

# СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В. А. СИДОРОВ

*Практическая реализация теоретических положений технической диагностики механического оборудования требует комплексного решения задач определения внутреннего состояния элементов механизма, определения значений прикладываемых нагрузок, восстановления работоспособного состояния механизма. Определено направление развития теории практической диагностики — разработка методов и средств управления техническим состоянием.*

*Practical realization of theoretical principles of technical diagnostics relative to mechanical equipment requires a complex solution of the problems of determination of inner state of mechanism elements, determination of applied load magnitudes, and restoration of operable condition of the mechanism. Direction of development of theory and practice of technical diagnostics is established, namely development of methods and means of technical condition control.*

Теоретические вопросы технической диагностики в основном решены в 1970-х годах и представлены в работах И. А. Биргера [1], П. П. Пархоменко [2], Б. В. Павлова [3]. Предполагалось, что «начальное техническое состояние устройства, внешние условия работы и закономерности протекания процесса износа и разрушения могут быть заданы в форме дифференциальных уравнений, решение которых с достаточной точностью предскажет момент поломки» [4].

Практическая реализация теоретических положений показала необходимость решения ряда дополнительных задач при определении технического состояния механического оборудования. Установлено, что состояние оборудования определяется внутренним состоянием отдельных элементов механизма, значениями прикладываемых нагрузок и реализацией воздействий по восстановлению работоспособного состояния механизма [5]. Соответственно современные задачи определения технического состояния механического оборудования заключаются в комплексном решении данных вопросов в общем аспекте эффективного восстановления работоспособного состояния механической системы. Рассмотрение уровней решения задач позволит классифицировать реализуемые функции диагностическими системами и выявить направления дальнейшего развития.

Известны методы функционального и тестового диагностирования, определяющие реакцию объекта контроля на неизвестное или известное внешнее воздействие [6]. Опыт диагностирования механического оборудования металлургических предприятий показывает необходимость использования информации, полученной при работе в режиме холостого хода и при работе под нагрузкой [7]. Решение задачи функционального диагностирования

должно предусматривать возможность однозначного определения действующей нагрузки. В этом случае точность диагностирования увеличивается и повышается эффективность ремонтных работ.

**Определение внутреннего состояния элементов механизма.** *Первый уровень* — это анализ технического состояния без применения технических измерительных или регистрационных средств на основании органолептических методов диагностирования. Эта информация не может быть представлена в численном выражении, поскольку решение принимается по результатам анализа чувственных восприятий. Поэтому точность метода зависит от квалификации, опыта и способностей лиц, проводящих диагностирование. При органолептическом контроле используются технические средства: лупа, микроскоп, технический стетоскоп и т. п., не являющиеся измерительными.

Решение принимается на уровне «соответствует» «не соответствует» и определяется диагностическими правилами типа «если—то», имеющими конкретную реализацию для узлов механизма. Практически состояние оборудования оценивается по двухуровневой шкале — продолжать эксплуатацию или необходим ремонт. Объем информации о техническом состоянии, а в данном случае минимально необходимый.

Основная цель — обнаружение отклонений от работоспособного состояния механизма. Решение о техническом состоянии механизма принимает технологический или ремонтный персонал. Принимается решение об остановке оборудования для визуального осмотра и последующего ремонта или продолжения эксплуатации.

*Основные органолептические методы, используемые при оценке технического состояния механического оборудования, следующие:*



– анализ шумов механизмов на основании акустического восприятия и анализа колебаний механизмов;

- контроль температуры;
- восприятие вибрации;
- визуальный осмотр механизма;
- методы осязания.

Эти методы универсальны, и если они применяются квалифицированным персоналом, имеющим значительный опыт работы наблюдения за состоянием оборудования, то их выполнение является залогом работоспособного состояния механического оборудования [8].

