

М. П. Козочкин, Ф. С. Сабиров

## ЗАДАЧИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРИ СОЗДАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В статье рассматриваются проблемы технической диагностики оборудования для металлообработки и примеры решения задач диагностики состояния режущего инструмента в реальном времени, задач тестовой диагностики состояния шпиндельных узлов. В статье также приводится интересный пример, когда пропущенный дефект шпиндельного узла оказывает сложное влияние на работоспособность режущего инструмента, провоцирующее ложный диагноз. *Виброакустическая диагностика; диагностика шпиндельных узлов; частотные характеристики; упругие деформации; динамические характеристики*

Технической диагностикой называется наука о распознавании состояния технических систем. В станкостроении методы технической диагностики получили импульс развития еще в восьмидесятые годы. Именно тогда начали создаваться гибкие производственные системы и модули, ориентированные на внедрение принципов «безлюдной технологии». За это время существенно изменилась приборная база, на которой строятся системы технической диагностики, расширились возможности вычислительной техники, с помощью которой реализуются диагностические алгоритмы, многократно увеличилось ее быстродействие и объемы памяти, повысилась компактность и надежность всех модулей диагностических систем, значительно расширились технические возможности первичных преобразователей. Однако и технологическое оборудование претерпело значительные изменения. Автоматизированные технологические системы механической обработки совершенствуются в направлении концентрации на одном рабочем месте различных видов технологических операций. На повестке дня возникли задачи обработки деталей с наноточностью, возникли потребности в обработке новых материалов и т. п. Статистические данные об отказах технологических систем, определяемых незапланированным износом и поломкой режущего инструмента при различных видах обработки, свидетельствуют о том, что время простоев оборудования с ЧПУ из-за таких отказов составляет до 50 % времени рабочей смены. В тех же условиях простои, обусловленные отказами оборудования, не превышают 6 % рабочего времени [1–4].

### ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ СИСТЕМАМИ ДИАГНОСТИКИ, И СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРОБЛЕМЫ

В качестве инструментария получения диагностической информации в современном станкостроении можно определить три направления применения систем диагностики, отличающихся областями использования и периодичностью. Это оперативная диагностика (ОД), тестовая (ТД) и исследовательская (ИД). ОД предназначена для отслеживания состояния важнейших узлов и процессов на станке в реальном времени, ТД предполагает периодическое получение информации о состоянии важнейших узлов и изменениях в настройках. ИД предназначена для изучения физических процессов, определяющих связь функциональных параметров технологического оборудования и соответствующих процессов с диагностическими параметрами, которые потом используются в ОД и ТД. ИД является тем фундаментом, на базе которого выявляются эффективные диагностические параметры и строятся рациональные алгоритмы выявления различных видов отказов в тестовом режиме и режиме реального времени как режущего инструмента, так и узлов оборудования. Отмеченные направления диагностики тесно переплетаются между собой, определяя друг для друга круг нерешенных задач и их приоритеты.

Оперативная диагностика является тем направлением, значение которого резко возрастает при расширении работ по созданию автоматизированных технологических комплексов (ГПМ, ГПС). В число задач ОД включаются такие важнейшие направления, как диагностика процесса резания, состояния режущего инструмента и важнейших узлов, размерный контроль и коррекция положения режущего инструмента,

паспортизация технологического процесса, заключающаяся в записи сопровождающих операций диагностических параметров, и ряд других задач, возникающих в конкретных условиях. Поскольку переход на режим «безлюдной технологии» невозможен без интеллектуализации оборудования, важнейшим этапом ОД является оснащение станков встроенными источниками информации о состоянии важнейших узлов и качестве протекания самого технологического процесса. Этим проблемам посвящено много работ, предлагающих самые разнообразные подходы к их решению [1–9].

