосредственно в систему управления всем комплексом или на автоматизированное рабочее место оператора. Основа функционирования распределенной СД — промышленная сеть, объединяющая все компоненты. Передача данных в промышленной сети может осуществляться по упомянутым выше сигнальным кабельным линиям, оптоволокну или при помощи беспроводных технологий. Причем независимо от способа передачи измерительного сигнала канал передачи характеризуется, прежде всего, помехоустойчивостью к внешним воздействиям, что особенно актуально в условиях значительного уровня помех на машиностроительном производстве. Применение беспроводных технологий передачи данных обусловлено требованиями, вытекающими из условий построения СД: большие расстояния между чувствительными элементами и центром управления технологическим комплексом; необходимость закрепления датчиков на подвижных частях станков; сложность объекта и, как следствие, большое количество первичных преобразователей.

В общем случае ИИС с беспроводной передачей измерительной информации состоит из передающего и принимающего устройств. Функции передающего устройства (передатчика) — преобразование аналоговой величины (виброускорения, силы резания и др.) в цифровой код посредством аналого-цифрового преобразователя (АЦП). При этом к передатчику предъявляются следующие основные требования: точность измерения, скорость передачи и ее дальность.

Точность измерений определяется характеристиками передатчика, а именно диапазоном входных сигналов с датчика, разрядностью и частотой дискретизации АЦП. Для вычисления необходимой разрядности АЦП, как правило, используют среднее квадратическое значение (СКЗ) отношения сигнал—шум (SNR — signal-noise-ratio), которое для идеального N -разрядного преобразователя определяется как [5]:

$$SNR = 20 \lg [\text{сигнал/шум}] = 6,02N + 1,76 \text{ дБ.} \quad (1)$$

Суммарная приведенная среднеквадратическая погрешность АЦП состоит из погрешностей квантования и дискретизации:

$$\delta_{\Pi} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \sqrt{N_{\kappa}^{-2} + 12\sigma^2 T_0 / (L^2 \tau_{\kappa})}, \quad (2)$$

где $L = qN_{\kappa}$ — диапазон измерения, N_{κ} — число уровней квантования, q — напряжение, равное одному младшему значащему разряду; $\sigma^2 = M[y^2(t)] = M[(y'(t))^2]$ — дисперсия процесса $y(t)$; T_0 — период дискретизации; τ_{κ} — постоянная времени корреляции измеряемого процесса.

Требуемая скорость передачи определяется с учетом максимальной частоты дискретизации и разрядностью АЦП. Необходимо отметить, что информация в упомянутых выше сетях передается пакетами, которые содержат помимо результатов измерений еще и служебную информацию, размер которой, как и весь размер пакета, меняется в зависимости от используемого стандарта передачи. Кроме этого на скорость передачи отдельных узлов влияет их количество в сети [5]:

$$v = N_{\kappa} N_y (f_{\text{д}} n + H_{\text{с}}), \quad (3)$$

где N_y — количество соседних узлов; $H_{\text{с}}$ — размер служебных данных в посылке (бит); n — количество узлов в сети; $f_{\text{д}}$ — частота дискретизации.

Для оценки дальности передачи в помещении можно воспользоваться формулой для расчета потерь [6]:

$$P_L = 20 \lg [R\lambda/4\pi] - 10k \lg R, \quad (4)$$

где k — степенной показатель, величина которого зависит от окружающей обстановки и частоты сигнала (например, для частоты 2,4 ГГц в условиях цеха $k = 3,3$, а в офисе $k = 1,8$).

В промышленности при построении беспроводных распределенных систем и сенсорных сетей (Wireless Sensor Network, WSN) в нелицензируемом диапазоне частот ISM (Industrial, Scientific and Medical) чаще всего применяют следующие стандарты интерфейсов передачи:

ZigBee/IEEE 802.15.4 — технология ретранслируемой радиосвязи;

Bluetooth/IEEE 802.15.1 — беспроводная персональная сеть;

Wi-Fi/IEEE 802.11 — беспроводное расширение сетей Ethernet.

