

## ВЫБОР ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН

В. А. СИДОРОВ, А. Е. СУШКО

*Появление современных систем стационарного контроля для металлургического оборудования требует разработки новых подходов к оценке технического состояния, учитывающих нестационарность нагружения. В статье обоснован выбор комплекса диагностических параметров для контроля состояния комбинированных редукторов сортовых прокатных станов.*

*Appearance of modern systems of stationary control for metallurgical equipment requires development of new approaches to assessment of the technical condition, allowing for the non-stationary nature of loading. The paper substantiates selection of a set of diagnostic parameters for monitoring the condition of combined reducers of section mills.*

Современный сортовой прокатный стан включает от 15 до 30 клеток, имеющих индивидуальный или групповой привод. Мощность привода прокатной клетки 300...1000 кВт, частота вращения входного вала 300...1000 об/мин, частота вращения выходных валов 10...1000 об/мин, а для чистовых блоков мелкосортных станов может составлять 1000...10000 об/мин. Часто используется схема привода с комбинированным редуктором, совмещающим функции редуктора и шестеренной клетки. Конструкция комбинированных редукторов ограничивает доступ к некоторым узлам механизма (рис. 1) для определения их технического состояния.

Высокая степень автоматизации, насыщенность механическим оборудованием требует изменения подходов к обеспечению эксплуатационной надежности данного оборудования. Требование необходимости безотказной работы комплекса металлургических машин в данном случае не может быть решено традиционными методами периодических осмотров и диагностирования. Необходимо использование стационарных систем диагностирования с использованием комплекса диагностических параметров. Оценка технического состояния металлургического оборудования, работающего при неопределенном нестационарном нагружении, не может проводиться методами, которые используются для роторных машин, работающих в длительном режиме.

Особенности диагностирования и проявлений технического состояния механического оборудования металлургических предприятий рассматривали в работах [1–4]. Появление современных систем стационарного контроля для металлургического оборудования требует разработки новых подходов к оценке технического состояния.

В работе рассмотрен вопрос выбора диагностических параметров для стационарных систем

контроля механического оборудования, в частности, комбинированных редукторов сортовых прокатных станов.

Необходимость постоянного контроля оборудования прокатных станов обосновывается скоростью развития повреждения при наиболее неблагоприятном стечении обстоятельств — ошибок эксплуатации и приложении внештатных технологических нагрузок.

Относительно металлургических машин скорость развития повреждений не может быть определена путем проведения активного эксперимента на действующем оборудовании или модели. Математическое моделирование неисправных состояний также не может быть использовано из-за отсутствия исходных данных, необходимых для расчетных моделей. Это предполагает рассмотрение любой внештатной ситуации как пассивного эксперимента с последующим анализом зафиксированных данных.

Прекращение подачи смазочного материала к узлам комбинированного редуктора привода вертикальных валков прокатной клетки среднесорто-



Рис. 1. Общий вид привода прокатной клетки с комбинированным редуктором

вого стана привело к внеплановой остановке стана. По результатам анализа токовых и частотных графиков развития повреждений отмечены два периода: период устойчивой работы в течение часа (рис. 2, а) и период развития повреждения (рис. 2, б). Реализация первого периода стала возможной из-за наличия масляной пленки на поверхности контактирующих деталей. Развитие повреждения происходило быстро, в течение трех минут и привело к повреждению зубьев конической передачи из-за смещения валов при износе подшипников.

Иницирующим событием в данном случае послужило увеличение частоты вращения приводного двигателя на 7,5 об/мин. Это подтверждает необходимость использования для описания развития повреждения теории катастроф (марковских процессов). Плавное изменение параметров системы (отработка существующей на контактирующих поверхностях масляной пленки) приводит к скачкообразному изменению физических процессов в зоне контакта. В данном случае переход от граничного трения ( $\mu = 0,01$ ) к сухому трению ( $\mu = 0,1$ ). Иницирующее событие (повышение частоты вращения на 7,5 об/мин) к такому эффекту привести не могло.