Из перечисленных задач ОД особо следует выделить задачу распознавания и фиксации поломок и предельного износа режущего инструмента (РИ). В настоящее время при создании систем ОД основной упор делается на контроль силовых нагрузок и виброакустических (ВА) сигналов в зоне резания, генерируемых в процессе обработки изделия. Современные приводы предусматривают поступление в ЧПУ станка сигнала, пропорционального создаваемому крутящему моменту. Если крутящий момент, возникающий при резании, можно выделить на фоне сигнала, определяемого холостым ходом станка, то с его помощью можно наблюдать за износом РИ. Практика показывает, что следить за износом мелкого концевой инструмента и за чистовым инструментом с помощью такой системы удается не всегда, поскольку приращение мощности, создаваемое таким инструментом, обычно очень небольшое, которое трудно выделить на фоне момента холостого хода. Поэтому для контроля износа и поломок чистового и мелкого инструмента количество контролируемых параметров в процессе резания расширяется за счет контроля параметров ВА сигнала [3]. Природа силовых и вибрационных параметров разная, поэтому, несмотря на то, что порой они коррелируют между собой, параллельный контроль силовых и ВА параметров дает положительный эффект, позволяя выявлять больший процент изношенного инструмента, не доводя ситуацию до поломки. Недостатком алгоритмов, используемых для контроля износа и поломок инструментов, является необходимость проведения предварительного обучения для получения информации об уровне диагностических параметров при работе острого инструмента. Даже после получения такой информации остается проблема назначения «коридора», в пределах которого допустимы изменения диагностических параметров. Положение «коридора»

и его ширина могут меняться с изменением режимов резания, обрабатываемого материала, требований к качеству поверхностного слоя изделия, жесткости заготовки в пределах зоны резания. То есть задание допустимых границ изменения значений диагностических параметров может потребовать предварительных исследований с участием инженера-технолога. Результатом такого исследования должно стать задание целого ряда коэффициентов, определяющих границы «коридоров» контролируемых параметров. Необходимость задания «коридоров» для нескольких контролируемых параметров делает задачу особенно сложной [5]. Развитие ОД в части диагностики состояния инструментов должно идти по пути совершенствования алгоритмов распознавания, а также создания системы автоматической разработки программ диагностики, объединенных с системами автоматической подготовки управляющих программ. В общей постановке такая задача крайне сложна для строгого решения, особенно при использовании ВА параметров, характеризующихся нелинейной зависимостью от условий обработки. Задача упрощается, если она ориентирована на конкретное производство, где в автоматическом режиме обрабатывается ограниченный набор изделий, повторяющийся в зависимости от потребностей производства. В этом случае удается разбить используемые инструменты на группы, где для каждой из них дается определенный набор коэффициентов, определяющих границы «коридора» относительно значений, получаемых при работе острым инструментом. Но даже и здесь приходится идти на упрощения, например, исключать контроль износа на некоторых участках обработки, характеризующихся разбросом контролируемых параметров из-за нестабильности условий обработки. То есть контроль износа переносится на последующие участки с более стабильными условиями. В ряде случаев придется упрощать зависимости границ контролируемых параметров от координат рабочего пространства, используя постоянный «коридор» для разных участков обработки и разных инструментов.

Однако остаются задачи, связанные с обработкой единичных изделий с высокими требованиями к качеству поверхности. В этом случае необходимо иметь систему создания управляющих программ, совмещенную с системой разработки программы диагностики, исключаящую предварительное обучение. Для таких случаев необходимо создавать постепенно заполняемую

базу данных со значениями допусков на контролируемые параметры для разных условий обработки. Сам порядок создания такой базы данных является сложной самостоятельной задачей. Это связано с тем, что в общем случае в базе данных надо учитывать не только режимы обработки и материал заготовки, но и различные динамические характеристики инструментов, заготовок и самой упругой системы в разных точках рабочего пространства. Сложности вызывает количество характеристик, с помощью которых можно описать, например, материал заготовки или ее динамические характеристики и т. п.

### ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

В какой-то степени решению проблемы создания систем автоматической подготовки программ с параметрами ОД может помочь поиск и применение таких параметров контролируемых сигналов, которые в меньшей степени зависят от вариаций условий обработки, но стабильно реагируют на изменение состояния режущих кромок инструментов. Обычно это безразмерные параметры, получающиеся при делении одной характеристики контролируемого сигнала на другую. Для выявления зарождающихся дефектов могут применяться такие параметры как пик-фактор, эксцесс-сигнала, но практика показала, что они применимы при анализе зарождающихся дефектов и при нарушении плавности резания [5, 9].

Для примера на рис. 1 показано изменение отношения эффективных амплитуд ВА сигнала, взятых в разных частотных диапазонах. В качестве высокочастотного диапазона был взят диапазон 7100–7800 Гц, а в качестве низкочастотного был взят диапазон 900–1200 Гц.

Видно, что отношение эффективных амплитуд ( $A_{hf}/A_{lf}$ ) в этих диапазонах падает с ростом износа резца по задней грани для всех скоростей резания, полученных при торцевом точении. Видно, что в диапазоне 30–50 м/мин это уменьшение доходит до 50 %. При малых скоростях резания при торцевом точении в ВА сигнале возникали импульсы (примеры показаны на поле рис. 1), которые приводили к росту отношения амплитуд. Для применения такого отношения амплитуд в качестве диагностического параметра необходимо заранее знать правила выбора частотных диапазонов и исследовать его поведение при более широком изменении условий обработки.

