

## ДИАГНОСТИКА КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

*Шитов А.М., Кондратьев И.М.*

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва*

**Ключевые слова:** теория машин и механизмов, диагностика, математическая модель, металлорежущий станок.

**Аннотация.** Рассмотрена роль диагностики как инструментария не только для определения технического состояния объектов, но и для совершенствования теории машин и механизмов. На примере диагностирования узлов металлорежущих станков показано, как разные диагностические системы позволяют решать эту задачу. Методы и средства диагностики дают возможность уточнять математические модели, описывающие различные аспекты функционирования объектов, включая оценку их остаточного ресурса. Это оказывается особенно полезным при разработке новых сложных машин и механизмов.

## DIAGNOSTICS AS A TOOL FOR THE THEORY OF MACHINES AND MECHANISMS DEVELOPMENT

*Shitov A.M., Kondratiev I.M.*

**Keywords:** theory of machines and mechanisms, diagnostics, sensor, mathematical model, machine tool.

**Abstract.** The role of diagnostics for theory of machines and mechanisms is discussed. Diagnostics tools and techniques usage is shown through machine tool examples to demonstrate possibilities to improve and refine mathematical models.

Один из разделов современной теории машин и механизмов связан с исследованиями машин-автоматов, мехатронных и робототехнических систем. В ходе разработки подобных устройств стремятся обеспечить согласованность работы отдельных узлов и механизмов системы с целью достижения наилучших показателей качества ее функционирования (производительности, точности, надёжности, безопасности и др.).

Как известно, основным инструментом исследования сложных систем и особенностей их функционирования является моделирование, возможности которого в последние годы существенно расширились за счет использования компьютеров и мощного программного обеспечения. Например, при проектировании современного станочного оборудования применяют такие широко известные программные комплексы как MatLab и ANSYS (или их аналоги, в том числе на основе открытого кода), позволяющие на ранних стадиях детально проанализировать прочностные, жесткостные, вибрационные характеристики создаваемого станка, выяснить распределение рабочих нагрузок и температурный режим его работы. Тем не менее компьютерное моделирование по-прежнему не отменяет такие этапы разработки как изготовление и испытания опытного образца (или опытной партии) изделия [1].

В процессе испытаний требуется контролировать (измерять и оценивать) различные параметры системы, описывающие функционирование системы. Для

этого в нее встраиваются разного рода датчики, обеспечивающие многопараметрический (механический, электрический, оптический, акустический и т. д.) контроль за техническим состоянием узлов с целью предотвращения возможных отказов в условиях эксплуатации [2].

Следует сказать, что возникающие на практике отказы объекта (станка, узла и т.п.) можно разделить на две категории: те, которые уже встречались прежде, и такие, которые проявились впервые. Первопричины отказов первой категории, как правило, хорошо изучены, в то время как базовые причины отказов второй категории изначально неизвестны и их приходится определять в ходе дополнительных исследований, в том числе с использованием натурных испытаний и исследования математических моделей.

При оценке технического состояния объекта значения параметров приходится сравнивать с предельно допустимыми или нормативными значениями. Как правило, эти значения задаются либо из предыдущего опыта (накопления, статистической обработки и анализа экспериментальных данных), либо с помощью математического моделирования (аналитического и численного) и расчета необходимых нормативных значений по результатам моделирования. Естественно, что результаты оценки будут зависеть от того, насколько адекватными будут используемые модели.

В ИМАШ на протяжении многих лет проводились работы по диагностированию станков и созданию систем диагностики (СД) разного назначения. В результате лабораторных и цеховых исследований большого числа станков были созданы компьютерные системы, предназначенные для диагностирования станков как в процессе их изготовления, так и при эксплуатации.

СД, представляющую собой совокупность объекта диагностирования, аппаратно-программных средств и оперативного персонала, можно рассматривать как специфическую систему управления – управления техническим состоянием объекта диагностирования. Поэтому при создании СД были использованы принципы теории систем управления.

Одной из первых разработанных в ИМАШ систем диагностики станков стала **система диагностирования токарных автоматов (СД-ТМА)**. Она представляет собой систему функционального диагностирования и является составной частью ТМА, связанной с его механической системой, а также с системами электроавтоматики и ЧПУ.

СД-ТМА предназначена для повышения надежности, предотвращения износа и поломок деталей механизмов в случае перегрузки токарных многошпиндельных автоматов (ТМА) с едиными распределительными валами (РВ) и основана на измерении крутящих моментов. Система СД-ТМА автоматически анализирует изменения крутящего момента на РВ в функции угла его поворота и проводит сравнение с эталоном. Метод диагностирования этого вида оборудования базируется на результатах проведенных натурных исследований большого числа токарных автоматов в лабораторных условиях и при эксплуатации, а также на разработке соответствующей динамической модели функционирования ТМА.