Наличие режима холостого хода связано с паузами по 5 с между прокаткой слитков. Последовательное увеличение тока холостого хода в 1,3, а затем в 2 раза стало первым признаком повреждения. Токковая нагрузка рабочего хода и размах частоты вращения начали изменяться на 1 мин позже. Следует выделить две стадии в развитии повреждения: увеличение размаха частоты вращения двигателя от 1,0 до 3,9 об/мин (ток холостого хода при этом увеличился с 3,7 до 12,5 %); стабилизация размаха частоты вращения на уровне 3,3 об/мин (ток холостого хода при этом продолжал увеличиваться до 19,6 %).

Предполагая исходное состояние удовлетворительным, имеем два перехода в техническом сос-

тоянии — сначала к плохому, а затем к аварийному состоянию. Ток рабочего хода увеличивался на значение холостого хода. Исходя из приведенных данных, можно сделать следующий выбор диагностических параметров: ток холостого хода — определяет техническое состояние механического оборудования; размах частоты вращения — изменение или стабилизация данного параметра определяет границы технического состояния; можно высказать предположение об изменении технического состояния при увеличении значений тока холостого хода и размаха частоты вращения в 2,6 раза — аналогично различию, принятому в стандартах, регламентирующих значения вибрационных параметров.

Решение поставленной диагностической задачи следует продолжить изучением свойств объекта контроля — механической системы металлургической машины. Как для любой механической системы в качестве диагностических параметров можно использовать [5]:

- анализ шума: акустического и механических колебаний;
- анализ параметров вибрации;
- анализ параметров температуры;
- результаты визуального осмотра.

Учитывая субъективность принятия решений при визуальном осмотре и анализе шумов механизма и необходимость постоянного контроля за изменением технического состояния, для стационарной системы следует принять параметры вибрации и температуры.

Параметры температуры, подлежащие контролю: температура в локальных контрольных точках; скорость изменения температуры в контрольных точках; изменение разности температуры на входе и выходе системы смазывания редуктора привода прокатной клетки.

Необходимость использования дополнительного диагностического параметра (температуры) при

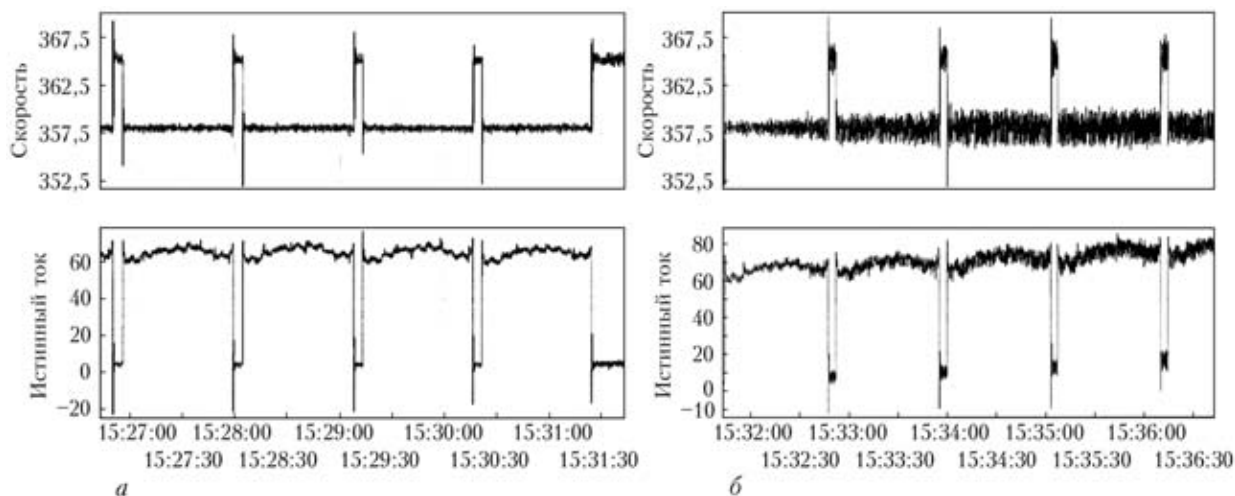


Рис. 2. Изменение токовых параметров и частоты вращения при номинальном режиме (а) и при развитии повреждения (б)

