

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХ. И ФИЗ.-ТЕХН. ОБРАБОТКИ

УДК 621.923

А. А. ИГНАТЬЕВ, В. А. КАРАКОЗОВА, С. А. ИГНАТЬЕВ

**ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА
ПО АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫМ ФУНКЦИЯМ
ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ
ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ**

Предлагается метод оценки динамического состояния шлифовального станка по автокорреляционной функции виброакустических колебаний, регистрируемых при обработке колец подшипников при стационарном режиме резания, причем входное воздействие на систему рассматривается в виде сигнала типа «белый шум». *Динамическая система; виброакустические колебания; автокорреляционная функция*

В рамках системы мониторинга технологического процесса (СМТП) необходимо контролировать динамические характеристики станков, так как они непосредственно влияют на качество обработки, например, на параметры точности и однородность структуры поверхностного слоя дорожек качения колец подшипников [1, 2]. Для оценки динамических характеристик используют измерение виброакустических (ВА) колебаний основных элементов формообразующей подсистемы станка, возбуждаемых в динамической системе (ДС) различными методами [3–7]. Далее осуществляется обработка результатов измерений и оцениваются различные характеристики ДС (см. табл.).

Идентификация методами теории автоматического управления связана с необходимостью подачи на вход ДС типового сигнала. Наиболее часто в известных работах по экспериментальному определению динамических характеристик станков идентификацию передаточных функций элементов и ДС в целом осуществляют с помощью активного эксперимента, возбуждая систему детерминированными воздействиями: ступенчатым, импульсным или гармоническим. Указанные методы обладают рядом недостатков:

- необходимо формировать эталонное входное воздействие калиброванной амплитуды и формы, что не всегда возможно для станков;

- искажение входного и выходного сигналов снижает точность идентификации;

- сложно оценить реальные динамические характеристики станка, поскольку спектры воздействий отличаются от спектра колебаний, возникающих при резании.

При оценке состояния ДС станков применяется и пассивный эксперимент, когда измерения выполняются в процессе обработки и система возбуждается силами резания. При этом выделяется два метода идентификации: первый – по переходным характеристикам при врезании инструмента в заготовку, второй – при стационарном резании. Оба метода разработаны в СГТУ и реализованы для токарных станков [4]. В обоих случаях обязательно учитывается стохастическая составляющая колебаний в ДС, которая по своему спектру близка к сигналу типа «белый шум». Эта составляющая обусловлена тем, что на ДС оказывают воздействие несколько независимых источников ВА колебаний с различными спектрами (электродвигатели, шпиндели, процесс резания и т. п.). Их суммарное воздействие в диапазоне частот до нескольких килогерц определяет стохастическую составляющую силы резания, которую можно рассматривать как «ограниченный белый шум».

Основное преимущество метода, рассматриваемого возбуждение ДС силой резания со стохастической компонентой типа «белый шум», является использование реальных воздействий в технологической системе, что существенно повышает адекватность идентифицированной модели ДС станка [8]. Стохастическая компонента ВА колебаний ДС в этом случае рассматривается как стационарный случайный процесс (ССП). Следовательно, возможность применения метода

обусловливается стационарностью режима резания и линейностью ДС, что выполняется как для токарных, так и для шлифовальных станков при финишных операциях обработки.

Для оценки состояния ДС шлифовального станка представляется целесообразным получить выражение для ее передаточной функции [8, 9]. Для этого используется экспериментально-аналитический метод оценки передаточной функции ДС по автокорреляционной функции (АКФ) ВА колебаний, зарегистрированных в процессе шлифования колец подшипников на основных узлах станков, наиболее близких к зоне резания (шпиндели, опора кольца). Из ранее выполненных исследований известно [10], что при воздействии на объект стохастических колебаний АКФ имеют доста-

точную информативность для оценки его динамических свойств.