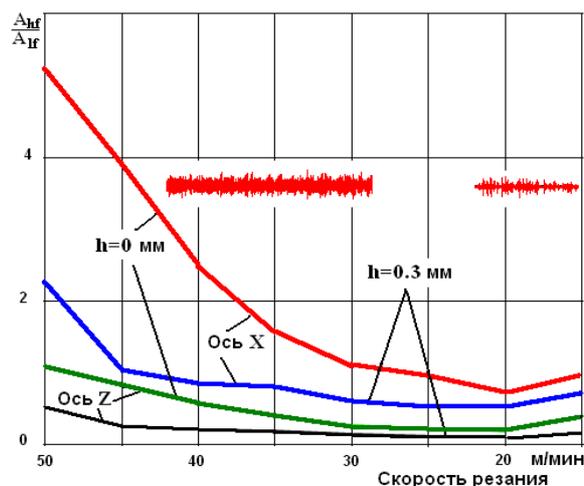


Рис. 1. Изменение отношения амплитуд ВА сигнала с ростом износа при разных скоростях резания (показаны примеры записей ВА сигналов для разных скоростей резания)

Паспортизация процесса обработки связана с изготовлением ответственных деталей, от качества которых зависит надежность функционирования оборудования, определяющего, например, безопасность людей [5]. При необходимости о нарушениях технологии изготовления деталей можно судить по характеру записей сигналов, сопровождавших процесс обработки.

Кроме инструментов, системами ОД надо охватывать и все прочие механизмы, разрегулирование и износ которых могут требовать контроля со стороны оператора. Сюда кроме шпиндельных узлов обычно еще относятся механизмы смены инструментов и заготовок, механизмы привода ограждений и т. п. Многое зависит от конкретных конструктивных и технологических недоработок и часто решение о необходимости ОД приходится принимать после начала эксплуатации технологического комплекса. Исследования показали [5], что наличие системы размерного контроля и коррекции позволяет ликвидировать более 60 % параметрических отказов. Круг задач ОД обычно расширяется в условиях конкретной реализации.

Тестовая диагностика (ТД) может опираться на средства ОД, на мобильные диагностические комплексы и на стационарные комплексы, которыми оснащаются стенды для испытаний станочных узлов. Практика эксплуатации ГПС показала, что параметрические отказы, связанные с нарушением регулировок различных механизмов, могут резко снижать эффективность эксплуатации ГПС [1–5]. Нарушения регулировок

какого-либо элемента механизма могут инициировать ускоренный износ связанных с ним других деталей и узлов. По результатам ТД должна определяться необходимость технического обслуживания, регулировки, замены деталей или элементов узлов. Ниже показан пример влияния качества ТД на вероятность ложного диагноза при ОД.

При эксплуатации токарного станка с ЧПУ мод. TNL-100AL операторы столкнулись с интенсивными автоколебаниями на некоторых переходах, например, при прорезке канавок (рис. 2).

Построение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) для обоих станков (рис. 2) показало, что первая собственная частота дефектного станка (станок № 1) на 109 Гц ниже станка № 2, а динамическая податливость его на 70 % выше.

Логарифмический декремент колебаний составлял 0,057 и 0,154 для станков № 1 и 2 соответственно.

Однако не прослеживалась связь между автоколебаниями на столь высоких частотах с динамическими характеристиками шпинделя.

Частота автоколебаний составляла около 5,9 кГц. Поскольку столь высокие частоты свойственны режущему инструменту, то причиной отказа объявлялся канавочный резец. Дальнейшие исследования были инициированы тем фактом, что тот же резец на другом таком же станке давал вполне приемлемые результаты.

При сравнении экспериментальных АЧХ, полученных путем импульсного силового воздействия на шпиндель [10], с АЧХ, полученными с помощью математического моделирования [1, 11], было установлено, что такое изменение АЧХ соответствует ослаблению натяга в переднем подшипнике.