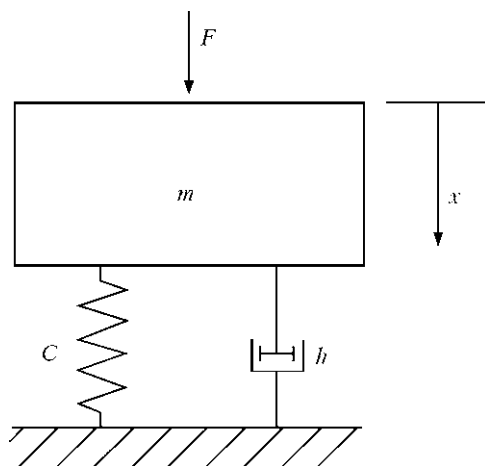


Рис. 3. Одномассовая расчетная модель для изучения механических колебаний

контроле механической системы объясняется наличием повреждений, снижающих значения параметров вибрации при своем развитии. Например, проворачивание наружного кольца подшипника в корпусе, уменьшение зазоров в подшипнике.

Основной источник информации о внутреннем состоянии механического оборудования — механические колебания. Диагностическая модель может быть представлена одномассовой расчетной моделью (рис. 3) с параметрами: масса  $m$ , жесткость  $C$ , коэффициент демпфирования  $h$ . Колебания массы  $m$  возможны при воздействии силы  $F$ , переменной относительно направления колебаний.

Параметры колебательного процесса определяются уравнением [6]:

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + Cx = F.$$

На основании приведенного выше уравнения проведен анализ возможных изменений в колебательном процессе при возникновении повреждений в механической системе: параметры колебаний могут измениться при изменении приложенной силы, массы, жесткости и коэффициента демпфирования; изменение приложенной силы приведет к изменению токовой нагрузки на двигатель, что должно быть зафиксировано; значительное изменение массы при износе для металлургических машин недопустимо, поэтому полагаем массу  $m$  — величиной, имеющей постоянное значение; изменение жесткости  $C$  одновременно приведет к изменению коэффициента демпфирования  $h$ . Это может произойти как постепенно, при ослаблении резьбовых соединений, ослаблении посадки элементов, так и внезапно, при возникновении трещин в корпусных деталях; изменение технического состояния приведет к изменению комплекса параметров вибрации механизма.

Традиционное решение контроля вибрационных параметров механизмов роторного типа, работающих в длительном режиме при постоянных

нагрузках, заключается в наблюдении за постоянством вибрационных параметров. Механическое оборудование прокатных станов работает в нестационарных скоростных режимах и при непостоянной силовой нагрузке, обусловленной различием в технологическом режиме нагрева и прокатки. Поэтому принципы контроля технического состояния металлургических машин должны отличаться наблюдением за изменением скорости нарастания параметров.

Следовательно, диагностическая система постоянного контроля должна быть ориентирована на возможность предупреждения быстроразвивающихся повреждений и позволять диагностировать развитие повреждений. Для этого необходим контроль минимум двух параметров: виброскорости и виброускорения. Необходимо зафиксировать внешние воздействия на механическую систему: частоты вращения двигателя — определяющий скоростной режим работы; ток рабочего хода — для определения степени перегрузки механизма.

Параметры вибрации, подлежащие контролю: виброскорость, среднеквадратичное значение в частотном диапазоне 2...500 Гц — для контроля энергии вибрации; виброускорение, пиковое и среднеквадратичные значения в частотном диапазоне 10...5000 Гц — для контроля развития повреждений; спектральная и временная форма вибрационных сигналов — для распознавания неисправностей.

Частотные диапазоны должны быть согласованы с информативными частотами возможных повреждений.

