

## **ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВНЕДРЕНИЯ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КЛЕТЕЙ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ**

Основной целью любого современного металлургического производства является получение высококачественной и конкурентоспособной готовой продукции. Обработка давлением - один из наиболее распространенных способов ее получения, который подразделяется на прокатку, волочение, ковку, штамповку, прессование и некоторые другие специальные процессы. Среди указанных видов, именно прокатка является самым производительным процессом выпуска готовых изделий из металла-проката, хорошо поддающимся механизации и автоматизации. Прокат является наиболее массовым видом конструкционных материалов и находит широкое применение в машиностроении, металлообработке, строительстве, на транспорте и других отраслях народного хозяйства. Кроме того, прокат используют и в самом металлургическом производстве для дальнейшего передела в трубы, метизы, жечь и т.д. [1].

Производство проката – сложнейший процесс, базирующийся на современных технологиях и оборудовании, высоком уровне механизации, автоматизации и организации производства, контроле технологических процессов и качества проката, высоких технико-экономических показателях работы прокатных станков и т.д. Именно прокатное производство, в большинстве случаев являясь завершающей фазой сложнейшего технологического процесса, во многом определяет качество выпускаемой готовой продукции, производительность, а также эффективность работы всего металлургического комбината в целом [2, 3]. Важнейшую роль в успешной организации прокатного производства играет хорошее функциональное состояние оборудования. Одним из наиболее ответственных объектов прокатного производства является прокатный стан.

Минимизация времени незапланированных простоев, приводящих к значительным финансовым потерям, исключение брака готовой продукции (волнистость, разнотолщинность и т.д.), заблаговременное планирование сроков и объемов ремонтных работ путем локализации неисправностей и оценки остаточного ресурса дефектных узлов и, как следствие, существенное сокращение ремонтных затрат - важнейшие задачи любого прокатного производства [4]. Для успешного решения этих задач традиционно используются методы и средства вибрационной диагностики [5]. На сегодняшний день проработана методология практического использования технологий вибрационной диагностики на предприятиях различных отраслей промышленности, в том числе и в металлургии, а также созданы и внедрены многочисленные переносные и стационарные аппаратно-программные средства контроля

и оценки состояния самого различного технологического оборудования. Однако существует целый ряд факторов, препятствующих успешному внедрению методов и средств вибродиагностики в прокатном производстве и, прежде всего, на прокатных станах.

В первую очередь, к таким факторам можно отнести особенности технологического процесса (отсутствие стационарных режимов работы прокатного оборудования даже на коротких интервалах времени), разнообразие существующих видов прокатных станов (как по принципу работы, так и по сортаменту металлопроката), а также их металлоемкость и конструктивную сложность. Кроме того, в ряде случаев доступ к наиболее ответственным измерительным точкам (прежде всего подшипникам опорных и рабочих валков) затруднен или даже невозможен по соображениям техники безопасности, что также негативно отражается на эффективности внедрения технологий вибрационной диагностики. Рассмотрим более подробно особенности проявления этих факторов с точки зрения практического внедрения методов и средств вибрационной диагностики.

Одним из ключевых подходов при внедрении технологий вибродиагностики, обеспечивающих наибольшую достоверность распознавания технического состояния, является мониторинг – отслеживание различных параметров во времени с целью их всестороннего анализа на предмет изменения (монотонного роста или убывания) детерминированной компоненты зашумленного сигнала, выявления скачков и т.д. [5, 6]. Обязательным условием для успешного применения мониторинга является стационарность работы контролируемого оборудования в моменты выполнения измерений, то есть анализ и сравнение данных должны производиться на одних и тех же режимах (при неизменной частоте вращения, одинаковой нагрузке, направлении вращения и т.д.). В подавляющем большинстве случаев, в силу особенностей технологического процесса, на прокатных станах условие стационарности не выполняется.

С точки зрения практического внедрения технологий вибрационной диагностики на прокатном оборудовании можно говорить о двух основных видах нестационарности. Первый, наиболее значимый вид, – нестационарность в рамках проката одной партии заготовок – процесс последовательного чередования, как правило, с различными интервалами времени, режимов «холостой ход» и «нагрузка» (проход заготовки через клеть). На рис. 1 показаны тренды общего уровня виброскорости (верхний график) и виброускорения (нижний график) в стандартных полосах частот по нескольким подшипникам главного редуктора клетки за одну рабочую смену при неизменном сортаменте. На графиках явно выраженный характер носит зависимость общего уровня вибрации от режима работы – наименьшие по уровню значения характеризуют режим холостого хода, наибольшие – режим прохода заготовки через клеть.

