

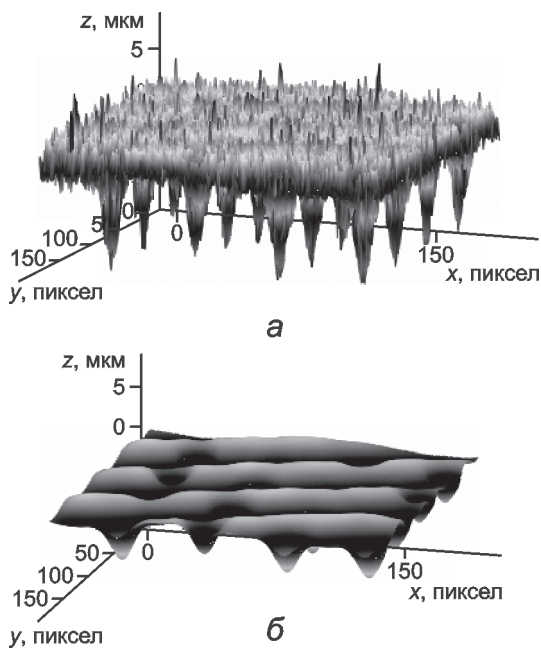


Рис. 2. Изображения микрорельефа MUFU-поверхности (а) и средняя поверхность (б)

ный фильтр Гаусса можно использовать и для робастной фильтрации микрорельефа. Процедура фильтрации остается неизменной, но отсечки шага следует выбирать несколько по-другому.

Таким образом, показаны возможности приложения двумерных аналогов традиционного и регрессионного фильтров Гаусса для обработки изображений микрорельефа поверхности с целью определения параметров пространственной шероховатости по [1].

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания на выполнение научных проектов № 9.2545.2014/К на оборудовании Центра коллективного пользования МГТУ «СТАНКИН» (соглашение № 14.593.21.0004 от 04.12.2014 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI59314X0004).

Литература

1. ISO 25178-3:2012. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности: Ареал. Часть 3. Операторы характеристик.
2. Конов С. Г., Марков Б. Н. Алгоритм коррекции погрешности от перспективных искажений изображений измерительных меток // Метрология. 2011. № 3. С. 8—15.
3. Шулепов А. В., Холин И. Е., Герасимов С. Н., Дударов Д. А., Байковский А. Ю., Куликов В. А. Разработка измерительного комплекса для автоматизированной настройки инструментальных наладок для станков с ЧПУ // Измерительная техника. 2013. № 123. С. 32—35.
4. Лич Р. Инженерные основы измерений нанометровой точности: Учебное издание. Долгопрудный: Изд. Дом «Интеллект», 2012.

Дата принятия 27.05.2015 г.

621.9.08:62.503.57

Информационно-измерительные и управляющие системы силовых и виброакустических параметров

М. П. КОЗОЧКИН, А. Р. МАСЛОВ, А. Н. ПОРВАТОВ

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

Рассмотрены вопросы, связанные с созданием информационно-измерительных и управляющих систем на основе контроля акустозмиссионных и электромагнитных эффектов. Приведены экспериментальные данные о возможностях и границах применения этих эффектов при высокоскоростной обработке конструкционных материалов.

Ключевые слова: адаптивное управление, технологический процесс, высокоскоростная обработка, диагностика процесса резания, информационно-измерительная система, числовое программное управление.

The problems of creating information-measuring and control systems based on monitoring of acoustic emission and electromagnetic effects were considered. The experimental data describes possibilities and limits of these effects application in structural materials high-speed machining.

Key words: adaptive control, technological process, high-speed machining, cutting process diagnostics, information-measuring system, CNC.