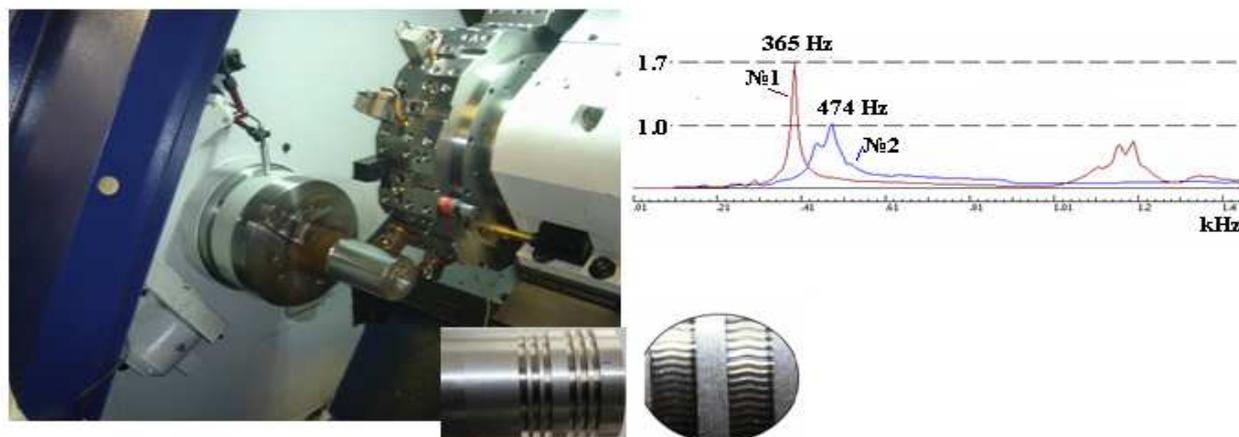


Рис. 2. Токарный станок мод. TNL-100AL, фотография следов вибраций, амплитудно-частотные характеристики шпинделей двух экземпляров станков

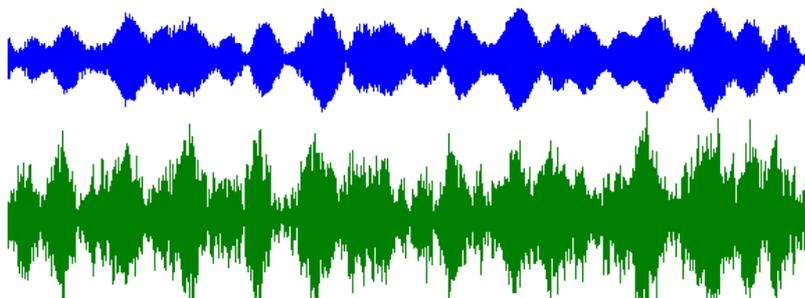


Рис. 3. Профиль ВА сигналов, записанных на револьверной головке (верхний график) и шпиндельной бабке. Период записи 0,2 с

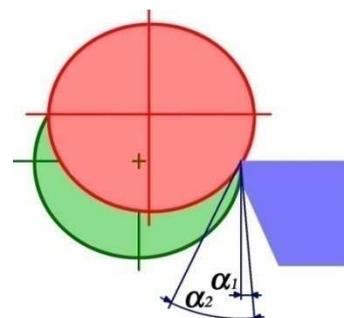


Рис. 4. Схема изменения положения центра заготовки и заднего угла при автоколебаниях

Этап ИД был начат с параллельной записи ВА сигналов автоколебательного процесса с корпуса шпиндельной бабки и инструментального узла. На рис. 3 показан профиль записанных ВА сигналов. Верхний график был зафиксирован на шпиндельной бабке, нижний – на револьверной головке. Видно, что контуры записанных сигналов во многих деталях подобны.

Контур ВА сигнала на рис. 3 не носит строго периодического характера. Его разложение в спектр показывает, что для обоих сигналов в спектре их огибающих присутствуют спектральные максимумы на частотах 63, 82, 102, 122 Гц. Можно также отметить, что фаза минимума в сигнале на шпиндельной бабке наступает приблизительно на 0,002 с раньше. Перечисленные частоты значительно ниже собственных частот шпинделя, РИ и других элементов станка. Этот факт позволяет предположить, что модулирующие низкочастотные колебания тоже являются автоколебательным процессом, природа возникновения которого поясняется на рис. 4.

На рис. 4 схематично показано, что из-за уменьшения радиального натяга шпиндель вместе с заготовкой имеет возможность под действием сил резания приподниматься над режущей кромкой и «накатываться» на нее. При этом увеличивается фактический задний угол, уменьшается демпфирование. В процессе дальнейшего резания шпиндель с заготовкой постепенно спускается в исходное положение небольшими скачками при формировании каждого элемента стружки. После опускания шпинделя высокочастотные автоколебания на короткий миг прекращаются, но процесс движения шпинделя повторяется вновь. Ситуация напоминает движение смычка по струнам скрипки, только в качестве струны выступает резец, а в качестве смычка – шпиндель с заготовкой, которыми управляет низкочастотный автоколебательный процесс. В результате было принято решение о необходимости замены шпиндельного узла.

