

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,

² ООО НПП «Учтех-Профи», Челябинск

³ Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск

ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА УПРУГОГО МОМЕНТА ГЛАВНОЙ ЛИНИИ КЛЕТИ ПРОКАТНОГО СТАНА

На основании литературного обзора показана актуальность непрерывного контроля состояния электромеханических систем клетей прокатных станов. Подчеркнута целесообразность разработки систем мониторинга упругого момента шпинделей толстолистовых станов. Целью является непрерывный контроль динамических нагрузок главной линии клетки с возможностью регистрации усталостных повреждений. Дана характеристика оборудования горизонтальной клетки стана 5000 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»). Названы причины поломок шпинделей и валков, основной из которых является накопление нагрузений, обусловленных динамическими перегрузками при захвате раскатов валками. Показаны реальные поломки валка и шпинделя и осциллограммы координат электроприводов в аварийном режиме. Рассмотрена структура системы измерения упругой деформации валопроводов, ранее установленная на стане. Подтверждена эффективность мониторинга упругого момента. Представлены основные принципы создания инновационной телеметрической системы онлайн-мониторинга упругого момента на передающих валах. Сформулированы требования к системе, предложено ее построение по модульному принципу. Основными требованиями являются простота монтажа и индукционное питание измерительного устройства. Дан перечень и обосновано применение модулей, обеспечивающих контроль, передачу и хранение информации. Для измерения упругого момента рекомендовано применение тензорезистов, включенных по схеме сбалансированного моста. Предложено индуктивное питание измерительного блока, установленного на валу, без применения аккумуляторных батарей. Обоснована конфигурация базы данных, включающая характеристическую и текстовую базы, базы данных сигналов тревоги и длительного хранения информации. Представлена «желаемая» структура разрабатываемой системы. Подчеркнута актуальность ее технического исполнения, отмечены преимущества применения для расширения сортамента и оптимизации программ прокатки. Наряду с предотвращением ущерба от аварий, это обеспечит синергетический эффект от ее промышленного внедрения на действующих прокатных станах.

Ключевые слова: прокатная клеть, электромеханическая система, шпиндель, упругий момент, мониторинг, телеметрическая система, концепция, обоснование, структура, модули

ВВЕДЕНИЕ

Необходимым условием реализации концепции «цифровой прокатный стан» является оснащение его оборудования телеметрическими системами мониторинга [1, 2]. Они должны стать основой систем диагностирования технического состояния в онлайн-режиме, что обеспечит создание «умного» производства и будет способствовать переходу металлургической отрасли на инновационные рельсы.

Сложность и стоимость электромеханических систем прокатных станов постоянно увеличиваются. Чтобы обеспечить их эффективность и сохранить работоспособность, важно активно контролировать рабочие нагрузки, регистрировать повреждения и износ критических компонентов. К таким компонентам относятся шпиндели, обеспечивающие передачу крутящего момента от двигателей к рабочим валкам. Несмотря на внешнюю простоту, они относятся к дорогостоящему оборудованию. Задача поддержания их работоспособности особо актуальна для толстолистовых прокатных станов, электромеханические системы которых работают в реверсивном режиме с частыми ускорениями и торможениями. Постоянные динамические режимы приводят к преждевременному износу оборудования, что приносит предприятию существенный ущерб

[3, 4]. Поэтому, наряду с измерением динамических нагрузок, назначением системы мониторинга является контроль состояния оборудования, предупреждение аварий либо выяснение причин в случае, если авария произошла. Сопутствующей задачей является прогнозирование срока службы электромеханической системы главного привода клетки.

Авторами [5] утверждается, что «прокатный стан является основным оборудованием для производства продукции, от его эффективности и надежности зависят возможности предприятия. Повреждение системы главного привода напрямую влияет на производство и приводит к огромным потерям». Аналогичный вывод сделан в [6]: «шпиндель прокатного стана всегда подвергается воздействию окружающей среды, усталостной нагрузке из-за момента при периодическом вращении, из-за этого существует вероятность поломки». В [7] отмечается, что «эксплуатация прокатных станов связана со значительным износом шпинделей, редукторов и подшипников. На них сложно реализовать цифровые диагностические инструменты из-за тяжелых условий эксплуатации». Основной причиной низкой долговечности элементов главных линий клетей станов горячей прокатки являются высокие динамические (ударные) нагрузки, возникающие при захвате раскатов валками. Здесь под термином «раскат» понимается промежуточный продукт между заготовкой (слябом) и готовым продуктом (полосой либо листом).

Проблемы ограничения динамических нагрузок прокатных станов рассматривали многие отечественные и зарубежные ученые. В числе публикаций последних лет следует выделить работы [8, 9], а также [10, 11], посвященные мониторингу динамических нагрузок и прогнозированию ресурса электрического и механического оборудования. Достаточно подробно этот вопрос исследован в диссертациях [12, 13]. В статье [14] предлагается использовать угловые и радиальные зазоры в целях диагностики износа приводных механизмов, осуществляемой путем анализа переходных процессов. Однако для решения этих вопросов необходимо, прежде всего, иметь возможность «видеть» динамический момент на шпинделе. Поэтому актуальной научно-практической задачей является разработка телеметрических измерительных систем упругого момента. Авторским коллективом представленной публикации накоплен значительный опыт внедрения систем мониторинга оборудования прокатных станов. Отдельные результаты опубликованы в [15–17].

В работе [5] представлены «многопрофильное исследование и разработка интеллектуальной системы контроля остаточного срока полезного использования для станов горячей прокатки». Приведен подробный анализ диагностических систем. В [18] также выполнен анализ известных систем мониторинга динамических нагрузок. Разработан «цифровой телеметрический измеритель на основе тензодатчиков с бесконтактным питанием, который может применяться не только на прокатных станах, но и в других отраслях промышленности в составе стационарных систем мониторинга нагрузок». Сделан вывод, что «для условий прокатного производства наиболее приемлемым является тензометрическая схема с передачей цифровых данных по радиоканалу частотно-модулированным сигналом».