Интерфейс передачи Bluetooth, несмотря на распространенность, не подходит для построения сетей сложной конфигурации при значи-

тельном времени автономной работы. В отличие от него ZigBee позволяет реализовать миниатюрные автономные узлы, работающие до шести месяцев от одного заряда батарей, но его скорость передачи ограничивает применение этого интерфейса для быстропротекающих процессов. Интерфейс Wi-Fi предоставляет огромные возможности по конфигурации системы за счет большей скорости передачи, дальности связи и количества устройств в сети, но не позволяет долго использовать автономные источники питания из-за большого потребления тока.

В соответствии с перечисленными требованиями к передающему узлу, входящему в ИИС, возникает вопрос оценки необходимого количества и качества измерительной информации.

Один из параметров качества информации — полнота, определяемая коэффициентом

$$P = R_p/R,$$

где R_p — число регистрируемых ИИС параметров объекта; R — общее число параметров объекта.

Информация может быть полной $P = 1$, неполной $P < 1$ и избыточной $P > 1$. При $P < 1$, $P > 1$ могут возникнуть дополнительные искажения, связанные как с недостатком информации при постановке диагноза, так и с увеличившимся объемом вычислений при избыточной информации. Однако следует отметить, что в большинстве случаев информационная избыточность (константы, статистические характеристики и др. значения, неизменные или медленно изменяющиеся с течением времени) позволяет значительно повысить точность и достоверность получаемой информации.

Общее число параметров объекта достаточно велико, поэтому необходимо сократить их количество до приемлемого для ИИС. Это можно сделать, используя критерий информативности параметра. Для СД информативность параметра, по которому проводят диагностирование, может определяться как отношение изменения измеряемого параметра к изменению параметра состояния объекта. Параметрами состояния объекта, в свою очередь, могут быть: износ инструмента, уровень вибрации при холостом ходе, сила резания при работе резцом без износа, температура окружающей среды и др.

Кроме информативности могут быть использованы также критерии однозначности, стабильности и чувствительности. Под однознач-

ностью понимается, что одному интервалу изменения значения параметра должно соответствовать одно единственное состояние объекта. Стабильность параметра определяется дисперсией его измерений при неизменных условиях и состоянии объекта. Чувствительность характеризует скорость приращения параметра при изменении технического состояния диагностируемого объекта.

Главными критериями при построении ИИС для задач диагностики являются информативность и чувствительность параметров, которые используются для формирования диагноза. Информативность можно оценить количественно с точки зрения вероятности. Пусть $f_1(p)$, $f_2(p)$ — функции распределения параметров, по которым проводится диагностика для исправного и неисправного объектов, соответственно. Тогда, принимая во внимание, что при большом количестве измерений эти распределения стремятся к нормальному, построим график распределения для информативного p_1 и неинформативного p_2 параметров (рис. 1). Из рис. 1 следует, что чем больше площадь перекрытия, тем менее информативным становится параметр. Таким образом, информативность можно оценить количественно при помощи коэффициента

$$K = P_1(p_T) / [P_1(p_T) + P_2(p_T)],$$

где P_1 , P_2 — вероятности для текущего параметра p_T исправного и неисправного объектов, соответственно.

Чувствительность параметра диагностирования количественно можно определить, если известно как изменилось состояние контролируемого объекта, например для инструмента — износ.

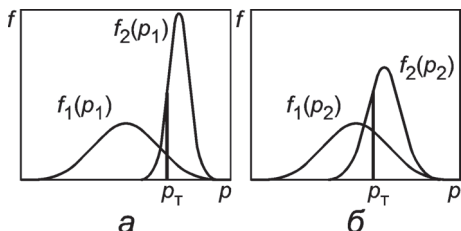


Рис. 1. График распределения информативного (а) и малоинформативного (б) диагностических параметров для исправного 1 и неисправного 2 объектов

В качестве примера можно привести ВА-сигнал, спектр которого достаточно широк (до 22 кГц), поэтому в соответствии с теоремой Котельникова частота дискретизации должна быть как минимум в 2 раза больше (от 44 кГц). Данное обстоятельство, принимая во внимание разрядность передаваемой информации (ми-

