

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ УГЛОВОГО ЗАЗОРА В ШПИНДЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ГЛАВНОЙ ЛИНИИ ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ

В.Р. Гасияров¹, С.Н. Басков¹, О.А. Гасиярова¹, Б.М. Логинов²

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

² ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия

Разработка систем контроля технического состояния оборудования прокатных станов должна основываться на современных цифровых технологиях. Одним из наиболее частых повреждений, возникающих в главных линиях электроприводов клетей, является поломка шпиндельных соединений. На примере реверсивной клетки толстолиствого стана 5000 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК») обоснована задача контроля износа шпиндельных соединений на основе периодического измерения угловых зазоров в автоматическом режиме. Выполнен анализ осциллограмм скоростей и моментов двигателей в аварийном режиме, вызванном поломкой шейки вала. Подтверждены колебательные свойства системы «электропривод – валок», увеличивающие амплитуду упругого момента при захвате металла. Разработан наблюдатель углового зазора, принцип которого основан на алгоритмическом вычислении (восстановлении) неизмеряемого сигнала (зазора) на основе математической обработки физических параметров (скорости и электромагнитного момента двигателя), измеряемых с заданной периодичностью. Предложен способ мониторинга износа шпиндельного соединения, обеспечивающий косвенное определение углового зазора путем интегрирования скорости при разомкнутом зазоре. Интервал вычисления интеграла определяется путем фиксации динамического увеличения момента двигателя в момент его активного закрытия при отсутствии металла в валках. Представлена структура наблюдателя, приведены осциллограммы, поясняющие возможность его практической реализации. Дана характеристика имитационной модели электромеханической системы клетки стана 5000. Выполнены исследования алгоритмов, реализующих разработанный способ. Предложены варианты технического исполнения и алгоритм настройки наблюдателя. Обозначена стратегия дальнейших исследований, обоснованы направления создания цифровой системы мониторинга износа шпиндельных соединений. Отмечены технические эффекты, обеспечиваемые при внедрении выполненных разработок.

Ключевые слова: прокатная клеть, электропривод, шпиндель, износ, угловой зазор, косвенное измерение, наблюдатель, разработка, имитационная модель, исследование, техническое исполнение, рекомендации.

Введение

В настоящее время в промышленности набирает популярность новый цифровой сервис: «предиктивное обслуживание» (predictive maintenance, PdM). Данная технология внедряется для сбора и анализа информации о состоянии оборудования, для прогнозирования сроков ремонтных работ и предотвращения сбоев производства [1, 2]. Безусловно, такой вид обслуживания является перспективным для агрегатов прокатного производства, эксплуатация которых происходит в тяжелых условиях. Аварийные простои прокатных станов, вызванные поломками оборудования, дорого обходятся предприятию, а устранение их последствий вызывает длительные простои, повышение затрат на обслуживание и недовыпуск продукции [3–5].

Одним из наиболее частых повреждений, возникающих в линиях главных электроприводов клетей прокатных станов, является разрушение головок шпинделей, вызывающее их поломку. Это повреждение характерно для горизонтальных клетей толстолистных станов, в том числе стана 5000 ПАО «ММК» (далее – стан 5000) [6, 7]. Не менее

опасной, но более «дорогостоящей» аварией является поломка шейки вала. За период эксплуатации стана с 2009 года произошло несколько поломок шпиндельных соединений и не менее двух поломок шеек горизонтальных валков. Эти повреждения привели к длительным простоям стана и значительным затратам на устранение последствий.

В то же время ряд поломок был предупрежден благодаря своевременному диагностированию предаварийной ситуации. В этом случае неисправность устраняется в течение нескольких часов при минимальных затратах. Это подтверждает целесообразность диагностирования износа шпиндельных соединений путем автоматизированного контроля их состояния. Сложность такого диагностирования связана с невозможностью измерения степени износа. Вместе с тем она напрямую связана с величиной углового зазора (люфта) в соединении. Периодический контроль зазора с заданным интервалом позволит косвенно оценивать развитие механических повреждений, усталостного выкрашивания и других развивающихся дефектов.

Однако прямое измерение углового зазора в рабочем режиме также невозможно. Опублико-

ванные в литературе попытки его вычисления по результатам осциллографирования динамических моментов при входе металла в клеть не привели к достижению цели. Это связано со сложностью выделения составляющей момента, вызванной закрытием углового зазора (выбором люфта). Связано это с тем, что на динамический момент при захвате металла валками влияет много факторов, определяющих скорость выполнения очага деформации. К ним относятся: соотношение скорости движения раската и линейной скорости валков, форма переднего конца раската, величина раствора валков, температура и др.

Конструкция шпинделя

В реверсивной клетке стана 5000 установлены шпиндели выдвижного (слипเปอร์ного) типа. Фотография шпинделя показана на рис. 1. Непосредственно сочленение валка со шпинделем осуществляется с помощью головки специальной конструкции (рис. 1б), которая крепится к рабочему валу [8]. Аналогичная головка смонтирована со стороны двигателя. На рис. 1б схематично показано замыкание углового зазора δ . Если зазор разомкнут, то при захвате раската валками происходит его замыкание, сопровождающееся механическим ударом и колебаниями упругого момента в шпинделе.

На вновь устанавливаемом механизме угловой зазор в соединении небольшой и составляет 1–2 град. Он необходим для сочленения двух вращающихся устройств – непосредственно шпинделя и валка и обеспечения свободного движения при вертикальном перемещении валков. Величину углового зазора определяет износ вилок и головок шпинделей (см. рис. 1б), они наиболее подвержены усталостным разрушениям. Их поломки наиболее часто возникают со стороны клетки. Это обусловлено большой массой валка, упругими удара-

ми при захвате металла, воздействием охлаждающей жидкости и т. д.

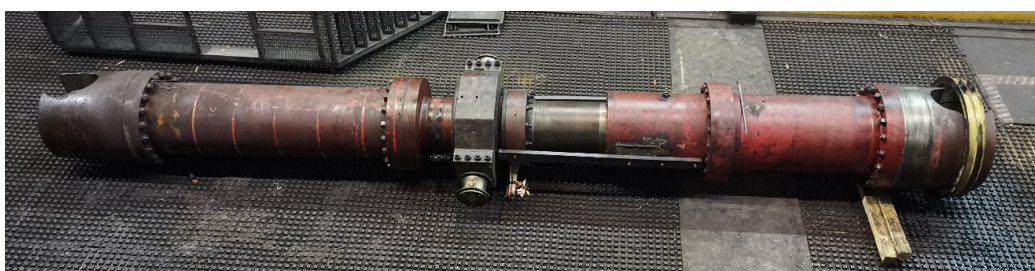
Сложность конструкции, ударные нагрузки, тяжелые режимы эксплуатации подтверждают актуальность разработки мероприятий по предотвращению поломок шпиндельных соединений. Наименее затратным и наиболее эффективным способом решения этой задачи является своевременный мониторинг их состояния.