Распознавание неисправностей с использованием спектрального анализа затрудняется неоднозначностью проявления неисправностей при различных частотах вращения и при различной нагрузке. Изменение нагрузки на двигатель также изменяет вид спектрограммы. Стационарная система, работая в режиме накопления информации (обучения), может определить зависимости между входными воздействиями и выходными реакциями, что необходимо предусмотреть в алгоритме функционирования.

Нелинейные зависимости, наличие зон неустойчивости и стабилизации позволяет утверждать, что в механическом оборудовании наряду с детерминированными процессами присутствуют и стохастические. Стабильность вероятностных характеристик последних определяется техническим состоянием системы. Амплитуда составляющих виброскорости и стабильность значений виброускорения могут быть связаны с изменением скоростного режима или технического состояния комбинированного редуктора. Решение данной задачи заключается в определении неизменности вибрационных параметров при снижении частоты вращения.

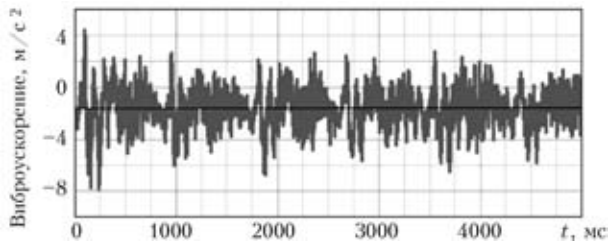


Рис. 4. Пример временной реализации вибрационного сигнала

Практически исправный механизм будет иметь минимальный уровень вибрации с минимальными случайными отклонениями отдельных параметров. Ухудшение состояния приводит к увеличению вероятностных характеристик случайных отклонений — происходит накопление малых повреждений и выбор дальнейшего развития повреждения. Когда выбор сделан, возрастают значения детерминированных процессов и уменьшаются изменения случайных отклонений. Закономерности развития повреждений, имея общее проявление, различными для каждого механизма, что усложняет задачу распознавания технического состояния.

Решение может быть получено при разделении задачи контроля технического состояния и диагностирования вида повреждения. В этом случае может быть использован анализ временной реализации вибрационного сигнала (рис. 4). Сравнительный анализ изменения состояния редуктора привода прокатной клети проведен по выборкам вибрационного сигнала в двух контрольных точках при работе

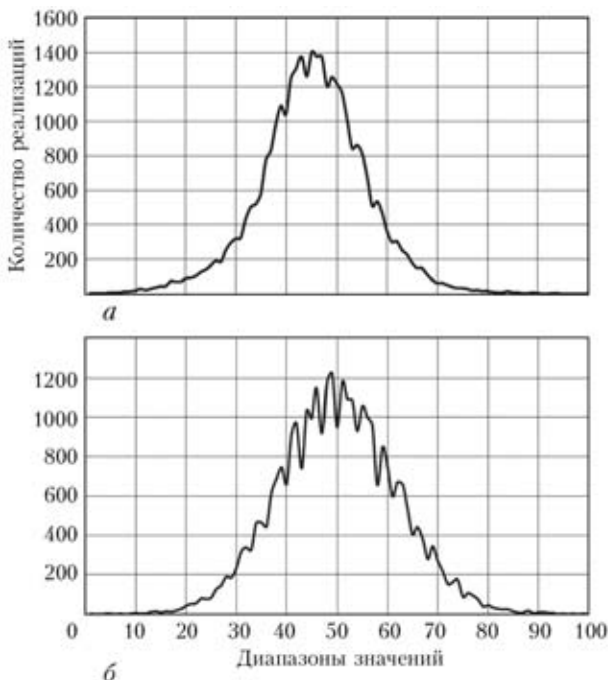


Рис. 5. Распределение количества реализаций по диапазонам измерения по контрольной точке А в режиме холостого хода 19.07.09.7:00 (а) (6,06 — максимум; -7,86 — минимум; 13,92 — размах) и 29.08.09.10:18 (б) (-6,94 — максимум; -14,14 — минимум; 7,2 — размах)

в режиме холостого хода (рис. 5) и режиме рабочего хода, зафиксированных с периодом 1 месяц. Каждая реализация содержит 32000 значений в коротком временном интервале. Определены закономерности распределения количества реализаций относительно диапазонов измерений.