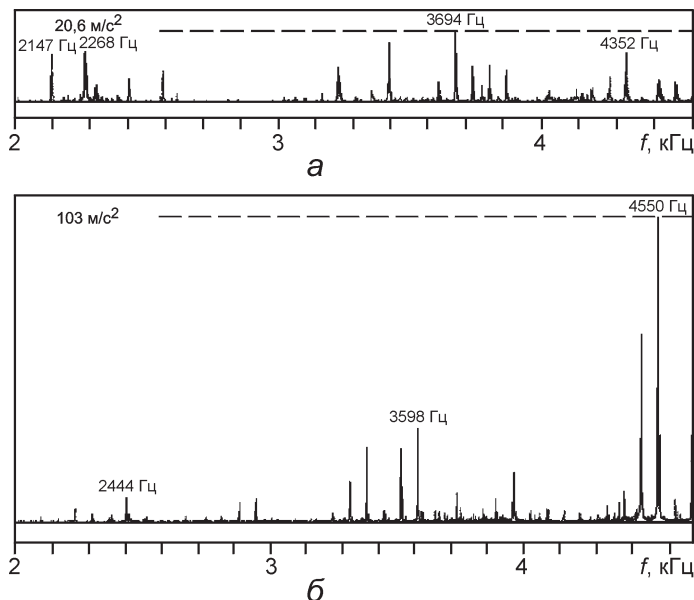


Рис. 2. Спектры ВА-сигналов корпусов шпинделей № 1 (а), № 2 (б) при частоте вращения 9000 мин^{-1}

нимум 12 бит), приводит к необходимости оптимизировать процесс выделения диагностического параметра непосредственно в устройстве передачи. При этом по радиоканалу достаточно передавать изменение амплитуды какой-либо огибающей ВА-сигнала в нужном частотном диапазоне. Огибающая ВА-сигнала может содержать информацию об изменении его пиковых значений или СКЗ. При этом частота ее опроса может находиться в пределах 1 кГц. Это позволяет решать, например, на шлифовальных станках следующие задачи: фиксировать момент касания шлифовальным кругом детали, контролировать процесс засаливания инструмента, следить за процессом правки и управлять им. При работе торцевой фрезой при помощи ВА-сигнала, контролируемого в одном частотном диапазоне, можно вести мониторинг износа фрезы, а контролируя огибающую ВА-сигнала в двух частотных диапазонах при точении, надежно оценивать износ инструмента [7].

Ниже приведены результаты испытаний двух шлифовальных шпинделей. Оба шпинделя были признаны годными к эксплуатации, но у

второго шпинделя температура корпуса в районе переднего подшипника при обкатке в течение часа с частотой вращения 9000 мин^{-1} была на 15°C выше. Следует отметить, что на начальной стадии развития дефектов непосредственные измерения точностных параметров шпинделя могут не дать результатов, поскольку погрешности возникают позднее, когда дефект уже разовьется до критических размеров.

На рис. 2 показаны спектры ВА-сигналов, зафиксированных на корпусе шпинделей в одинаковых условиях: спектр ВА-сигнала шпинделя № 2 (рис. 2, б) имеет составляющие, в пять раз превышающие максимумы в спектре ВА-сигнала шпинделя № 1 (рис. 2, а).

Виброакустическая диагностика состояния подшипников традиционно проводится на основе метода спектрального разложения огибающей высокочастотного сигнала [8, 9]. На рис. 3 представлены спектры огибающих ВА-сигналов для двух шпинделей. Для построения огибающей из регистрируемого ВА-сигнала при помощи полосового фильтра была выделена составляющая в диапазоне $2,8\text{--}5,6 \text{ кГц}$. Далее сигнал разбивался на временные интервалы, значения которых определяли в соответствии с требуемым частотным диапазоном спектраль-

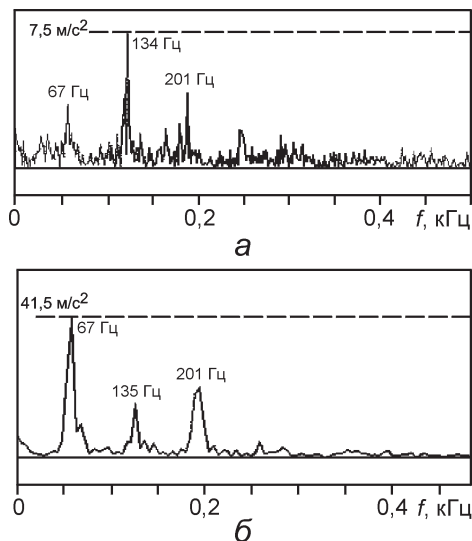


Рис. 3. Спектры огибающей ВА-сигнала со шпинделей № 1 (а), № 2 (б) в октавной полосе со средней геометрической частотой 4 кГц при частоте вращения 9000 мин^{-1}