Автоматическое поддержание работоспособности станочного оборудования в условиях минимального вмешательства оператора (безлюдная технология) невозможно без

широкого использования встроенных средств измерений [1—3], выполняющих сбор, обработку информации о качестве протекания технологического процесса, и работающих в

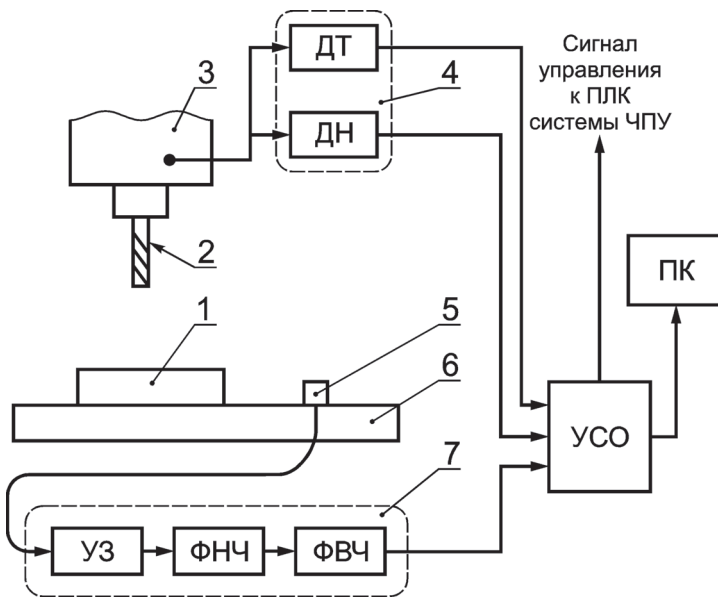


Рис. 1. Функциональная схема макета:

1 — деталь; 2 — инструмент (фреза); 3 — мотор-шпиндель; 4 — датчики тока ДТ и напряжения ДН; 5 — датчик ВА-сигналов; 6 — рабочая плита; 7 — согласующее устройство (УЗ — устройство запоминания, ФНЧ, ФВЧ — фильтры низких и высоких частот); УСО — устройство сбора и обработки; ПК — персональный компьютер (ноутбук) с программным обеспечением

составе системы диагностики (СД). К функциям оперативной диагностики (ОД) относят не только оценку состояния механизмов и рабочего процесса, определение места и причин сбоя в работе, но и принятие решений по ликвидации последствий отказов. Выбор средств (датчиков) для ОД процесса резания зависит в основном от следующих факторов [4]: информативности, адекватной исследуемой ситуации, возникающей в зоне резания, а также простоты и надежности монтажа на станке.

В настоящее время наибольшее распространение получили СД, базирующиеся на информационно-измерительных системах силовых и виброакустических (ВА) параметров. Измерительные устройства, регистрирующие силы, возникающие при резании, можно разделить на два класса: электромеханические (динамометры) и основанные на электромагнитных эффектах в электроприводе (датчики тока и напряжения). Измерительные устройства, использующие электромагнитные эффекты в электроприводе с помощью датчиков тока и напряжения, напротив значительно дешевле и проще в эксплуатации, их широко применяют в промышленности при организации так называемого адаптивного управления [5].

Виброакустические сигналы при резании и трении в широком диапазоне частот имеют сложную структуру, которая не совпадает с природой сил при резании. Например, при увеличении площади контакта при трении амплитуда колебаний на каких-то этапах может резко возрасти, а на каких-то падать или не меняться совсем [6].

Правильная оценка состояния процесса резания затрудняется сложностью процесса, не имеющего единой теории, и структуры его динамики [7]. Есть основания утверждать,

что процесс резания материалов — автоколебательный [6, 8]. Также добавляются вопросы диагностики важнейших узлов технологического оборудования, отвечающих за точность обработки, и нарушения в работе этих узлов способны вызвать аварийную ситуацию или сбой в технологическом цикле [9—11].

Развитие средств измерений и вычислительной техники в последние годы позволило частично решить проблемы контроля и диагностики путем создания систем мониторинга машин и оборудования на базе рассмотренных информационных технологий [5].

Большинство существующих на рынке систем адаптивного управления и контроля реагируют на изменение условий резания по электромагнитным сигналам от силовой части электропривода и автоматически настраивают подачу на максимально допустимый для каждой операции уровень [12]. В случае необходимости такие системы останавливают станок из-за перегрузки или обнаружения поломки инструмента. Зачастую ведущие производители систем числового программного управления (ЧПУ), такие как Siemens, Heidenhain (Германия), Fanuc (Япония) вступают в партнерство с производителями систем адаптивного управления и осуществляют их полную интеграцию друг с другом.