Измерение ВА колебаний осуществлялось виброизмерительным прибором ВШВ-003М2, датчик которого устанавливался с помощью магнитного основания на узлы станка. Измерения проводились на различных станках моделей SIW-4, SIW-5 при обработке колец различных типоразмеров на операциях предварительного и окончательного шлифования. Запись и обработка результатов осуществлялись компьютером типа Notebook. Вычисление спектров и АКФ производилось с помощью программного продукта Matlab. Выходные данные формируются в виде двоянного графика (спектрограмма и график АКФ).

Таблица 1

Методы идентификации динамического состояния станков

№ п/п	Вид входного воздействия	Реализация на станках	Основные свойства	Выходные характеристики	Литература
1	Гармоническое	Возбуждение колебаний от вибраторов	Большие затраты времени, точен	АФЧХ, АЧХ, ФЧХ	[1–3]
2	Импульсное	Возбуждение колебаний ударом специальным молотком Возбуждение колебаний от математического маятника Электромагнитный возбудитель с обратной связью	Сложность задания параметров импульса, легок в интерпретации. Выполнено только на лабораторной установке. На станке не опробовано	АФЧХ, ИПФ, передаточная функция АЧХ при различных углах удара	[1–3, 8]
3	Ступенчатое				
3.1	Без резания	Переходной процесс при нагружении через батавскую слезку	Не соответствует реальным условиям, легок в интерпретации.	Переходная и передаточная функции	[1–3]
3.2	При резании	Переходной процесс при врезании инструмента	Чувствителен к возмущениям, легок в интерпретации	Переходная и передаточная функции, запас устойчивости	
4	Стохастическое				
4.1	Без резания	Возбуждение колебаний от специального вибратора	Не соответствует реальным условиям, сложен в применении, нечувствителен к возмущениям	АФЧХ, АЧХ, передаточная функция	[4–7]
4.2	При резании	Возбуждение колебаний силой резания с регистрацией спектра и автокорреляционной функции (АКФ)	Прост в применении, нечувствителен к возмущениям, приближен к реальным условиям	Спектр и АКФ при резании, интегральная оценка спектра и АКФ, передаточная функция, степень устойчивости	

Если принять во внимание, что переходной процесс при врезном шлифовании колец подшипников средних типоразмеров является кратковременным и износом круга при обработке одного кольца можно пренебречь, то ВА колебания узла формообразующей подсистемы (например, опоры кольца), можно рассматривать как ССП. При условии, что по экспериментальным данным о ВА колебаниях получено математическое выражение АКФ, можно вычислить передаточную функцию динамической системы станка при резании [8].

Для этого используется методика, предложенная в работе [11], согласно которой для передаточной функции линейной системы, находящейся под воздействием ССП типа «белый шум» со спектральной плотностью S_0 , выполняется соотношение

$$W(p)W(-p) = K_{yy}(p) + K_{yy}(-p). \quad (1)$$

Предположим, что АКФ идентифицирована в виде

$$K_{yy}(\tau) = De^{-\alpha\tau} \left(\cos \omega_1 \tau + \frac{\alpha}{\omega_1} \sin \omega_1 \tau \right), \quad (2)$$

причем $K_{yy}(0) = D$, где D – дисперсия ССП; ω_1 – круговая частота.

Изображения по Лапласу от АКФ заданного вида легко получаются, если воспользоваться табличными данными из справочника [12]:

$$K_{yy}(p) = \frac{D(p + \alpha)}{(p + \alpha)^2 + \omega_1^2} + \frac{D\alpha}{(p + \alpha)^2 + \omega_1^2}. \quad (3)$$

После проведения соответствующих алгебраических операций по формулам (1) и (3), связанных с раскрытием скобок и приведением подобных членов, следует, что передаточная функция ДС шлифовального станка при обработке, рассчитанная при входном воздействии типа «белый шум», записывается в виде

$$W(p) = \frac{k}{p^2 + \alpha p + \omega_0^2}, \quad (4)$$

где $k = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{D}{\alpha}}$, $\omega_0^2 = \omega_1^2 + \alpha^2$.

Переходный процесс в ДС при врезании круга в заготовку можно рассматривать как сумму двух составляющих: детерминированной и стохастической. Детерминированная составляющая переходной функции $\tilde{h}(t)$ определяется по передаточной функции $W(p)$ при единичном ступенчатом воздействии на ДС шлифовального станка выражением

$$\tilde{h}(t) = L^{-1} \left\{ \frac{W(p)}{p} \right\} = L^{-1} \left\{ \frac{1}{p} \frac{k}{p^2 + \alpha p + \omega_0^2} \right\}. \quad (5)$$

В качестве ступенчатого рассматривается воздействие силы резания при постоянной подаче шлифовального круга. Детерминированная составляющая $\tilde{h}(t)$ соответствует сглаженной переходной функции колебательного звена. Стохастическая составляющая переходного процесса $\dot{h}(t)$, возникающая под действием сигнала типа «белый шум» $\xi(t)$, определяется выражением [13]

$$\dot{h}(t) = \frac{1}{\omega} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\{-\alpha(t - \tau)\} \xi(\tau) \sin \omega(t - \tau) d\tau. \quad (6)$$

После завершения переходного процесса этим же выражением описывается стохастический процесс на выходе системы в стационарном режиме. Следовательно, имеет место преобразование стохастического процесса $\xi(t)$ в стохастический процесс $\dot{h}(t)$, причем если исходный процесс является стационарным случайным с нулевым математическим ожиданием, то и преобразованный относится к тому же типу. Однако явный вид процесса $\dot{h}(t)$ установить не удается.

Таким образом, реальный переходный процесс является суммой составляющих $\tilde{h}(t)$ и $\dot{h}(t)$, определяемых, соответственно, детерминированной $\tilde{F}_p(t)$ и стохастической $F_p(t)$ составляющими силы резания $F_p(t)$. После завершения переходного процесса в ДС наблюдается ССП, определяемый составляющей силы резания $F_p(t)$.

Реальные АКФ, зарегистрированные при шлифовании колец подшипников на станках SIW-5, представлены на рис. 1 и 2. Они аппроксимированы с погрешностью 10...15% выражениями вида (2).

Для станка № 333:

- черновой проход

$$K_{yy}(\tau) = 0,82e^{-136\tau} (\cos 120\tau + 1,14 \sin 120\tau);$$

- чистовой проход

$$K_{yy}(\tau) = 0,55e^{-252\tau} (\cos 120\tau + 2,1 \sin 120\tau).$$

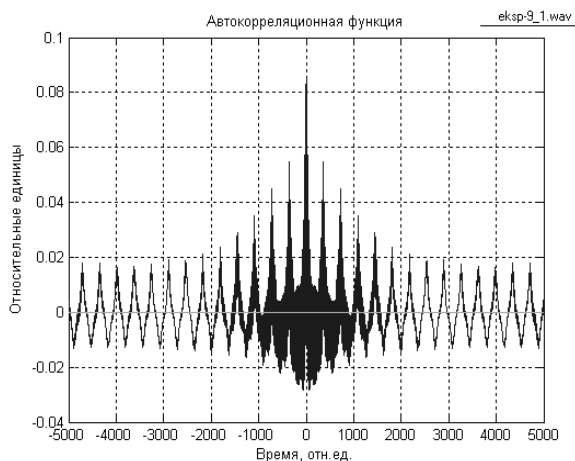
Для станка 302:

- черновой проход

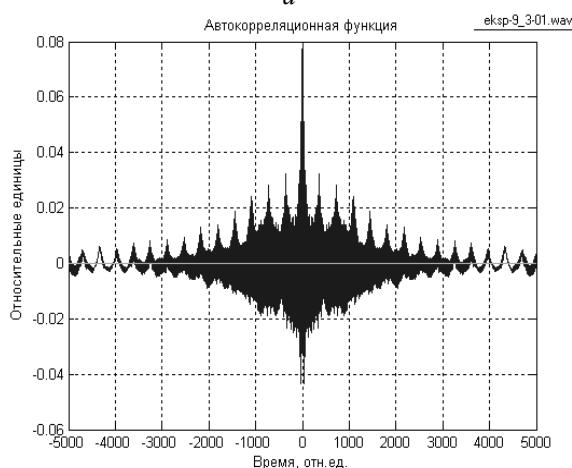
$$K_{yy}(\tau) = 0,02e^{-744\tau} (\cos 120\tau + 6,2 \sin 120\tau);$$

● чистовой проход

$$K_{yy}(\tau) = 0,015e^{-304\tau}(\cos 120\tau + 2,5 \sin 120\tau).$$



a



б

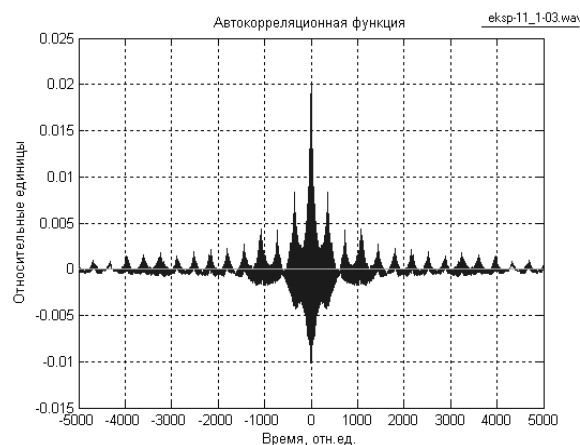
Рис. 1. Автокорреляционные функции при обработке на шлифовальном станке № 333:

a – черновой проход; *б* – чистовой проход

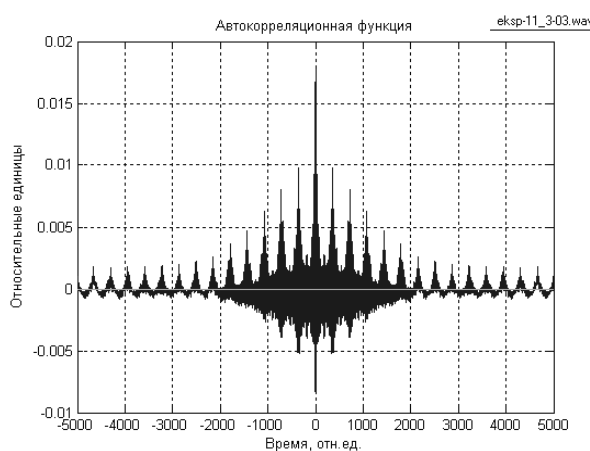
Полученные АКФ свидетельствуют о различных динамических характеристиках станков, в том числе при разных технологических режимах. По идентифицированным передаточным функциям можно не только оценивать реальное состояние ДС, но и выбрать целесообразный режим шлифования по таким характеристикам как степень устойчивости и запас устойчивости.

Вычисляя значения коэффициентов передаточной функции по АКФ ВА колебаний при стационарном резании и определяя степень устойчивости ДС станка при различных значениях параметров технологического режима, можно установить режим с наибольшей степенью

устойчивости, а следовательно, и с более высоким качеством обработки. Динамическое состояние ряда станков одной модели целесообразно сравнивать при близких технологических режимах, что позволит сравнить их техническое состояние и выбрать станок с приемлемыми характеристиками. Обе задачи решаются в рамках системы мониторинга технологического процесса [1].



a



б

Рис. 2. Автокорреляционные функции при обработке на шлифовальном станке № 302:

a – черновой проход; *б* – чистовой проход

Известно, что построение ДС станка обычно производится при ряде допущений, направленных на упрощение модели, и не может учесть в явном виде всех процессов, протекающих в системе при резании. Следовательно, идентификация позволяет более четко представить реальную структуру модели ДС и выделить ее наиболее важные составляющие, поскольку измерение ВА колебаний выполняется именно в процессе резания. По идентифициро-

ванной модели можно сформулировать некоторый критерий, оценивающий динамическое состояние станка, а также установить эталонное значение или диапазон изменения этого критерия, соответствующий заданному качеству обработки деталей. Выход критерия за допустимые границы связан либо с существенным нарушением динамического состояния станка, либо с неправильно выбранным технологическим режимом. В обоих случаях качество обработки деталей не удовлетворяет заданному и требуется осуществить корректирующее воздействие, например, выполнить подналадку станка или выбрать целесообразный технологический режим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Игнатъев, А. А.** Мониторинг станков и процессов шлифования в подшипниковом производстве / А. А. Игнатъев, М. В. Виноградов, В. В. Горбунов [и др.]. Саратов: СГТУ, 2004. 124 с.
2. **Игнатъев, А. А.** Мониторинг технологического процесса на основе автоматизированного контроля динамических характеристик станков / А. А. Игнатъев, В. А. Добряков, С. А. Игнатъев // СТИН. 2005. № 7. С. 3–7.
3. **Кудинов, В. А.** Динамика станков / В. А. Кудинов. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
4. **Попов, В. И.** Динамика станков / В. И. Попов, В. И. Локтев. Киев: Техника, 1975. 136 с.
5. **Бржозовский, Б. М.** Точность и надежность автоматизированных прецизионных металлорежущих станков / Б. М. Бржозовский, А. А. Игнатъев, В. А. Добряков, В. В. Мартынов. Саратов: СГТУ, Ч. 1, 1992. 156 с.; Ч. 2, 1994. 160 с.
6. **Есипов, Ю. В.** Проблемы мониторинга «здоровья» и ресурса конструкций / Ю. В. Есипов, В. М. Мухортов // Тр. VIII Междунар. науч.-техн. конф. по динамике технологических систем. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2007. Т. 1. С. 44–50.
7. **Мерзляков, А. А.** Способы возбуждения колебаний при исследовании динамики механических систем / А. А. Мерзляков, Н. А. Серков, Р. О. Сироткин // Тр. VIII Междунар. науч.-техн. конф. по динамике технологических систем. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2007. Т. 2. С. 194–199.
8. **Игнатъев, С. А.** Обеспечение качества обработки поверхностей качения колец подшипников на основе контроля динамического состояния шлифовальных станков по стохастическим характеристикам виброакустических колебаний: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. А. Игнатъев. Саратов, 2001. 16 с.
9. **Игнатъев, С. А.** Идентификация динамической системы шлифовального станка по автокорреляционным функциям виброакустических колебаний технологической системы для оптимизации режима обработки / С. А. Игнатъев, В. А. Каракозова, А. А. Игнатъев // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2008. С. 80–85.
10. **Балакирев, В. С.** Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления / В. С. Балакирев, Е. Г. Дудников, А. М. Цирцлин. М.: Энергия, 1967. 232 с.
11. **Лебедев, А. Н.** Цифровое моделирование и идентификация стационарных случайных процессов / А. Н. Лебедев, Д. Д. Недосекин, Г. А. Стеклова. Л.: ЛЭТИ, 1983. 118 с. (Рукопись депонирована в ВИНТИ, № 6248–83).
12. **Корн, Г.** Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. М.: Наука, 1984. 832 с.
13. **Неймарк, Ю. И.** Стохастические и хаотические колебания / Ю. И. Неймарк, П. С. Ланда. М.: Наука, 1987. 424 с.

ОБ АВТОРАХ



Игнатъев Александр Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации и управления технологическими процессами Саратовск. гос. техн. ун-та.



Каракозова Вера Алексеевна, зав. лаб. той же каф.



Игнатъев Станислав Александрович, канд. техн. наук, докторант той же каф.