

УДК 621.091.001.1..531.1

**К ВОПРОСУ ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ИССЛЕДОВАНИИ  
ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ  
КАК ЭЛЕМЕНТА ЗАМКНУТОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ  
МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО СТАНКА**

© 2007 г.

*А.С. Буданков, В.Н. Комаров*

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

[alexei.budankov@gmail.com](mailto:alexei.budankov@gmail.com)*Поступила в редакцию 31.05.2007*

Описывается информационная система, обеспечивающая решение прикладных задач физического и математического моделирования динамических процессов, протекающих при вибрационном резании металлов. Собираемые с помощью данной системы экспериментальные данные о динамике процесса резания могут быть использованы для идентификации параметров различных математических моделей динамики процесса несвободного косоугольного резания и расчета металлорезающих станков на устойчивость и автоколебания при различных технологических параметрах.

**Введение**

Анализ физических явлений, возникающих при резании металлов, свидетельствует о сложном характере упругопластических процессов, протекающих в зоне резания [1, 2, 3], связанных с разрушением обрабатываемого материала, выделением тепла, трением и др. В таких условиях построение математических моделей для описания общего случая несвободного косоугольного резания, характерного для подавляющего большинства случаев металлообработки, требует привлечения результатов экспериментальных исследований динамики процесса резания металлов.

В этой связи в работах [4, 5] были предложены эффективные методики построения средств автоматизации экспериментального исследования динамики процесса резания металлов, на основе которых в Научно-исследовательском институте прикладной математики и кибернетики при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского была разработана информационная система, позволяющая осуществлять полный цикл экспериментальных исследований данного процесса в автоматическом режиме под управлением ЭВМ, начиная от проведения эксперимента и сбора данных и заканчивая анализом экспериментальной информации и идентификацией параметров двух типов математических моделей, описывающих динамику процесса резания металлов.

Важность автоматизации экспериментальных исследований динамики процесса резания обусловлена задачами сбора, обработки, анализа и хранения больших массивов экспериментальных данных. В связи со сложностью и быстротечностью динамического процесса резания металлов актуальна задача управления экспериментом в целом, т.е. управления совокупностью аппаратных средств, участвующих в эксперименте, и управления процессом исследования.

Для успешного решения этих задач необходимы формализации алгоритма исследования, позволяющие создавать эффективные методики и программные системы управления экспериментом, и привлечение совокупности современных промышленных средств, информационных технологий и эффективного математического аппарата.

Первым этапом автоматизации исследования динамики процесса резания является осуществление сбора экспериментальных данных об исследуемом процессе. При изучении динамики процесса резания большую роль играет частота сбора данных. Вследствие быстротечности исследуемых динамических процессов аппаратные измерительные устройства должны обладать достаточным быстродействием, чтобы с должной для правильного описания скоростью собирать данные о динамике процесса резания. Необходимо отметить, что в реальных условиях динамический процесс резания металлов характеризуется не одним, а сразу несколькими параметрами, нуждающимися в измерении.

Задача сбора данных дополнительно усложняется наличием нескольких информационных потоков и требует использования нескольких измерительных каналов. Условие многоканальности измерения дополнительно повышает требование к частоте сбора данных, так как требует учета временных задержек на переключение и установление измерительного канала.

При сборе статистических данных, какими являются данные о динамическом процессе резания металлов, происходит формирование выборок данных, содержащих наряду с полезным сигналом различные шумы и помехи. Данные помехи могут вносить существенные искажения в полезный сигнал, вплоть до его полного подавления. Для выделения полезного сигнала и анализа собранных данных следует использовать аппаратные или программные средства цифровой фильтрации [6], что является предметом второго этапа автоматизации экспериментального исследования динамики процесса резания металлов.

Наряду с управлением экспериментом, сбором и обработкой полученных данных, важной является задача хранения полученных экспериментальных данных и управления ими [7, 8].