Однако указанные системы имеют и ряд особенностей, ограничивающих их применение только отдельными операциями и режимами обработки. На результат измерений влияют: энергетические характеристики других приводов, включенных в общую силовую сеть; относительно большая постоянная времени, вызываемая инерционностью электромеханической системы; недостаточная чувствительность при работе на чистовых и получистовых режимах. Недостатки можно нивелировать, введя дополнительный измерительный канал, использующий ВА-сигналы, генерируемые процессом резания или работой важнейших узлов, например, шпинделя [10]. Эти сигналы более чувствительны к динамике процесса резания, что особенно важно при чистовых операциях или при работе малоразмерным инструментом [13].

На рис. 1 показана функциональная схема макета, в состав которого входят фрезерный трехкоординатный станок с мотор-шпинделем и информационно-измерительная система (ИИС), базирующаяся на контроле активной мощности и параметров ВА-сигналов. В устройстве сбора и обработки (УСО) блоки аналого-цифрового и цифроаналогового преобразователей АЦП и ЦАП и микроконтроллера (МК) объединены в одном 32-разрядном микроконтроллере STM32F417ZGT6 с ядром Cortex-M4F, имеющим блок арифметики с плавающей точкой (FPU), позволяющий обрабатывать сигнал одновременно с его оцифровкой и управлением. За оцифровку отвечают три 12-разрядных АЦП с производительностью до 2,4 MSPS (миллионов выборок в секунду). Сигнал управления формирует встроенный 12-разрядный ЦАП.

Основные технические характеристики разработанной ИИС приведены в табл. 1.

Особенность разработанной ИИС — передача информации не только по проводному, но и беспроводному каналу с помощью интерфейсов ZigBee или Wi-Fi, а применение аккумуляторного блока позволяет добиться наибольшей гибкости при конфигурации системы.

Таблица 1

Технические характеристики макета ИИС

Наименование параметра	Значения и описание
Количество измерительных каналов	<8
Фильтр нижних частот	перестраиваемая полоса пропускания 0,25—30 кГц на уровне –3 дБ
Погрешность измерений	±0,1 % от полной шкалы
Разрешение	1 бит или 0,024 %
Напряжение для датчиков	+15 В и максимальный ток 50 мА
Программируемые для дифференциальных каналов коэффициент усиления смещение	1—8000 0—4096 бит
Разрядность АЦП	12 бит
Встроенная память	2 МБ (или 1 000 000 значений)
Поддержка режима работы без ПК	данные сохраняются в памяти
Поддержка режима работы в реальном времени	частота дискретизации до 100 кГц для каждого канала
Внутренний программируемый триггер	0—4096 бит
Интерфейс	USB 2.0 Hi-Speed
Энергопотребление	до 400 мА
Рабочая температура	–20 ... +60 °С
Максимально допустимое ускорение	500 g

В состав ИИС входят следующие аналоговые компоненты (см. рис. 1): датчики тока, напряжения, вибрации и согласующее устройство, которое состоит из усилителя заряда с коэффициентом усиления 1 мВ/пКл, фильтров нижних и верхних частот с перестраиваемой полосой пропускания. В табл. 2 указаны основные характеристики используемых датчиков.

Таблица 2

Технические характеристики датчиков

Параметр	Значение
Датчик напряжения	
Номинальное входное напряжение, эфф. знач., В	350
Диапазон преобразования, В	0...±500
Выходное аналоговое напряжение, В	5
Коэффициент преобразования	1:100
Напряжение питания, В	+15 ± 5 %
Частотный диапазон (–1 дБ) при 50 % от входного напряжения, кГц	0—300
Датчик тока	
Номинальный входной ток, эфф. знач., А	150
Диапазон преобразования, А	0...±200
Выходное аналоговое напряжение, В	0,5
Коэффициент преобразования	1:1000
Напряжение питания, В	+15 ± 5 %
Частотный диапазон (–1 дБ), кГц	0—200
Датчик вибрации	
Диапазон преобразования, g	50
Выходное аналоговое напряжение, В	±5
Коэффициент преобразования, В/g	0,1
Напряжение питания (±5%), В	+15
Частотный диапазон (–1 дБ), кГц	0,001—10