Постановка задачи

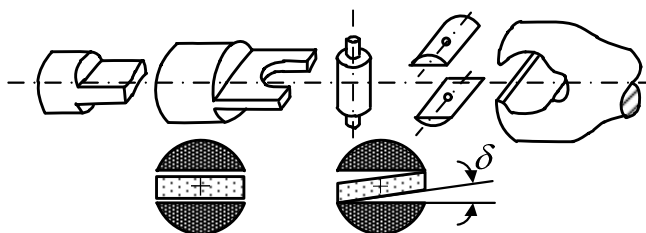
Анализ осциллограмм моментов

Основными причинами возникновения недопустимых динамических нагрузок являются большая инерционность двухмассовой системы, образованной массой валка с одной стороны и массой вращающихся частей двигателя – с другой. Кроме этого, на амплитуду динамического момента оказывают влияние упругие свойства шпинделя. Поэтому изменения момента на валу в режиме захвата металла имеют колебательный характер. Как показано в [9], динамические броски момента определяются непосредственно ударом при замыкании зазора и упругими свойствами вала. Причем амплитуда колебаний в 2–3 раза превышает максимум динамического момента, обусловленного непосредственно замыканием зазора. Это подтверждают осциллограммы, представленные на рис. 2, на которых зафиксирована авария, вызванная поломкой шейки нижнего валка клетки стана 5000 во время приложения нагрузки.

Захват происходит в момент времени t_1 , далее в момент t_2 электромагнитный момент двигателя главного привода нижнего валка (НПП) достигает уровня ограничения 4200 кН·м. Непосредственно поломка происходит в момент времени t_3 , что видно по снижению момента этого двигателя от 4200



а)



б)

Рис. 1. Фотография шпинделя (а) и изображение деталей шпиндельного соединения (б)

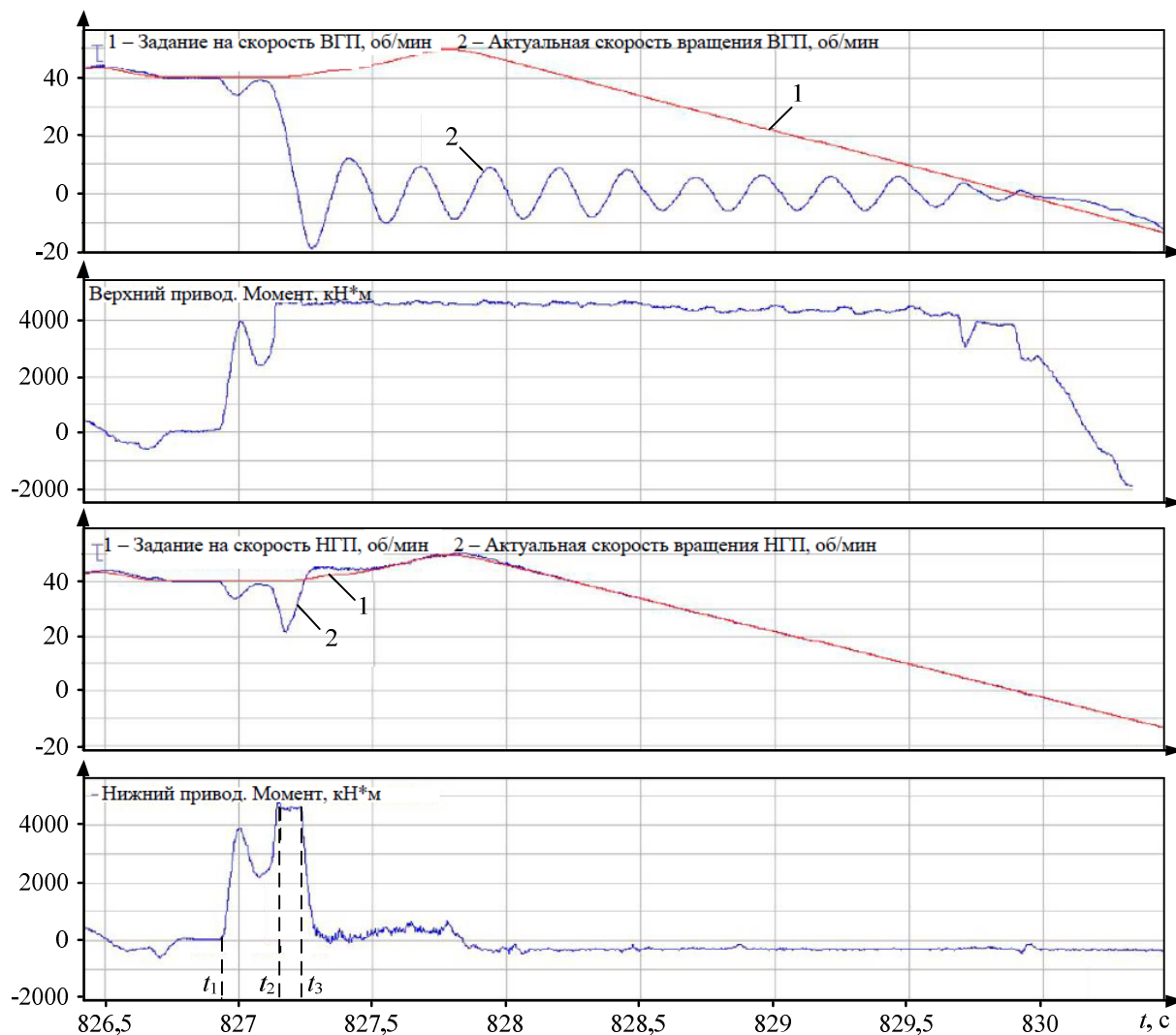


Рис. 2. Осциллограммы моментов и скоростей электроприводов при аварийной поломке шейки нижнего валка

до 500 кН·м. Электропривод верхнего валка (ВГП) пытается «в одиночку» прокатать заготовку, но его момента недостаточно, и он переходит в режим отсечки по моменту. Контур регулирования скорости размыкается, возникают медленно затухающие колебания скорости (кривая 2), обусловленные упругостью валопровода. Задание скорости двигателя (кривая 1) снижается по сигналу от задатчика интенсивности.

Представленные осциллограммы подтверждают колебательные свойства системы «электропривод – валок» горизонтальной клетки. В обычной ситуации колебания накладываются на ударный процесс замыкания зазоров, что приводит к увеличению амплитуды момента.

Одной из причин аварийных остановок стана, вызванных поломкой шпинделей, является сложность контроля их угловых зазоров с заданной периодичностью. На действующих станах такой контроль проводится путем прямых замеров в «ручном» режиме во время плановых остановок.