### Аппаратное обеспечение и алгоритмы функционирования информационной системы

Разработанная информационная система (рис. 1) представляет собой совокупность механических, электронных, аналого-цифровых и программных средств, направленных на получение экспериментальной информации о динамических характеристиках процесса резания металлов, необходимых для построения математической модели исследуемого процесса. Электронно-механическая часть системы включает в себя:

- экспериментальную установку на базе токарно-винторезного станка, в составе токарного станка 1К-62: упругая система станка (УСС), деталь (Д), резец (Р), датчик управления (ДУ), датчик смещения (ДС), динамометр (УДМ) с тензометрическим усилителем (УТ);
- вибродинамический стенд (ВДС);
- фильтры (Ф), преобразующие и усилительные устройства (УПУ), предназначенные для предварительной обработки сигналов о трех составляющих силы резания и относительных колебаний резца и детали, задающий генератор частот (ЗГ);
- систему автоматического управления

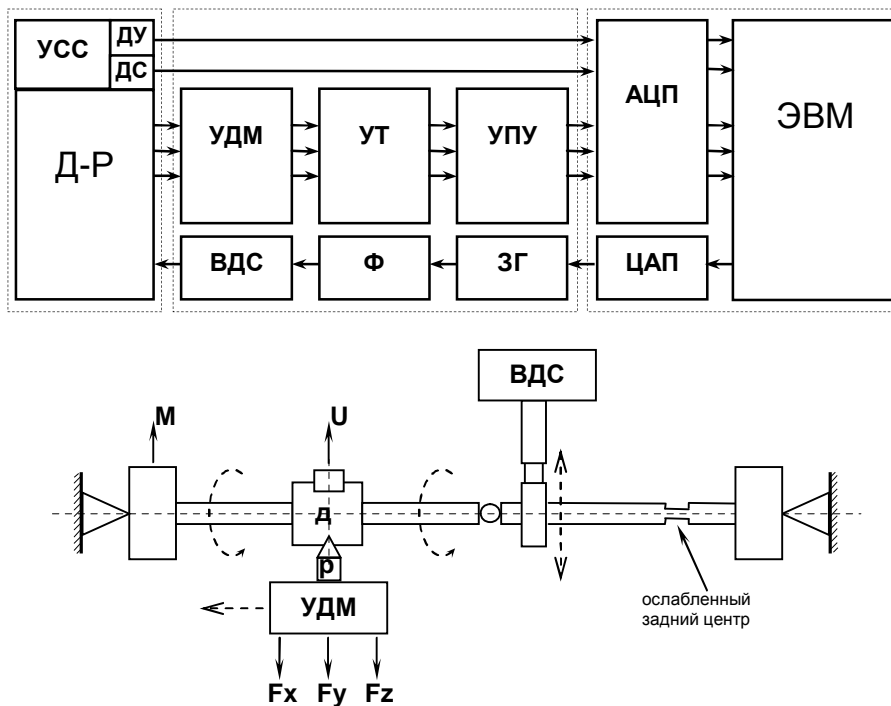


Рис. 1. Аппаратное обеспечение информационной системы: УСС – упругая система станка, ДУ – датчик управления, ДС – датчик смещения, Д – деталь, Р – резец, УДМ – динамометр, УТ – тензометрический усилитель, ВДС – вибратор, Ф – фильтры, УПУ – усилительно-преобразующие устройства, ЗГ – задающий генератор, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, ЭВМ – электронная вычислительная машина

(плата AD/DAC L-305, содержащая 16-канальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и 1-канальный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП));

— ЭВМ архитектуры IBM PC-AT (ЭВМ).

Методология проведения эксперимента заключается в возбуждении колебаний заданной частоты и амплитуды в зоне резания и снятии значения силы резания и относительных колебаний детали во время последующей вибрационной обработки и срезании оставленного следа.