ного разложения. Для каждого интервала находили эффективную амплитуду, в результате получали дискретное представление огибающей, которое затем разлагали в спектр. На рис. 3, *а* представлен спектр огибающей для шпинделя № 1, а на рис. 3, *б* — для шпинделя № 2. На обоих спектрах по три доминирующих пика первой, второй и третьей гармоник, определяемых частотой вращения сепаратора относительно наружного кольца. Это может свидетельствовать об износе тел качения и о перекосе подшипниковых колец относительно друг друга при сборке шпиндельного узла.

Момент сил сопротивления вращению подшипника аналогичен характеру и амплитудам колебаний, вызываемых заеданием в сепараторе [10]. В приведенном примере в обоих шпинделях проявляются колебания, связанные с вращением сепаратора, однако у шпинделя № 2 амплитуда этих гармоник в несколько раз больше, чем у шпинделя № 1.

Таким образом, можно сделать вывод, что не обязательно передавать всю измерительную информацию, полученную ИИС, а достаточно лишь оптимально подобрать правильный состав и структуру разрабатываемой ИИС.

Из представленных примеров и обзора литературы по выявлению зарождающихся дефектов в подшипниковых и шпиндельных узлах можно определить минимальный набор средств их контроля в цехе или других мало приспособленных условиях [8, 11].

Из опыта проведения работ в цеховых условиях возникло дополнительное требование к мобильным СД, заключающееся в их автономности. Независимость от источников питания позволяет ускорить процедуру настройки и во многих случаях избавиться от лишних помех.

На 10-й Европейской конференции по неразрушающему контролю МГТУ «СТАНКИН» представил мобильную СД (рис. 4), имеющую два измерительных канала для контроля ВА-сигналов. Система питается напряжением 3,7 В от встроенного Li-Ion аккумулятора. В ее состав входит: модуль аналогового преобразования (МАП); система сбора данных; специальное программное обеспечение, разработанное при помощи пакета программ NI LabVIEW. Указанный МАП предназначен для питания, согласования и фильтрации сигналов вибродатчиков со встроенной электроникой (ICP — Integrated Circuit Piezoelectric) и состоит из трех функциональных узлов: импульсного источника питания датчиков, блока согласования и фильтра низких частот (ФНЧ)

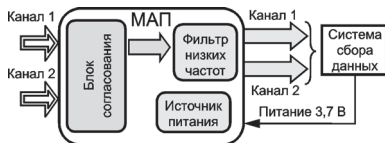


Рис. 4. Блок-схема мобильной СД с двумя измерительными каналами для контроля ВА-сигналов:

МАП — модуль аналогового преобразования

2-го порядка с граничной частотой 5 кГц (на уровне -3дБ , крутизна спада 40 дБ/дек). Импульсный источник питания повышает входное напряжение с 3,7 до 20 В и обеспечивает питание датчика через узел согласования сигнала, так как для питания и передачи сигналов датчиков со встроенной электроникой используется один и тот же проводник.

Особенность устройства — возможность работать от любого источника питания в диапазоне 3,7—5 В (ток потребления не более 200 мА). Питание ФНЧ осуществляется напряжениями $\pm 15\text{ В}$ от источника, расположенного в системе сбора данных. При необходимости фильтры могут быть отключены при помощи внутренних перемычек. Блок согласования представляет по два перестраиваемых полосовых фильтра и детектора на каждый канал, выделяющие огибающую сигналов.