Он является неэффективным, так как не имеет четкого регламента и требует временных затрат. К тому же замеры приходится проводить далеко не в «комфортных» условиях, поэтому на частоту и погрешность измерений оказывает влияние «человеческий фактор».

Анализ известных разработок

Специалистами промышленных предприятий и научных учреждений неоднократно предпринимались попытки разработки технических средств для автоматизированного измерения величины зазоров в шпindelных соединениях при наличии индивидуального реверсивного электропривода. Краткий анализ этих разработок приведен в [10]. В публикации [11] рассмотрен цифровой прибор для измерения угловых зазоров, разработанный ИЧМ НАН Украины. Для его работы на поверхность шпинделя на фиксированном расстоянии наносятся оптические магнитные метки. Информация об их расположении считывается двумя датчиками и обрабатывается по заданному алго-

ритму. На выходе устройства формируется цифровой сигнал, содержащий информацию об угловых зазорах в линии привода.

Недостатками данного устройства являются сложность использования, связанная с необходимостью считывания информации с магнитных меток, и низкая точность. Сведения о его масштабном промышленном использовании отсутствуют.

В статье [12] предлагается использовать угловые и радиальные люфты в целях диагностики износа в диапазоне собственных частот приводных механизмов во время переходных процессов.

Заслуживает внимания публикация [13], авторами которой отмечается, что угловые и радиальные зазоры создают высокие динамические нагрузки и вызывают внезапные отказы в многоклетевых станах горячей прокатки. Их мониторинг затруднен из-за изменений технологических режимов, свойств обрабатываемого материала и скорости привода. Со ссылкой на публикации [14–17] утверждается, что глобальная цифровизация металлургических производств позволяет развить новые эффективные подходы к прогнозированию и управлению состоянием машин и механизмов. В результате комплексного исследования предлагается разработка интеллектуальной системы контроля и прогнозирования оставшегося срока службы (RUL) механизмов. Такой подход основан на физических моделях и согласуется с термином «Dynamics Based Maintenance» («Техническое обслуживание на основе динамики») [18].

Разработка интеллектуальных систем контроля состояния на основе online-мониторинга оборудования прокатных станов выполняется многими исследователями, в том числе авторами статей [19–23]. Контроль состояния, как правило, основан на обработке параметров электроприводов (токов, скоростей) либо сигналов, поступающих от систем автоматического регулирования технологических параметров (натяжения, толщины и др.). Мониторингу износа шпиндельных соединений внимания не уделяется.

В связи с изложенным поставлена задача разработки наблюдателя (цифрового двойника) углового зазора, принцип которого основан на моделировании (восстановлении) измеряемой координаты на основе обработки физических параметров, измеряемых непрерывно либо с заданной периодичностью. На таком принципе основана работа большинства известных наблюдателей физических параметров, например, упругих моментов в валопроводах [24–26] либо натяжений прокатываемой полосы [27, 28]. При восстановлении зазора контролируемые параметрами являются легкодоступные для измерения координаты – электромагнитный момент и скорость двигателя.

Конечной целью является разработка информационно-измерительной системы, обеспечивающей косвенное определение и визуализацию изно-

са шпиндельных соединений на основе контроля угловых зазоров. Измерения должны осуществляться с заданной периодичностью в автоматизированном режиме, без участия персонала. Проведенные эксперименты показали, что величину зазора можно определить косвенным методом по моментам двигателей в режиме свободного выбега во время реверса.

Основная часть

Принцип косвенного определения углового зазора

В основу способа мониторинга износа шпиндельного соединения положена идея косвенного определения углового зазора путем измерения динамического момента двигателя в момент активного закрытия зазора при отсутствии металла в клетки. Для этого необходимо разработать алгоритм вычисления зазора в автоматизированном режиме, включив его в программу калибровки, проводимой после каждой перевалки (замены) рабочих валков. С учетом того, что такая перевалка на толстолистовых станах осуществляется один раз в двое-трое суток, это обеспечит требуемую точность, а объем получаемой информации будет достаточным для диагностирования скорости развития дефекта.

Данный способ поясняют осциллограммы скоростей и моментов при замыкании зазора в шпиндельном соединении верхнего вала, приведенные на рис. 3. Они получены при тестовом задании скорости электропривода в виде треугольной диаграммы с равноускоренными разгоном и торможением.

В момент времени t_1 , когда момент двигателя изменяет знак, происходит раскрытие зазора в передаче. К моменту t_2 зазор закрывается, это подтверждает динамический бросок момента двигателя от 300 до 800 кН·м. Предполагая, что скорость шпинделя при раскрытом зазоре постоянна (изменяется по кривой 3), величину люфта можно рассчитать по зависимости

$$\alpha = \frac{1}{2} \Delta n \cdot \Delta t \cdot 0,1047,$$

где 0,1047 – коэффициент перевода [об/мин] в [рад/с].

В данном случае $\Delta n = 4$ об/мин; интервал времени $\Delta t = 0,18$ с; соответственно угловой зазор $\alpha = 0,038$ с⁻¹ или около 2,2°.

Приведенный пример подтверждает, что зазор в механической передаче электропривода может быть определен косвенным методом. Для этого необходимо зафиксировать время его замыкания (момент t_2) по началу динамического роста момента двигателя.

Экспериментальные исследования позволили разработать методику косвенного определения зазора в шпиндельном соединении. Она включает следующие этапы:

