

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ДИНАМИКИ И ДИАГНОСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Изложены результаты теоретических и прикладных исследований в области динамики и диагностики прокатных станов, показаны возможности использования полученных результатов теоретических исследований в автоматизированных системах мониторинга нагрузок и диагностики технологического процесса и технического состояния оборудования.

Состояние вопроса.

До 1960-х годов существовало представление о крупногабаритных металлургических агрегатах, как системе абсолютно жестких тел, соединенных недеформируемыми промежуточными валами, имеющими зачастую диаметры до 800–900 мм. Началом этапа изучения прокатных станов как систем с упруго-массными параметрами, способными совершать колебания, принято считать появление в начале 1960-х годов публикаций С.Н. Кожевникова, где приведены результаты анализа колебаний (крутящих моментов) в линиях привода стана горячей прокатки 1680 завода «Запорожсталь». Известные на то время другие работы, в т. ч. и зарубежных авторов, не имели столь существенного значения для дальнейшего развития динамики прокатных станов. Проведение многочисленных дальнейших экспериментальных исследований крутящих моментов позволило углубить понимание крутильных колебаний в линиях привода прокатных станов различного типа и конструкций.

Начиная с 1970-х годов, в ИЧМ проводились исследования резонансных вибраций на различных станах холодной прокатки и дрессировки полос в связи с проблемами качества поверхности и производительностью [1].

Теоретические исследования в области динамики прокатных станов проводились по направлениям:

- разработка и идентификация нелинейных моделей колебаний;
- использование моделей для расчета динамических нагрузок;
- оптимизация параметров оборудования для снижения колебаний;
- разработка научных основ и методов диагностики оборудования.

Прикладные исследования на каждом конкретном прокатном стане проводились по различным направлениям:

- измерения динамических нагрузок и вибрации в прокатных станах;
- расчет прочности и усталостной долговечности оборудования;
- определение допускаемых технологических нагрузок;
- разработка режимов работы оборудования, снижающих нагрузки;
- разработка устройств демпфирования нагрузок и вибрации.

Результаты теоретических и прикладных исследований в области динамики прокатных станов достаточно полно отражены в работах С.Н.Кожевникова [2], П.И.Полухина, Ф.К.Иванченко [3,4], С.Л.Коцаря [5], В.И.Большакова [10], В.В.Веренева [1,14] и других авторов [6,7,8], сборниках научных трудов ИЧМ, ХПИ, ВНИИМЕТМАШ, материалах международного Конгресса механиков [9].

В области диагностики прокатного оборудования известны разработки устройств для определения износа (зазоров) на основе сельсинных [11], оптических [12], потенциометрических [13] датчиков углового положения. Проводились исследования по использованию данных о запаздывании импульса крутильной нагрузки в линиях привода для диагностики зазоров [14]. Исследования в области динамики и вибродиагностики оборудования прокатных станов проводятся в ДонНТУ (г. Донецк), филиале КИА (г. Кривой Рог). Однако, на сегодняшний день ИЧМ остается, пожалуй, единственным научным центром на Украине и в странах СНГ, где ежегодно выполняется несколько хоздоговорных НИР, непосредственно связанных с экспериментальными и теоретическими исследованиями динамических нагрузок и вибродиагностики основного оборудования прокатных станов.

В области контроля технологического процесса на высоких скоростях прокатки для предотвращения резонансных вибраций непрерывный 5-клетевой стан холодной прокатки 2030 НЛМК оснащен разработанной в ИЧМ совместно ОПЛ и ОТОСУ стационарной системой контроля вибрации, осуществляющей также функции диагностики оборудования клетей и качества прокатываемых полос (периодических дефектов типа «ребристость», «продольная разнотолщинность»). Данная система является единственной известной в странах СНГ, и по многим показателям превосходит зарубежные аналоги [15].

В области мониторинга динамических нагрузок прокатного оборудования известны работы НМетАУ [16], исследования МГТУ им. Баумана [17]. В ходе этих исследований созданы опытные образцы систем контроля нагрузок в линиях привода прокатных станов для текущего расчета остаточного ресурса деталей. Подобные автоматизированные системы пока не нашли промышленного применения в металлургической промышленности стран СНГ. В тоже время за рубежом крупнейшие фирмы-производители прокатных станов, например, *SMS Demag*, *Voest Alpine* и другие, имеют в своем составе исследовательские центры, где разрабатываются комплексные автоматизированные системы слежения за состоянием оборудования и технологическим процессом (*PPMS – Plant and Process Monitoring System*). В ИЧМ для контроля динамических нагрузок в линиях привода с 1970-х годов применяются бесконтактные (на основе телеметрии) тензометрические датчики крутящих моментов [18], сопоставимые по своим некоторым функциям с зарубежными системами.

Динамический анализ и оптимизация прокатных станов.

Анализ результатов прикладных и теоретических исследований в области динамики и диагностики прокатных станов позволил выявить ограничения применяемых методов динамического анализа и оптимизации параметров, которые не позволяют эффективно решать задачи автоматизированного управления технической эксплуатацией основного оборудования прокатных станов.

1) *Решение дифференциальных уравнений* моделей колебаний осуществлялось численными (во временной области) методами, что неприемлемо в реальном масштабе времени. В современных системах мониторинга нагрузок и вибродиагностики оборудования используют в основном частотные методы. Для прокатных станов эти методы не применялись, за исключением анализа систем управления и периодической разнотолщинности [19]. Частотные методы (передаточные функции) наиболее приспособлены для анализа в реальном масштабе времени динамических систем со многими входами–выходами и множественными связями между элементами, что характерно для непрерывных прокатных станов с многомассными редукторными линиями привода и клетями кварто.

2) *Модальный анализ линейных динамических моделей* ограничивался размерностью третьего порядка, что обусловлено применявшимися методами решения частотного уравнения системы (характеристического полинома). Известные методы не позволяют вычислять собственные частоты, амплитуды и фазы по каждой из форм колебаний для систем с произвольной структурой (разветвленной, замкнутой). Например, метод Толле, широко применяемый в механике, используется в основном для рядных систем и не позволяет учесть в аналитическом виде параметры демпфирования и настройки электропривода с системой управления.

3) *Аналитические методы расчета динамических нагрузок* основаны все на известном принципе неблагоприятной коллинеарности [20], который дает существенное (в 1.5–2.0 раза) завышение значений нагрузок, т.к. не позволяет в принципе учесть при расчетах начальные фазы и демпфирование системы по каждой из форм колебаний, а также параметры технологической нагрузки. В диссертационной работе В.И. Лошкарева [21] для анализа динамики линий привода с электроприводом применялись передаточные функции, но использование только коэффициента динамичности на основе указанного принципа не позволило до конца раскрыть все преимущества нового метода.

4) *Критерии оптимизации конструктивных параметров* линий привода также основанные на указанном выше принципе, в связи с ограничениями по размерности, строились на основе упрощенных 3–х массовых моделей и предусматривали «разведение» (увеличение отношения) двух первых собственных частот системы для устранения биений. Очевидная необходимость учета при этом диапазона частот (длительности нарастания) внешних технологических нагрузок на валках, приводит к другим частотным критериям оптимизации, давно используемым в теории

автоматического управления и основанным на соотношении частот (длительности нарастания) входных нагрузок и собственных частот системы в каждой упругой связи.

5) *Применение коэффициента динамичности* ($K_d = M_{\max}/M_{\text{ст}}$) – отношения максимальной и статической нагрузки, в качестве универсального критерия при анализе динамики нелинейных систем усложняется при импульсном внешнем воздействии на систему (удары сляба о роляганги) или при изменениях в период захвата заготовки статического момента нагрузки, например, за счет действия натяжения полосы между клетями. При наличии зазоров нарушается фундаментальное свойство линейных систем – пропорциональность динамического отклика ($M_{\max}$) и входной нагрузки ($M_{\text{ст}}$), т.е. $K_d \neq \text{const}$, поэтому его использование становится не эффективным по сравнению с исходной нелинейной зависимостью $M_{\max} = M_{\max}(M_{\text{ст}})$, где K_d является по сути производной этой функции в некоторой точке.

6) *Технические средства измерения и регистрации* аналоговых сигналов нагрузок и вибрации допускали расчет только ограниченного числа параметров колебаний: основной частоты, коэффициентов динамичности, демпфирования (декремента колебаний). Полный частотный анализ нагрузок и вибрации был ограничен параметрами аналоговой аппаратуры и отсутствием возможности цифровой обработки сигналов. По результатам обработки данных измерений колебаний считалось, что частотный спектр сигналов содержит одну, максимум две низшие собственные частоты системы, визуально различимые на бумажных носителях (фотобумаге или пленке).

7) *Идентификация динамических моделей* проводилась по основной частоте колебаний, т.к. вторая и более высокие формы колебаний в графических данных измерения нагрузок были недоступны для численного анализа. Идентификацию переходного процесса на модели осуществляли сочетанием величин зазоров, добиваясь совпадения измеренных и расчетных значений K_d . Сложности аналитического определения параметров входной нагрузки и неизвестные на момент проведения измерений величины зазоров (нелинейностей) не позволяют точно идентифицировать спектр основных собственных частот системы путем сравнения K_d модели и объекта, особенно при раскрытии зазоров в течение переходных процессов. Идентификация нелинейных систем должна проводиться не только по амплитуде отклика и основной частоте, а по всем значимым формам колебаний, определяющим вид переходного процесса, а также связанным с этим интегральным и среднеквадратичным критериям близости траектории колебаний модели и объекта.

8) *Накопление и обработка больших массивов данных* в цифровом виде, включая данные о технологических параметрах процесса прокатки и техническом состоянии узлов оборудования, сдерживалась не только отсутствием технических средств, но и методов статистического расчета

динамических нагрузок в нелинейных системах с зазорами. Применяемые методы не позволяют обнаружить на фоне помех новые закономерности и учесть влияние на динамику различных технологических факторов и настроек оборудования, которые ранее считались не существенными [22].

9) *Измерение (мониторинг) динамических нагрузок* (крутящих моментов) существующие системы, как правило, производят только в одной или двух точках по линии привода (на моторном валу или на шпинделях). В исследовательских работах измерения могут проводиться в 3–4 точках. Измерения на моторном валу дают большие, а измерения на шпинделях – меньшие значения нагрузок. Это связано с тем, что перепады динамических нагрузок зависят от износа отдельных узлов и схемы линии привода, значения в разных точках могут отличаться в 1.5–2.0 раза и более. Поэтому для диагностики оборудования в переходных режимах работы с учетом текущего износа отдельных узлов необходимо использование подробных многомассных динамических моделей, без которых место установки датчика будет значительно влиять на величину, частотный состав сигналов нагрузок и расчетный ресурс оборудования.

10) *Переменная жесткость зацеплений редукторов и муфт* должна рассматриваться в двух аспектах. Во–первых, при моделировании и расчетах динамических нагрузок в линиях привода, где в расчетных схемах с ограниченным числом (3–4) приведенных масс податливости упругих связей (при закрытых зазорах) считаются постоянными величинами. Редукторы обычно рассматриваются как одна целая масса без учета податливости зубчатых зацеплений. Во–вторых, это затрудняет использование динамических моделей для диагностики технического состояния редукторов. Хотя более ранними исследованиями ИЧМ многодвигательных приводов конвертеров и зубчатых муфт шпинделей в станах холодной прокатки полос была показана необходимость учета переменной жесткости зубчатых зацеплений для правильной интерпретации резонансных режимов оборудования.

11) *Износ в подшипниковых опорах редукторов и валков* не учитывается при расчетах колебаний в крутильной системе, что ограничивает возможности динамического анализа всей линии привода в целом при взаимодействии угловых и радиальных зазоров. Величины радиальных зазоров (1–2 мм) сопоставимы с угловыми зазорами, например, в зубчатых зацеплениях редукторов и муфт.

Для устранения всех указанных выше ограничений необходима разработка новых подходов на основе многомассных динамических моделей, цифровой обработки сигналов и статистических методов расчета динамических нагрузок в нелинейных системах с зазорами. Применяемые методы, адаптированные к условиям прокатного производства, должны учитывать данные о технологических нагрузках, данные о техническом состоянии и конструктивных особенностях оборудования, а также иметь производительность, достаточную для их эффективной реализации в со-

ставе автоматизированных систем мониторинга нагрузок и вибродиагностики.

Новые результаты исследований.

Рассмотренные ниже новые результаты исследований получены в ходе хозяйственных работ на слябинге 1150 и широкополосном стане 1680 горячей прокатки ОАО «Запорожсталь»¹, непрерывном стане 2030 холодной прокатки ОАО «НЛМК»², а также в ходе академических и поисковых работ.

1) Модели параметрических колебаний нагрузки в редукторах.

Результаты исследований слябинга 1150 [23] показали, что при расчете колебаний линий привода необходимо отдельно учитывать моменты инерции зубчатых колес и шестерен, а также переменную жесткость зацеплений, которые могут качественно изменить частотные свойства всей линии привода. По своему характеру переменная жесткость является параметрическим возмущением, поэтому даже малые изменения (5–7%) при определенных условиях, зависящих от соотношения демпфирования и величины возмущения, могут вызывать усиление колебаний. С другой стороны параметры этих колебаний (нагрузки, вибрации) являются диагностическими признаками, так как непосредственно зависят от условий контактного взаимодействия в зубчатом зацеплении. На основе построенных моделей параметрических колебаний разработаны и совершенствуются методы диагностики редукторов и клетей [24].

2) Мониторинг динамических нагрузок по току электропривода.

Внедрение на прокатных станах электроприводов, оснащенных современными цифровыми системами управления, привело к повышению их быстродействия, что обеспечивает достаточно высокую частоту среза контуров регулирования (до 25–30 Гц), вследствие чего, сигнал токовой нагрузки содержит частоты собственных колебаний механической нагрузки в линиях привода. Разработанный метод цифровой обработки сигналов токовой нагрузки электроприводов, реализованный в способе мониторинга колебаний механической нагрузки [25], позволяет выделять собственные частоты механической системы линии привода и оценивать по их амплитуде пиковые нагрузки. Данный метод не может быть использован для предохранения от перегрузок, т.к. ток привода всегда запаздывает по отношению к механической нагрузке. Однако, с учетом разброса прочностных характеристик деталей (не менее 15–20%), точность данного метода (7–10%) достаточна для расчета ресурса оборудования без использования дорогостоящих и сложных в эксплуатации датчиков крутящих моментов, имеющих точность того же порядка (2–3%).

Известны технические решения по использованию токовой нагрузки для диагностики механического оборудования трансмиссий машин на

¹ Исследования проведены с А.П. Даличуком (измерения), В.В.Коренным (моделирование).

² Исследования проведены с И.Ю. Приходько, К.В. Соловьевым, Е.А. Парсенюком, В.В. Акишиным.

основе выделения амплитудной огибающей колебаний токовой нагрузки. В ходе академических исследований предложен новый метод диагностики общего износа линии привода, определяемый по фазовым частотным характеристикам токовой нагрузки, т.к. амплитудные изменения токовых сигналов имеют значительно меньший диапазон изменения.

Кроме методов обработки токовой нагрузки, в настоящее время ведется разработка цифрового устройства для тензометрических измерений крутящих моментов с учетом современных тенденций в измерительной технике и телеметрии.

3) *Взаимодействие нелинейностей в опорах и трансмиссии.*

Разработаны динамические модели радиальных колебаний валов редуктора и шестеренных клетей для оценки нагрузок, действующих на подшипники в симметричных опорах с зазорами. В зависимости от направления действия момента нагрузки и конструкции опор, радиальные зазоры могут, как усиливать, так и ослаблять динамические нагрузки в линии привода [28]. Такое явление наблюдается при раскрытии зазоров в болтовых креплениях подшипниковых опор. Кроме того, повышенные зазоры в опорах и постоянные колебания крутильной нагрузки в линиях привода прокатных станов ограничивают возможности применения стандартных методов вибродиагностики. Поэтому разработанные модели служат основой для новых методов диагностики зазоров в переходных режимах работы оборудования.

4) *Определение взаимосвязи статической и динамической нагрузки.*

В ходе исследований по мониторингу нагрузок черновых клетей на стане 1680 статистически установлена ранее наблюдавшаяся при измерениях в линиях привода взаимосвязь статической и динамической нагрузки. С увеличением момента прокатки на валках коэффициент динамичности падает. Расчеты на динамических моделях при постоянном времени нарастания нагрузки подтвердили указанную закономерность. Расчет максимальных нагрузок $M_{\max}$ по измеренным значениям статической нагрузки $M_{\text{ст}}$ и коэффициента K_d , согласно формуле $M_{\max} = K_d M_{\text{ст}}$, не может быть использован на практике за счет нелинейности функции при появлении износа (зазоров).

5) *Метод анализа технологических нагрузок.*

В соответствие с разработанным общим подходом по динамическому анализу прокатных станов, основанным на передаточных функциях и частотных характеристиках оборудования, предложено представление входных технологических нагрузок (моментов прокатки на валках) в виде спектров – зависимостей амплитуды от длительности (полупериода частоты) их нарастания. В ходе хозяйственных и академических работ выполнен анализ технологических параметров в черновых клетях непрерывного станов горячей прокатки 1680 ОАО «Запорожсталь». Построены амплитудно–частотные характеристики (АЧХ) по каналу «момент прокатки – вал двигателя», т.е. в местах установки датчиков крутящих моментов. Та-

ким образом, были сопоставлены АЧХ линий привода, определяемые конструктивными параметрами оборудования, и технологические нагрузки в каждой из черновых клетей. Определены клетки, где наблюдаются повышенные динамические нагрузки при совпадении частоты (времени нарастания) момента прокатки на валках и собственных частот линий привода.

Применение предложенных частотных методов и разрабатываемое для их реализации программное обеспечение позволяет в автоматизированном режиме для любых типов прокатных станов на единой основе проводить системный анализ технологии, конструктивных параметров клетей и условий эксплуатации оборудования (износ, текущие нагрузки, отказы и замены узлов и деталей).

6) *Методы снижения динамических нагрузок.*

Частотные спектры входных нагрузок и АЧХ линий привода были использованы для разработки методов снижения динамических нагрузок. Для снижения динамических нагрузок необходимо корректировать при захвате время нарастания момента прокатки, что можно осуществить несколькими технологическими способами:

- изменением (перераспределением) обжатий по клетям;
- целенаправленным формированием фигурной передней кромки;
- изменением момента включения системы гидросбива окалины;
- изменением скорости валков (ускорением привода) перед захватом.

Некоторые из методов уже были известны ранее, но применялись на практике без обоснования условий, необходимых для их реализации. При увеличении обжатия растет как амплитуда статической нагрузки, так и время ее нарастания при захвате, что имеет противоположное воздействие на динамическую нагрузку. Формирование различными способами фигурной передней кромки раската для увеличения времени нарастания нагрузки требует конструктивных изменений оборудования прокатных станов.

Проведенные на стане 1680 измерения температуры передних кромок раскатов показали, что перепад температуры на участке длиной 200–300 мм может достигать 60–80°C. Так как длина очага деформации в черновых клетях не превышает 100–150 мм (в пределах величины обрезки перед чистовой группой), то без ущерба для качества поверхности раската можно реализовать изменение времени нарастания и амплитуды входной нагрузки на валках при захвате путем регулирования момента включения системы гидросбива окалины. Данный способ был опробован в ручном режиме на стане 1680 и показал возможность снижения динамической составляющей нагрузок ($\delta M = K_d - 1$) на 30%. Для реализации данного способа в автоматическом режиме необходима установка датчика положения раската перед клетью для выдачи сигнала в систему управления станом на включение гидросбива.

При изменении скорости валков (ускорении привода) перед захватом необходимо постоянное согласование скорости рольганга, чтобы не происходило раскрытие зазоров в шпинделях от ударов раската по валкам. Данный способ был опробован в черновых клетях стана 1680. Приводы постоянного тока в клетях дуо, 3, 4 сначала замедлялись, а затем ускорялись перед самым захватом раската валками, что приводило к инерционному замыканию зазоров. По результатам промышленных экспериментов установлено снижение динамической составляющей нагрузки (на промежуточных валах): в клети дуо – на 2%; в клети №3 – на 22%; в клети №4 – на 96%. При ускорении приводов зафиксировано также снижение амплитуды ударной вибрации на опорах валов редукторов, что увеличивает ресурс работы подшипников.

Ни в одной из известных с 1960–х годов публикаций или патентах по данному способу, например в работе [5] на чистовых клетях стана горячей прокатки 2000 НЛМК, не оговариваются параметры ускорения привода в зависимости от конструктивного исполнения оборудования клети. В основном этот способ применялся операторами в ручном режиме на обжимных станах с линиями привода без редукторов. Новым результатом является методика определения оптимальных (допускаемых) уровней ускорения для клеток листопрокатных станов, т.к. большие моменты инерции редукторов приводят сначала к снижению, а затем повышению динамических нагрузок, чем и обусловлена низкая эффективность метода в клети дуо, где установлены два редуктора. Наибольший эффект достигнут в клети №4, где установлен один одноступенчатый редуктор. Для стана 1680 разработано техническое задание на реализацию алгоритмов управления скоростными режимами приводов и гидросбивом окаины.

7) *Оптимизация конструктивных параметров оборудования.*

Последними исследованиями установлено, что незначительные отклонения конструктивных параметров клети или линии привода, например моментов инерции валков при переточках, могут качественно изменять формы колебаний системы без существенного изменения значений собственных частот. Переход узла колебаний по линии привода, например, с промежуточного вала в зацепление редуктора может приводить к поломкам зубьев за счет раскрытия там зазоров при захвате. Совпадение по знаку нескольких форм колебаний в одном из узлов приводит к усилению в этом месте динамических нагрузок. На стане холодной прокатки 2030 НЛМК экспериментально установлено изменение форм (узлов) вертикальных колебаний валков в клети на разном сортаменте, что обуславливает повышение взаимодействия клеток через полосу и периодическую разнотолщинность. Поэтому при оптимизации параметров расчетных схем кроме частотных критериев необходимо анализировать изменения форм колебаний на разных частотах с использованием фазовых частотных характеристик (ФЧХ).

8) *Методы статистического расчета нагрузок.*

Анализ экспериментальных данных по исследованию величин зазоров в шпинделях и линиях привода показал, что величина их открытой части имеет сложный закон распределения. Одновременные измерения динамических нагрузок и углового положения лопасти шпинделей на вкладышах скольжения показали, что при вертикальном положении лопастей зазоры открыты и нагрузки максимальны.

Исследованиями для нормального и равномерного закона распределения входного воздействия (момента прокатки на рабочих валках) подтверждено теоретическое положение о том, что в линейной динамической системе без зазоров, независимо от количества и структуры упругих связей параметры распределения динамических нагрузок в каждой упругой связи соответствуют распределению входной нагрузки.

При наличии параметров распределения момента прокатки на валках передаточные функции позволяют определить спектр динамических нагрузок в линиях привода клетей с различной компоновкой. Предложен способ диагностики износа линии привода, основанный на сравнении законов распределений динамической нагрузки [30]. При появлении износа (зазоров) параметры закона распределения динамических нагрузок существенно изменяются и зависят от того, насколько близко на АЧХ клетки находится область рассеяния технологической нагрузки от одной из собственных частот линии привода.

9) *Методы диагностики линий привода прокатных станов.*

Основным параметром технического состояния линий привода прокатных станов является боковой износ сочленений, выраженный величинами угловых зазоров, которые имеют сложный характер своего влияния на динамику оборудования клетей. Поэтому актуальной научной и прикладной задачей является диагностика угловых зазоров линий привода прокатных станов [26]. Поскольку зазоры проявляются в момент приложения и снятия нагрузок, то их диагностика наиболее эффективна именно в переходных режимах работы оборудования [14], в отличие от стандартных методов, где диагностику осуществляют в установившемся режиме работы оборудования. Основным принципом диагностики зазоров, реализованным в способе [27], является анализ параметров сигналов крутильной нагрузки или вибрации (амплитуда, фаза, частота) по каждой из форм колебаний на собственных частотах механической системы. В качестве эталонного сигнала при этом принимается переходный процесс в линейной системе без зазоров, построенный на основе идентифицированных многомассных динамических моделей оборудования прокатных станов. Данный подход может быть применен в трансмиссиях любых машин и агрегатов. Высокая помехоустойчивость способа диагностики обеспечивается за счет малого влияния на результаты диагностики колебаний нагрузки и оборотов привода, что является основным недостатком стандартных методов.

Кроме цифровой обработки сигналов вибрации, разработан также эффективный метод диагностики элементов трансмиссий машин на основе датчиков углового положения, который был опробован на непрерывном и дрессировочном станах 2030 НЛМК, а также стане горячей прокатки 1680.

10) Методы диагностики подшипниковых опор редукторов.

Радиальные зазоры в опорах редукторов прокатных станов, как и угловые зазоры, являются важнейшими параметрами, влияющими на долговечность работы оборудования. Различная величина износа в опорах редукторов приводит к перекосам валов, перераспределению контактной нагрузки и поломкам зубьев на периферийных участках.