Согласно рис. 1, заготовка закрепляется на оправке, установленной в центрах станка. Для ориентации колебаний задний центр имеет ослабленное сечение прямоугольной формы. В процессе обработки детали с ЭВМ выдается команда на запуск сбора данных (рис. 2), после которой управляющая программа начинает анализ сигнала  $M$ , поступающего с датчика управления ДУ на первый канал АЦП. При регистрации первого целого, после выдачи команды,  $n$ -го управляющего импульса на первом канале АЦП с ЦАП системы выдается запускающий сигнал, который включает вибратор ВДС, после чего на  $(n+1)$ -м обороте детали при включенном вибраторе напряжения  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  и  $U$ , пропорциональные значениям трех составляющих силы резания и амплитуде относительных колебаний резца и детали, с динамометра УДМ и фотодатчика смещения ДС поступают на аналоговые входы АЦП и оцифрованная экспериментальная информация о динамической характеристике резания (ДХР) I-го рода вводится в память ЭВМ. Затем, на  $(n+2)$ -м обороте, вибратор выключается и аналогичным образом снимаются данные о динамической характеристике резания II-го рода, после чего эксперимент завершается. После окончания эксперимента данные, накопленные в памяти машины, помещаются в файл на диске ЭВМ. Так как длительность управляющих импульсов равна половине одного оборота детали, имеется возможность выделить и исключить переходные процессы, вызванные включением и выключением вибратора на первом полуобороте детали. Таким образом,

информация об  $u_2^{(1)}$ ,  $f_1^{(1)}$ ,  $f_2^{(1)}$ ,  $f_3^{(1)}$ , снимаемая после первого импульса, и об  $f_1^{(2)}$ ,  $f_2^{(2)}$ ,  $f_3^{(2)}$ , снимаемая после второго импульса с датчика ДУ, по четырем каналам данных вводится в ЭВМ для последующей обработки. При обработке информации на ЭВМ учитывается, что  $u_2^{(2)} = -u_2^{(1)}$ , так как на  $(n+2)$ -м обороте оставленный инструментом след практически совпадает с относительными колебаниями детали на  $(n+1)$ -м обороте с точностью до множителя «-1».

### Информационное и программное обеспечение информационной системы

Информационное обеспечение системы состоит из входной и выходной информации, определяющей основные параметры проведения эксперимента и получаемые экспериментальные данные.

Входной информацией для системы являются:

- параметры проведения эксперимента;
- управляющий сигнал с датчика оборотов шпинделя;
- мгновенные значения напряжений трех составляющих силы резания и относительных смещений детали и резца.

Параметры проведения эксперимента задаются при конфигурации системы управления из файла параметров эксперимента, находящегося на жестком диске ЭВМ, и включают в себя:

- общую длительность сбора экспериментальных данных;
- массив с номерами опрашиваемых каналов АЦП;
- шаг квантования АЦП по времени;
- межканальную задержку АЦП;
- цифровой код датчика управления (пороговое значение, при превышении которого выдается сигнал на пуск и останов вибратора);
- цифровой код пуска вибратора, определяющий уровень напряжения на ЦАП и частоту колебания при включенном вибраторе;

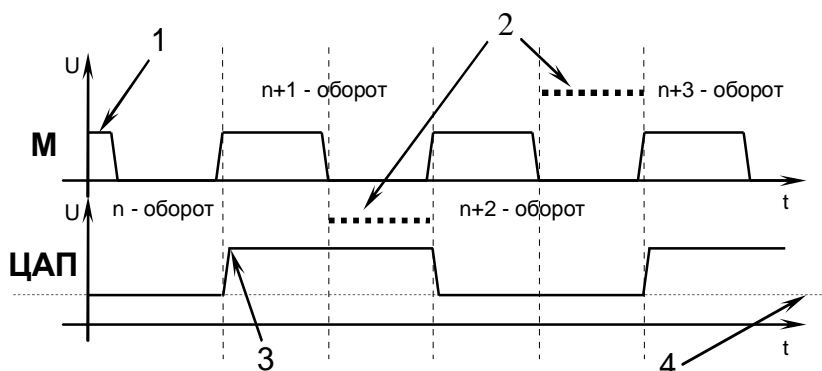


Рис. 2. Временная диаграмма работы системы управления системы: 1 – команда на запуск сбора данных,

- цифровой код остановки вибратора, определяющий уровень напряжения на ЦАП при выключенном вибраторе;
- имя файла для сохранения собранных данных на жестком диске ЭВМ;
- имена файлов на жестком диске ЭВМ, содержащих BIOS для автоматической системы управления.

Кроме этого, с помощью элементов управления станка устанавливаются значения скорости вращения шпинделя, продольной подачи суппорта и глубины резания, а с помощью элементов управления вибратора – амплитуда вынужденного колебания.

В процессе проведения эксперимента информация о мгновенных значениях составляющих силы резания и относительного смещения детали и резца вместе с управляющим сигналом в форме уровня напряжения подаются на входные каналы АЦП, а затем в цифровой форме поступают в память вычислительной машины. Далее экспериментальная информация в виде цифровых массивов  $R_M$ ,  $R_U$ ,  $R_{F_x}$ ,  $R_{F_y}$ ,  $R_{F_z}$  сохраняется в файле на жестком диске ЭВМ.

Используя оцифрованные данные  $R_M$ , полученные с управляющего датчика ДУ, из экспериментальных массивов  $R_U$ ,  $R_{F_x}$ ,  $R_{F_y}$ ,  $R_{F_z}$  выделяются кадры *полезных* экспериментальных данных  $U_{U1}$ ,  $U_{F_{x1}}$ ,  $U_{F_{y1}}$ ,  $U_{F_{z1}}$ ,  $U_{F_{x2}}$ ,  $U_{F_{y2}}$ ,  $U_{F_{z2}}$ , полученных на вторых полуоборотах первых двух целых последовательных оборотов детали (см. рис. 2), прошедших после выдачи команды запуска. На втором этапе обработки осуществляется цифровая фильтрация полезных данных с помощью фильтра с полосой пропускания 100–600 Гц. На последнем этапе преобразований отфильтрованные данные проходят осреднение по числу целых периодов колебаний, уложившихся во вторые полуобороты каждого из двух последовательных оборотов детали, и в результате получают обработанные массивы  $P_{U1}$ ,  $P_{F_{x1}}$ ,  $P_{F_{y1}}$ ,  $P_{F_{z1}}$ ,  $P_{F_{x2}}$ ,  $P_{F_{y2}}$ ,  $P_{F_{z2}}$ .

Данные массива  $P_{U2}$  получают путем умножения значений массива  $P_{U1}$  на «-1», так как след, оставленный резцом на первом обороте, совпадает с колебаниями детали на втором обороте с точностью до множителя «-1».

Полученные массивы данных используются для построения графических зависимостей экспериментальных динамических характеристик резания:  $F1[U1]$  для ДХР I-го рода,  $F2[U2]$  для ДХР II-го рода, а также для идентификации параметров математической

модели динамической характеристики процесса несвободного косоугольного резания [9].

Программное обеспечение информационной системы (ПОИС) (рис. 3) разработано и функционирует под управлением операционных систем Microsoft Windows 2000/XP. Часть программных комплексов реализована с использованием алгоритмических языков C и C++. Остальные модули системы, в частности алгоритмы обработки полученных экспериментальных данных, спектрального преобразования и цифровой фильтрации, а также сопутствующая графическая интерпретация данных, реализованы с помощью встроенного программного языка системы аналитических вычислений MAPLE.

ПОИС состоит из следующих программных комплексов:

- комплекс автоматического управления экспериментом;
- комплекс графической визуализации экспериментальных данных;
- модуль обработки экспериментальных данных, цифровой фильтрации и построения экспериментальных динамических характеристик процесса резания металлов.

Комплекс автоматического управления экспериментом предназначен для проведения эксперимента и сбора экспериментальных значений динамических сил резания и относительных колебаний резца и детали. Он состоит из следующих программных компонентов:

- драйвер системы управления экспериментом, включающий файлы `adcdrv.sys`, `adcdrv.inf`, `lbios.bin` и `lbios.dat`;

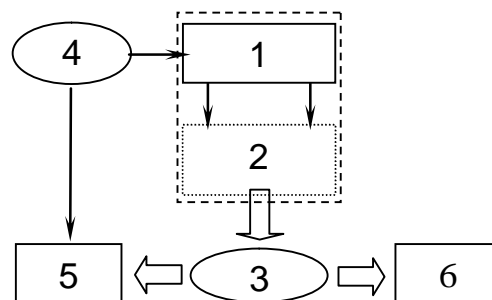


Рис. 3. Архитектура программного обеспечения информационной системы: 1 – программа управления экспериментом, 2 – драйвер системы управления экспериментом, 3 – файл, содержащий экспериментальные данные о динамике резания, 4 – файл параметров эксперимента, 5 – комплекс графической визуализации экспериментальных данных, 6 – модуль обработки полученных экспериментальных данных

— программа управления экспериментом `manager.exe`.