Сбор информации с помощью постоянно установленных на РВ датчиков крутящего момента ( $M$ ) и угла поворота ( $\varphi$ ), осложняется трудностью выбора начальной точки отсчета для массива диагностических данных, поскольку в начальной части массива могут отсутствовать характерные признаки, указывающие на начало цикла поворота РВ. Для устранения этой неопределенности потребовалось использовать дополнительные синхронизирующие сигналы, аппаратные и программные средства.

Динамограммы крутящего момента, записанные на РВ станка–автомата, позволяют определить формы дефектов в механизме ТМА. (Эталонная динамограмма изменения крутящего момента на РВ автомата с указанием предельных допустимых значений крутящего момента и угла поворота РВ показана на рис. 1). Например если в начале цикла (участок 1) при расфиксации шпиндельного блока проявляются удары  $M_1 \gg M_1^0$ , это означает неправильное функционирование механизма фиксации. Удары в начале поворота шпиндельного блока  $M_4 \gg M_4^0$  свидетельствуют о неправильном зацеплении ролика кривошипа с мальтийским крестом (участок 4). Если при повороте шпиндельного блока (участок 6) наблюдается значительное увеличение крутящего момента  $M_6 \gg M_6^0$ , то значит имеются дефекты в регулировке механизмов и обкатка станка была недостаточной. При подводе поперечных суппортов наблюдаются увеличение крутящего момента из-за повышенных сил трения в механизмах  $M_8 \gg M_8^0$ . Причиной этого могут быть погрешности изготовления кулачковых механизмов и неправильная регулировка зазора в направляющих (участок 8). В целом для диагностирования поворотного-фиксирующего узла многошпиндельного токарного автомата было разработано 26 дефектных карт.

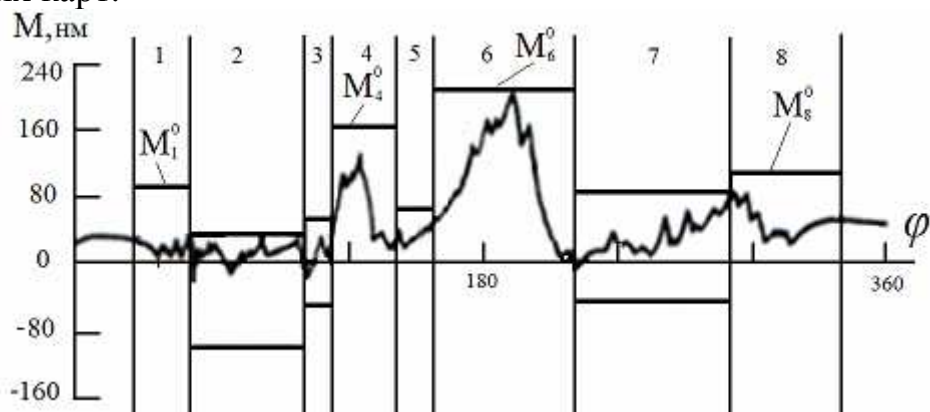


Рис. 1. Эталонная динамограмма ТМА

Другой пример системы диагностики – **система сбора данных (ССД-01) для стендовых испытаний узлов станков**. В состав этого комплекса входит испытательный стенд, оснащенный измерительными и нагрузочными устройствами. Нагрузочные устройства позволяют создавать радиальные, осевые и комбинированные усилия, действующие на исследуемый узел, обеспечивая таким образом имитацию различных режимов эксплуатации устройства в реальных условиях.

Основой аппаратной части комплекса является набор датчиков, вторичных блоков преобразования сигналов и компьютер (рис. 2.). Все датчики через блоки-

преобразователи (АЦП) с USB-интерфейсом подключают к компьютеру, оснащенный комплекс программных средств. Особенностью аппаратной части комплекса является возможность использования датчиков разного вида формирования выходного сигнала: аналоговых постоянного и переменного тока, цифровых, интеллектуальных с интерфейсом USB.



Рис. 2. Система сбора данных ССД-01

Методика диагностики шпиндельного узла (ШУ), например, включает измерение и контроль его основных параметров: оси биения шпинделя; температуры шпиндельного узла; жесткостных параметров шпинделя; вибрации на холостом ходу и под нагрузкой; люфтов в подшипниковых опорах; измерение погрешности обработки детали; энергетических потерь.

При диагностировании ШУ каждый из показателей сравнивается с нормированным, предельно допустимым, для него значением. По результатам измерения рабочих параметров оценивается наличие и степень проявления различных дефектов.

Собранная в процессе диагностики разнообразная информация о рабочих параметрах используется для корректировки математических моделей, заложенных в методике диагностики. В частности, для контроля жесткости ШУ использована математическая модель, представляющая собой систему уравнений, описывающих состояние статического равновесия, прогибы и углы поворота сечений шпинделя и отвечающую дополнительным граничным условиям, которые определяются свойствами упругих опор ШУ [3].

Многочисленные измерения жесткости и ее расчеты с помощью принятой математической модели позволили уточнить ряд параметров математической модели, касающиеся в частности описания свойств упругих опор и характера приложения сил и моментов в составных опорах ШУ. Корректировка математической модели дает возможность более обоснованно назначать предельные нормы на значение жесткости ШУ.

Аппаратно-программный комплекс успешно применяется не только для стендовой диагностики ШУ, но и служит средством сбора информации для исследования узлов с целью их возможной модернизации.

Еще один пример разработки ИМАШ – **система оперативной диагностики ВК-1И** (общий вид ее представлен на рис. 3). Она была создана для оперативной диагностики шпиндельных узлов станков разного вида, в частности токарных автоматов, профилешлифовальных и обрабатывающих центров.

Систему ВК-1И можно применять как встроенное средство в схему электроавтоматики станка или как внешнее устройство проверки состояния ШУ. Кроме того, ею можно оснащать испытательные стенды, используемые для контроля качества ремонта шпиндельных узлов.

Принцип действия системы основан на методе оперативной диагностики, позволяющем определить степень опасности возникновения дефектов для подшипников и инструмента с целью предотвращения разного рода аварийных ситуаций, в том числе и механических разрушений. Для этого определяются конкретные виды подшипниковых частот, связанные с дефектами различных компонентов подшипников, т.е. наружного и внутреннего кольца, тел качения, сепаратора, и частоты вибрации, которая возникает в результате обработки изделия на станке и характеризует виброустойчивость системы «станок – приспособление – инструмент – деталь» при заданных режимах обработки.

В состав системы ВК-1И входит микропроцессорный модуль, два датчика для измерения вибрации (в передней и задней опорах ШУ) и фотоэлектрический датчик угловой скорости. Для проверки виброустойчивости станка один из датчиков измеряет вибрацию, возникающую в системе «инструмент – деталь», и при превышении допустимого уровня колебаний подает предупреждение, а затем аварийный сигнал.



Рис. 3. Система оперативной диагностики ВК-1И

В системе заложен принцип обучения, который позволяет корректировать предельные допустимые значения контролируемых параметров путем запоминания максимальных значений, возникающих в механизмах станка при обработке деталей с предельно допустимыми режимами.

В работоспособном состоянии узла все его параметры находятся в допустимых пределах, а выход хотя бы одного из параметров за границы диапазона допустимых значений свидетельствует об отказе, т.е. потере работоспособности.

В системе ВК-1И реализована также функция прогнозирования остаточного ресурса, основанная на методе экстраполяции тренда, т.е. продления в будущее тенденций, наблюдавшихся в прошлом и описанных в уравнении модели.

Для определения остаточного ресурса необходимо знать среднюю скорость деградации диагностируемых параметров за период использованного ресурса; для этого разработаны математические модели расчета остаточного ресурса с использованием скорости деградации диагностического параметра.

Данный подход был использован, в частности, для прогнозирования остаточного ресурса ШУ по уровню допустимой вибрации. Использованная для прогноза среднего квадратического значения виброскорости функция вначале базируется на немногих исходных данных, но мере накопления статистических данных (при периодических измерениях с использованием датчиков значений параметра виброскорости) функция прогнозирования корректируется [4].

Таким образом, подводя итог, можно констатировать, что диагностирование позволяет получить разного рода информацию, на основе которой можно уточнять математические модели, описывающие функционирование исследуемых объектов, и на их основе создавать более совершенные технические системы – различные машины-автоматы, мехатронные и робототехнические системы.

#### **Список литературы**

1. ГОСТ 2.103-2013. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Стадии разработки. – М.: Стандартинформ, 2019. – 6 с.
2. Шитов А.М., Кондратьев И.М. Применение датчиков для повышения надежности станочного оборудования при эксплуатации // *Машиностроение и инженерное образование*. – 2017. – № 2 (51). – С. 2-9.
3. Шитов А.М. Диагностические методы и модели шпиндельных узлов станков // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. – 2016. – № 1. – С.43-50.
4. Шитов А.М, Кондратьев И.М. Диагностирование узлов металлорежущих станков и прогнозирование остаточного моторесурса // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. – 2018. – № 4. С. 142-149.

#### **Сведения об авторах:**

*Шитов Аркадий Михайлович* – к.т.н., с.н.с., ИМАШ РАН, г.Москва;

*Кондратьев Игорь Михайлович* – к.т.н., с.н.с., ИМАШ РАН, г.Москва.