Отличается и спектральный состав вибрации. В момент прокатки существенно возрастает виброактивность шестерен зубчатых передач, что приводит к значительному росту составляющих на частотах зубозацепления и их гармониках. На холостом ходу напротив, при отсутствии развитых дефектов

подшипников доминируют составляющие на частотах, кратных частоте вращения. На рис. 2 представлен ряд спектров виброускорения, измеренных на одном из подшипников клетки в течение нескольких циклов чередования режимов «холостого хода» и «нагрузки». На спектрах, полученных в моменты прохождения заготовки через клеть, доминирует высокочастотная составляющая в области 900 Гц (отмечена курсором), соответствующая частоте зубозацепления.

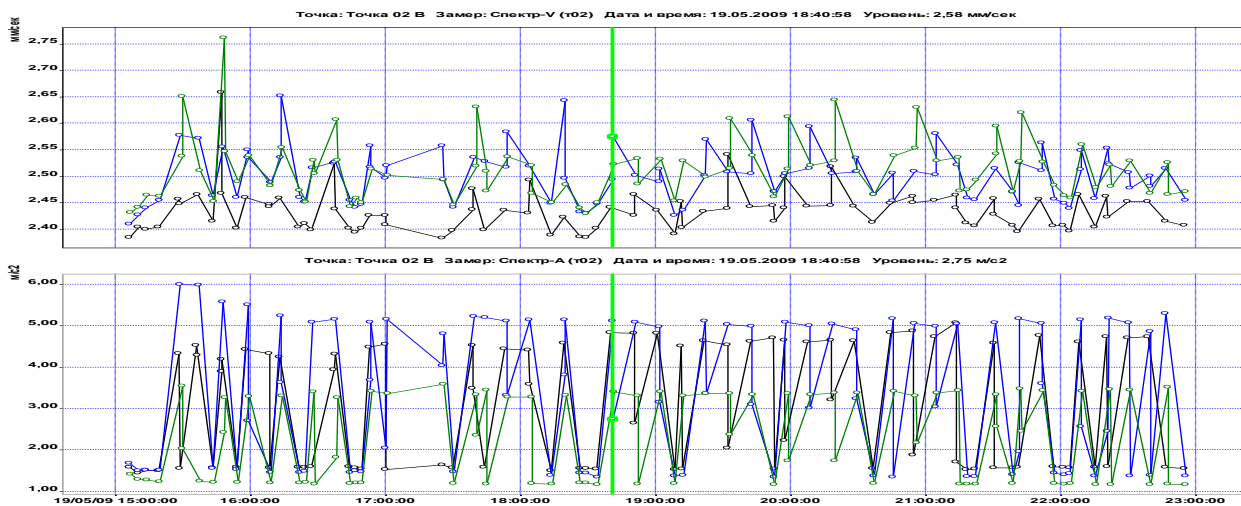


Рис. 1. Тренды изменения общего уровня вибрации подшипников главного редуктора на протяжении одной рабочей смены.