Отражение изменения в техническом состоянии связано с изменением или стабильностью размаха колебаний и с изменением положения максимального количества реализаций относительно диапазона значений.

В приведенном примере произошло смещение положения максимального количества реализаций от диапазона 40...50 % в диапазон 50...60 %. Согласно предположениям, приведенным в работе [7], это свидетельствует об ухудшении технического состояния.

При работе в переходном режиме разгона, остановки эффективно использование комбинированных зависимостей внешних воздействий и реакций системы. Например, использовать в качестве параметров характеристики электродвигателя: ток якоря и частоту вращения, в качестве функции отклика — виброускорение корпуса шестеренной клети во время прокатки металла (рис. 6). Анализ

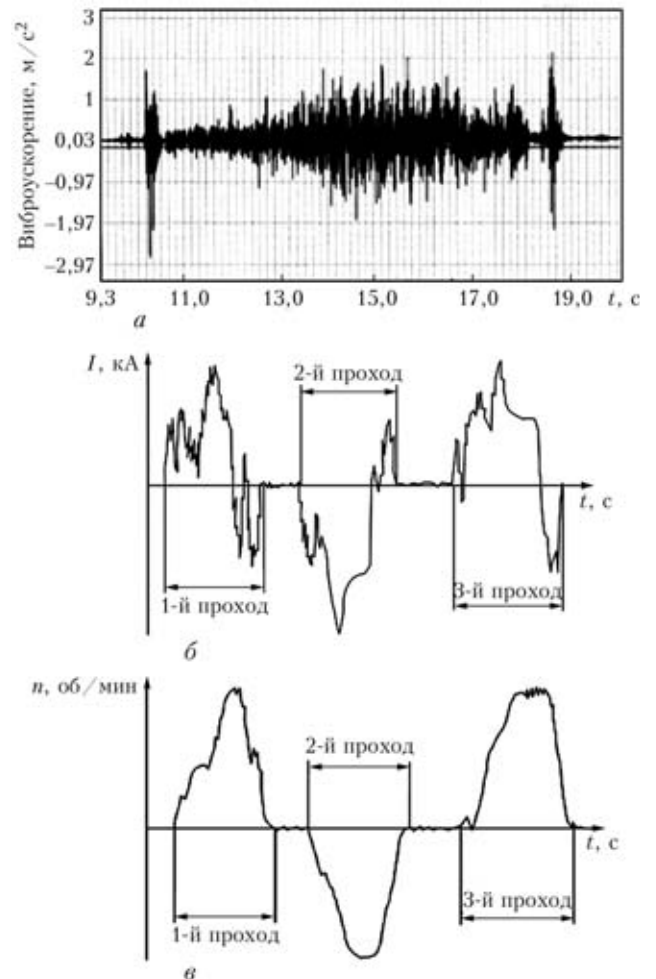


Рис. 6. Временные реализации сигнала виброускорения второго прохода (а); тока якоря (б); частоты вращения ротора (в)