Технические характеристики модуля аналогового преобразования

Сигнал:

входной	+ (20—25) В
выходной	$\pm 5\text{ В}$
Полоса пропускания (на уровне 3дБ)	5—20000 Гц
Ток питания датчика	$(4,7 \pm 0,4)\text{ мА}$
Напряжение питания:	
датчика	20 В
устройства	3,7 В
Коэффициент пульсаций	0,05 %
Ток потребления, не более	200 мА
Габаритные размеры	110×60×32 мм
Масса	200 г

Система сбора данных — устройство для аналого-цифрового преобразования сигналов. Данное устройство передачи имеет возможность подключения до четырех дифференциальных каналов с максимальной частотой дискретизации 10 кГц, зависящей от количества подключенных каналов. В составе мобильной диагностической системы

работают два измерительных канала с максимальной частотой преобразования 5 кГц на каждый канал. Плата соединена с персональным компьютером при помощи приемника, оснащенного радиointерфейсом ZigBee. Специальное программное обеспечение для диагностического комплекса создавали с применением программного комплекса NI LabVIEW, ставшего во всем мире своего рода стандартом для разработки промышленных систем измерений и контроля. Для решения конкретной задачи диагностического контроля в программном обеспечении может быть предусмотрен протокол, в который автоматически вносятся все параметры узла и контролируемых сигналов, зафиксированные во время теста. Этот протокол хранится в памяти для сравнения с результатами будущих тестов. При достаточной наработке выводы по результатам сравнения данных тестов могут делаться автоматически. На этапе накопления статистических данных анализировать протоколы могут опытные специалисты, к которым протокол и исходные записи сигналов поступают по электронной почте.

Необходимо учитывать, что в основе любой СД лежит не программное обеспечение и не средства контроля диагностических признаков, а глубокие знания процессов, происходящих в узле при его работе и развитии повреждений. Однако удобные и компактные средства, позволяющие регистрировать и анализировать сигналы, связанные с процессами в узлах станка или с обработкой изделия, позволяют быстрее накапливать необходимые знания и создавать формализованные алгоритмы. Выше были приведены примеры анализа сигналов, возникающих при работе шпиндельных узлов, но задачи могут меняться, следовательно, могут меняться и требования к составу и характеристикам мобильных СД. Существуют два направления решения поставленной задачи: создание универсального комплекса, насыщенного разнообразными датчиками, охватывающими большинство задач отрасли, или создание двух-, трехканальных портативных комплексов, легко трансформируемых под контроль разнообразных сигналов вследствие использования модульного принципа.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Козочкин М. П. Оснащение современных станков с ЧПУ системами диагностики и адаптивного управления // Технология машиностроения. 2011. № 3. С. 18—20.

2. **Григорьев С. Н. и др.** Техническая диагностика станочного оборудования автоматизированного производства // Контроль. Диагностика. 2011. № 8. С. 48—54.

3. **Козочкин М. П., Кочинев Н. А., Сабиров Ф. С.** Диагностика и мониторинг сложных технологических процессов с помощью виброакустических сигналов // Измерительная техника. 2006. № 7. С. 30—34; **Kozochkin M. P., Kochinev N. A., Sabirov F. S.** Diagnostics and monitoring of complex production processes using measurement of vibration-acoustic signals // Measurement Techniques. 2006. V. 49. N 7. P. 672—678.

4. **Исаев А. В., Порватов А. Н., Козочкин М. П.** Информационно-измерительная система контроля вибраций при металлообработке // Метрология. 2011. № 8. С. 18—25.

5. **Hashemi H.** The Indoor Radio Propagation Channel // Proc. IEEE. 1993. V. 81. N 7.

6. **Bennett W. R.** Spectra of Quantized Signals // Bell Syst. Tech. J. 1948. V. 27. P. 446—471.

7. **Козочкин М. П.** Особенности вибраций при резании металлов // СТИН. 2009. № 1. С. 29—35.

8. **Барков А. В., Баркова Н. А., Азовцев А. Ю.** Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации: Учебн. пособие. СПб.: Изд. центр СПбМТУ, 2000.

9. **Козочкин М. П. и др.** Виброакустическое диагностирование инструмента в процессе резания // Справочник. Инженерный журнал (с приложением). 2010. № 2. С. 44—47.

10. **Рагульскис К. М. и др.** Вибрации подшипников. Вильнюс: Изд-во «Минтис», 1974.

11. **Козочкин М. П., Сабиров Ф. С.** Роль виброакустической диагностики в исследовании и отладке шпиндельных узлов // Комплект: инструмент, технология, оборудование. 2009. № 1. С. 36—39.

Дата принятия 28.08.2013 г.