Основной недостаток известных способов диагностики подшипников в опорах состоит в том, что они не позволяют определять радиальные зазоры (суммарный износ) подшипников трансмиссии, например, в редукторах главной линии привода или подушках валков прокатной клетки, поскольку после нагрузки вращающим моментом или усилием прокатки все радиальные зазоры замкнуты и никак себя не проявляют. Проведение регулярных ревизий с разборкой опор приводит к снижению срока службы приработанных деталей. Разборка в процессе эксплуатации подшипников скольжения вообще не допускается.

Известные способы диагностики не учитывают также пластическое удлинение болтовых креплений опор, которые испытывают постоянные ударные нагрузки в редукторах прокатных станов. Для предотвращения раскрытия стыков в опорах редуктора производится регулярная обтяжка болтового крепления, которую выполняют при появлении его пластического удлинения. Известные способы не позволяют выявлять износ крепления.

Решение задачи диагностики зазоров в подшипниках и болтовых креплениях, реализованное в способе [29], достигается тем, что вибрации на опоре измеряют в период нарастания момента прокатки. Сравнивают в спектре колебаний вала в опорах значения собственной частоты и ее высших гармоник, полученных в нескольких предыдущих измерениях, величину износа крепления и радиальных зазоров определяют по изменению амплитуды и фазы на собственной частоте колебаний.

Выводы.

1. Для динамического анализа в частотной области и статистического расчета динамических нагрузок и вибрации в нелинейных системах предложены методы, которые наиболее отвечают требованиям цифровых средств регистрации и обработки сигналов в автоматизированных системах мониторинга динамических нагрузок и вибродиагностики.

2. Результаты исследований динамики прокатных станов, полученные на основе метода передаточных функций, могут быть также использованы при проектировании для оптимизации параметров технологического процесса и условий эксплуатации оборудования прокатных станов.

3. Разработанные методы диагностики износа позволяют решать в реальном масштабе времени задачу обслуживания по фактическому состоянию основного оборудования прокатных станов.

1. *Влияние динамических процессов в оборудовании полосовых станов на качество и выход годного.* / В.В.Веренев, О.Н.Кукушкин, Е.Г.Зиновьев Обзор по «Информсталь» // Ин-т «Черметинформ.». М, 1990. – Вып. 4(361). – 33 с.
2. *Кожевников С.Н.* Динамика нестационарных процессов в машинах. Киев: Наукова думка, 1986. – 288 с.
3. *Динамика и прочность прокатного оборудования* / Ф.К. Иванченко, П.И. Полухин, М.А. Тылкин, В.П. Полухин. – М.: Металлургия, 1970. – 487с.
4. *Иванченко Ф.К., Красношапка В.А.* Прикладные задачи динамики машин. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1983. – 200 с.
5. *Динамика процессов прокатки* / С.Л. Коцарь, В.А. Третьяков, А.Н. Цупров, Б.А. Поляков. – М.: Металлургия, 1997. – 255 с.
6. *Смирнов В.В., Яковлев Р.Я.* Механика приводов прокатных станов. – М.: Металлургия, 1977. – 216 с.
7. *Лехов О.С.* Динамические нагрузки в линии привода обжимных станов. – М., «Машиностроение», 1975. – 182 с.
8. *Расчет механических систем приводов с зазорами* / В.Л.Вейц, А.Е.Кочура, Г.В.Царев. – М.:Машиностроение, 1979. – 183 с.
9. *Материалы международного Конгресса механиков.* Донецк. – 1974. – 275 с.
10. *Большаков В.И.* Определение нагрузок и диагностика металлургического оборудования // Сб. тр. Международного н-т симпозиума. – Львов. – 2001. – С.78.
11. *Снижение угловых зазоров и динамических нагрузок при захвате металла валками* / С.А.Коцарь и др.// Бюл. «Черметинформация». – М. – 1979. – Вып.2. – С.42.
12. *Устройство для диагностики состояния соединения валов прокатных станов.* / В.Д. Плахтин и др. – Черметинформация, 1982. – №20. С.45.
13. *Датчик для измерения зазоров в сочленениях вращающихся деталей* / Е.Я.Подковырин, П.Я.Скичко // Сб. Динамика металлургических машин. XXXI. М.: Металлургия, 1969. – С. 161–165.
14. *Веренев В.В.* Диагностика технического состояния оборудования по данным вибродинамических процессов в переходных режимах работы прокатных станов. // Труды 4-го Конгресса прокатчиков. – Россия, Магнитогорск, 2001.
15. *Система контроля вибрации для станов холодной прокатки полос.* / И.Ю. Приходько, П.В. Крот., К.В. Соловьев / Труды VI Конгресса прокатчиков, Липецк, 18–21 окт. 2005. – М.:ОАО «Черметинформация», 2005.
16. *Автоматизированная система контроля силовых параметров прокатки* / В.М.Гребенник, А.В. Гордиенко и др. // Изв. ВУЗов черная металлургия. – 1984. – № 8. – С. 161–164.
17. *Создание системы мониторинга прокатного оборудования.* / Р.К.Вафин, Р.И. Ахмедшин, А.И.Мальцев и др. //ОАО «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия». – 2001. – № 12. – С.58–61.
18. *Подковырин Е.Я.* Бесконтактный измеритель крутящего момента // Сб. Динамика металлургических машин. XXXI. – М.:Металлургия, 1969. – С.159–161.
19. *Статистические исследования точности тонколистовой прокатки.* / Ю.Д.Железнов, С.Л.Коцарь, А.Г.Абиев. – М.Машиностроение, 1974. – 240 с.

- 20.. *Голубенцев А.И.* Интегральные методы в динамике. – К.:Техника, 1967. –350 с.
- 21..*Лошкарев В.И..* Динамика электромагнитных систем приводов непрерывных станов горячей прокатки. ИЧМ. Дисс. канд. техн. наук. 1968, 325 с.
- 22..*Экспериментальные исследования и промышленное опробование способов снижения динамических нагрузок в редукторных линиях приводов черновых клетей НТЛС 1680.* / П.В. Крот, А.Ю. Путники и др. // Труды V Конгресса прокатчиков, Череповец, 21–23 октября 2003. – М.: ОАО «Черметинформация», 2004.
- 23..*Крот П.В.* Параметрические колебания в прокатных станах. / Сб. научных тр. НГУ №13, том 3 – Дн–ск: Национальный горный университет, 2002.–С.15–21.
- 24..*Крот П.В.* Экспериментальные исследования и разработка компьютерных моделей для диагностики линий привода прокатных станов. Труды V Конгресса прокатчиков, Череповец, 21–23 октября 2003.– М.: ОАО «Черметинформация», 2004.
- 25..*Заявка на патент Украины. №а200508872 от 19.09.2005.* Большаков В.И., Крот П.В. и др. Способ мониторинга колебаний механических нагрузок в трансмиссиях машин.
- 26..*Вибродиагностика прокатных станов в диапазоне собственных частот колебаний.* / П.В. Крот, А.П. Даличук, В.В. Коренной, К.В. Соловьев // Материалы 12-ой ежегодной международной конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики», 20–24 сентября, 2004 г. – С.124–126.
- 27..*Заявка на патент Украины. №а200508854 от 19.09.2005.* Большаков В.И., Крот П.В. и др. Способ диагностики износа элементов трансмиссий машин.
- 28..*Крот П.В.* Исследование нелинейных колебаний крутильной нагрузки и вибрации в прокатных станах. / Тезисы доклада на Международной н–т конф. «Вибрации в технике и технологиях», Полтава, ПНТУ,3–7окт. 2005. –С.116–120.
- 29..*Заявка на патент Украины. №а200508869 от 19.09.2005.* Большаков В.И., Крот П.В. и др. Способ диагностики подшипниковых опор трансмиссий машин.
- 30..*Применение нестационарных режимов работы прокатных станов для диагностики зазоров.* / Большаков В.И., Крот П.В. и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научных трудов. – Вып.9 – К.:Наукова думка, 2004.– С.208–220.

Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. В.И. Большаковым.

Послесловие редактора сборника.

В отличие от традиционного для школы С.Н.Кожевникова подхода к анализу исследований в статье содержится большое количество субъективных оценок. Отличительной особенностью представленных автором путей решения задач динамики и диагностики является использование статистических методов оценки, которые не позволяют определить особенности динамических процессов, влияние различных факторов и поэтому не несут конструктивных предложений по совершенствованию машины или режимов ее работы.