По результатам проведенного литературного обзора сделан вывод: в известных публикациях рассматриваются принципы мониторинга упругих моментов с помощью телеметрических систем, однако информация о структурах и аппаратном составе этих систем, как правило, не приводится. Поэтому задача разработки и подробного рассмотрения системы онлайн-мониторинга упругого момента на шпинделе прокатного стана является актуальной. В конкретном случае она решается для реверсивной клетки стана 5000 ПАО «ММК» (далее – стан 5000). Представленная публикация посвящена обоснованию принципов ее построения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Фотография клетки стана 5000 представлена на рис. 1, характеристика, сортамент стана и описание силового оборудования приведены в [13]. В [12] рассмотрены результаты моделирования и экспериментальных исследований динамических режимов. Основные технические характеристики оборудования клетки приведены в таблице. Электроприводы верхнего и нижнего валков выполнены индивидуально на основе синхронных двигателей с частотным регулированием скорости. Установлены двигатели мощностью 12 МВт, обеспечивающие номинальный момент 1,91 МН·м.



Рис. 1. Движение металла по рольгангу на выходе клетки стана 5000

Таблица
Характеристики реверсивной прокатной клетки стана 5000

Наименование компонента	Наименование характеристики	Значение или описание
Прокатные валки	Диаметр рабочих валков	1210-1110 мм
	Длина рабочих валков	5300 мм
	Диаметр опорных валков	2300-2100 мм
	Длина опорных валков	4950 мм
	Скорость рабочих валков при максимальном диаметре вала	(0-3,17)/7,30 м/с
Прокатные валки	Максимально допустимое усилие прокатки	120 МН
	Максимальное усилие на цилиндрах НГС при давлении 300 бар со стороны поршня, 30 бар со стороны штока	Более 140 МН
Главный привод	Тип	Спаренный
	Мощность главного привода	2×12 МВт
	Частота вращения вала двигателя	(0-60)/115 об/мин
	Номинальный крутящий момент	2×1,91 МН·м
	Максимальный крутящий момент при прокатке	2×3,82 МН·м (200% от ном.)
	Максимальный крутящий момент перегрузки (двигатель)	2×4,23 МН·м (225% от ном.)
	Крутящий момент при отключении двигателя	2×5,25 МН·м (275% от ном.)

Вход раскатов в клеть осуществляется на относительно небольшой заправочной скорости (в диапазоне от 2 до 5 м/с), далее после формирования «лыжи» осуществляется разгон до установившейся скорости прокатки. Масса заготовки составляет 30 и более тонн, исходная толщина 300-350 мм. Абсолютные обжатия в первых проходах – до 30 мм. Очевидно, что задание в клеть заготовки, обладающей большой инерцией, при указанных обжатиях приводит к значительным (часто недопустимым) динамическим нагрузкам. Кроме того, на динамические показатели оказывают влияние условия захвата, которые определяются рядом факторов, в частности соотношением линейных скоростей валков и раската [19, 20]. Влияние настройки электроприводов

на динамические процессы исследовано в [21]. Значительное негативное влияние на их качество оказывают зазоры в механических соединениях шпинделей [22].

Исследования показали, что амплитудные значения упругого момента на шпинделе при входе металла в клеть могут превышать установившийся момент прокатки в 3–3,5 раза. Это приводит к накоплению усталостных нагрузок и разрушениям головок шпинделей и шеек валков. С учетом того, что момент прокатки заготовок «тяжелого» сортамента составляет до 200% номинального момента двигателя (согласно таблице, это уровень ограничения), указанное превышение составляет 600–700%. В [23] на основе анализа большого количества проходов на стане компании Rolled Products Inc. (США) при прокатке различных марок стали сделан вывод, что амплитуды динамического момента могут достигать 1200%. С целью сокращения количества поломок на стане 5000 установлены пороговые значения аварийной системы: 6500 кН·м – для предупреждения персонала и 8000 кН·м – для торможения быстрым остановом. Эти параметры превышают значения, приведенные в таблице.

Характеристика шпинделей

В главной линии установлены шпиндели выдвигного типа, фотография показана на рис. 2, а [13]. Непосредственно сочленение валка со шпинделем осуществляется с помощью головки специальной конструкции (рис. 2, б), которая крепится к рабочему валу. Аналогичная головка смонтирована со стороны двигателя. На этом же рисунке 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. Наиболее сильно динамические удары проявляются на стороне клетки. Это вызвано большими массами вращающегося валка и перемещаемого слитка.

Непосредственно динамические удары, возникающие при захвате, редко приводят к поломкам и аварийным остановам стана. Их вероятными причинами являются разовые либо накопленные циклы перегрузок по крутильному моменту. К сожалению, наиболее частыми авариями являются поломка головки шпинделя (рис. 3, а) и поломка валка (рис. 3, б). Устранение их последствий связано с длительными простоями и значительными затратами.

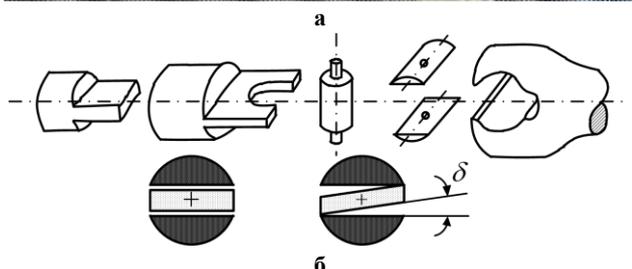


Рис. 2. Фотография шпинделя (а) и изображение деталей шпиндельного соединения (б)



Рис. 3. Поломки шпинделя (а) и валка (б) клетки стана 5000

Причинами усталостных разрушений являются колебательные процессы моментов в динамических режимах. Это подтверждают осциллограммы, представленные на рис. 4, на которых зафиксирована авария, вызванная поломкой шейки нижнего валка клетки в режиме захвата [12]. Захват происходит в момент времени t_1 , далее в момент t_2 электромагнитный момент двигателя нижнего валка достигает уровня ограничения 4200 кН·м. Непосредственно поломка происходит в момент времени t_3 , что видно по снижению момента нижнего двигателя от 4200 до 500 кН·м. Электропривод верхнего валка пытается «в одиночку» прокатать заготовку, но его усилий недостаточно, привод переходит в режим отсечки по моменту. Контур регулирования скорости размыкается, возникают медленно затухающие колебания скорости, обусловленные упругостью валопровода. Задание скорости двигателя аварийно снижается по сигналу от датчика интенсивности (описание системы автоматического регулирования скорости приведено в [24]).

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

Осциллограммы подтверждают, что в предаварийной ситуации электроприводы валков переходят в режим ограничения. Очевидно, что в этом случае кратно возрастают динамические моменты на шпинделях.