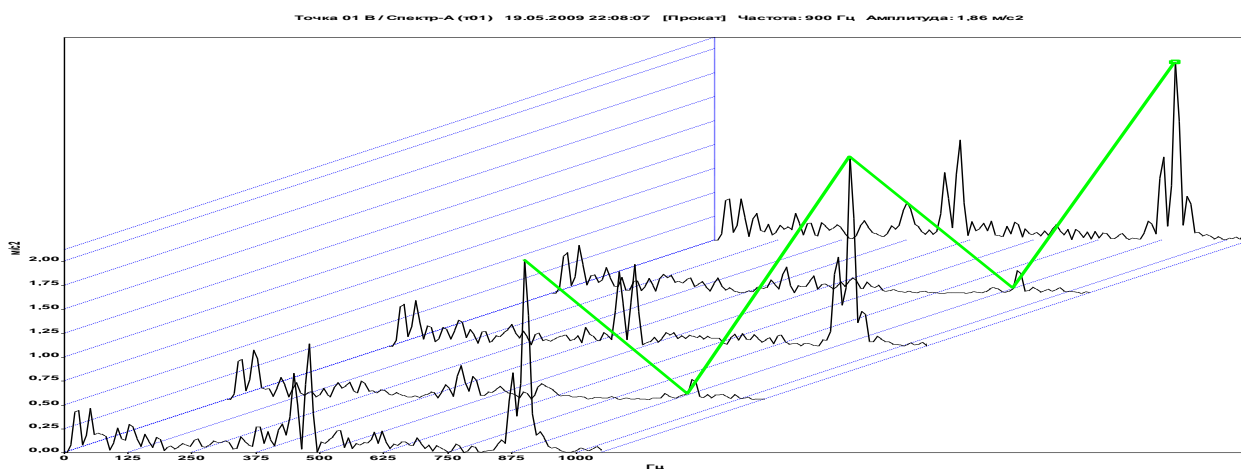


Рис. 2. Спектры виброускорения одного из подшипников клетки при чередовании режимов «холостой ход» - «нагрузка».

Кроме того, существенное влияние на виброактивность при проявлении нестационарности первого вида оказывают переменная частота вращения (частота вращения снижается в момент захода заготовки в клеть и возрастает в момент ее выхода), а также неперiodические удары, возникающие при прохождении заготовки и в моменты ее захода и выхода из клетки. На рис. 3 показан временной сигнал виброускорения, полученный на одном из подшипников клетки в момент смены рабочих режимов («прокат» – «пауза» – «прокат»), наглядно иллюстрирующий зависимость виброактивности от нагрузки, а также наличие неперiodических быстро затухающих ударов.

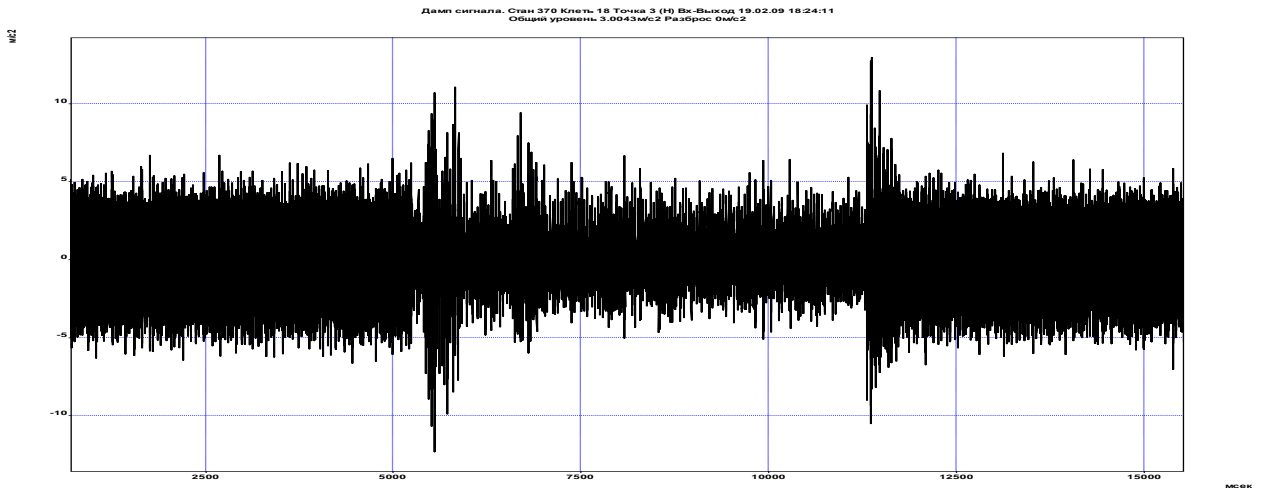


Рис. 3. Временной сигнал виброускорения подшипника в момент смены режимов работы.

Второй вид нестационарности, в меньшей степени влияющий на виброактивность, обусловлен чередованием различных сортов проката. На рис. 4 представлены тренды общего уровня виброускорения (верхний график) и температуры нескольких подшипников клетки, а также диаграмма изменения частоты вращения привода (нижний график), полученные для нескольких различных видов сортамента. На графиках видны отличия в общих уровнях вибрации от режима к режиму, обусловленные различными условиями нагружения клетки и различными частотами вращения привода.