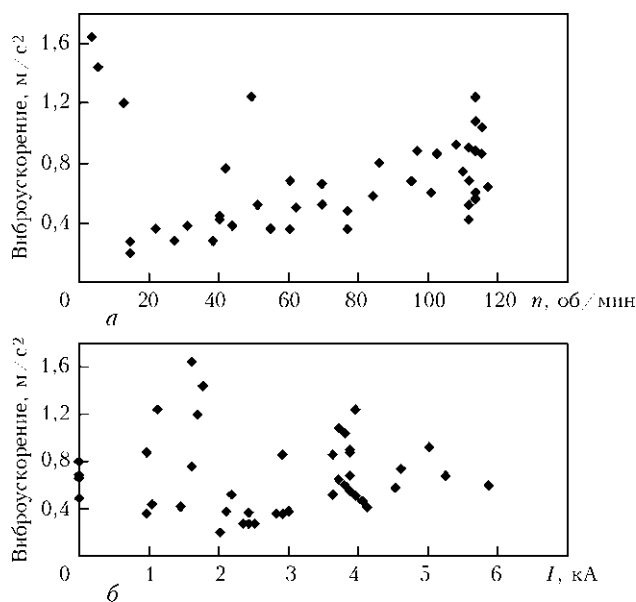


Рис. 7. Диаграммы рассеяния, построенные по координатам: виброускорение — частота вращения (а); виброускорение — ток (б)

полученных данных указывает на значительные изменения нагрузки привода и скорости (так, нагрузка в течение первого прохода дважды имеет отрицательное значение). Этим и характеризуется любой переходный процесс, независимо от причины возникновения (пробуксовка валков, отклонения в технологии прокатки). Изменения токовых характеристик приводят к изменению механических колебаний в функции, связанной с техническим состоянием системы.

Построенные диаграммы рассеяния (рис. 7) между такими текущими значениями параметров, как виброускорение, частота вращения и токовые характеристики в едином временном масштабе позволяют предположить наличие между виброускорением и частотой вращения связь, близкую к линейной, с рассеянием относительно центра. Между значениями виброускорения и тока однозначная связь отсутствует, что согласуется с выводами работы [8].

Предлагаемый перечень диагностических параметров включает внешние воздействия и реакции системы: частоту вращения двигателя; токовую нагрузку двигателя; параметры вибрации — виброскорость и виброускорение; параметры температуры.

Эффективным дополнением может быть стационарная или переносная аппаратура для визуального

осмотра внутренних элементов механизма, позволяющая выполнить уточнение характера повреждений во время текущих ремонтов и профилактик, подтвердив правильность поставленного диагноза. Эффективность функционирования системы определяется степенью использования информации о техническом состоянии. Сообщения о текущем состоянии должны стать постоянной информацией для эксплуатационного персонала.

## Выводы

В работе стационарной диагностической системы необходимо выделить два уровня задач: задачи контроля, решаемые введением пороговых значений, и задачи диагностирования, решаемые определением диагностических признаков возможных ремонтных воздействий. Необходимым является использование комплексных показателей и набора диагностических правил для распознавания изменения технического состояния.

Дальнейшие исследования позволят сформировать алгоритм распознавания технического состояния механического оборудования металлургических предприятий на основе адаптируемых подходов, учитывающих многообразие возможных проявлений.

1. Сидоров В. А., Ошовская Е. В. Особенности проявления и выявления поломок металлургических машин / Захист металургійних машин від поломок. — Мариуполь, 2000. — Вып. 5. — С. 14–19.
2. Диагностирование механического оборудования металлургических предприятий / В. Я. Седуш, В. М. Кравченко, В. А. Сидоров, Е. В. Ошовская. — Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2004. — 100 с.
3. Сушко А. Е., Демин М. А. Вибродиагностика в системах технического обслуживания по фактическому состоянию оборудования металлургических производств. — Вибрация машин: измерение, снижение, защита. — 2005. — № 1. — С. 6–9.
4. Радчик И. И., Рябков В. М., Сушко А. Е. Комплексный подход к вопросам надежности работы основного и вспомогательного оборудования современного металлургического производства // Оборудование. Технический альманах. — 2006. — № 1. — С. 24–28.
5. Кравченко В. М., Сидоров В. А., Седуш В. Я. Техническое диагностирование механического оборудования. — Уч. пособие. — Донецк: ООО «ЮгоВосток, Лтд», 2009. — 459 с.
6. Иорши Ю. И. Виброметрия. Измерение вибрации и ударов. Общая теория, методы и приборы. — М.: Машгиз, 1963. — 771 с.
7. 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.
8. Явленский А. К., Явленский К. Н. Теория динамики и диагностики систем трения качения. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. — 184 с.