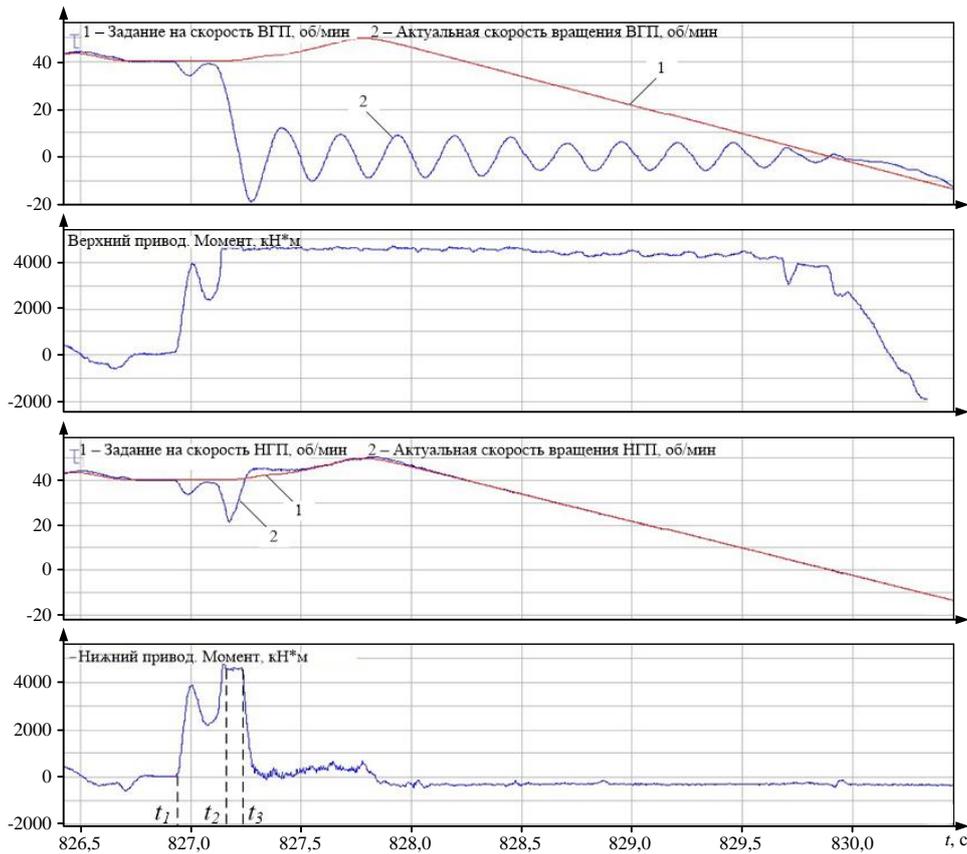


Рис. 4. Осциллограммы моментов и скоростей электроприводов при аварийной поломке шейки нижнего вала

Однако дать их оценку не представляется возможным в связи с отсутствием системы мониторинга упругого момента. Кроме того, динамическим режимам, как правило, предшествуют колебания упругих моментов с нарастающей амплитудой. Поэтому возможность их оперативного контроля позволит разработать мероприятия по предотвращению аварий.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Ниже приводится обоснование принципов построения телеметрической системы мониторинга упругого момента, предварительно дается характеристика системы, ранее установленной на стане.

Характеристика системы компании MANNER

Система измерения упругой деформации «MANNER TG28TE», разработанная фирмой MANNER (Германия), была смонтирована на стане в 2011 г. Структура системы приведена на рис. 5. Однако ее эксплуатация была непродолжительной, основными причинами явилась необходимость повторной установки датчиков после каждой замены шпинделей.

На рис. 6 представлены осциллограммы моментов на валах верхнего и нижнего шпинделей, а также осциллограммы крутильных колебаний, полученные с помощью этой системы.



Рис. 5. Структура информационно-измерительной системы фирмы MANNER

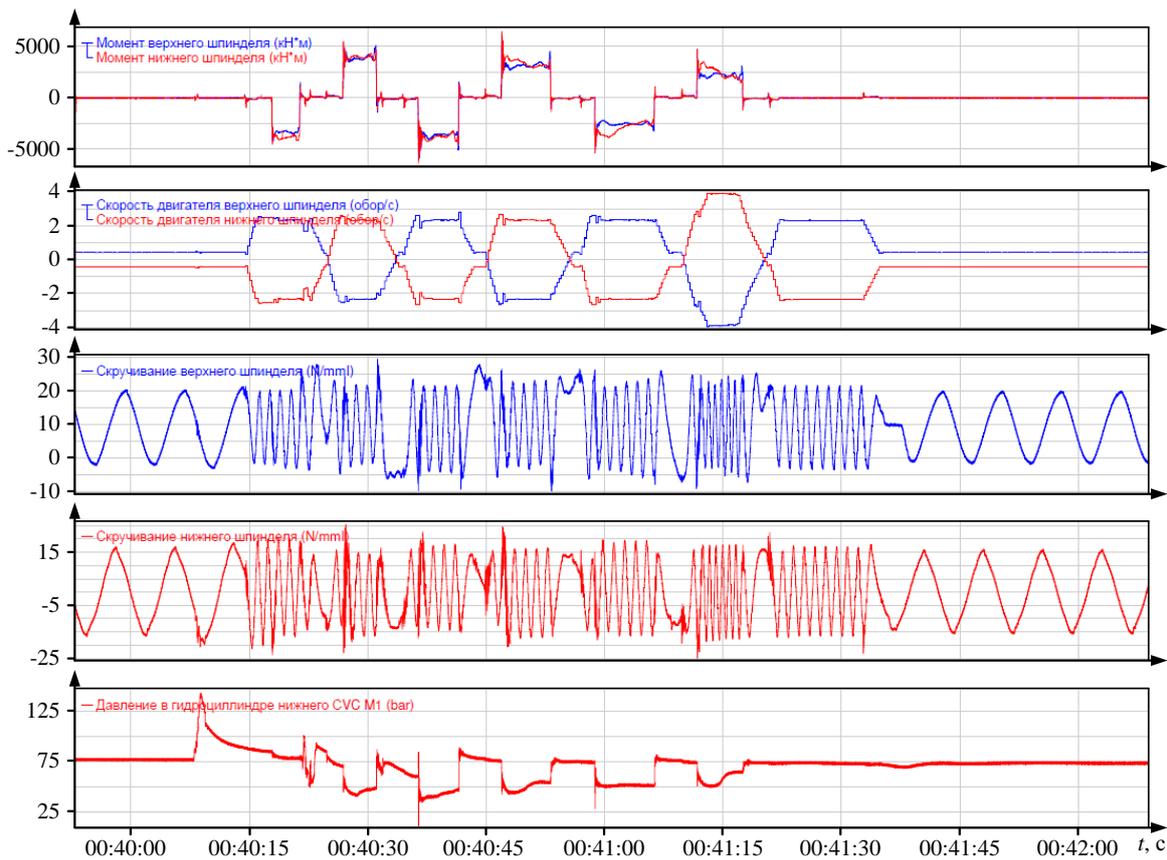


Рис. 6. Осциллограммы упругих моментов на валах шпинделей верхнего и нижнего валков горизонтальной клетки, снятые системой «MANNER TG28TE»

Эти и другие осциллограммы подтверждают, что амплитуда динамического момента, наряду с ударным приложением нагрузки, определяется упругими свойствами механической передачи. На них прослеживаются затухающие колебания моментов, при этом максимальные значения наблюдаются на первом пике после захвата металла. Как показано в [25], амплитуда колебательных процессов может иметь значительно большие значения, чем максимум составляющей момента, вызванного непосредственно ударным замыканием зазора.

В целом работа системы подтвердила эффективность непрерывного измерения упругого момента. При этом вывод о целесообразности онлайн-контроля крутильных колебаний был неоднозначным. Это связано со сложностью физической интерпретации и использования этого параметра в диагностических целях. В связи с выходом из строя данной системы была поставлена задача разработки и внедрения аналогичной системы «собственными силами». Основным требованием было обеспечение относительно простого монтажа измерительной аппаратуры и безбатарейное питание. Это должно повысить надежность и продолжительность ее эксплуатации.

Обоснование принципа построения онлайн-системы

На основании анализа известных разработок в качестве прототипа была принята система онлайн-мониторинга шпинделей прокатного стана с индивидуальным электроприводом валков [5]. Принципы получения, передачи и хранения данных в этой разработке приняты за основу для создаваемой системы. Преимуществом является бесконтактный метод измерения крутящего момента с индукционным источником, что

обеспечивает стабильное питание и длительную непрерывную работу.

Система должна представлять собой открытую распределенную структуру, в которой используется архитектура удаленного мониторинга состояния на основе режима полевой шины. Она должна включать в себя следующие модули: сбора сигналов, сетевой связи, сервера базы данных, контроля состояния и сигнализации, обработки и анализа сигналов, клиент-серверный модуль.

Модуль сбора сигналов

Точки измерения крутящего момента должны располагаться на валах шпинделей в выбранных местах. В направлении 45° к оси выходного вала наклеиваются четыре тензорезистора, образующих мостовую испытательную схему (рис. 7). Через онлайн-устройство телеметрии крутящего момента выходные сигналы моста передаются на встроенный модуль сбора данных, а затем после их обработки – на удаленный сервер данных посредством USB-интерфейса.

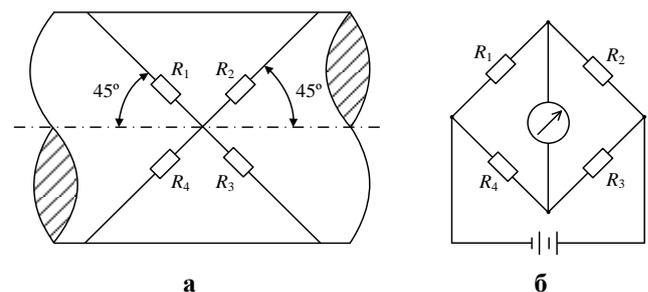


Рис. 7. Схема расположения тензорезисторов (а) и их подключение по мостовой схеме (б)

Бесконтактный контроль крутящего момента на основе индукционного источника питания

Принцип работы датчика крутящего момента радиотелеметрического типа (рис. 8) заключается в усилении напряжения от тензодатчиков и преобразовании их в частотные сигналы, которые после модуляции передаются на приемник [23]. Усиленное напряжение преобразуется в сигнал эквивалентной частоты (20-100 кГц), который модулируется на несущей частоте. Во избежание взаимного влияния телеметрических систем, установленных на двух валах клетки, они должны иметь разные несущие частоты. Частотно-модулированный сигнал передается вращающейся антенной, прикрепленной к валу. Приемная (статическая) антенна находится на расстоянии до 1 м от передающей. От статической антенны сигнал может быть передан через коаксиальный кабель к блоку воспроизведения, который демодулирует его в аналоговый сигнал напряжением ~10 В. На рис. 8 измерительный блок питается от аккумуляторов, которые крепятся на валах. При установке бесконтактных датчиков крутящего момента имеет место индуктивный источник питания.

Таким образом, при использовании метода есть два способа питания вращающейся цепи – это питание от специальной батареи и применение индукционного источника питания. Датчик крутящего момента с питанием от батареи может работать относительно короткое время, поэтому плохо применим для длительного непрерывного мониторинга. Датчик крутящего момента с индукционным питанием, напротив, обладает необходимой энергией, которая передается посредством электромагнитной связи вращающейся и статической катушек. Такой источник обеспечивает долгосрочное стабильное питание и непрерывную работу системы без необходимости замены батарей. Поэтому датчик с таким питанием целесообразно использовать в разрабатываемой системе.

Модуль обработки и анализа сигналов предназначен для вычисления заданных функций. Как правило, выполняется анализ сигналов во временной и частотной областях. Предварительная обработка включает их фильтрацию и усиление (подобные операции производятся в большинстве систем диагностического мониторинга [26]). В расширенном варианте диагностирование должно обеспечить автоматизированный временной анализ, при необходимости – анализ формы и спектра сигнала, а также моделирование, расчет износа и усталостной долговечности.

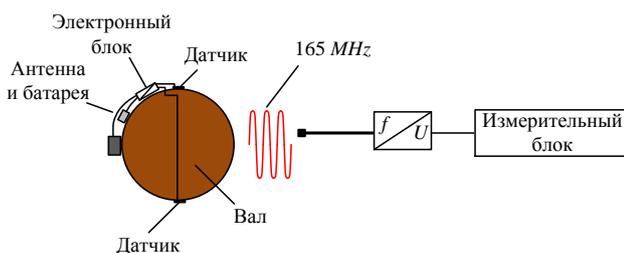


Рис. 8. Принцип передачи сигнала от измерительного моста

Модуль контроля состояния и сигнализации предназначен для отображения диагностической информации в реальном времени и оповещения о событиях.

Данные мониторинга должны содержать сигналы крутящего момента, усилий, скорости прокатки и других технологических параметров (при необходимости). Модуль выполняет их сопоставление с пороговыми значениями, при превышении которых система должна обеспечить отображение аварийных сигналов и их импортирование во внутреннюю базу данных.

Модуль сервера базы данных

Поскольку объем каждой выборки на месте велик, а их «внутренние связи» сложны, необходимо организовать хранение данных со всех точек измерения. При разработке программного обеспечения должна быть принята стандартная технология подключаемых модулей, которая позволяет относительно легко формировать и поддерживать систему данных. Для правильного хранения и управления информационными потоками предлагается разработать базы данных, перечисленные ниже.

Обычная база данных разделена на характеристическую и текстовую базы. Первая предназначена для хранения пикового и среднего значений крутящего момента и усилия прокатки. Текстовая база данных предназначена для хранения информации в режиме реального времени в непрерывном процессе, чтобы облегчить анализ состояния.

База данных сигналов тревоги: когда значения измеряемых величин выходят за пределы уровней тревоги, все параметры сохраняются в реальном времени. В случае полной загрузки базы должны автоматически выполняться резервное копирование и очистка. Также возможно предусмотреть применение облачных технологий хранения информации. Это целесообразно для случая, когда разрабатываемая система мониторинга будет являться частью системы онлайн-контроля более высокого уровня, например цеховой или заводской системы.

База данных истории: измеренные либо вычисленные характеристики могут храниться в течение, например, одного года для обеспечения запросов и сравнительного анализа. В этом случае один год является единицей резервного копирования данных.

Обобщенная структура информационно-измерительной системы, организованной на основе перечисленных модулей, представлена на рис. 9. Она принята за основу при создании аналога для стана 5000. Очевидно, что принцип ее построения может быть применен для устройств мониторинга состояния другого промышленного оборудования. Авторский коллектив имеет большой опыт разработки систем мониторинга состояния трансформаторов электроплавильных агрегатов [27–29]. Опыт, накопленный при их внедрении, может быть использован при разработке программного обеспечения разрабатываемой системы.

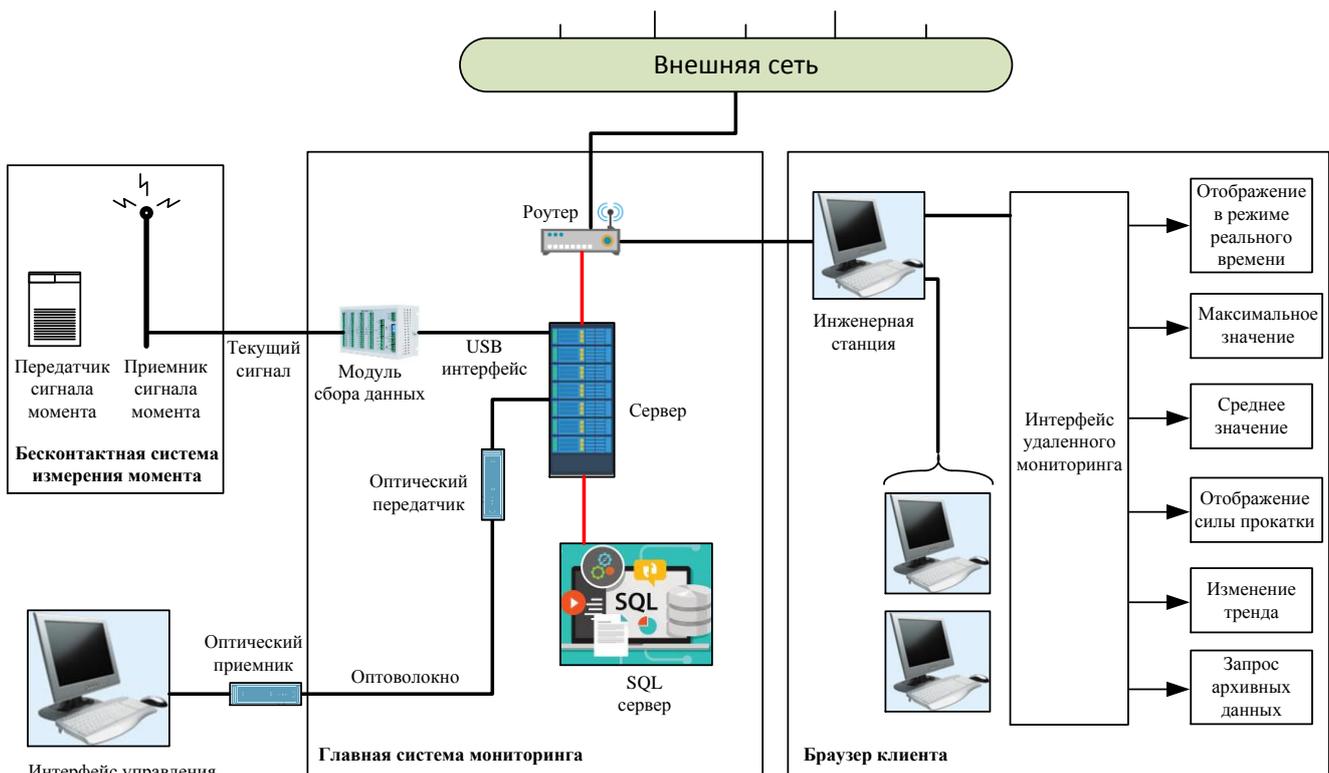


Рис. 9. Структура, поясняющая принцип передачи и обработки данных в создаваемой системе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация системы мониторинга поможет предотвратить катастрофический ущерб от аварий и сократить расходы от непредвиденных простоев. Вместе с тем, благодаря онлайн-мониторингу и анализу сигналов крутящего момента можно получить максимальные, минимальные и средние значения крутящего момента в процессе прокатки.

На основе их анализа можно настроить модель прогнозирования крутящего момента. После сопоставления расчетных значений с результатами испытаний могут быть оптимизированы программы и параметры прокатки (скорости, обжатия и др.). Это необходимо для улучшения ритма прокатки, увеличения производительности и защиты оборудования стана. Полученную информацию также целесообразно использовать при освоении новых сортов проката. В этом заключается синергия применения разработанной системы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Совершенствование автоматизированных электроприводов и диагностика силового электрооборудования / И.А. Селиванов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, В.Р. Храшшин, А.А. Шеметова, А.С. Евдокимов, А.А. Лукин, А.Ю. Андрушин, П.В. Шилияев, В.В. Головин, А.А. Титов, С.Е. Мостовой, С.А. Петряков // Известия вузов. Электромеханика. 2009. № 1. С. 5-11.
2. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования / С.И. Лукьянов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.С. Сарваров, М.Ю. Петушков, В.Р. Храшшин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1. С. 129-136.
3. Согласование скоростей взаимосвязанных электроприводов клетей черновой группы прокатного стана / А.А. Радионов, В.Р. Храшшин, И.Ю. Андрушин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизиро-

ванному электроприводу. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет, 2012. С. 652-657.

4. Алгоритм расчета скоростных и нагрузочных режимов электроприводов клетей прокатного стана при прокатке толстых полос / В.В. Галкин, А.С. Карандаев, В.В. Головин, А.А. Радионов, В.Р. Храшшин, В.Р. Гасияров, О.А. Залогин // Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. №3-2. С. 12-17.
5. Hou Y., Kong J.Y., Wang X.D. Research on Online Monitoring for the Main Drive System of Rolling Mill. Applied Mechanics and Materials. 2011. Vol. 127. Pp. 444-448. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.127.444
6. Kim E.S. Fatigue life evaluation of spindle of rolling mill using ADINA structure and WINLIFE. Journal of Mechanical Science and Technology. 2020. No. 34. 3991-3996. doi: 10.1007/s12206-020-2209-6
7. Model Based Monitoring of Dynamic Loads and Remaining Useful Life Prediction in Rolling Mills and Heavy Machinery / P. Krot, I. Prykhodko, V. Raznosilin, R. Zimroz // In: Advances in Asset Management and Condition Monitoring. Smart Innovation, Systems and Technologies, 2020. Vol. 166. Pp. 399-416. doi: 10.1007/978-3-030-57745-2_34
8. Shin N., Shin K., Bae J. A study on the health monitoring of hot rolling mill // 46th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 2019. URL:https://www.iastatedigitalpress.com/qnde/article/id/8686/ (дата обращения 21.07.2022)
9. Shin K.Y., Kwon W.K. Development of Smart Condition Monitoring and Diagnosis System for Tandem Cold Rolling Mills in Iron and Steel Manufacturing Processes // 18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). PyeongChang, Korea (South), 2018. Pp. 1568-1572.
10. Ohlert J., Sprock A., Sudau P. Digitalization in hot and cold rolling mills // Mat. Sci. Forum. 2016. Vol. 854. Pp. 215-224. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.854.215
11. Krot P.V. Hot rolling mill drive train dynamics: torsional vibration control and backlash diagnostics // Millennium Steel China. Annual Issue. 2009. Pp. 91-95. URL:https://www.researchgate.net/publication/202044159_Hot_rolling_mill_drive_train_dynamics_torsional_vibration_contr

- ol_and_backlashes_diagnostics (дата обращения 21.07.2022)
12. Логинов Б.М. Ограничение динамических нагрузок электроприводов горизонтальной клетки толстолистого прокатного стана: дис. ... канд. техн. наук / Логинов Борис Михайлович. Челябинск, 2019. 164 с.
 13. Гасияров В.Р. Совершенствование электротехнических систем реверсивной клетки толстолистого прокатного стана: дис. ... докт. техн. наук / Гасияров Вадим Рашитович. Челябинск, 2021. 358 с.
 14. Krot P.V. Nonlinear Vibrations and Backlashes Diagnostics in the Rolling Mills Drive Trains // Proc. of 6th EURO-MECH Nonlinear Dynamics Conference (ENOC. St. Petersburg, Russia, 2008. Pp 360-365. doi:10.13140/2.1.3353.1840
 15. Information and Measurement System for Control of Technical State of Asynchronous Electric Motors with Group Supply from Frequency Converter / A.A. Radionov, S.A. Evdokimov, A.S. Karandaev, V.R. Khrumshin // 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-). Novosibirsk, 2014. Vol. 1. Pp. 280-285. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040897
 16. Development and industrial introduction of systems for monitoring technical state of the rolling mills' electrical equipment / V.R. Khrumshin, A.S. Evdokimov, S.A. Evdokimov, A.S. Karandaev // IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW). St. Petersburg, Russia, 2015. doi: 10.1109/eiconrusnw.2015.7102264
 17. Новые технические решения в электроприводах и системах регулирования технологических параметров станов горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрушин, В.В. Головин, П.В. Шильяев, С.А. Петряков, А.А. Лукин // Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. №3-2. С. 34-40.
 18. Крот П.В. Телеметрические системы мониторинга динамических нагрузок в линиях привода прокатных станов // Вибрация машин: измерение, снижение, защита: научно-технический и производственный сборник статей. Донецк: ДонНТУ, 2008. Вып. 1. С. 46-53.
 19. Артюх В.Г. Основы защиты металлургических машин от поломок: монография. Мариуполь: Издат. группа «Университет», 2015. 288 с.
 20. Limitation of Dynamic Loads of the Mechatronic System of the Rolling Stand / A.A. Radionov, B.M. Loginov, K.E. Odintsov, O.A. Gasiyarova // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi, Russia, 2022. Pp. 1157-1162. doi: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787233
 21. Dynamic Load Limitation in Electromechanical Systems of the Rolling Mill Stand during Biting / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, D.Yu. Usatiy, V.R. Khrumshin // IEEE 11th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT). Cape town, South Africa, 2020. doi: 10.1109/ICMIMT49010.2020.9041192
 22. Developing Digital Observer of Angular Gaps in Rolling Stand Mechatronic System / O.A. Gasiyarova, A.S. Karandaev, I.N. Erdakov, B.M. Loginov, V.R. Khrumshin // Machines. 2022. 10. 141. doi: 10.3390/machines10020141
 23. Report on Torque Measurements and Process - ACIDA...Musterbericht - ACIDA Torque Measurement Services by ACIDA GmbH Report on Torque Measurements and Process Analyses at the Heavy. ACIDA GmbH. URL:https://www.vdocuments.site/report-on-torque-measurements-and-process-acidamusterbericht-acida-torque.html?page=1 (дата обращения 21.07.2022)
 24. Экспериментальное определение параметров двухмассовой электромеханической системы прокатного стана / А.С. Карандаев, А.А. Радионов, Б.М. Логинов, О.А. Гасиярова, Е.А. Гартлиб, В.Р. Храмшин // Известия вузов. Электромеханика. 2021. Т. 64. № 3. С. 24-35. doi:10.17213/0136-3360-2021-3-24-35
 25. Dynamic Torque Limitation Principle in the Main Line of a Mill Stand: Explanation and Rationale for Use / V.R. Gasiyarov, V.R. Khrumshin, S.S. Voronin, T.A. Lissovskaya, O.A. Gasiyarova // Machines. 2019. 7(4). 76. doi: /10.3390/machines7040076
 26. Partial Discharge Monitoring Data: Statistical Processing to Assessment Transformer Condition / O.I. Karandaeva, I.M. Yachikov, E.A. Khrumshina, N.N. Druzhinin // IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). IEEE, 2019. Pp. 139-143. doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915407
 27. Diagnostic Functions of a System for Continuous Monitoring of the Technical Condition of the Transformers of Arc Steelmaking Furnaces / A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, V.R. Khrumshin, R.A. Lednov // Metallurgist. 2014. Vol. 58. No. 7-8. Pp. 655-663. doi: 10.1007/s11015-014-9972-5
 28. System for Real-Time Monitoring of the Technical State of a Transformer on an Ultrahigh-Power Electric-Arc Steelmaking Furnace / A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, V.R. Khrumshin, A.A. Sarlybaev // Metallurgist. 2014. Vol. 58. No. 9-10. Pp. 872-879. doi: 10.1007/s11015-015-0010-z
 29. Monitoring Technical State of the Power Transformers Is a Necessary Condition of the Smart-Grid Technology Introduction within the Industrial Electric Networks / V.R. Khrumshin, S.A. Evdokimov, An.A. Nikolaev, Ar.A. Nikolaev, A.S. Karandaev // IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW). St. Petersburg, Russia, 2015. Pp. 214-220. doi: 10.1109/EIconRusNW.2015.7102265

Поступила в редакцию 01 июня 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

FEASIBILITY STUDY OF THE ELASTIC MOMENT TELEMETRIC MONITORING SYSTEM AT THE MAIN LINE ROLLING STAND

Vadim R. Khrumshin

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Industrial Electric Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, hvrnmg@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0972-2803>

Sergey A. Evdokimov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electronics and Microelectronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Olga A. Gasiyarova

Design Engineer, LLC Scientific and Production Enterprise "Uchtekh-Profi", Chelyabinsk, Russia.

Boris M. Loginov

Ph.D. (Engineering), Master's Degree Student, Department of Mechatronics and Automation, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia, lb18@yandex.ru.

Alexander S. Karandaev

D.Sc. (Engineering), Professor, Chief Researcher, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia, askaran@mail.ru.

The literature review was used to prove the urgency of the electromechanical system state continuous monitoring at rolling stands. It was pointed out that a monitoring system must be developed to control the spindle elastic moment at plate rolling mills. The main purpose is to provide continuous monitoring of dynamic loads at the main line stand, which can detect fatigue damage. The paper gives the characteristics of the horizontal stand equipment at 5000 mill, PJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Plant" (PJSC "MMK"). The main causes of spindles and roll failures were enumerated, the main one being load accumulation caused by dynamic overloads during the strip gripping by the rolls. The paper shows the real roll and spindle failures and electric drive oscillograph records in the operating emergency conditions. The measuring system of roll elastic deformation previously installed at the mill was considered. The efficiency of the elastic moment monitoring was proved. The main principles of the innovative telemetric on-line monitoring system of the elastic moment at the transfer rolls were introduced. Requirements to the system were developed and it was proposed to design it according to the modular approach. The main requirements were the ease of installation and the induction feeding of the measuring device. The paper listed and justified the application of modules providing data control, transfer and storage. To measure the elastic moment, it was recommended to apply resistance strain gauges switched in accordance with the balanced bridge scheme. It was proposed to use induction feeding of the measuring device installed at the shaft without any electric batteries. The paper justified the database structure, which includes the characteristic and the text databases, alarm signals databases and databases for long storage of information. The paper also showed the proposed layout of the developed system. The authors pointed out the relevance of its technical implementation and the advantages of its application provided by the product range extension and rolling mode optimization. It will also make it possible to prevent the damage caused by failures and provide the synergistic effect due to its implementation at the operating rolling mills.

Keywords: rolling stand, electromechanical system, spindle, elastic moment, monitoring, telemetric system, concept, feasibility, structure, modules