Результатом работы комплекса является файл `buffer.bin` на жестком диске ЭВМ, содержащий полученные экспериментальные данные о динамике резания, а также параметры проведения эксперимента.

Комплекс графической визуализации экспериментальных данных предназначен для отображения собранных данных на дисплее ЭВМ и состоит из файла `viewer.exe`, который использует данные файла параметров эксперимента `default.xml`.

Модуль обработки полученных экспериментальных данных предназначен для обработки, спектрального анализа и цифровой фильтрации собранной экспериментальной информации. Он реализует алгоритмы выбора полезных кадров данных из собранных экспериментальных данных, усреднения их по числу целых периодов, построения спектра сигналов, их цифровой фильтрации, а также осуществляет построение экспериментальных динамических характеристик процесса резания.

Модуль обработки состоит из двух программных компонентов:

- библиотека импорта экспериментальных данных в среду системы MAPLE;
- библиотека подпрограмм обработки, спектрального преобразования и цифровой фильтрации полученных экспериментальных данных.

Модуль состоит из файлов `expdata.dll` и `dynamics.lib`. Библиотека импорта `expdata.dll` включает в себя алгоритмы доступа к экспериментальным данным из системы MAPLE. Файл `dynamics.lib` является модульным файлом системы MAPLE и реализует библиотеку подпрограмм обработки, спектрального преобразования и цифровой фильтрации полученных экспериментальных

данных.

#### Список литературы

1. Клушин М.И. Резание металлов. Элементы теории пластического деформирования срезаемого слоя. – М.: Машгиз, 1958. – 454 с.
2. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. – М.: Машгиз, 1961. – 368 с.
3. Кабалдин Ю.Г., Шпилев А.М. Самоорганизующиеся процессы в технологических системах обработки резанием. Диагностика. Управление. – Владивосток: Дальнаука, 1988. – 296 с.
4. Городецкий Ю.И., Продиус В.Я. Экспериментальное исследование динамических характеристик процесса резания с помощью ЭВМ // Станки и инструмент. – 1980. – № 6. – С. 25–27
5. Галкин А.П., Городецкий Ю.И., Крючков А.И., Продиус В.Я. Автоматизация исследований динамики процесса резания в связи с решением задач оптимального проектирования металлорежущих станков. Автоматизация научных исследований. – Куйбышев: КуАИ, 1988. – С. 130–136.
6. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 428 с.
7. Hansen G.W., Hansen J.V. Database management and design. Prentice-Hall International. Inc., 2000. – 534 p.
8. Буданков А.С., Городецкий Ю.И. О динамических характеристиках процесса резания металлов и объектной модели их базы данных. Прогрессивные технологии в машино-приборостроении // Межвузовский сборник статей. – Н. Новгород–Арзамас, 2003. – С. 87–91.
9. Буданков А.С., Городецкий Ю.И. О нелинейных математических моделях динамики процесса резания металлов // Сборник трудов VII Всероссийской научной конференции по нелинейным колебаниям механических систем. – Нижний Новгород: ННГУ, 2005. – С. 238–240.

#### EXPERIMENTAL STUDY OF THE DYNAMIC PROCESS OF METAL CUTTING AS A PART OF THE CLOSED SYSTEM OF A METAL-CUTTING MACHINE

*A.S. Budankov, V.N. Komarov*

We describe an information system for solving applied problems of physical and mathematical modeling of the dynamic processes accompanying vibratory metal cutting. The experimental data acquired by the information system can be used to identify the parameters of various mathematical models simulating the dynamics of constrained oblique-angled cutting and to calculate the stability and self-oscillations of metal-cutting machines for various process variables.