Функция управления параметрами резания реализуется системой ЧПУ следующим образом:

программируются свободные *M*-функции на перехват сигнала, несущего информацию о требуемой подаче или скорости вращения, с внешнего устройства (в данном случае УСО), которые ставятся в соответствие со свободными портами программируемого логического контроллера (ПЛК);

в тексте программы обработки детали (в системе ЧПУ) вызывают эти *M*-функции перед операцией, где необходима адаптация; при этом управление параметрами резания переходит к УСО, и он формирует управляющий сигнал.

Управляющий сигнал может быть представлен как в цифровой, так и в аналоговой форме, когда амплитуда пропорциональна, например, значению подачи. Это зависит от особенностей ПЛК и наличия у него свободных входов. Сигнал управления формируется посредством регулятора типа ПИД (пропорционально-интегрально-дифференциальный) в УСО в диапазоне 0—200 % от номинального значения параметра адаптации. Таким образом, можно увеличить производительность в 2 раза. При режиме адаптации инструмент используется в более щадящем режиме. Введение ВА-канала позволяет реализовывать алгоритмы управления, направленные на стабилизацию процесса резания при возникновении интенсивных автоколебаний, которые ухудшают качество поверхности и могут спровоцировать поломку режущего инструмента (РИ). Еще одна особенность автоколебаний — при их возникновении обычно уменьшаются силы резания и, соответственно, потребляемая мощность. Если в этой ситуации опираться только на информацию о текущем значении мощности, то создается впечатление, что, например, уменьшилась глубина резания.

На рис. 2 показан пример спектров ВА-сигналов, сопровождающих точение стальной заготовки на одинаковых режимах, но при разной динамической жесткости технологической системы: обычный вылет резца и пиноли задней бабки; увеличенный вылет. Во втором случае потребляемая мощность меньше на 25 %, хотя значения спектральных

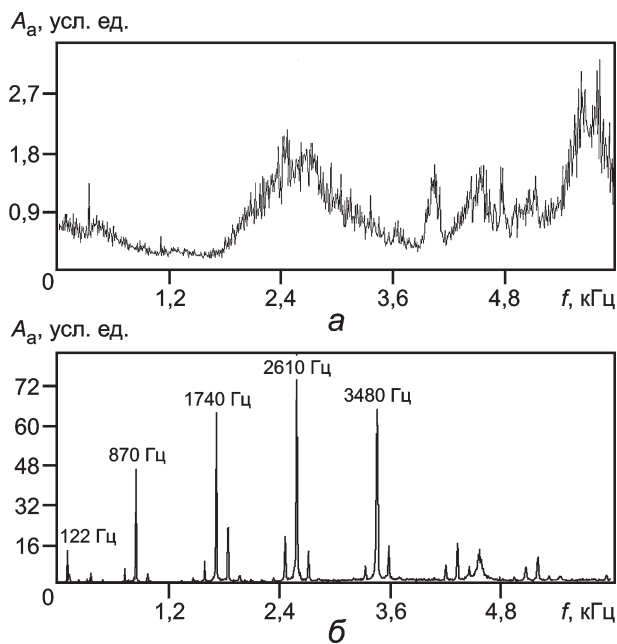


Рис. 2. Пример спектров ВА-сигналов, полученных при нормальном точении (а) и при интенсивных автоколебаниях (б)

максимумов вырастают в десятки раз. Существование только канала контроля мощности не позволяет СД правильно идентифицировать эту ситуацию и принять нужное решение для ее исправления. Кроме поломки РИ интенсивные автоколебания вызывают резкое снижение качества поверхности.

При обработке деталей на фрезерно-расточном станке может возникать автоколебательный режим, который появляется при высокой нагрузке на инструмент и во время чистовых операций, когда контроль процесса резания с помощью сигналов мощности, потребляемой приводом станка, становится невозможным.