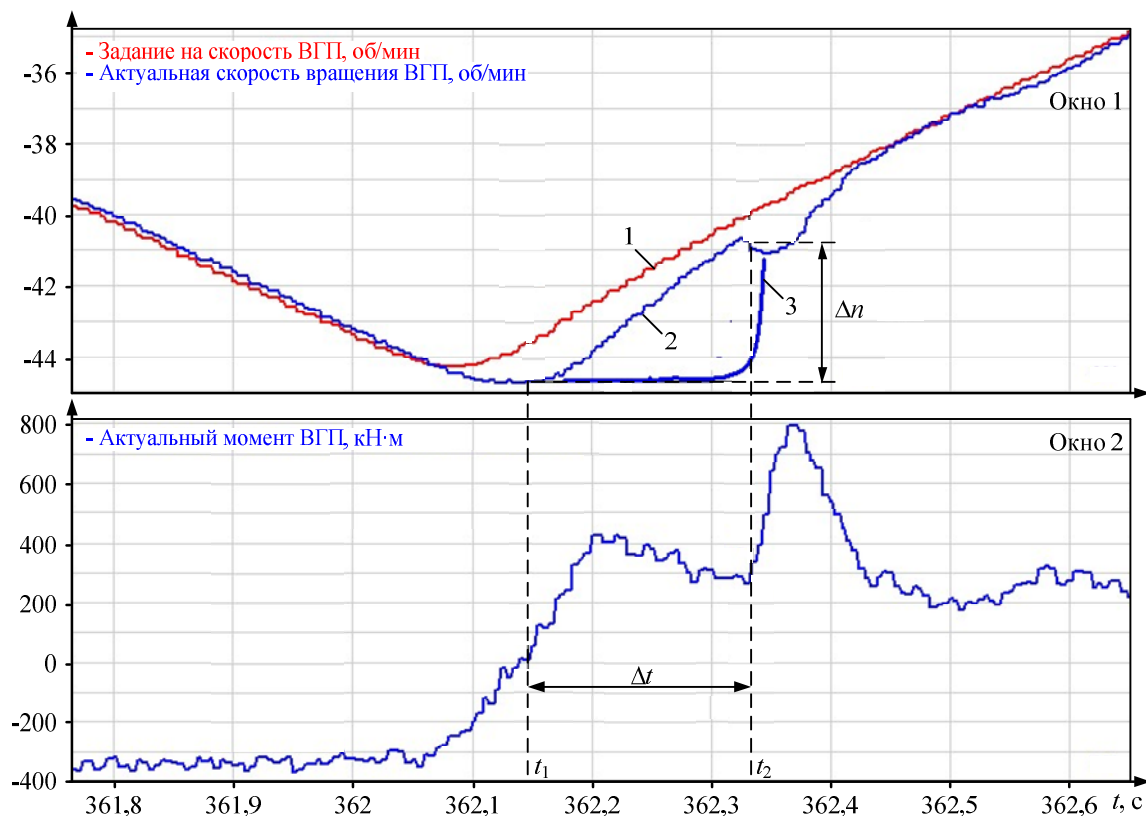


Рис. 3. Осциллограммы замыкания углового зазора в режиме реверса: окно 1 – заданная (1) и фактическая (2) скорости вращения двигателя, об/мин; окно 2 – фактический момент двигателя

1) формирование задания скорости на электропривод таким образом, чтобы зазор замкнулся в одну сторону (условно, при вращении вперед), затем разомкнулся и замкнулся при вращении назад;

2) контроль изменения момента двигателя с целью определения временных моментов замыкания и размыкания зазора;

3) определение времени, в течение которого зазор был разомкнут, и фиксацию сигнала скорости в этом интервале. Вычисление угловой величины зазора как интеграла скорости в данном промежутке.

Как отмечалось выше, для выполнения первой задачи сигнал задания скорости должен иметь треугольную форму с одинаковыми темпами ускорения и замедления.

Очевидно, что промышленным испытаниям разработанного способа должны предшествовать исследования методом моделирования. Поскольку

при анализе переходных процессов скоростей и моментов нет необходимости анализа «внутренних» координат электропривода (токов, магнитного потока и др.), целесообразно использовать упрощенную имитационную модель электропривода. Ее основу составляет двухмассовая система «электропривод – валок» с упругой связью и угловым зазором в передаче. Для клетки стана 5000 такая модель разработана и рассмотрена в публикациях [29, 30]. Поэтому ниже дается лишь ее краткая характеристика.

Характеристика имитационной модели

Структурная схема модели представлена на рис. 4. Блоки 3, 5–7 являются типовыми блоками модели двухмассовой системы. Блок 4 определяет характер переходных процессов в механической части, в том числе естественное затухание колебаний, блок 5 имитирует зазоры в механических передачах. Обратная связь по скорости моделируется блоком 8 с коэффициентом k_{oc} .

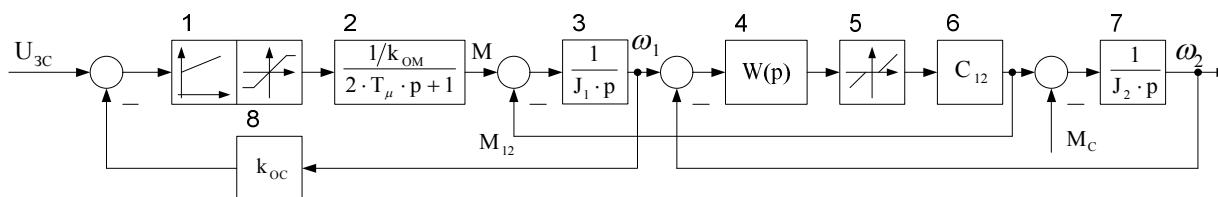


Рис. 4. Структурная схема двухмассовой электромеханической системы

Электромеханические системы

Приняты обозначения: $J_1 = J_{\text{ДВ}}$ – момент инерции первой массы (двигателя); J_2 – приведенный момент инерции второй массы (рабочего и опорного валков, промежуточных валов и т. д.); c_{12} , M_{12} – жесткость и момент упругой связи; β – показатель затухания; M_1 , ω_2 – момент на входе и угловая скорость на выходе системы.

Передаточная функция замкнутой системы механической части при пренебрежении нелинейностью, вызванной зазором в передачах,

$$W_{\text{ЗМ}}(p) = \frac{c_{12} \cdot W(p)}{c_{12} \cdot W(p) + J_1 \cdot p}.$$

Параметры всех звеньев определены по данным электрооборудования и осциллограммам, снятым на стане. В модели принимается, что контур регулирования момента настроен на технический оптимум. Поэтому для упрощения анализа он представлен апериодическим звеном первого порядка (блок 2). Контур регулирования скорости настроен на симметричный оптимум с пропорционально-интегральным регулятором скорости (блок 1). Так как при работе электропривода возникает ограничение момента, на его выходе установлен блок ограничения с изменяемыми пределами.

Результаты моделирования

Расчеты, выполненные на модели, показывают, что равноускоренного разгона и торможения вполне достаточно для получения результата. На рис. 5 приведены временные зависимости скорости двигателя, электромагнитного момента, момента кручения вала и зазора в передачах, подтверждающие этот вывод. Все величины показаны

в относительных единицах (моменты – относительно номинального момента двигателя 1910 кН·м, скорость – относительно задания 0,628 рад/с, зазор – относительно начальной величины 0,017 рад).

При выборе сигнала задания необходимо учесть условие: величина углового ускорения (и замедления) должна быть такой, чтобы динамический момент электропривода превышал момент холостого хода. В разработанной модели момент холостого хода принят равным 5 % номинального момента двигателя и составляет 95 500 Н·м. При таком моменте для замыкания и размыкания зазора достаточно изменения сигнала задания с ускорением 1 В/с^2 , что соответствует ускорению двигателя $0,628 \text{ рад/с}^2$. Реальный момент холостого хода может отличаться от принятого в модели, поэтому выбор ускорения следует производить непосредственно на стане, контролируя моменты замыкания и размыкания зазоров.

Из представленных зависимостей следует, что начало замыкания (размыкания) зазора можно определить по динамике упругого момента вала, так как при разомкнутом зазоре этот момент равен нулю. Однако физическое измерение момента кручения требует установки специальных датчиков. Вместе с тем если проанализировать структурную схему механической части на рис. 4, видно, что момент кручения вала M_{12} равен моменту нагрузки двигателя. Следовательно, его можно вычислять по электромагнитному моменту двигателя M_1 и угловой скорости ω_1 с помощью «классической» схемы датчика статического момента (рис. 6).

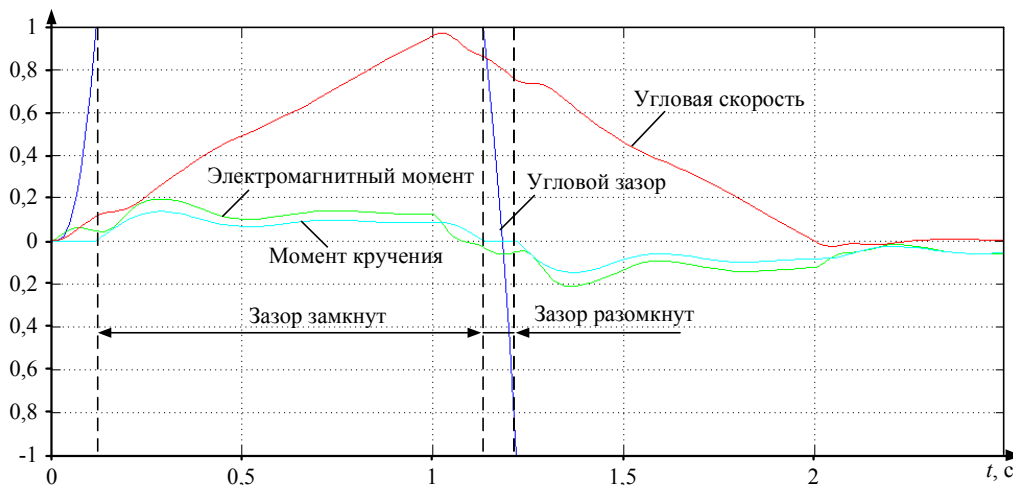


Рис. 5. Переходные процессы скорости и моментов при обработке треугольной тахограммы задания

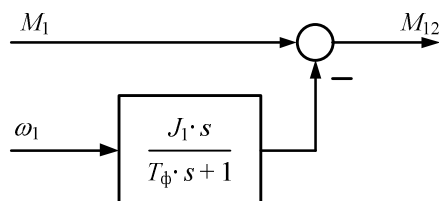


Рис. 6. Структурная схема датчика статического момента

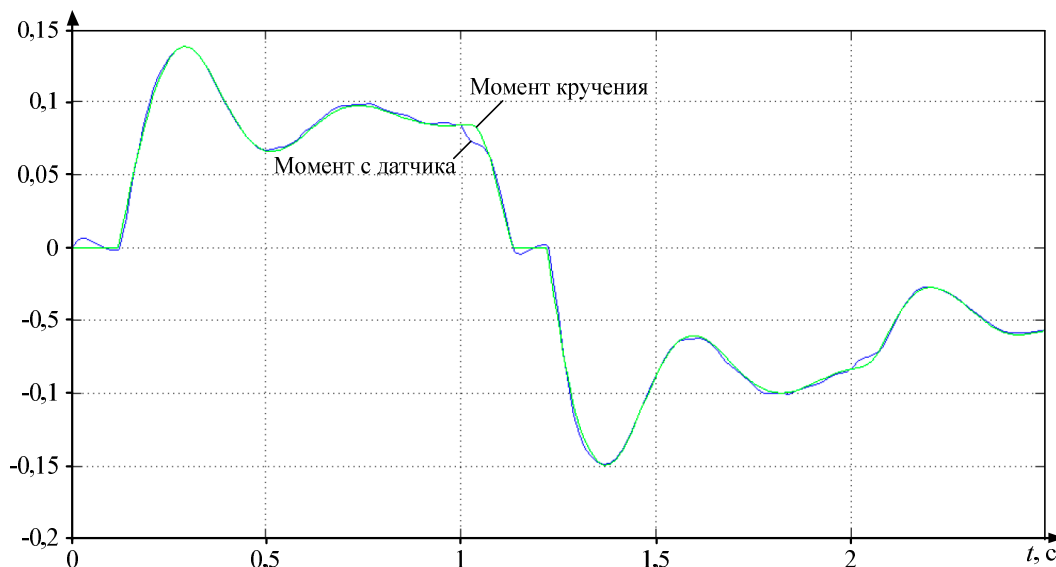


Рис. 7. Сравнение сигналов статического момента

На схеме T_{ϕ} – постоянная времени фильтра (принята равной 0,01 с). Фильтр необходим для устойчивой работы дифференцирующего звена, хотя вносит незначительную задержку в вычисление выходного сигнала.

На рис. 7 приведены графики момента кручения вала, рассчитанные на модели и полученные с помощью датчика статического момента при одинаковых входных сигналах. Сигнал датчика практически совпадает с реальным моментом кручения. Погрешности проявляются только при резких изменениях момента, что вызвано наличием фильтра низких частот с постоянной времени T_{ϕ} .

Структура наблюдателя

Структурная схема разработанного наблюдателя углового зазора приведена на рис. 8.

Входными сигналами являются угловая скорость и момент двигателя (при отсутствии нагрузки – это момент кручения вала), подаваемый с выхода датчика статического момента. Точность его вычисления не важна, так как он служит только для фиксации момента размыкания зазора. Кроме этих параметров задается логический сигнал «Начало торможения». По нему определяется момент измерения зазора путем контроля «знака» скорости. Согласно рис. 3 и 5,

этот сигнал должен формироваться в момент времени 1 с.

Блоки 1, 2, 3 предназначены для определения интервала времени, в течение которого момент нагрузки двигателя равен нулю. Блок 1 – «зона нечувствительности» – необходим для компенсации погрешности определения статического момента, так как момент, вычисленный датчиком, неоднозначно равен нулю при размыкании зазора (см. рис. 5). Величина зоны нечувствительности зависит от настроек датчика и должна подбираться экспериментально. В модели она принята равной 0,1 % номинального момента. Также включены блок 2 вычисления модуля момента, релейный блок 3, выдающий логический ноль на выходе, если входной сигнал не равен нулю. Релейная характеристика применяется для повышения помехозащищенности. Блок 4 – логическое «И», его выходной сигнал замыкает ключ (Блок 5) на входе интегратора (Блок 6).