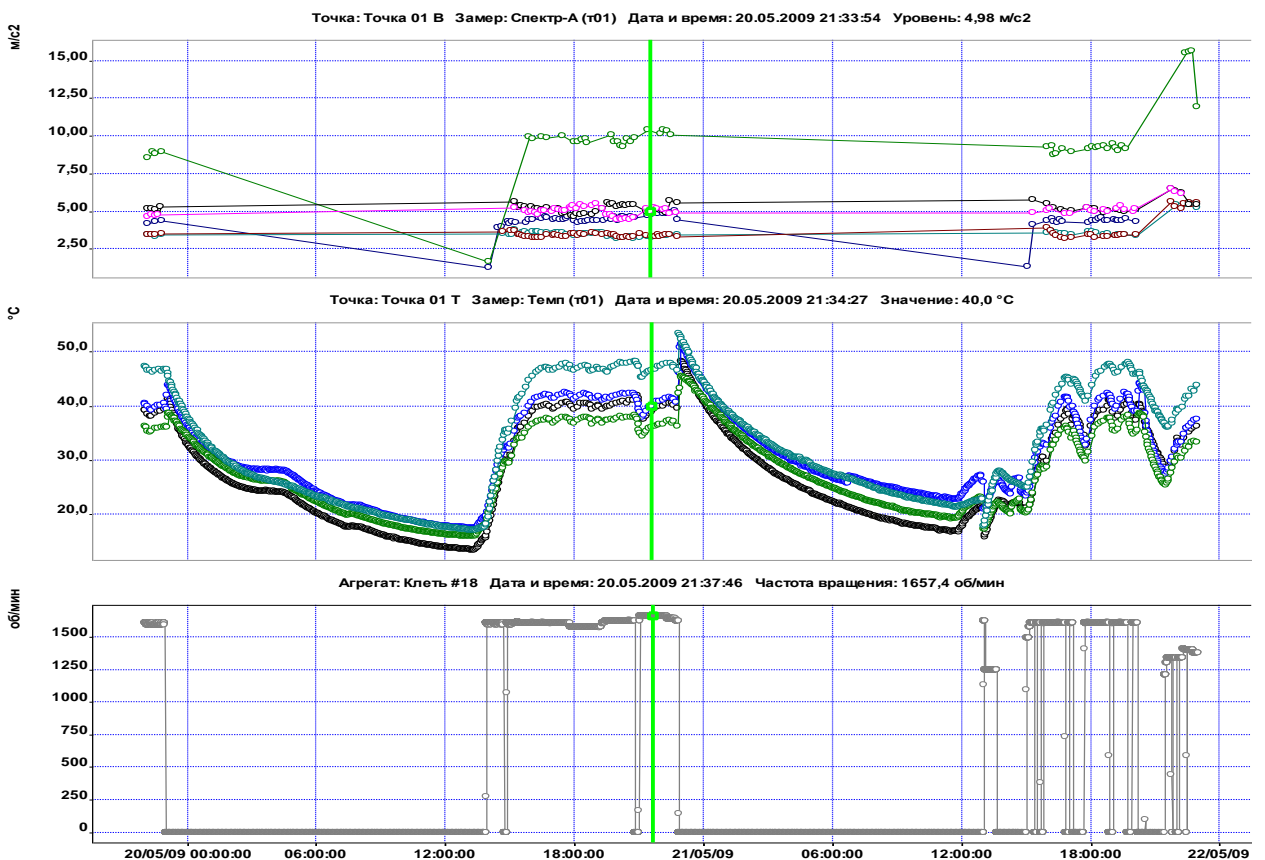


Рис. 4. Тренды вибрации, температуры и частоты вращения для нескольких различных видов сортаментов.

Представленные выше данные наглядно демонстрируют нестационарный характер протекания вибрационных процессов, вызванный различиями в технологических режимах работы оборудования, подтверждая на практике низкую эффективность внедрения традиционных подходов вибромониторинга. Значительные изменения виброактивности при смене рабочих режимов (рис. 1) и видов сортамента (рис. 4) существенно усложняют анализ данных в рамках стратегии мониторинга технического состояния, а в ряде случаев могут стать причиной выдачи ложных диагностических заключений, с последующими необоснованными ремонтными воздействиями, незапланированными простоями и, как следствие, экономическими потерями.