При работе малоразмерным инструментом на многооперационных станках тоже возникает сложная ситуация, поскольку привод станка рассчитан на всю номенклатуру операций, включая черновые, потребляющие максимальную мощность, и чистовые, где значение мощности практически нельзя отличить от уровня холостого хода.

Характер и источники возникновения автоколебаний при резании изучены, что позволяет составлять алгоритмы расчета и управления режимами обработки [6–8].

Экспериментальное исследование проводилось на фрезерном трехкоординатном станке DMG 635eco (DMG MORI, Швейцария). В табл. 3 показано распределение энергии ВА-сигнала и активной мощности при обработке алюминия и инструментальной стали на различных режимах в процентном отношении к энергии этих же сигналов при холостом ходе. При этом глубину резания варьировали в диапазоне 0,25–2 мм, а частоту вращения фрезы $n = 1000–3000$ мин⁻¹, подачу не меняли. Как следует из табл. 3 сигнал активной мощности мало чувствителен к небольшим изменениям глубины резания и, лишь начиная с 1 мм, можно говорить о линейных зависимостях измеряемого сигнала от глубины как у алюминия, так и стали. С сигналом вибрации картина несколько иная: его хорошая (в среднем при резании действующее значение виброускорения изменяется в 2 раза по срав-

нению с аналогичным значением при холостом ходе) чувствительность к самым небольшим (0,25–0,5 мм) глубинам режимов резания может смениться нелинейной зависимостью (выделенные ячейки).

Таблица 3

Распределение энергии сигналов виброакустической эмиссии и активной мощности

Материал	n , мин ⁻¹	Вибрация (мощность), СКЗ сигнала в % от холостого хода при разных глубинах резания h , мм			
		0,25	0,5	1	2
Алюминий	1000	341/123	556/130	672/124	761/168
	2000	242/108	575/110	659/129	763/157
	3000	401/101	519/105	1044/108	910/149
Сталь	1000	1135/115	1698/133	2100/140	2226/149
	2000	1262/126	1950/144	2653/167	2449/210
	3000	1497/122	2462/147	3461/196	2745/236

Несмотря на то, что подавляющее большинство систем адаптивного контроля процесса резания основано на информации об электрической мощности (активной, полной) электроприводов, следует четко сознавать границы применимости этих систем. Как было показано выше, ВА-сигнал, сопровождающий процессы трения и резания, способен в зависимости от режимов дополнить или заменить системы контроля, основанные на регистрации электромагнитных эффектов в электроприводах, а параметры ВА-сигнала можно широко использовать для реализации систем диагностики, осуществляющих мониторинг контактных процессов в кинематических парах, контроль износа и поломок режущего инструмента, определение периодов возникновения фрикционных автоколебаний [14, 15].

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № 9.1557.2014/К от 11.07.2014 г. на оборудовании Центра коллективного пользования МГТУ «СТАНКИН», при поддержке Минобрнауки РФ (соглашение № 14.593.21.0004 от 04.12.2014 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI59314X0004) и Гранта Президента России (№ 14.Z56.14.2749-МК от 03.02.2014 г.) — в части подготовки и проведения эксперимента. Методика измерений сигналов акустической эмиссии выполнена в рамках государственного контракта № 9.1188.2014/К.

Литература

1. Козочкин М. П., Порватов А. Н., Сабиров Ф. С. Оснащение технологического оборудования информационно-измерительными системами // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 29–32.
2. Grigoriev S. N., Kozochkin M. P., Sabirov F. S., Kutin A. A. Diagnostic systems as basis for technological improvement // Proc. CIRP 1 (1) 2012. P. 599–604.
3. Козочкин М. П., Маслов А. Р., Порватов А. Н. Управление процессом резания посредством интеграции подсистемы диагностирования в систему ЧПУ металлообрабатывающего станка // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2011. № 3. С. 110–111.
4. Козочкин М. П., Гусев А. В., Порватов А. Н. Создание портативных мобильных диагностических комплексов для мониторинга и отладки технологических процессов и станочных узлов // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2011. № 1. С. 42–47.