Подключение указанных блоков обеспечивает разрешение интегрирования сигнала угловой скорости, если выполняются одновременно два условия: статический момент нагрузки равен нулю (то есть зазор разомкнут) и началось торможение электропривода. После замыкания зазора статиче-

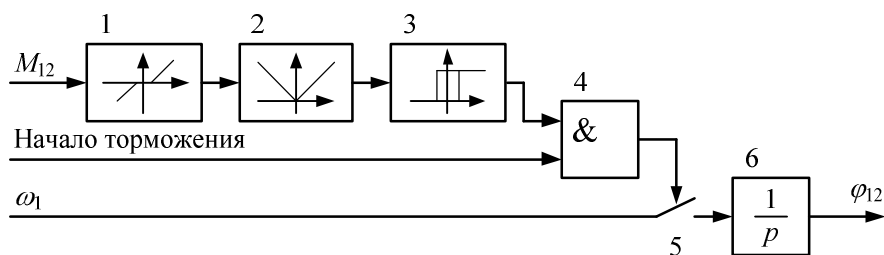


Рис. 8. Структурная схема наблюдателя углового зазора в механических передачах

Электромеханические системы

ский момент отличается от нуля и сигнал на выходе релейного блока становится равным логическому нулю. В результате этого ключ размыкается, интегрирование прекращается и на выходе интегратора устанавливается сигнал, численно равный величине углового зазора в передаче.

Так как скорость электропривода в процессе выбора зазора (интервал Δt на рис. 3) изменяется практически по линейному закону, операцию интегрирования можно заменить приближенным вычислением зазора по формуле

$$\varphi_{12} = \alpha \cdot \Delta t^2,$$

где α – угловое ускорение (по модулю) при торможении электропривода.

Время выбора зазора может быть определено по длительности сигнала логической единицы на выходе Блока 4.

Техническая реализация

Для практического определения суммарного углового зазора в шпинделях предлагается структура, представленная на рис. 9. Его вычисление производится по окончании процесса калибровки клетки. Для этого задается тестовое воздействие на электропривод в виде треугольной диаграммы. Последовательность действий, реализованных в блоке анализа, рассмотрена выше по ходу изложения текста.

Настройка наблюдателя выполняется один раз, ее программа включает следующие действия:

1) программирование и экспериментальную настройку датчика статического момента, в том числе подбор величины постоянной времени фильтра, обеспечивающей минимальную погрешность и устойчивую работу датчика;

2) экспериментальное определение тахограммы электропривода (величины и темпа ускорения и замедления), обеспечивающей гарантированное замыкание и размыкание зазора;

3) экспериментальную настройку зоны нечувствительности (Блок 1 на рис. 8), обеспечи-

вающей надежное определение момента размыкания;

4) внедрение разработанных алгоритмов в программу калибровки.

Стратегия дальнейших исследований

Ожидаемым конечным результатом является информационная система мониторинга износа шпиндельного соединения на основе периодических измерений углового зазора в автоматическом режиме.

Для ее промышленного исполнения необходимы следующие разработки.

1. Визуализация информации о техническом состоянии шпиндельных соединений. Для предупреждения о развитии аварии следует предусмотреть выпадающие окна на мониторе оператора.

2. Вывод эмпирических зависимостей степени износа шпиндельного соединения от величины углового зазора. Их следует получить по результатам статистической обработки экспериментальной информации при большом количестве замеров. Они обеспечат достаточную точность, поскольку процесс износа соединения (как и изменения зазора) длительный. Полученные зависимости позволят не только дать оперативную оценку состояния механического соединения, но и определить скорость развития неисправности. Это позволит прогнозировать время достижения заданных граничных значений. Обоснование граничных значений углового зазора и/или показателя степени износа, соответствующих ухудшенному и предаварийному состояниям, является одной из задач, которые необходимо решить после накопления информации.

3. Для определения динамики износа и прогнозирования состояния шпиндельных соединений необходима разработка специализированных программ. Они должны обеспечить математическую обработку трендов диагностических параметров. Для построения трендов необходимо накопление больших объемов информации. Это предопределяет целесообразность создания специализированной базы данных.

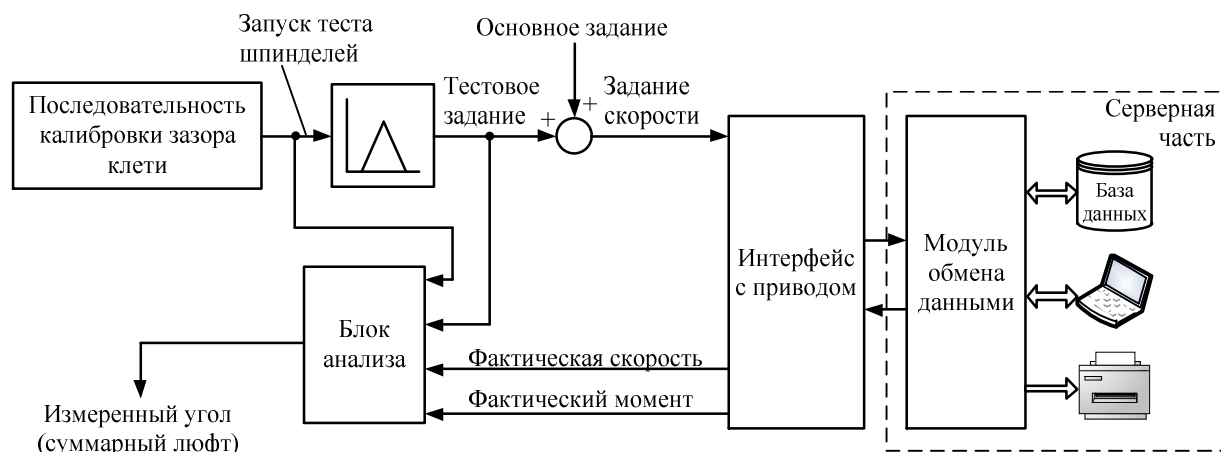


Рис. 9. Структура системы мониторинга зазора в шпинделях

Заключение

Разработанный наблюдатель углового зазора в шпиндельных соединениях обеспечивает его восстановление (косвенное определение) по измеряемым параметрам электропривода (скорости и электромагнитному моменту двигателя). Его преимуществами являются простота настройки и возможность получения контролируемых сигналов по заданной команде без участия персонала.

Внедрение алгоритмов автоматизированного контроля угловых зазоров обеспечит диагностирование развития аварии на начальной стадии. Это позволит устранить опасную ситуацию во время регламентного обслуживания без дополнительной остановки стана.

Разработанный наблюдатель предназначен для предотвращения поломок шпинделей и шеек валков реверсивной клетки стана 5000 ПАО «ММК».

Вместе с тем его внедрение будет эффективным на других станах горячей прокатки (толстолистовых, широкополосных, сортовых), характерным режимом которых является ударное приложение нагрузки при захвате металла валками.