К факторам, затрудняющим использование технологий вибрационной диагностики, можно отнести и конструктивную сложность оборудования. В то время как большинство традиционных объектов вибромониторинга – насосное, тягодутьевое, компрессорное оборудование и т.д. состоит из 10–15 узлов, учитываемых при составлении диагностических моделей, только одна четырехвалковая клеть в зависимости от типа редуктора, может включать до 30 – 60 подобных узлов. Таким образом, общее количество нуждающихся в контроле узлов для сортового или листопрокатного стана может достигать нескольких сотен.

Другим фактором, затрудняющим активное внедрение методов и средств вибрационной диагностики, является разнообразие прокатных станов по конструктивному исполнению, принципу работы и сортаменту выпускаемой продукции. Ранее (рис. 4) была показана зависимость виброактивности подшипников клетки одного и того же стана от вида сортамента. Для клеток различных станов, даже имеющих схожую конструкцию, отличия в виброактивности узлов, в силу целого ряда очевидных причин, еще более значительны. На рис. 5 приведены спектры виброускорения, измеренные на ближнем к приводу подшипнике редуктора клетки, для сортовых станов «370» и «450» соответственно. Еще более кардинальные отличия в уровнях и спектральном составе вибрации наблюдаются для станов с различными принципами действия.

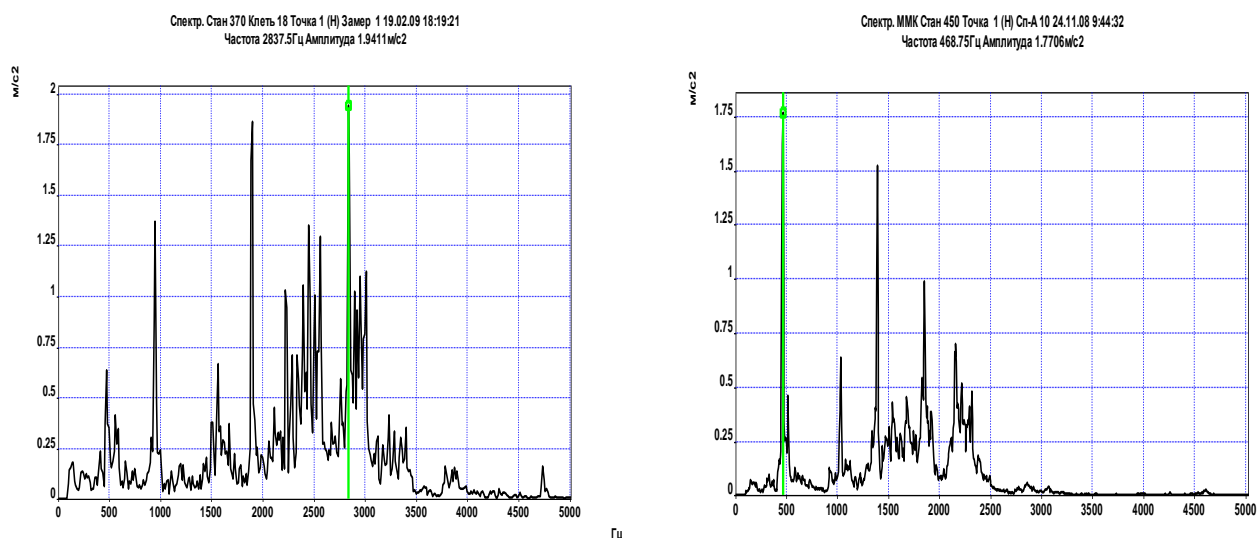


Рис. 5. Спектры виброускорения подшипников стана «370» (слева) и «450» (справа).

Все описанные выше факторы в значительной степени усложняют внедрение методов и средств вибрационной диагностики на оборудовании прокатных производств и накладывают целый ряд серьезных ограничений при выборе аппаратно-программных средств. Специалистами компании НПО «ДИАТЕХ» на основании многолетнего опыта практических работ на предприятиях металлургии были сформулированы требования к техническим характеристикам и функциональным особенностям используемой виброизмерительной аппаратуры. Рассмотрим эти требования более подробно.

Ранее, на ряде примеров была показана невозможность применения аппарата «классического» мониторинга в условиях нестационарного протекания вибрационных процессов при постоянном чередовании режимов работы («холостой ход» - «нагрузка»), изменении сортамента и возникновении непериодических ударов в моменты входа и выхода заготовки из клетки. Кроме того, в процессе изучения спектрального состава вибрации подшипников клетей, была обоснована необходимость использования как данных полученных под нагрузкой (для диагностики механических передач), так и данных, полученных в режиме «холостой ход» (для оценки состояния подшипниковых узлов). Единственным выходом в сложившейся ситуации может стать использование стационарных систем контроля вибрации.

Действительно, представим специалиста, в задачи которого входит провести диагностику хотя бы одной клетки стана. Первостепенная задача любого специалиста – соблюдение требований техники безопасности, поэтому он будет вынужден пропустить точки, недоступные для контроля. В зависимости от конструктивных особенностей клетки такими точками являются подшипники опорных и прокатных валков и выходные подшипники редуктора со стороны клетки. Кроме того, для некоторых видов станов доступ к точкам измерения во время работы невозможен, поэтому все измерения будут выполняться на холостом ходу. Таким образом, в распоряжении специалиста окажется от силы 30 – 40 % диагностической информации, по которой крайне сложно сделать объективные выводы о текущем состоянии оборудования. С другой стороны, среднее время, затрачиваемое на выполнение замеров (как правило, это 5 – 6 различных типов замеров с пользовательскими настройками) в одной точке, составляет 2 – 3 минуты, то есть в условиях постоянного чередования режимов, специалист будет вынужден прерывать измерения в ожидании нужного режима. В том случае, если специалист не успевает своевременно прервать измерения, показания будут полностью искажены из-за попадания в сигнал затухающих колебаний от ударов в моменты захода или выхода заготовки, а, следовательно, непригодны для дальнейшего анализа - специалист будет вынужден произвести повторные измерения. Из практики применения переносных виброизмерительных средств следует, что даже при наличии соответствующих навыков специалист будет вынужден потратить только одну измерительную точку около 10 – 15 минут (свыше 2 часов на одну клетку с 12 подшипниками). По оценке специалистов одного из металлургических комбинатов, на измерение вибрации семи клетей стана (в среднем по 9 точек на одну клетку) только на одном из режимов («холостой ход») при помощи переносного прибора уходит до 7 часов [3]. В этих

условиях велика вероятность проявления так называемого «человеческого фактора», способного привести к ошибочным действиям оператора с непредсказуемыми последствиями. Высочайшая трудоемкость и длительность сбора достоверных вибрационных данных, наряду с необходимостью контроля и последующего взаимного анализа ряда дополнительных («невибрационных») параметров, таких как температура, потребляемый ток, частота вращения и т.д. делают невозможным и даже опасным использование переносных сборщиков вибрационных данных.

Однако далеко не каждая стационарная система может быть использована в прокатном производстве. Конструктивные особенности металлургических машин, их повышенная виброактивность, наличие «паразитных» шумов, вызванных особенностями технологического процесса, необходимость эксплуатации в условиях повышенной влажности, запыленности, сильных электромагнитных полей и т.д. выдвигают самые жесткие требования к техническим характеристикам и исполнению подобных систем.

Рассмотрим более подробно основные требования к аппаратной и программной частям стационарной системы мониторинга и диагностики с учетом специфики прокатного производства. Многолетний опыт практических работ на прокатных станах свидетельствует об относительно медленном протекании процессов усталостного износа наиболее ответственных узлов. Тем не менее, в ряде случаев были зафиксированы лавинообразные разрушения подшипников клетей в течение одного – двух часов. Из опыта практических работ специалистов НПО «ДИАТЕХ» на различных видах роторного оборудования [7] следует, что для прокатных станов не требуются дорогостоящие системы с функциями параллельного опроса каналов и защиты в режиме реального времени. Наиболее оптимальным решением по соотношению «цена – функциональность – достоверность диагностики» для эффективного решения задач мониторинга и оценки технического состояния в этом случае являются системы с последовательным опросом каналов, обеспечивающие периодичность сбора данных 15 – 20 минут. Ряд научно-практических исследований [8, 9], указывает на высокую информативность дополнительных режимных характеристик, таких как температура, потребляемый ток, частота вращения и т.д., поэтому наряду с вибрацией, система должна контролировать и любые дополнительные типы параметров. Кроме того, в силу конструктивной сложности, высокой металлоемкости и особенностей эксплуатации прокатных станов, самые высокие требования предъявляются к измерительному тракту такой системы. Действительно, проведенные расчеты показывают, что в большинстве случаев диагностические частоты находятся в диапазоне от 0,1 Гц до 3 – 4 кГц, а информативные амплитуды - в диапазоне от 0,1 до 30 м/с<sup>2</sup>.