5. Григорьев С. Н., Козочкин М. П., Сабилов Ф. С., Синопальников В. А. Диагностика технологического оборудования в современном производстве // Технология машиностроения. 2012. № 1. С. 45—50.

6. Kozochkin M. P., Porvatov A. N. Effect of Adhesion Bonds in Friction Contact on Vibroacoustic Signal and Autooscillations // J. Friction Wear. 2014. V. 35. N. 5. P. 389—395.

7. Козочкин М. П., Сабилов Ф. С. Аттракторы при резании и перспективы их использования в диагностике // Измерительная техника. 2009. № 2. С. 37—41.

8. Маслов А. Р., Молодцов В. В. Моделирование колебаний инструментальной системы для растачивания отверстий // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2014. № 4 (31). С. 196—199.

9. Козочкин М. П., Сабилов Ф. С., Порватов А. Н., Боган А. Н. Вибрационный контроль технологического оборудования в производстве // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2012. № 4 (20). С. 8—14.

10. Козочкин М. П., Сабилов Ф. С. Выявление дефектов шпиндельных узлов виброакустическими методами // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2009. Т. 13. № 1. С. 133—137.

11. Козочкин М. П., Кочинев Н. А., Сабилов Ф. С. Диагностика и мониторинг сложных технологических процессов с помощью измерения виброакустических сигналов // Измерительная техника. 2006. № 7. С. 30—35.

12. Кузовкин В. А., Филатов В. В., Порватов А. Н., Порватова А. Н. Система измерения активной мощности асинхронного двигателя станочного электропривода // Измерительная техника. 2014. № 2. С. 60—62.

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

14. Пат. 2478929 РФ. Способ определения износа режущего инструмента / С. Н. Григорьев, М. П. Козочкин, В. В. Филатов, А. Н. Порватов // Изобретения. Полезные модели. 2013. № 10.

15. Пат. № 2481183 РФ. Устройство автоматизированного контроля нагрузки на валу электродвигателя металлорежущего станка / В. А. Кузовкин, В. В. Филатов, А. Н. Порватов, Е. А. Соколов, В. А. Камнев // Изобретения. Полезные модели. 2013. № 13.

Дата принятия 27.05.2015 г.

681.786.4

Алгоритм быстрого распознавания измерительных маркеров для бесконтактных измерительных систем

С. Г. КОНОВ, А. А. ХОХОЛИКОВ, В. В. СКВОРЦОВА

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Москва, Россия, e-mail: public32@gmail.com

Рассмотрен алгоритм распознавания измерительных маркеров различного назначения, применяемых в пространственных информационно-измерительных системах. Приведены примеры для использования алгоритма в системах, основанных на технологии фотограмметрии.

Ключевые слова: фотограмметрия, пространственная измерительная система, измерительный маркер, сопряженные точки.

An algorithm for detecting different measuring markers used for spatial information-measuring systems is considered. The examples of using the algorithm in systems based on photogrammetry technology are presented.

Key words: photogrammetry, three-dimensional measuring system, measuring marker, conjugated dots.

В настоящее время большое количество измерительных задач в машиностроении можно решить с применением бесконтактных измерительных технологий, что повышает актуальность разработки современных пространственных фотограмметрических информационно-измерительных систем (ИИС) [1, 2]. При проектировании таких систем разработчикам приходится решать задачи, для которых в пространстве ИИС требуется выделение отдельных опорных точек [3, 4]. При применении бесконтактных технологий, основанных на фото- и видеокамерах, эти точки часто являются центрами измерительных маркеров, выполняемых в виде геометрических примитивов контрастных цветов. Измерительные

маркеры, как правило, являются фигурой с центральной симметрией, в подавляющем большинстве случаев — кругом черного цвета на белом фоне или со специальными световозвращающими покрытиями для подсветки маркеров [5].

Взаимное расположение маркеров устанавливается при их изготовлении или обеспечивается технологически. При проектировании фотограмметрических информационно-измерительных сканирующих или следящих систем маркеры используют для: калибровки [6, 7], задавая опорные измерительные маркеры с известными координатами; организации процесса слежения за перемещениями объектов в рабочем пространстве ИИС, размещая маркеры на поверх-