Проблемы ТД возникают и на стадии изготовления станочных узлов, стадии закупки оборудования, на стадии его эксплуатации. Например, при изготовлении шпиндельных узлов проверяется точность вращения и нагрев в опорах. Особенностью зарождающихся дефектов является то, что они не сразу отображаются на функциональных характеристиках узлов, но они ограничивают перспективу использования данного узла. Зарождающийся дефект через какое-то время разовьется до значительных размеров,

что нарушит нормальную работу узла. Сначала нарушаются точность и качество поверхности, дальнейшая эксплуатация может привести к функциональному отказу, вызывающему простой оборудования. В связи с этим методы ТД должны включать проверки, позволяющие выявлять зарождающиеся дефекты в узлах. Например, методы ВА диагностики обладают высокой чувствительностью к изменению условий контактирования подвижных элементов узлов. Для выбора наиболее чувствительных параметров к изменениям качества в контролируемых узлах необходимы соответствующие исследования, позволяющие установить физические закономерности, связывающие зарождающиеся дефекты с диагностическими параметрами. Для ВА сигналов это может быть корреляционный и спектральный анализы, анализ огибающих в разных частотных диапазонах, статистический анализ. Сюда же можно отнести и анализ пространственного распределения ВА сигналов (анализ «розы вибраций») [12].

Каждая точка упругой системы совершает пространственные колебания. Выделение доминирующих направлений колебаний в разных частотных диапазонах тоже несет полезную информацию о причинах возникающих нарушений. Для примера, на рис. 5 показаны, пространственные «розы вибраций» в октавной полосе 2,8–5,6 кГц для передних опор двух шлифовальных шпинделей [11].

Оба шпинделя по температуре нагрева и точности вращения соответствовали существующим нормативам, хотя второй шпиндель имел показатель нагрева на 15° выше. Видно, что второму шпинделю соответствует более выраженной асимметрия «розы вибраций» и больший размах распределения колебаний. Полученная картина позволяет судить о направленности ударов в контакте тел качения. Однако возникает вопрос до какой величины допустима асимметрия распределения вибраций, показанная на рис. 5 для второго шпинделя. Такая же проблема возникает и по целому ряду других показателей. В любом узле встречаются отклонения от идеала, но рационально разрешить дихотомию годен / негоден без отслеживания поведения узла в эксплуатации крайне трудно. Для этого потребуется процедура сопоставления результатов ТД с результатами наблюдений за поведением узла в процессе эксплуатации.

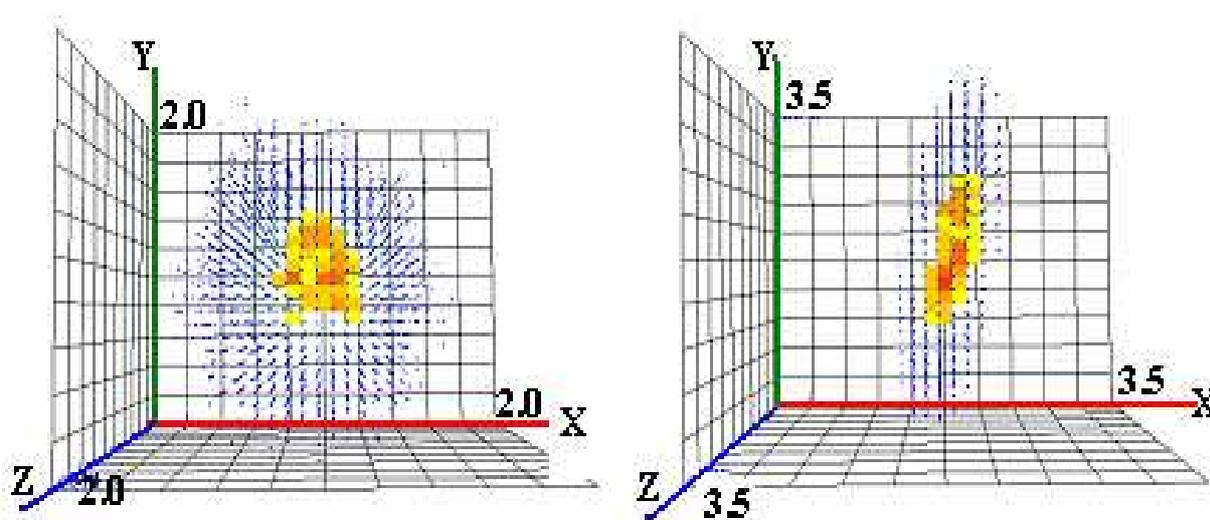


Рис. 5. Примеры построения пространственных распределений вибраций для шлифовальных шпинделей (ось X – ось шпинделя)