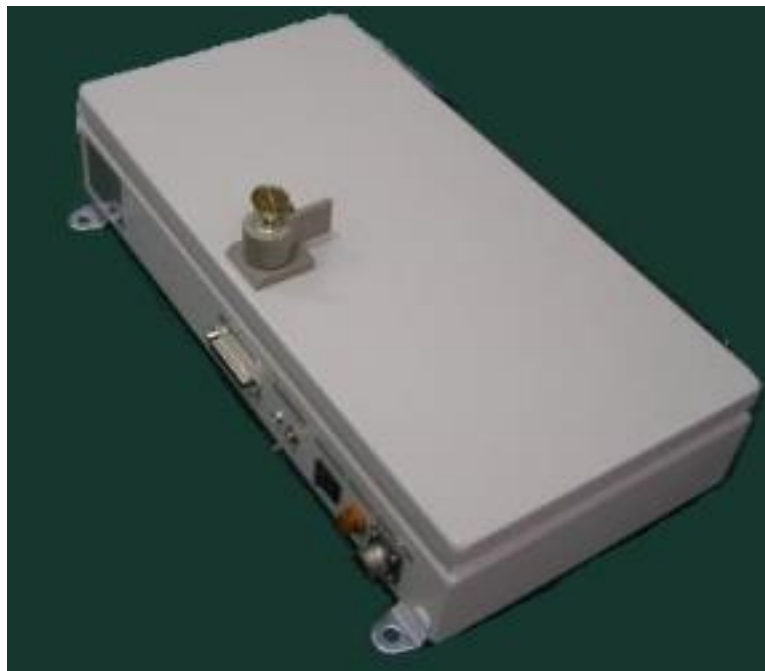
Не менее строгие требования должны предъявляться и к программной части используемой стационарной системы. Специалисту, выполняющему диагностику по данным, измеряемым системой, приходится сталкиваться с необходимостью классификации каждой отдельной выборки данных (привязки данных к одному из режимов работы) и кропотливому, всестороннему анализу, как в рамках текущей выборки, так и при сравнении с другими однотипными выборками за рассматриваемый временной интервал. Результаты

замеров в каждой измерительной точке содержат диагностическую информацию одновременно по нескольким узлам (для многовального редуктора со вдвоенными подшипниками – до 3 – 5 узлов в одной измерительной точке). Помимо информации по этим узлам в замерах в ряде случаев присутствуют и отдельные составляющие, передаваемые от соседних узлов или даже от соседних механизмов (так называемые «наведенные» вибрации). В этих условиях, специалист, выполняющий диагностику, вынужден не только идентифицировать дефектный узел и классифицировать вид неисправности путем оценки уровня вибрации на более чем 20 – 30 характерных частотах, производить поиск их гармоник и модуляционных рядов, но и определять степень развития дефекта при помощи аппарата сравнительного анализа. Еще больше затрудняет процедуру диагностики необходимость учета режимных показателей при распознавании технического состояния по каждому из узлов.

Очевидно, что в этих условиях успешная поузловая диагностика прокатного стана невозможна без использования специализированного программного обеспечения с функциями автоматизированного анализа и обработки данных, так называемого «экспертного» модуля, который позволяет в автоматическом режиме проводить фильтрацию и классификацию данных, а также рассчитывать основные частоты неисправностей, анализировать тренды и на основании заложенных диагностических моделей выдавать заключения о текущем состоянии оборудования и наличии развивающихся дефектов. Разнообразие прокатных станов в значительной степени усложняет процесс автоматизированного распознавания технического состояния отдельных узлов, делая крайне затруднительными любые интерпретации при написании экспертных правил диагностики на основании статистического материала, накопленного по оборудованию других типов. Поэтому еще одним важным требованием к программной части системы является возможность адаптации ее экспертного модуля к конструктивным и технологическим особенностям диагностируемого оборудования – наличие экспертной системы открытого типа [10].