Внедрение обеспечит:

- сокращение времени аварийных простоев стана;
- сокращение затрат на устранение последствий аварий, замену и восстановление оборудования;
- повышение срока службы электрического и механического оборудования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания (фундаментальное научное исследование), договор № FENU-2020-0020 (2020071ГЗ).

Литература/References

1. Predictive maintenance (PdM) analysis matrix: A tool to determine technical specifications for PdM ready-equipment. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2019, vol. 700, 012033. DOI: 10.1088/1757-899X/700/1/012033
2. Yongyi Ran, Xin Zhou, Pengfeng Lin, Yonggang Wen. A Survey of Predictive Maintenance: Systems, Purposes and Approaches. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2019, vol. XX, no. XX, 36 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/337971929_A_Survey_of_Predictive_Maintenance_Systems_Purposes_and_Approaches.
3. Кирсанов А.Ф., Кузerman В.Ф., Виноградов Б.Н. и др. Анализ причин аварий оборудования листопркатных станов и меры по их предупреждению. Обзор. информ. Ин-та «Черметинформация». М., 1985. 36 с. [Kirsanov A.F., Kuzerman V.F., Vinogradov B.N. et al. *Analysis of the causes of accidents in equipment of sheet rolling mills and measures for their prevention*. Overview Inform. Institute “Chermetinformation”. Moscow, 1985. 36 p. (in Russ.)]
4. Мюллер В. Обзор повреждений в приводах прокатных станов. Черные металлы. 1996. № 25–26. С. 9–14. [Muller V. Review of damages in drives of rolling mills. *Black metals*. 1996, no. 25–26, pp. 9–14. (in Russ.)]
5. Белоха В.В., Рябов Б.П., Бишко М.Ю. и др. Виды повреждений зубчатых передач металлургических приводов. Ин-т «Черметинформация». Обзор. информ. Сер. «Эксплуатация и ремонт металлургического оборудования». Вып. 2. М., 1990. 15 с. [Belokha V.V., Ryabov B.P., Bishko M.Yu. et al. *Types of damage to gears of metallurgical drives*. Institute “Chermetinformation”. Review Inform. Ser. “Operation and repair of metallurgical equipment”, iss. 2. Moscow, 1990. 15 p. (in Russ.)]
6. Karandaev A.S., Gasiyarov V.R., Maklakova E.A., Loginov B.M., Khramshina E.A. Method limiting dynamic loads of electromechanical systems of plate mill stand. *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. Moscow and St. Petersburg, Russia, 2018, pp. 651–656. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317180
7. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Use of automated electric drives for limiting dynamic loads in shaft lines of roll mill stands. *Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 17, pp. 3578–3581. DOI: 10.1049/joe.2018.8135
8. Krot P.V. Hot rolling mill drive train dynamics: torsional vibration control and backlash. *Millennium Steel China. Annual Issue*, 2009, pp. 91–95. Available at: https://www.researchgate.net/publication/202044159_Hot_rolling_mill_drive_train_dynamics_torsional_vibration_control_and_backlashes_diagnostics. DOI: 10.1109/ccca.2009.5280933
9. Gasiyarov V.R., Khramshin V.R., Voronin S.S., Lisovskaya T.A., Gasiyarova O.A. Dynamic Torque Limitation Principle in the Main Line of a Mill Stand: Explanation and Rationale for Use. *Machines*, 2019, no. 7 (4), pp. 76. DOI: 10.3390/machines7040076
10. Крот П.В. Методы и аппаратура измерения износа в линиях привода прокатных станов. Металлургические процессы и оборудование. 2008. № 2 (12). С. 45–53. [Krot P.V. Methods and equipment for measuring wear in drive lines of rolling mills. *Metallurgical processes and equipment*, 2008, no. 2 (12), pp. 45–53. (in Russ.)]
11. Крот П.В., Приходько И.Ю. Активный контроль крутильных колебаний и вибрации в прокатных станах. Вибрация машин: измерение, снижение, защита: научно-технический и производственный сборник статей. Вып. 3. Донецк: ДонНТУ, 2009. С. 44–60. [Krot P.V., Prikhodko I.Yu. Active control of torsional vibration and vibration in rolling mills. *Vibration of machines: measurement, reduction, protection: scientific, technical and industrial collection of articles*, vol. 3. Donetsk, DonNTU Publ., 2009, pp. 44–60. (in Russ.)]