С позиций состояния механического оборудования работоспособное состояние следует определить не только как выполнение всех функций механизмом в пределах заданных параметров. При этом необходимо обеспечить: низкий уровень шума и вибрации; минимизацию динамических, в частности, ударных процессов; допустимые значения температуры деталей механизма; отсутствие трещин и подтеканий масла. Это позволяет сформулировать перечень диагностических параметров, объединив субъективные и объективные (приборные) методы технического диагностирования: анализ шумов механизма, измерение параметров вибрации, измерение температуры, результаты визуального осмотра.

*Второй уровень* позволяет решать вопросы контроля технического состояния механического оборудования на основе текущего контроля (мониторинга) значений диагностических параметров. Наиболее часто используется контроль температуры и параметров вибрации.

Целевую функцию данной задачи можно определить как контроль пороговых значений. Проводится измерение и контроль одного или нескольких диагностических параметров и сравнение с заданными пороговыми значениями. Требуется повышение уровня знаний персонала для интерпретации полученных данных на уровне «допустимо», «недопустимо». Для встроенных (стационарных) систем диагностирования реализуются функции защиты — сигнализация о превышении заданного уровня или отключения оборудования.

При реализации данной задачи используются портативные приборы, анализаторы или встроенные системы диагностирования. Их использование цеховыми группами диагностирования или как элемент системы управления позволяет предупредить возникновение аварийных ситуаций. На этом принципе строятся системы защиты оборудования по контролируемым диагностическим параметрам: осевому смещению, температуре, параметрам вибрации. Техническое состояние рассматривается как совокупность диагностических параметров, изменяющих значения при изменении состояния объекта [9].

Методическое обеспечение — это разработка методов оценки технического состояния: взаимной, относительной и абсолютной оценки. Основные положения взаимной и относительной оценки приведены в работах [10, 11]. Абсолютный метод представлен все более расширяющимся перечнем стандартов, регламентирующих допустимые уровни вибрации для различных классов машин.

*Третий уровень* позволяет решать вопросы распознавания (диагностирования) неисправностей механического оборудования. Появляется возможность отслеживания трендов изменения составляющих диагностических сигналов. Специализированными подразделениями ремонтных служб (службы диагностирования, виброналадки) используются в основном анализаторы вибрации, что позволяет решать широкий круг задач, связанных с определением времени ремонтного воздействия.

Обнаружение неисправностей механического оборудования проводится на основе диагностических моделей типа «если—то». При интерпретации результатов применяют экспертные системы, основанные на формализации отработанных алгоритмов диагностирования или анализе опыта квалифицированных экспертов.

Классическая теория технической диагностики изначально предполагает установление связи между пространством состояний и пространством диагностических признаков. Для этого формулируются условия разбиения множества  $W$  на подмножества: исправных  $W_1$  и неисправных  $W_2$  состояний; определяется критерий для оценки работоспособности объекта диагностики (различение состояний в подмножестве  $W_1$ ); устанавливаются признаки возникших неисправностей (различение состояний в подмножестве  $W_2$ ); устанавливаются соответствия между пространством состояний  $W$  и пространством диагностических признаков  $D$  [9].

Традиционный подход к определению технического состояния механизма, в общем аспекте решения задач технической диагностики, в первую очередь предполагает поиск неисправностей, т. е. различение состояний в подмножестве  $W_2$  [10]. С этой целью строится диагностическая модель, составляется словарь неисправностей, определяются диагностические признаки и так далее. Поиск неисправностей ведется по выбранным диагностическим признакам в зоне предполагаемых значений. Определяющим становится не количество и вид неисправностей, а количество возможных проявлений неисправностей, имеющее в несколько раз большее количество. Увеличивается число диагностических параметров, усложняются диагностические модели, растет количество обрабатываемой информации. Это усложняет процесс постановки правильного диагноза.

Методическое обеспечение заключается в разработке справочников повреждений. Для механического оборудования в наибольшей степени используется анализ составляющих вибрационного сигнала [12, 13] (рис. 1).