Коллективом компании НПО «ДИАТЕХ» на основании практического опыта разработки и внедрения аппаратно-программных средств вибрационной диагностики и балансировки более чем для 50 предприятий металлургии России, Украины, Беларуси, Молдавии и Казахстана был спроектирован и апробирован на практике комплекс мониторинга и автоматизированной диагностики CMS (UMS) (рис. 6) в максимальной степени удовлетворяющий всем описанным выше требованиям. За время промышленной эксплуатации комплекса при активном содействии специалистов-диагностов различных металлургических производств были учтены и устранены все замечания, препятствующие его успешному использованию. Накопленный статистический материал, а также результаты практических работ на аналогичных видах оборудования, позволили создать адаптированные правила автоматизированной диагностики, отличающиеся высокой достоверностью и помехоустойчивостью.





*Рис. 6. Измерительный блок CMS (UMS)*

Являясь «пионерами» в области внедрения методов и средств вибрационной диагностики и балансировки на отечественные предприятия металлургии и обладая колоссальным опытом выполнения практических работ в этой отрасли, специалисты НПО «ДИАТЕХ» реализовали в комплексе ряд новаторских идей по сбору и анализу данных, таких как интеллектуальный опрос каналов, параметрическая фильтрация, диагностические курсоры и т.д., направленных на дальнейшее повышение достоверности диагностирования. Использование при анализе комплексной информации о вибрационном состоянии оборудования, температуре подшипниковых узлов, частоте вращения, потребляемой мощности, а также ряда других параметров, получаемых из заводской АСУ ТП, в значительной степени расширяют функциональные возможности комплекса. Функции передачи данных на удаленные рабочие места по локальной заводской сети, гибкая система автоматизированного документооборота, возможность оперативного доступа к текущей и архивной информации делают комплекс эффективным элементом единой системы управления прокатным производством, направленным на повышение надежности работы оборудования и оптимизации затрат на его техническое обслуживание и ремонт.

### **Заключение**

Не смотря на ряд практических сложностей, аппаратно-программные комплексы вибрационной диагностики на базе стационарных систем и программного обеспечением с функциями автоматизированного распознавания технического состояния, при соответствующем методологическом обеспечении и адаптации могут быть с успехом использованы для повышения надежности и эффективности эксплуатации прокатных станов путем организации мониторинга и диагностики их технического состояния.

## Список литературы

1. Зотов В.Ф. Производство проката.– М: «Интермет Инжиниринг», 2000.
2. Сушко А.Е. Комплексный подход к вопросам повышения надежности работы оборудования // Вибрация машин: измерение снижение защита. 2006. №3. С. 42-47.
3. 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.
4. Вибродиагностика в системах технического обслуживания по фактическому состоянию оборудования металлургических производств / Сушко А.Е., Демин М.А. – Вибрация машин: измерение снижение защита -2005. - №1 – С. 6- 9.
5. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7: Кн.2: Вибродиагностика. / Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова и др. М.: Машиностроение, 2005. 829с.: ил.
6. Ширман А.Р, Соловьев А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. – М: 1996.
7. Тараканов В.М., Скворцов О.Б., Сушко А.Е. Системы непрерывного контроля по вибрационным параметрам // Вибрация машин: измерение снижение защита. 2006. №3 С. 48- 54.
8. Сушко А.Е. Практические аспекты внедрения систем вибрационной диагностики в условиях современных промышленных производств // Вибрация машин: измерение снижение защита. 2007. №4 С. 24 - 30.
9. Герике Б. Л., Сушко А.Е. Разработка алгоритма скаляризации для оценки вектора признаков при решении задачи диагностики подшипников качения // Изв. вузов. Горный журнал. 2007. № 8. С. 73-79.
10. Сидоров В.А., Сотников А.Л., Сушко А.Е., Цыба С.А. Методика оценки экономической эффективности балансировки роторов в производственных условиях // Вибрация машин: измерение снижение защита. 2009. №2 С. 38 – 43.