12. Krot P.V. Nonlinear Vibrations and Backlashes Diagnostics in the Rolling Mills Drive Trains. *Proc. of 6th EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference (ENOC 2008)*, Institute of Problems in Mechanical Engineering RAS, June 30 – July 4, 2008, St. Petersburg, Russia, pp. 360–365.
13. Krot P., Prykhodko I., Raznosilin V., Zimroz R. Model Based Monitoring of Dynamic Loads and Remaining Useful Life Prediction in Rolling Mills and Heavy Machinery. *Advances in Asset Management and Condition Monitoring*. Chapter: 34. Springer International Publishing, pp. 399–416. DOI: 10.1007/978-3-030-57745-2_34
14. Ohlert J., et al. Digitalization in hot and cold rolling mills. *Mat. Sci. Forum*, 2016, 854, pp. 215–224. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.854.215
15. Tervo J., et al. Intelligent techniques for condition monitoring of rolling mill. *European Symposium on Intelligence Technology, ESIT 2000*, Aachen, Germany, 2000, pp. 330–334. Available at: <https://citeseer.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.4.5697&rank=1>
16. Lei Y., et al. Machinery health prognostics: a systematic review from data acquisition to RUL prediction. *Mech. Syst. Signal Process*, 2018, vol. 104, pp. 799–834. DOI: 10.1016/j.ymsp.2017.11.016
17. Bachschmid N., et al. Identification of multiple faults in rotor systems. *J. Sound Vibr.*, 2003, vol. 254 (2), pp. 327–366. DOI: 10.1006/jsvi.2001.4116
18. Tinga T., Loendersloot R. Physical model-based prognostics and health monitoring to enable predictive maintenance. *Predictive Maintenance in Dynamic Systems: Advanced Methods, Decision Support Tools and Real-World Applications*, 2019, pp. 313–353. Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-05645-2_11
19. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khrumshin V.R., Karandaeva O.I. Information and Measuring System for Electric Arc Furnace Transformer Monitoring. *12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014)*. Novosibirsk, 2014, vol. 1, pp. 273–279. DOI 10.1109/APEIE.2014.7040896
20. Лукьянов С.И., Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Храмшин В.Р. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2014. № 1. С. 129–136. [Lukyanov S.I., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarvarov A.S., Petushkov M.Yu., Khrumshin V.R. Development and implementation of intelligent systems for diagnosing the technical condition of electrical equipment. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*, 2014, no. 1, pp. 129–136. (in Russ.)]
21. Radionov A.A., Evdokimov S.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R. Information and Measurement System for Control of Technical State of Asynchronous Electric Motors with Group Supply from Frequency Converter. *12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014)*. Novosibirsk, 2014, vol. 1, pp. 280–285. DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040897
22. Karandaev A.S., Evdokimov S. A., Khrumshin V. R., Lednov R. A. Diagnostic Functions of a System for Continuous Monitoring of the Technical Condition of the Transformers of Arc Steelmaking Furnaces. *Metallurgist*, 2014, vol. 58, no. 7–8, pp. 655–663. DOI: 10.1007/s11015-014-9972-5
23. Khrumshin V.R., Evdokimov A.S., Evdokimov S.A., Karandaev A.S. Development and Industrial Introduction of Systems for Monitoring Technical State of The Rolling Mills and Electrical Equipment. *Proceedings of the 2015 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW)*, pp. 208–213. DOI: 10.1109/EIConRusNW.2015.7102264
24. Лебедев С.К., Колганов А.Р., Гнездов Н.Е. Электромехатронные системы позиционирования с наблюдателями нагрузки: моногр. Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2016. 340 с. [Lebedev S.K., Kolganov A.R., Gnezdov N.E. *Electromechatronic positioning systems with load observers: monograph*. Ivanovo, Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin Publ., 2016. 340 p. (in Russ.)]
25. Hori Yo., Sawada H., Chun Y. Slow resonance ratio control for vibration suppression and disturbance rejection in torsional system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1999, vol. 46, iss. 1, pp. 162–168. DOI: 10.1109/41.744407
26. Bouheraoua M., Wang J., Atallah K. Influence of Control Structures and Load Parameters on Performance of a Pseudo Direct Drive. *Machines*, 2014, no. 2, pp. 158–175. DOI: 10.3390/machines2030158
27. Zhou W., Gao Zh. An Active Disturbance Rejection Approach to Tension and Velocity Regulations in Web Processing Lines. *16th IEEE International Conference on Control Applications Part of IEEE Multi-conference on Systems and Control*. Singapore, 2007, pp. 842–848. DOI: 10.1109/CCA.2007.4389338
28. Kuhm D., Knittel D. New design of robust industrial accumulators for elastic webs. *IFAC Proceedings Volumes*. 2011, vol. 44, iss. 1, pp. 8645–8650. DOI: 10.3182/20110828-6-IT-1002.02458
29. Khrumshin V.R., Gasiyarov V.R., Karandaev A.S., Baskov S.N., Loginov B.M. Constraining the Dynamic Torque of a Rolling Mill Stand Drive. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 101–111. DOI: 10.14529/power180109
30. Басков С.Н., Гасияров В.Р., Логинов Б.М., Храмшин В.Р., Одинцов К.Э. Разработка математической модели взаимосвязанных электротехнических систем клетки толстолистного прокатного стана. *Известия вузов. Электромеханика*. 2017. Т. 60, № 6. С. 55–64. [Baskov S.N., Gasiyarov V.R., Loginov B.M., Khrumshin V.R., Odintsov K.E. Development of a mathematical model of interconnected electrical systems of the stand of a plate rolling mill. *Proceedings of universities. Electromechanics*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 55–64. (in Russ.)]

Гасияров Вадим Рашитович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Мехатроника и автоматизация», доцент кафедры «Теоретические основы электротехники», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; gasiiarovvr@susu.ru.

Басков Сергей Николаевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Мехатроника и автоматизация», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; baskovsn@susu.ru.

Гасиярова Ольга Андреевна, младший научный сотрудник, преподаватель, кафедра «Мехатроника и автоматизация», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; gasiiarovaoa@susu.ru.

Логинов Борис Михайлович, канд. техн. наук, инженер, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск; lb18@yandex.ru.

Поступила в редакцию 15 сентября 2020 г.

DOI: 10.14529/power200314

DEVELOPMENT OF A DIGITAL ANGULAR CLEARANCE OBSERVER IN SPINDLE CONNECTIONS OF THE MAIN ROLLING CABINET

V.R. Gasiyarov¹, gasiiarovvr@susu.ru,
S.N. Baskov¹, baskovsn@susu.ru,
O.A. Gasiyarova¹, gasiiarovaoa@susu.ru,
B.M. Loginov², lb18@yandex.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russian Federation

The systems monitoring the technical condition of rolling mill equipment should be developed based on modern digital technologies. Spindle connections breakdowns are one of the most frequent faults in the stands main electric drive lines. The paper justifies the problem of monitoring the spindle joints wear with periodic measurement of angular clearances in automatic mode. On the example of the reversing stand of the plate mill 5000 of PJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works” (PJSC “MMK”) the problem of monitoring the wear of spindle joints based on recurring measurement of angular clearances in the automatic mode. The authors analyze the oscillograms of the speeds and torques of the motors in the emergency mode caused by the roll fault. The oscillatory properties of the “electric drive – roll” system, which increase the amplitude of the elastic moment during metal capture, have been confirmed. An angular gap observer has been developed. Its principle is based on the algorithmic calculation (restoration) of an unmeasured signal (gap) based on mathematical processing of physical parameters (speed and electromagnetic torque of the motor) measured at a given frequency. The paper also proposes a method for monitoring the wear of a spindle joint, which provides for an indirect determination of the angular clearance by integrating the speed with an open clearance. The interval for calculating the integral is determined by fixing the dynamic increase in the engine torque during its active closing while there is no metal in the rolls. The paper presents the structure of the observer and gives oscillograms that explain the possibility of its practical implementation. The characteristics of the simulation model of the electromechanical system of mill stand 5000 are given. The algorithms implementing the developed method are studied. A technical solution and an algorithm for adjusting the observer are proposed. The paper outlines the strategy for further research and substantiates the directions in the creation of a digital spindle connections wear monitoring system. The technical effects provided by the implementation of the completed developments are noted.

Keywords: rolling stand, electric drive, spindle, wear, angular clearance, indirect measurement, observer, development, simulation model, research, technical execution, recommendations.

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of a subsidy for financial support for the fulfillment of a state task (fundamental scientific research), contract No. FENU-2020-0020 (2020071GZ).

Received 15 September 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Разработка цифрового наблюдателя углового зазора в шпindelных соединениях главной линии прокатной клетки / В.Р. Гасияров, С.Н. Басков, О.А. Гасиярова, Б.М. Логинов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 137–147. DOI: 10.14529/power200314

FOR CITATION

Gasiyarov V.R., Baskov S.N., Gasiyarova O.A., Loginov B.M. Development of a Digital Angular Clearance Observer in Spindle Connections of the Main Rolling Cabinet. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 137–147. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200314