**Определение значений прикладываемых нагрузок.** *Первый уровень* — отображение значений прикладываемых нагрузок на основные органы чувств человека. Для этого также используются органолептические методы диагностирования: уровень и характер шума и вибрации, плавность выполнения операций и реакция механизма на управляющие воздействия. Эта информация не может быть формализована. Использование органолептических методов контроля является непременным и важным условием безаварийной работы механического оборудования.

Оператор непосредственно связан с объектом управления. Состояние объекта управления оценивается не только на основании визуальной информации, но и при помощи осязания, слуха, обоняния. Квалифицированный оператор распознает вибрации, скрипы металлоконструкций и ускорения — рывки механизмов. На основании имеющегося опыта работы оператор оценивает техническое состояние и определяет отклонения параметров от стандартных, принимает решение по управлению состоянием механизмов и конструкций. Чем выше опыт и квалификация оператора, тем более точно он может определять состояние оборудования и металлоконструкций, тем самым выявлять места их поломки или отклонения от заданных норм. Так работает система управления первого поколения [14]. Идентифицировав отклонение параметров отклонились от принятых норм, оператор передает информацию обслуживающему персоналу (механикам, электрикам), которые и устраняют неисправность.

Фактические значения действующих сил на данном уровне остаются неизвестными и определяются на уровне «больше—меньше».

*Второй уровень* — контроль пороговых значений внешней нагрузки. Контроль осуществля-

ется путем регистрации силовых параметров привода: текущих значений силы тока, значений давления в нагнетательных линиях гидропривода, частоты вращения вала электродвигателя. Для реализации функций защиты в схемах управления устанавливаются токовые реле защиты от перегрузок, предохранительные клапаны.

Выполняется визуализация действующих нагрузок в виде аналоговых, цифровых показывающих приборов, временной реализации текущих значений контроля (рис. 2, 3).

Осуществляется контроль и защита оборудования по контролируемому параметру. В случае превышения заданных порогов включается звуковая, световая сигнализация, проводится отключение оборудования. Пороги устанавливает разработчик или обслуживающий персонал на основе опыта использования оборудования или рекомендаций стандартов.

*Третий уровень* — это распознавание уровней прикладываемых технологических и паразитных нагрузок. Это позволит определять зоны стабилизации технического состояния при изменении режимов работы оборудования, минимизировать степень разрушающих технологических нагрузок. Примером такого решения может быть график изменения общего вектора виброскорости редуктора привода прокатной клетки от частоты вращения вала двигателя (рис. 4). В данном случае снижение виброскорости произошло из-за проявления гирокосмического эффекта при работе оборудования на податливом фундаменте.

Использование информации о внешней нагрузке является необходимым элементом при определении текущего состояния механизма и прогнозировании снижения ресурса из-за накопления повреждений под влиянием повышенных нагрузок. Следовательно, реализация данных задач должна решаться в рамках единой системы диагностирования.

**Восстановление работоспособного состояния механизма.** *Первый уровень* позволяет восстановить рабочее состояние механического обо-