REFERENCES

- Selivanov I.A., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R., Shemetova A.A., Evdokimov A.S., Lukin A.A., Andryushin A.Yu., Shilyaev P.V., Golovin V.V., Titov A.A., Mostovoy S.E., Petryakov S.A. Automatic electric drive improvement and electrical power equipment diagnostics. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2009, no. 1, pp. 5-11. (In Russian)
- Lukyanov S.I., Karandaev S.I., Evdokimov S.A., Sarvarov A.S., Petushkov M.Yu., Khramshin V.R. Development and introduction of intelligent systems for electrical equipment state diagnostics. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 1, pp. 129-136. (In Russian)
- Radionov A.A., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N. Electric drive speed matching at roughing train of a rolling mill. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XVIII Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of VII International (XVIII All-Russian) scientific and technical conference on automatic electric drive], Ivanovo, Ivanovo State Power University Publ., 2012, pp. 652-657. (In Russian)
- Galkin V.V., Karandaev A.S., Golovin V.V., Radionov A.A., Khramshin V.R., Gasiyarov V.R., Zalagin O.A. Algorithm for calculation of load modes at rolling stand electric drives during plate rolling. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskije Nauki*. [Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences], 2010, no. 3-2, pp. 12-17. (In Russian)
- Hou Y., Kong J.Y., Wang X.D. Research on Online Monitoring for the Main Drive System of Rolling Mill. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, vol. 127, pp. 444-448. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.127.444
- Kim E.S. Fatigue life evaluation of spindle of rolling mill using ADINA structure and WINLIFE. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2020, 34, 3991-3996. doi: 10.1007/s12206-020-2209-6
- 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. Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2020, vol. 166, pp. 399-416. doi: 10.1007/978-3-030-57745-2_34
- Shin N., Shin K., Bae J. A study on the health monitoring of hot rolling mill. *46th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. 2019. URL: <https://www.iastatedigitalpress.com/qnde/article/id/8686/> (accessed 21 July 2022)
- Shin K.Y., Kwon W.K. Development of Smart Condition Monitoring and Diagnosis System for Tandem Cold Rolling Mills in Iron and Steel Manufacturing Processes. *18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*. IEEE, 2018, pp. 1568-1572.
- Ohlert J., Sprock A., Sudau P. Digitalization in hot and cold rolling mills. *Mat. Sci. Forum. Trans Tech Publications*, 2016, vol. 854, pp. 215-224. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.854.215
- Krot P.V. Hot rolling mill drive train dynamics: torsional vibration control and backlash diagnostics. *Millennium Steel China. Annual Issue*. 2009. Pp. 91-95. URL: https://www.researchgate.net/publication/202044159_Hot_rolling_mill_drive_train_dynamics_torsional_vibration_control_and_backlashes_diagnostics (accessed 21 July 2022)
- Loginov B.M. *Ogranichenie dinamicheskikh nagruzok elektroprivodov gorizontальной kleti tololistovogo prokatnogo stana*. Kand. Diss. [Electric drive dynamic load limiting at a horizontal stand of the plate rolling mill. Kand. Diss.]. Chelyabinsk, 2019. 164 p.
- Gasiyarov B.R. *Sovershenstvovanie elektrotekhnicheskikh sistem reversivnoy kleti tololistovogo prokatnogo stana. Doct. Diss.* [Improvement of electro technical systems in a convertible stand at a plate rolling mill. Doct. Diss.]. Chelyabinsk, 2021. 358 p.
- Krot P.V. Nonlinear Vibrations and Backlashes Diagnostics in the Rolling Mills Drive Trains. *Proc. of 6th EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference (ENOC)*. St. Petersburg, Russia, 2008. Pp 360-365. doi:10.13140/2.1.3353.1840
- Radionov A.A., Evdokimov S.A., Karandaev A.S., Khramshin 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). IEEE, 2014, vol. 1, pp. 280-285. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040897
16. Khramshin 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' electrical equipment. IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW). IEEE, 2015. doi: 10.1109/eiconrusnw.2015.7102264
 17. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Shilyaev P.V., Petryakov S.A., Lukin A.A. New technical solutions in electric drives and in control systems of operating parameters at hot rolling mills. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie Nauki*. [Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences], 2010, no. 3-2, pp. 34-40. (In Russian)
 18. Krot P.V. Telemetric monitoring systems of dynamic loads in rolling mill drive lines. *Vibratsiya mashin: izmerenie, snizhenie, zashchita: nauchno-tekhnicheskiy i proizvodstvennyi sbornik statey* [Machine vibration: measuring, reduction, protection: collection of scientific, technical and industrial papers]. Donetsk, DonNTU Publ., 2008, iss. 1, pp. 46-53. (In Russian)
 19. Artyukh V.G. *Osnovy zashchity metallurgicheskikh mashin ot polomok* [Fundamentals of metallurgical machines protection from failures]. Mariupol, Publishing group «University», 2015. 288 p. (In Russian)
 20. Radionov A.A., Loginov B.M., Odintsov K.E., Gasiyarova O.A. Limitation of Dynamic Loads of the Mechatronic System of the Rolling Stand. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2022, pp. 1157-1162. doi: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787233
 21. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Karandaev A.S., Usatyi D.Yu., Khramshin V.R. Dynamic Load Limitation in Electromechanical Systems of the Rolling Mill Stand during Biting. IEEE 11th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT). IEEE, 2020. doi:10.1109/ICMIMT49010.2020.9041192
 22. Gasiyarova O.A., Karandaev A.S., Erdakov I.N., Loginov B.M., Khramshin V.R. Developing Digital Observer of Angular Gaps in Rolling Stand Mechatronic System. *Machines*. 2022. 10. 141. doi: 10.3390/machines10020141
 23. Report on Torque Measurements and Process - ACIDA...Musterbericht – ACIDA Torque Measurement Services by ACIDA GmbH Report on Torque Measurements and Process Analyses at the Heavy. ACIDAGmbH. URL: <https://www.vdocuments.site/report-on-torque-measurements-and-process-acidamusterbericht-acida-torque.html?page=1> (accessed 21 July 2022)
 24. Karandaev A.S., Radionov A.A., Loginov B.M., Gasiyarova O.A., Gartlib E.A., Khramshin V.R. Experimental calculation of two-mass electromechanical system parameters at a rolling mill. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2021, vol. 64, no. 3, pp. 24-35. doi: 10.17213/0136-3360-2021-3-24-35. (In Russian)
 25. Gasiyarov V.R., Khramshin V.R., Voronin S.S., Liovsokaya T.A., Gasiyarova O.A. Dynamic Torque Limitation Principle in the Main Line of a Mill Stand: Explanation and Rationale for Use. *Machines*, 2019, 7(4), 76. doi: /10.3390/machines7040076
 26. Karandaeva O.I., Yachikov I.M., Khramshina E.A., Druzhinin N.N. Partial Discharge Monitoring Data: Statistical Processing to Assessment Transformer Condition. IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). IEEE, 2019, pp. 139-143. doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915407
 27. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin 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
 28. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R., Sarlybaev A.A. System for Real-Time Monitoring of the Technical State of a Transformer on an Ultrahigh-Power Electric-Arc Steelmaking Furnace. *Metallurgist*, 2014, vol. 58, no. 9-10, pp. 872-879. doi:10.1007/s11015-015-0010-z
 29. Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Nikolaev An.A., Nikolaev Ar.A., Karandaev A.S. Monitoring Technical State of the Power Transformers Is a Necessary Condition of the Smart-Grid Technology Introduction within the Industrial Electric Networks. IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW). IEEE, 2015, pp. 214-220. doi: 10.1109/EIconRusNW.2015.7102265

Обоснование разработки телеметрической системы мониторинга упругого момента главной линии клетки прокатного стана / В.Р. Храмшин, С.А. Евдокимов, О.А. Гасиярова, А.С. Карандаев, Б.М. Логинов // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 3(56). С. 70-79. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3\(56\)-70-79](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-70-79)

Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Gasiyarova O.A., Loginov B.M., Karandaev A.S. Feasibility Study of the Elastic Moment Telemetric Monitoring System at the Main Line Rolling Stand. *Elektrotechnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 3(56), pp. 70-79. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3\(56\)-70-79](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-70-79)