## ВЫВОДЫ

Основным фундаментом технической диагностики является знание физических процессов, происходящих в станочных узлах и при резании. Изучать эти процессы непосредственно нельзя, поэтому приходится прибегать к помощи разнообразных датчиков, сигналы которых связаны с функциональным состоянием изучаемых процессов. Это сложная работа, часто находящаяся на уровне искусства, где поиск диагностических моделей ведется эвристическими методами, опирающимися на опыт и интуицию исследователя. Только глубокое знание физики процессов позволяет находить простые и надежные диагностические модели, которые потом могут использоваться в ОД и ТД.

Таким образом, построение эффективных систем диагностики возможно только при тесном взаимодействии всех ее направлений с учетом аппаратных возможностей современной промышленности [1, 14].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев С. Н., Козочкин М. П., Сабиров Ф. С. Диагностика автоматизированного производства. М.: Машиностроение, 2011. 600 с.
2. Синопальников В. А. Надежность и диагностика технологических систем: учебник. М.: Высшая школа, 2005. 343 с.
3. Козочкин, М. П., Глух О. Н. Виброакустическое диагностирование состояния режущего инстру-

мента на гибких производственных модулях // Станки и инструмент, 1988. № 5. С. 16–20.

4. Кудояров, Р. Г., Фецак С. И., Перевертайло Ю. В. Определение параметрических отказов станочного оборудования // СТИН. 2007. № 11. С. 9–13.

5. Проблемы технической диагностики станочного оборудования на современном этапе развития / С. Н. Григорьев [и др.] // Вестник МГТУ Станкин, 2010. № 4. С. 27–36.

6. Козочкин М. П., Кочинев Н. А., Сабиров Ф. С. Диагностика и мониторинг сложных технологических процессов с помощью измерения виброакустических сигналов // Измерительная техника, 2006. № 7. С. 30–34.

7. Sabirov F. S., Savinov S. Y. Diagnostics and control of the accuracy of axis drives for automatically controlled multicoordinate metal cutting machines // Measurement techniques, Springer New York. 2011. Vol. 54, № 8. P. 879–882.

8. Применение систем контроля и диагностики для обеспечения качества поверхностей при строчечном фрезеровании / В. А. Горелов [и др.] // Контроль. Диагностика/ 2007. № 11. С. 53–59.

9. Козочкин М. П. Особенности вибраций при резании материалов // СТИН. 2009. № 1. С. 29–35.

10. Сабиров Ф. С. Импульсный метод оценки динамических характеристик упругих систем станков // Справочник. Инженерный журнал. 2009. № 11. С. 38–43.

11. Виброакустическая диагностика опор шпинделей станков для высокоскоростной обработки / М. П. Козочкин [и др.] // СТИН. 2010. № 6. С. 17–21.

12. Kozochkin M. P., Sabirov F. S. Attractors in cutting and their future use in diagnostics // Measure-

ment techniques, Springer New York, 2009. Vol. 52, № 2. P. 166–171.

13. **Юркевич В. В.** Контроль и диагностика процесса формообразования при обработке на токарных станках // Контроль. Диагностика. 2005. № 1. С. 45–48.

14. **Козочкин М. П., Сабиров Ф. С., Маслов А. Р.** Станки с ЧПУ с системами диагностики // Комплект: ИТО, 2010. № 6. С. 34–35.

#### ОБ АВТОРАХ

**Козочкин Михаил Павлович**, проф. каф. станков МГТУ «Станкин». Дипл. инженер-механик (МосСТАНКИН, 1969). Д-р техн. наук по технологиям и оборудованию механической и физико-технической обработки (МосСТАНКИН, 2002). Иссл. в обл. виброакустической диагностики технологич. оборудования и технологических процессов.

**Сабиров Фан Сагирович**, зав. той же каф. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1973). Д-р. техн. наук по технологиям и оборудованию мех. и физ. -техн. обработки (МГТУ «Станкин», 2009). Иссл. в обл. металлорежущих станков.