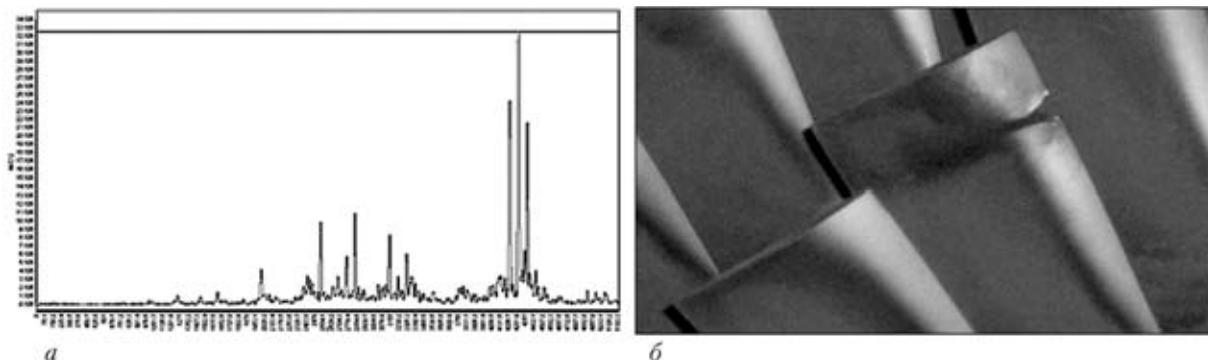
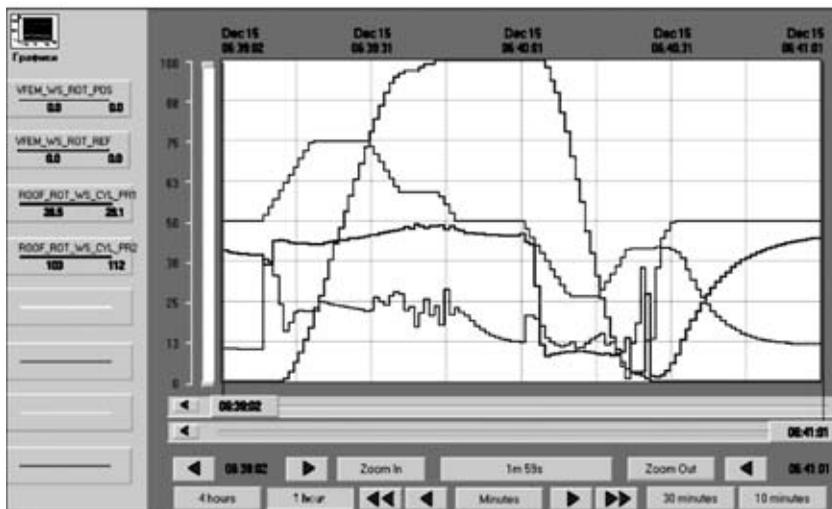


Рис. 1. Преобладающая лопаточная частота в спектре виброускорения, зафиксированного на корпусе компрессора (а) и визуальное подтверждение повреждений лопатки при ремонте (б)



б

Рис. 2. График движения свода (а) и пример реализации процесса (б)

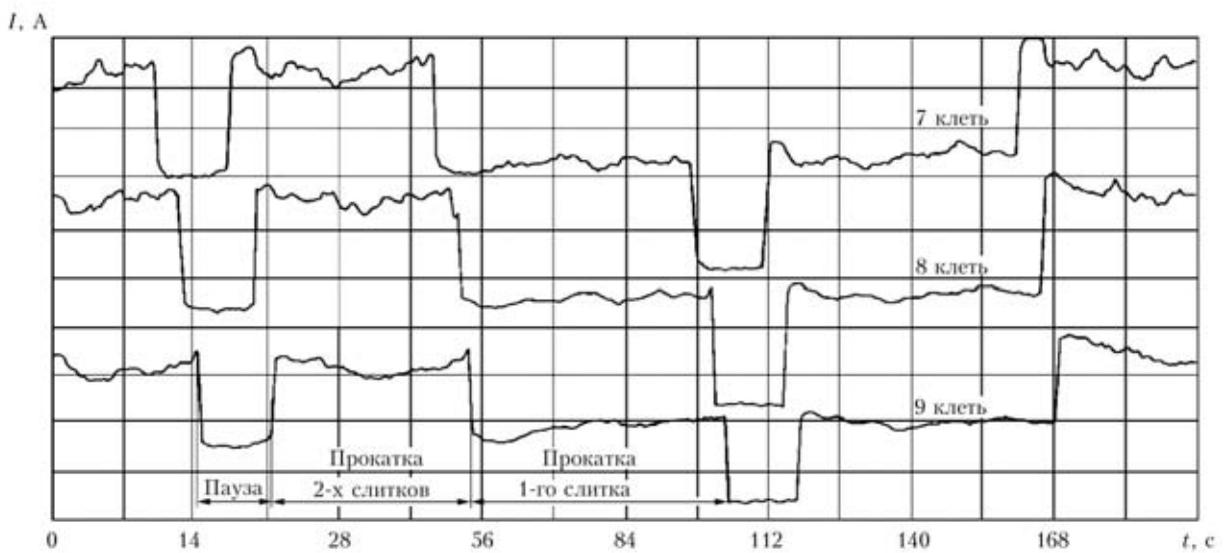


Рис. 3. Временные формы токовых характеристик двигателей прокатных клеток

рудования путем выполнения предупредительных операций по техническому обслуживанию и ремонту. При техническом диагностировании требуется не только обнаружение неисправностей, а и выдача четких рекомендаций. Следовательно, для каждого возможного вида ремонтных воздействий  $R_i$  необходимо определить диагностические признаки  $D_i$ . Необходимость проведения каждой операции следует определить несколькими решающими правилами, сопоставив их с ограниченным числом диагностических признаков.

Основанием для решения может послужить ограниченное число реальных ремонтных воздействий применительно к конкретному механизму. Перечень операций по техническому обслуживанию следующий: осмотр, очистка механизма, окраска деталей, смазка и затяжка резьбовых соединений. Операции по ремонту механического оборудования: регулировка — центрирование валов, установка зазоров, выверка положения элементов, балансировка; замена быстроизнашивающихся деталей (подшипников, валов, зубчатых передач, резьбовых соединений, уплотнений); восстановление корпусных деталей.

Методическое обеспечение — обоснование необходимости проведения ремонтов. Это позволит создать теоретические предпосылки для перехода на ремонт механического оборудования по состоянию.

*Второй уровень* — проведение упреждающего ремонта. Исходя из методологии теории катастроф, авария начинается развитием подготовительных процессов, дальнейшим доминированием нескольких процессов и завершается инициирующим событием. Соответственно, развитие отказа можно замедлить и предотвратить, влияя на скорость развития подготовительных процессов. Это обосновывает актуальность проведения предупредительных ремонтных воздействий для обеспечения безотказности и повышения долговечности оборудования. Необходимым условием для успешной реализации данного предложения является определение факторов, определяющих работоспособное состояние механизма и уровней данных факторов для оценки категории технического состояния.

Факторы, обеспечивающие работоспособность элементов и механизма в целом: состояние неподвижных соединений; состояние узлов трения; взаимное расположение деталей; равномерное распределение сил; накопление усталостных повреждений. Каждый из факторов имеет четыре уровня: исправного состояния, малых отклонений,

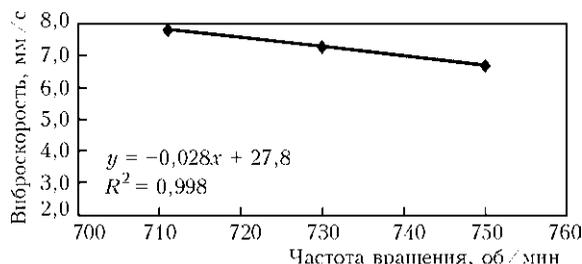


Рис. 4. Зависимость изменения вектора виброскорости редуктора прокатной клетки от частоты вращения двигателя

проведения ремонтных воздействий и предотказный. Уровни факторов необходимо определить по изменениям физических процессов износа или взаимодействия элементов. Соответствующие уровни факторов работоспособности элементов определяют техническое состояние механизма: хорошее, удовлетворительное, плохое и аварийное.

Основные предпосылки при определении уровней факторов следует определить изменением физики процесса износа, например, характера взаимодействия контактирующих либо сопрягаемых деталей.

*Третий уровень* позволит обеспечить управление техническим состоянием оборудования на этапе эксплуатации без остановки технологического процесса. Необходимое условие — наличие регуляторов технического состояния, отсутствующих в настоящее время. Примером такого вида регуляторов являются автоматические балансировочные устройства, используемые для оборудования, работающего в резонансном режиме.

Для контроля этих устройств и понадобятся закономерностей протекания процессов износа и разрушения, определяемые решением систем дифференциальных уравнений, описывающих техническое состояние [1–4]. Взаимосвязь решаемых задач определения технического состояния меха-



Рис. 5. Структурный график задач определения технического состояния механического оборудования



нического оборудования представлена структурным графиком (рис. 5).

### Выводы

Проведенный анализ уровней задач определения технического состояния механического оборудования позволил установить направление развития теории практической диагностики — разработка методов и средств управления техническим состоянием.

1. Биргер И. А. Техническая диагностика. — М.: Машиностроение, 1978. — 240 с.
2. Основы технической диагностики: В 2-х кн. / Кн. 1. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза / Под ред. П. П. Пархоменко. — М.: Энергия, 1976. — 464 с.
3. Павлов Б. В. Акустическая диагностика механизмов. — М.: Машиностроение, 1971. — 224 с.
4. Суетин А. С. Роль технической диагностики в ремонтном производстве / А. С. Суетин, В. И. Дубов, Н. И. Хильченко // Металлургическое машиноведение и ремонт оборудования. Тематический отраслевой сб. — 1976. — № 5. — С. 63–65.
5. Седуш В. Я. Надежность, ремонт и монтаж металлургических машин: Учебник. — 3-е изд., перераб. и доп. — Киев: НМК ВО, 1992. — 368 с.

6. Артоболевский И. И., Бобровицкий Ю. Н., Генкин М. Д. Введение в акустическую диагностику машин. — М.: Наука, 1979. — 296 с.
7. Авакумов С. И., Сидоров В. А., Сотников А. Л. Особенности диагностирования металлургического оборудования // Металлургическая и горнорудная пром-сть. — 2002. — № 3. — С. 96–99.
8. Сидоров В. А. Аксиомы работоспособного состояния металлургического оборудования / Проблемы механики горнометаллургического комплекса: Тез. докл. междунар. научно-техн. конф., 25–28 мая 2004 г. — Днепропетровск, НГУ, 2004. — С. 103–104.
9. Введение в техническую диагностику / Под ред. К. Б. Карандеева. — М.: Энергия, 1968. — 224 с.
10. Голуб Е. С., Мадорский Е. З., Розенберг Г. Ш. Диагностирование судовых технических средств: Справочник. — М.: Транспорт, 1993. — 150 с.
11. Кравченко В. М., Сидоров В. А., Седуш В. Я. Техническое диагностирование механического оборудования. — Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2009. — 459 с.
12. Ширман А. Р., Соловьев А. Д. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. — Москва, 1996. — 276 с.
13. Барков А. В., Баркова Н. А., Азовцев А. Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации: С.-Пб.: Изд. центр С.-Пб.ГМТУ, 2000. — 169 с.
14. Ницета В. В. Класифікація систем автоматизованого керування / Нафтова та газова пром-сть. — 2008. — № 6. — С. 51–54.

Донец. нац. техн. ун-т

Поступила в редакцию  
12.01.2010

23–26 Листопада 2010 р.

## IX МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2010

УКРАЇНА, КИЇВ  
МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР



**УКРПРОМ  
АВТОМАТИЗАЦІЯ**

- АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА
- КОМП'ЮТЕРИ І МЕРЕЖІ
- ВБУДОВАНІ СИСТЕМИ
- ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ
- ПРИЛАДИ І КОМПОНЕНТИ
- SCADA-СИСТЕМИ
- СИСТЕМИ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ
- УПРАВЛІННЯ ПІДПРИЄМСТВОМ
- ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
- СИСТЕМНА ІНТЕГРАЦІЯ І НАВЧАННЯ



**ЗРАЗКИ, СТАНДАРТИ,  
ЕТАЛОНИ, ПРИЛАДИ**

- СТАНДАРТИЗАЦІЯ
- СЕРТИФІКАЦІЯ
- МЕТРОЛОГІЯ
- НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ І ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА
- КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ І АПАРАТУРА
- ВАГОВЕ І ВАГОДОЗУЮЧЕ ОБЛАДНАННЯ
- ЛАБОРАТОРНЕ ОБЛАДНАННЯ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ:  
"ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА"