

**ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИКИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНИЯХ ПРИВОДОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН**

Представлен обзор научных работ по исследованию динамики переходных процессов в линиях приводов металлургических машин. На основании этого сформулированы дальнейшие направления использования характеристик переходного процесса на пути модернизации и повышения эксплуатационной надежности металлургических агрегатов.

Изучению природы возникновения и характеристик переходных процессов, в частности колебаний, упруго–массовых систем посвящен ряд монографий [1,7,16,33,39–42,46], множество статей отечественных и зарубежных исследователей и некоторые диссертационные работы [6,26,27].

Основателем научного направления динамики металлургических машин по праву считается член–корр. АН Украины С.Н. Кожевников. Теоретические основы динамики машин, в основном на базе прокатных станов, изложены им в монографии [1], затем развиты и систематизированы в работе [41]. В основанной им в 50–х годах школе на базе отдела механизации и автоматизации металлургического производства Института черной металлургии НАН Украины разработана и успешно используется и совершенствуется методика исследования динамики нелинейных электромеханических систем с упругими связями. Эта методика включает регламент составления, анализа и упрощения расчетных схем исследуемого объекта, расчет их амплитудно–частотных характеристик, выполнение базовых и контрольных экспериментальных исследований динамических нагрузок и особенностей протекания переходных процессов, анализ зависимостей изменения нагрузок от параметров и режимов работы машины, а также систематизацию нагрузок для расчетов на прочность и выносливость. Основой расчета динамических нагрузок является система дифференциальных уравнений, описывающая переходные процессы в линии главного привода прокатной клетки при различных режимах работы. Уравнения записываются в форме С.Н.Кожевникова, где неизвестными являются непосредственно моменты сил упругости. Коэффициенты в этих уравнениях определяются упруго–массовыми параметрами расчетной схемы.

Теоретические выкладки проверены на действующем прокатном оборудовании, когда были проведены, впервые в мировой практике, ряд масштабных экспериментальных исследований механического прокатного оборудования комбината «Запорожсталь». Были измерены крутящие моменты в клетях №5–№10 чистовой группы НТЛС 1680 на промежуточном валу (моторная муфта) и шпинделях [2], на главных шпинделях линии

привода вертикальных валков слябинга 1150 [4] и на коренном валу и шпинделях стана 2800 листовой прокатки [5]. Выявлена однозначная связь динамических нагрузок с величиной зазоров в линиях приводов.

Позднее проблемам динамических нагрузок прокатных станов посвятили себя и зарубежные авторы. Петерсен С.Р. на примере линии привода с редуктором, представленной 8-ми массовой рядной системой, исследует влияние жесткости участка двигатель–редуктор на величину коэффициента динамичности  $K_d$  [3]. Согласно расчетам на модели  $K_d$  изменяется в пределах 1,5–4,0. Автор отмечает, общеизвестный факт, что жесткость участка должна быть значительно, в 2–3 раза, изменена, чтобы получить желаемый эффект. При этом не указывает, какие размеры элементов рассматриваемого участка должен изменить конструктор.

А.И. Голубенцевым разработан интегральный метод для исследования динамики [7]. После перехода к обобщенным безразмерным параметрам решение одного дифференциального уравнения  $n$ -го порядка с параметрами  $C_i$ , к которому сводят систему  $n$  уравнений второго порядка, записывают в специальных функциях переходного процесса  $B(+k)$ . Находят численные значения этих функций, закон их изменения и их экстремальные значения при изменении параметров дифференциального уравнения в заданных интервалах. В результате последовательных вычислений устанавливают значения параметров  $C_i$ , соответствующие наименьшему из возможных максимальных значений функции переходного процесса. Решение задачи этим методом получается довольно громоздким. Для каждой системы (клетки) необходимо строить свои функции  $B(+k)$ . Анализ системы с увеличением числа степеней свободы существенно усложняется. Поэтому А.Н. Голубенцев (в качестве примеров) и анализирует, как правило, 3-х и 4-х массовые рядные системы. Для таких систем установлена оптимальная область изменения обобщенных безразмерных величин  $C_1$  и  $C_2$ , зависящих от упруго–массовых параметров. Автор этим ограничивается, не приводит рекомендаций, в каком направлении необходимо изменять массы и жесткости, чтобы войти в оптимальную область.

При выполнении ряда экспериментальных исследований были получены данные о динамических нагрузках в течение некоторого промежутка времени. В результате учета динамических нагрузок и экстраполяции величин зазоров была получена методика расчета на прочность и ограниченную долговечность элементов главной линии прокатных станов [8]. Дальнейшее развитие этого направления состояло в систематизации нагрузок, разработке методики установления гарантированных сроков службы тяжело нагруженных деталей, что способствует их своевременной замене [28].

При исследовании динамики электромеханических систем часто приходится упрощать расчетную схему (уменьшать количество масс). Взаимная связанность двух парциальных систем в 3-хмассовой крутильной системе приведена в публикации [11], где из равенства кинетической и по-

тенциальной энергии получена ее количественная оценка. Знание величины критерия связанности и коэффициента связи позволяет еще до начала исследования системы оценить степень взаимного влияния элементов системы на величину динамических нагрузок.

К тому времени накопленный опыт сотрудников ИЧМ теоретических [9] и экспериментальных [10] исследований прокатных станов, составления расчетных схем, их математического описания систематизирован в статье [12]. Это послужило отправной точкой для решения прикладных задач по исследованию динамики различных машин. Например, работа [9], была продолжена до получения количественных зависимостей возникающих дополнительных нагрузок в замкнутом силовом контуре с неравномерным передаточным отношением [22].

Из области теоретических исследований известна работа [13], где автор на примере линии привода нереверсивной прокатной клетки, показал, что коэффициент динамичности на моторном валу существенно зависит от отношения собственных частот  $\beta_1$  и  $\beta_2$  трехмассовой системы, определил верхнюю границу коэффициента динамичности исходя из условия неблагоприятной коллинеарности [7]. Им же впервые показана роль жесткостей и моментов инерции в формировании Кд. Аналитически получена важная закономерность: при постоянных моментах инерции имеется такое отношение жесткостей моторного  $C_{12}$  и шпиндельного  $C_{23}$  участков, при котором коэффициент динамичности достигает максимального значения, а, следовательно, одной величине коэффициента динамичности соответствуют два значения отношения жесткостей  $C_{12}$  и  $C_{23}$  [17].

Интересной особенностью обладает момент технологического соприкосновения на листопрокатных станах. Вопреки казалось бы привычному свойству постоянства момента прокатки плоских профилей, в процессе захвата металла валками он может превышать установившееся значение. Впервые этот факт был отмечен в работе [5], описан более детально в статье [14] и окончательно, в виде инженерной методики в зависимости от жесткости полосы и клетки, приведен в публикациях [21, 30]. Автор объясняет природу этого явления увеличенным обжатием переднего конца заготовки, вследствие пружины клетки, и одновременным увеличением плеча приложения усилия прокатки. В тоже время исследователи тонколистового стана 1680 горячей прокатки [15] объясняют этот эффект ускоренным остыванием переднего конца горячей полосы. По-видимому, на горячих станах наблюдается одновременное проявление этих факторов, что и приводит к увеличению момента прокатки при захвате полосы.

В работе [16] рассмотрены условия эксплуатации основного и вспомогательного оборудования прокатных цехов, определены действующие статические и динамические нагрузки в машинах и узлах в различных режимах работы и на их основе рассчитывается прочность и долговечность деталей оборудования.

В статье [18] опубликован результат проведенных измерений крутящих моментов привода клетей по аналогии с работой [2]. Авторы обращают внимание на величину зазора в шпиндельном сочленении и форму передней кромки полосы, как факторов, влияющих на динамическую составляющую нагрузки.

Зарубежными авторами публикации [19] проведена работа по теоретическому определению крутильных нагрузок на примере 12-массовой разветвленной модели со сдвоенным приводом и результаты экспериментального исследования. Отмечено влияние зазоров, необходимость его уменьшения, степени влияния обрезки переднего конца, расположение механического предохранителя, показано, что демпфирование незначительно влияет на пик крутящего момента.

В связи с увеличением мощности прокатных станов начали применять индивидуальный привод рабочих валков. Составлению расчетной схемы такого стана (на примере блюминга 1300 КМЗ) и применяемым методикам упрощения, одной из первых, посвящена статья [20]. В результате работы авторы не получили достаточно точное отображения динамических нагрузок по сравнению с экспериментальными осциллограммами.

Аналитический обзор о состоянии развития динамики металлургических машин [23] содержит все известные на то время направления исследований. Отмечается, что различные мероприятия по уменьшению или минимизации динамики не должны влиять на соответствие ГОСТам выпускаемой продукции. Это, кстати, является актуальным и в современных условиях производства.

Во ВНИИМЕТМАШе, для решения своих задач, применяется методика динамического расчета главных линий, в которой используются те же уравнения С.Н. Кожевникова, но записанные в безразмерных (относительных) параметрах [24]. В их научном обзоре [36] рассмотрены способы повышения работоспособности прокатного оборудования за счет новых конструкторских и технологических разработок, направленных на снижение различных видов нагрузок, возникающих в узлах и механизмах, а также в приводах прокатных станов. Подразумевалось, что переходные процессы в механической и электрической системе не связаны. Выделяются факторы, влияющие на динамику, конструктивные и технологические способы ее снижения: а) распределение масс и жесткостей (клеть №5 стана 2000 разрушения зубьев вал-шестерни редуктора – изготовили вал-торсион), б) угловые зазоры (в основном в шпинделях) – применение уравновешивающего устройства, противомомент перед захватом, ускорение электропривода, применение различных компенсаторов износа, в) скорость изменения технологического сопротивления – рез переднего конца полосы по угловому или шевронному контуру, уменьшение скорости электродвигателя на период захвата металла валками (заправка полосы).

Пристальное внимание угловому зазору в шпindelном сочленении уделено авторами работы [25]. Отмечается тот факт, что на холостом ходу зазор раскрывается из-за неуравновешенности шпинделя. Предлагается посадка валковой муфты на хвостовик рабочего валка с натягом, а также создание тормозного момента на рабочих валках перед захватом для выборки зазоров. Позднее ими же [37] изучалась система уравнивания шпинделей черновой группы стана 2000 НЛМК, при этом измеряли зазор в шпинделе с помощью двух сельсинов, крутящий момент, упругую деформацию станины. В результате разработана и внедрена методика точной настройки пружинных уравнивающих устройств шпинделей с текстолитовыми вкладышами.

Достаточно подробно, однако качественно, проблему минимизации динамики в связи с конструктивными параметрами рассматривает Дж. Райт [29]. Он отмечает роль моментов инерции, жесткостей, собственных частот, зазоров. Для улучшения динамических свойств предлагает конструктивный вариант установки в линии привода упругой муфты. Обосновывает участки, где она дает наибольший эффект. В работе [35] этот же автор рассматривает более детально конструктивные варианты муфт, обладающих разной жесткостью.

В статье [31] сообщается, что конструктивные мероприятия по снижению динамики труднореализуемы в условиях производства, поэтому рассмотрен такой метод снижения динамических нагрузок при захвате, как придание передней кромки заготовки фигурной формы, причем для всех клетей прокатного стана, и чистовых и черновых. Для черновой группы фигурная кромка образуется на ножницах слябинга или МНЛЗ, после определенного формоизменения в черновой группе, на ножницах перед чистовой группой формируется трапециевидная передняя кромка для задачи в чистовую группу клетей. Предложены рациональные параметры фигурной кромки для черновой и чистовой группы, по мнению авторов, не приводящие к дополнительному расходу металла в обрезь.

Попыткой исследовать линию привода прокатной клетки с синхронным двигателем является публикация [32]. Объектом были выбраны клеть 4а стана 1700 ММК им. Ильича и клеть 5 стана 2000 НЛМК. Нагрузки определялись экспериментально (осциллограммы не приведены), а также методом моделирования с помощью 3-х массовой модели (консольная заделка концевой массы и зазор в шпинделе). Наличие динамических нагрузок объясняется: а) наличием зазоров, б) близостью собственных частот, в) большим отличием частоты собственных колебаний двигателя от частот механической системы. Не приведена в явном виде функция жесткости магнитной связи синхронного двигателя при моделировании. Как вариант снижения динамики предлагается увеличить жесткость магнитной связи путем увеличения напряжения возбуждения перед захватом.

Прикладным задачам расчета крутильных и изгибных колебаний валов посвящена работа [33]. Приведены расчетные зависимости для опре-

деления частот, динамических сил и амплитуд. Автор рассматривает в основном условия работы коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания, и приводит рекомендации по оценке степени опасности колебаний (резонансные зоны) на прочность узлов.

В статье [34] отмечается необходимость систематически-технического подхода при проектировании новых технологических машин. Приведено математическое описание схем технологических агрегатов с рабочими характеристиками различных электроприводов.

Математическое моделирование, как метод исследования, применяется в работе [38]. Объектом исследования является черновая клеть кварто, приводимая во вращение спаренными электродвигателями, учтено описание модели зазора и параметры электрических приводов. Получены данные о влиянии степени раскрытия зазоров, отмечено их раскрытие при ударе раската о валки на динамические нагрузки, а также то, что с увеличением момента прокатки степень превышения амплитуды уменьшается.

На базе результатов экспериментальных исследований в монографии [39] изложены вопросы динамики основных типов машин металлургического производства. Сделаны попытки описания особенности возбуждения колебательных процессов в сложных электромеханических системах многодвигательных и групповых приводов. Показано влияние нелинейных колебаний на динамические характеристики машин.

В связи с современными тенденциями конструирования и создания металлургического оборудования авторами работы [40] сформулированы задачи оптимизации переходных процессов по коэффициенту динамичности и по времени затухания упругих колебаний. Предложена инженерная методика выбора структурных схем и параметров машин, маловосприимчивых к возмущающим воздействиям, использующая методику работы [7].

Из учебно-методических работ, посвященных исследованию колебательных процессов, следует отметить работу [42]. В ней дано изложение основ теории механических колебаний, которое опирается на общий курс теоретической механики и иллюстрируется рядом типовых примеров. Автор делает попытку углубить понимание процесса колебаний в реальных системах (наличие эффекта гистерезиса).

Для снижения динамики в работе [43] предложено производить изгиб переднего конца полосы вверх. Для этого на двухвалковой клетки №1 стана 2000 НЛМК станинный ролик был установлен выше линии прокатки и после экспериментальной проверки способ внедрен, правда, только для этой клетки.

Высокая динамичность и аварийность НШС объясняется в работе [44] большой энергией вращающихся масс, т.к. мощные двигатели могут ломать приводную линию. В виде решения предлагается переход на безредукторный тихоходный привод, уменьшение скорости вращения на период заправки полосы с дальнейшим разгоном, установка упругих энерго-

емких элементов в линии привода. Отмечается, что переход на двигатели с двухъякорным исполнением снижает динамичность, однако не обеспечивает защиты линий от поломок. В дальнейших исследованиях делается упор на использование упругих муфт [60] и упруго компенсирующего вала из конструкционного полиуретана [68].

В публикации [45] приводятся результаты моделирования динамических нагрузок в клетях №3, №4, №4а, №5, №6 НШС 1700 ММК им. Ильича. Определена степень влияния на частотные свойства и нагрузку отклонения упруго-массовых параметров от номинальных значений. Оценена возможность изменения структуры линии (применение спаренного привода) и его влияние на частотные свойства линии привода прокатной клетки.

Одной из последних работ по динамике процессов прокатки, включающей в себя много разработок предыдущих лет, является учебное издание [46], посвященное многим задачам самого процесса деформации металла в валках, так и расчетам динамических нагрузок, возникающих при их реализации в линии привода прокатной клетки. Методика расчета, составления, приведения динамических моделей не отличается от общеизвестных, хотя и содержит некоторые спорные моменты. Так авторы предлагают упрощать любую  $n$ -массовую рядную модель к  $2^x$ -массовой на основе равенства суммарной энергии и низшей собственной частоты, которую предварительно необходимо определить в  $n$ -массовой модели. При сведении к  $3^x$ -массовой возникает неопределенность (количество неизвестных больше, чем уравнений). Определена жесткость электромагнитной связи ротор-статор синхронного двигателя и отмечается незначительное ее изменение в переходных режимах, в связи с чем, предложено рассматривать эту связь как линейно упругую. Для двигателя постоянного тока связь ротор-статор как линейный элемент демпфирования. Сообщается, что максимальное значение коэффициента динамичности определяется не законом изменения момента прокатки во времени, а продолжительностью его нарастания. Получены зависимости коэффициента динамичности на  $3^x$ -массовой модели с зазорами от вариации параметров жесткостей и средней массы. Рассмотрены различные технологические варианты снижения динамических нагрузок (теоретически и экспериментально) и методики их расчетов, для количественной оценки их снижения.

Различным аспектам динамических нагрузок при нестационарном процессе асимметричной прокатки посвящена публикация [47]. Работа направлена на оптимизацию геометрических параметров трансмиссии и электрических параметров двигателей. Рассмотрены рабочие клетки с одно-, двух-, трех- и четырехдвигательным приводом, однако схемы приводов не приведены. Представленные осциллограммы имеют низкую частоту дискретизации, поэтому характеристики переходных процессов определить сложно. Предлагается регулировать величины моментов сил сопротивления на рабочих валках или жесткость механических характе-

ристик двигателей с помощью ЭВМ, которая в зависимости от конкретных условий прокатки, путем решения систем дифференциальных уравнений, высчитывает необходимые параметры.

Рассмотрены натурные переходные процессы в главных приводных линиях валков клетей ШСГП 1680, 1700, 2000 и 2500 [48]. Дан сравнительный анализ крутильных колебаний на моторном и шпиндельных участках, возникающих в линии привода при захвате металла валками. Отмечаются переходные процессы с увеличивающейся амплитудой, с «нулевой» полкой (раскрытие зазора), с обратным нагружением (замыкание зазора). На шпинделях отличающиеся переходные процессы (по фазе и амплитуде, частоты совпадают). Сделан вывод о целесообразности увеличения отношения низших частот, раскрытии зазоров вдоль линии привода, в результате чего система распадается на автономные колебательные подсистемы, что оказывает влияние на уровень динамических нагрузок, что необходимо учитывать при моделировании. Ими же разработана и предлагается к использованию при проектировании концепция поиска путей уменьшения динамических нагрузок [49], основанная на анализе совместного воздействия зазоров, конструктивных и технологических параметров.

В работе [50] измеряли динамический момент на нижнем и верхнем шпинделях чистовой клетки №7 стана 2000 МК «Северсталь». Было замечено, что нагружается сначала нижний, а затем верхний шпиндель. Этот факт автор трактует различными величинами зазоров в шпинделях при захвате и как вариант смягчения, предлагает методику подбора рабочих валков по катающему диаметру.

Систематизированы и изложены в статье [51] основные положения методики исследования динамических процессов и определения нагрузок в нелинейных электромеханических системах приводов металлургических машин.

В публикации [52] представлены этапы развития и пути модернизации тонколистового стана 1680 горячей прокатки. Именно благодаря коренной реконструкции стана в 1956–1958 гг., привлеченные для анализа нового оборудования научные сотрудники ИЧМ во главе с С.Н. Кожевниковым, совершили научный прорыв в определении динамических нагрузок тяжелых машин. Сообщается о мероприятиях, способствующих увеличению надежности оборудования, стабильной высокопроизводительной работе стана и получение конкурентоспособной качественной продукции.

Авторы работы [53] продолжают развивать теоретическое определение характеристик момента при захвате над установившимся значением момента прокатки. Путем электронного моделирования получено уравнение продольной разнотолщинности в динамике, определена скорость при которой линия привода становится максимально восприимчивой (в динамическом плане) к горбообразному моменту.

На базе большого количества экспериментальных измерений динамики, выполненных сотрудниками ИЧМ приведены и проанализированы частотные свойства черновых и чистовых клетей НТЛС 1680, НШС 1700 «Испат–Кармет», НШС 1700 ММК им. Ильича, НШС 2000 НЛМК и НШС 2500 ММК (всего 49 клетей) [55]. Предложены критерии, удовлетворяющие нормальному уровню динамики в клетях: а) отношение двух низших собственных частот должно быть больше 1.8, б) первая собственная частота должна быть менее 10 Гц.

При внедрении новой технологической схемы прямой транзитной прокатки по схеме слиток–сляб–рулон на НТЛС 1680 анализировались нагрузки по данным мощности синхронных приводов клетей №1 и №2 [56]. Был сделан вывод о нормальной величине перегрузки по электрическим сигналам, которые не отражают переходного процесса в механической системе.

Результаты экспериментальных исследований динамических процессов в оборудовании при взаимодействии смежных клетей через полосу, выполненных лабораторией динамики прокатного оборудования ИЧМ на непрерывных широкополосных станах обобщены в публикации [54]. При реализации технологии прокатки слябов удвоенной массы (т.е. длины) в первых черновых клетях НТЛС 1680 происходит одновременная деформация в двух клетях. В статье [57] приведены особенности этого динамического взаимодействия главных линий клетей через толстую полосу на примере тандема клеть дуо – клеть №1. Исследования включали в себя запись крутящего момента и силу тока приводов в клетях. Из сравнения переходных процессов в механической и электрической системах, сделан вывод об отсутствии связи колебаний силы тока и крутящего момента в переходном режиме. Как способ снизить динамические нагрузки в клетях дуо предлагается ускорение линии привода перед захватом и согласование скорости подающего рольганга со скоростью прокатки в клетях.

В прикладном плане интересна статья [58], где исследовано влияние податливого элемента на жесткость рядной механической системы с учетом возможного отклонения упругих параметров податливого элемента от номинальных значений.

В работе [59] определяли максимально возможное значение коэффициента динамичности для некоторых типов металлургических машин в зависимости от особенностей нагружения и влияния зазора. Отмечается, что системы с несколькими степенями свободы по сравнению с одно–двух степенными, обладают большей податливостью, сглаживающей нагрузку ударного характера.

Расчетно–прикладной характер имеет публикация [61], где приведена уточненная методика определения динамических нагрузок в процессе взаимодействия цапф зубчатых колес шестеренных клетей и редукторов прокатных станов с опорными узлами.

О результатах научно–производственной деятельности в области модернизации металлургического оборудования прокатных станов сообщается в работе [62]. Отмечаются такие технические решения, как – уменьшение зазоров между подушками рабочих валков и стойками станин, точное уравнивание универсальных шпинделей, выбор величины и направления смещения рабочих валков относительно опорных, изменение жесткости участков трансмиссии, согласование скорости валков вертикальной и горизонтальной клетей.

Основательно взялись за изучение влияния зазоров на динамические нагрузки авторы публикации [63]. Составив 16–ти массовую разветвленную расчетную схему линии привода черновой прокатной клетки, введя зазоры и демпфирование в каждую упругую связь, получили результат без указания величины зазоров и степени их открытия.

В статье [64] представлены уравнения движения асинхронных и синхронных электродвигателей переменного тока с частотным регулированием скорости вращения роторов в составе электромеханических систем приводов. Описаны особенности учета динамических характеристик электродвигателей при исследовании колебательных процессов в системах приводов с упругими связями.

Авторами публикации [65] проведено моделирование методом конечных элементов  $3^x$ –массовой расчетной схемы прокатного стана, содержащей соединительные валы с распределенной по длине массой. В результате расчетов сделан сомнительный вывод о неравномерности динамической нагрузки по длине тяжелого вала шпинделя.

На основании экспериментальных данных в работе [66] показано, что при захвате металла валками во всех системах прокатной клетки (станина, подушки валков, корпус шестеренной клетки и редуктор) формируются колебательные процессы. Несущей частотой этих колебаний является частота собственных колебаний упругой крутильной системы линии главного привода. Установленная взаимосвязь колебательных процессов в рядных системах позволяет использовать эту их особенность для диагностики технического состояния оборудования прокатной клетки.

Интересна публикация грузинских исследователей динамики [67]. Используя методику С.Н. Кожевникова, изучаются динамические нагрузки, возникающие в линии привода брикетировочных вальцов. Расчетная схема представляет собой  $2^x$ –массовую приведенную крутильную модель с консольной заделкой концевой массы, нагружение которой происходит технологической циклической нагрузкой, возникающей при формировании прессованных брикетов.

### **Заключение**

Подводя итог, следует отметить, что вопросы динамики освещены достаточно полно как в теоретическом так и в экспериментальном плане. Получены аналитические зависимости поведения простых линейных 2–3–массовых систем, их оптимизация по различным критериям. Например,

интегральный метод А.И. Голубенцева [7] позволяет достаточно легко проанализировать максимально возможные динамические нагрузки в реальной машине, но при оптимизации конструкции предлагает такие конструктивные параметры, реализовать которые невозможно.

Для других систем (многомассовых, с распределенными параметрами) приведены различные алгоритмы численных решений. Разработана методика учета углового зазора, как разрывающейся упругой связи между двумя массами. Упруго–массовые системы линии привода рассматриваются совместно с электрической системой двигателя, но в связи с усложнением и повышением быстродействия электрических машин требуется учет всех этих факторов при моделировании. С использованием вышеперечисленного представляется возможным разработка рациональных параметров приводов мощных и надежных прокатных станов.

Предложены, обоснованы и внедрены различные практические способы уменьшения динамики на конкретных объектах. Однако требуют дополнительного изучения варианты фигурной резки концов полосы перед чистовой группой на НТЛС 1680, в связи с установкой в линии стана ППУ «Coilbox».

Производились расчеты на прочность и выносливость, с применением так называемой эквивалентной нагрузки, определяемой по ограниченному числу захватов на определенном (одном) сортаменте и каком–то техническом состоянии оборудования. В связи с появлением быстродействующей цифровой аппаратуры для записи крутящего момента в больших количествах представляется возможным получить весь спектр нагрузок на всем сортаменте, в течение длительного периода работы прокатной клетки, для расчета элементов линии привода на ограниченную долговечность.

Вместе с тем характеристики переходного процесса крутящего момента с достаточной частотой дискретизации, совместно с сигналами вибрации, измеренными на различных участках линии привода представляют возможным судить о техническом состоянии линии привода. Для этого необходимо разработать техническую базу для применения на прокатных станах систем автоматизированной диагностики состояния и точности реализации режимов работы оборудования.

1. *Кожевников С.Н.* Динамика машин с упругими звеньями. // – Киев: Изд–во АН УССР, 1961.–160 с.
2. *Кожевников С.Н., Скичко П.Я.* Экспериментальное исследование главных линий чистовой группы клетей НТЛС 1680 завода «Запорожсталь» // ИзвВуз–ЧернМеталл. 1961, №12, с.179–184.
3. *Petersen S.K.* Impact torsional vibration of direct current hot strip mill drive motors // «Iron and Steel», 1964, 41, №10, pp. 105–110.
4. *Кожевников С. Н., Большаков В.И.* Исследование динамики приводной линии вертикальных валков слябинга // Модернизация и автоматизация металлургического оборудования. Труды ИЧМ. – Т. XIX. – М.: Металлургия, 1965. – С.72–78.

5. *Влияние зазоров на динамические нагрузки в главной линии стана 2800 / В.И.Большаков, С. Н. Кожевников, Ю. Я. Кармазин и др. // Изв. ВУЗов Черная металлургия . – 1967. – № 6. – С. 162–168.*
6. *Большаков В.И. Исследование нелинейных электромеханических систем приводов прокатных станов с упругими связями на электронных моделях: Автореф. дис. канд. техн. наук – Днепропетровск, 1966. – 18 с.*
7. *Голубенцев А.И. Интегральные методы в динамике.–К.: Техніка, 1967.–350 с.*
8. *Кожевников С.Н., Большаков В.И. Динамические нагрузки главных линий прокатных станов и учет этих нагрузок при расчетах на прочность и выносливость // Труды Первой Всесоюзной конференции по расчет на прочность металлургических машин. – Сб. № 23. – М.: ВНИИМЕТМАШ, 1968. – С. 28–46.*
9. *Большаков В.И. Динамика замкнутой электромеханической системы с нелинейными упругими связями // Динамика машин. – М.: Машиностроение, 1969. – С. 64–73.*
10. *Экспериментальное исследование перемещения валков в период захвата полосы / С.Н. Кожевников, М.М. Сафьян, П.Я. Скичко и др. // Прокатное производство. Труды ИЧМ. – Т. XXIX. – М.: Металлургия, 1969. – С. 395–400.*
11. *Большаков В.И. Взаимодействие парциальных систем с упругими связями при колебаниях и оценка степени их связанности// «Теория механизмов и машин». Вып.7. Харьков: ХГУ, 1969. – С.66–69.*
12. *Опыт исследования динамики главных приводов прокатных станов с учетом упругих связей и зазоров / С.Н. Кожевников, П.Я. Скичко, А.Н. Ленский и др. // Динамика металлургических машин. Сб. статей ИЧМ, т. XXXI, М.: Металлургия. 1969.–с.5–13.*
13. *Лошкарев В.И. Определение оптимальных параметров главной линии рабочей клетки неререверсивного прокатного стана // Динамика металлургических машин. Сб. ст. ИЧМ, т. XXXI. М.: Металлургия.1969.– С.17–21.*
14. *Большаков В.И. Технологические нагрузки листопркатных станов // Динамика металлургических машин. Сб. статей ИЧМ, т. XXXI, М.: Металлургия. 1969.–с.64–67.*
15. *Кожевников С.Н., Скичко П.Я. Известия вузов. Черная металлургия, 1967, №12, с.179–184.*
16. *Динамика и прочность прокатного оборудования / Ф.К. Иванченко, П.И.Полухин, М.А. Тылкин и др. // М: Металлургия, 1970. – 487с.*
17. *Лошкарев В.И. Определение параметров трехмассовой системы, обеспечивающих заданные коэффициенты динамичности. // Теория механизмов и машин, Харьков, вып.10, 1971, с.33–37.*
18. *Экспериментальное определение моментов в чистовой группе широкополосного стана горячей прокатки 1680 / М.М. Сафьян, Я.Д. Василев, В.П. Холодный и др. // В сб. «Обработка металлов давлением» (ДМетИ), вып.56. М.: Металлургия, –1971. – С.175–178.*
19. *Кэшей А.М., Вулкер Ф.С., Смолли А.О. Динамический удар в прокатном стане // Тр. Америк. о-ва инж.–механиков. Конструирование и технология машиностроения.–1972.–№2.–С.159–174.*
20. *Большаков В.И, Логинова К.С. Расчетная схема главной линии прокатного стана с индивидуальным приводом валков // Металлургическая и горнорудная промышленность – 1973. №1. – С. 67–70.*

21. *Большаков В.И.* Анализ зависимости момента сопротивления при захвате от параметров клетки и прокатываемого листа // В сб. «Листопрокатное производство». – М.: Металлургия, 1974. – № 3. – С. 123–127.
22. *Большаков В.И.* Особенности нагружения замкнутого контура с нелинейными упругими связями // В сб. «Динамика машин». – М.: Наука, 1974. – С.17–22.
23. *Праздников А.В., Большаков В.И.* Современное состояние и задачи динамики металлургических машин // В сб. «Динамика машин». – М.: Наука, 1974. – С.150–165.
24. *Исследование динамики приводов главных линий ШСГП / А.И. Целиков, Б.Е.Житомирский, М.С. Гарцман и др.* // Доклады международного симпозиума по динамике тяжелых машин горной и металлургической промышленности. Донецк, 1974.–С.25–31.
25. *Условия безударного захвата металла валками прокатного стана / М.Я. Ройзен, С.Л. Коцарь, Ю.В. Гесслер и др.* // ИзвВузЧернМеталл, 1974, №12, с.51–53.
26. *Ройзен М.Я.* Исследование динамики главных линий черновых клетей широкополосного стана: Автореф. дис. канд. техн. наук – Липецк, 1974. – 20 с.
27. *Вернев В.В.* Исследование динамики главных линий непрерывных широкополосных станов горячей прокатки и влияние динамических процессов на продольную разнотолщинность полос: Автореф. дис. канд. техн. наук – Днепропетровск, 1975. – 20 с.
28. *Большаков В.И.* Систематизация нагрузок при расчетах на выносливость деталей привода листопрокатного стана // В сб. «Металлургическое машиноведение и ремонт оборудования». – М.: Металлургия, 1975. – № 4. – С. 100–104.
29. *Wright J.* Mill drive system to minimize torque amplification // Iron and Steel Engineer, July, 1976. pp.56–60.
30. *Большаков В.И.* Особенности динамического нагружения листопрокатных станов // В сб. «Металлургическое машиноведение и ремонт оборудования». – Вып. 6 – М.: Металлургия, 1979. – № 4. – С. 58–59.
31. *Скичко П.Я., Вернев В.В.* Снижение ударных нагрузок в непрерывных широкополосных станах / Металлургическая и горнорудная промышленность. 1979, № 1. с.57–59.
32. *Дудко В.Ф., Гринчук П.С.* О комплексном подходе при решении задачи снижения динамических нагрузок в прокатном стане // Изв. вузов. Черная металлургия. № 9. 1979.с.78–81.
33. *Маслов Г.С.* Расчеты колебаний валов. М.: Машиностроение, 1980. – 151с.
34. *Шенерт Д., Томе Г.И.* Системы привода как составная часть технологических агрегатов / Черные металлы, 1980, №10, с.20–27.
35. *Wright J.* Tuning mill drives to minimize dynamic torques // Iron and Steel Eng. May 1981, pp.35–37.
36. *Житомирский Б.Е., Гарцман С.Д., Филатов А.А.* Повышение работоспособности прокатного оборудования за счет снижения динамических нагрузок // Металлургическое оборудование. Обзор ЦНИИИиТЭИпТТМ. Москва, – 1982, – №33.
37. *Снижение угловых зазоров и динамических нагрузок при захвате металла валками / С.Л. Коцарь, Б.А. Поляков, А.Д. Белянский и др.* // Сталь, – 1982. – №07.– С.42–44.
38. *Гудехус Х.* Расчет динамических нагрузок на детали приводов станов горячей прокатки с применением ЭВМ. // Черные металлы, –1983. – № 14. – С. 8–14.

39. *Иванченко Ф.К., Красношапка В.А.* Динамика металлургических машин. // М.: Металлургия, –1983. – 295с.
40. *Адамия Р.Ш., Лобода В.М.* Основы рационального проектирования металлургических машин. // М.: Металлургия, – 1984. – 128с.
41. *Кожжевников С.Н.* Динамика нестационарных процессов в машинах. // Киев. Наукова думка, –1986.–288с.
42. *Пановко Я.Г.* Введение в теорию механических колебаний: Учеб. пособие для вузов. // М.: Наука. Гл.ред.физ.–мат. лит., –1991. – 256 с.
43. *Хлопонин В.Н., Коцарь С.Л., Третьяков В.А.* Снижение динамических нагрузок при захвате металла валками// ИзвВузЧернМеталл., –1986. – №11, – с.153–154.
44. *Артюх Г.В., Артюх В.Г., Артюх В.С.* К вопросу защиты от поломок непрерывных широкополосных станов // Межвузовский тематич. сб. «Защита металлургических машин от поломок». Вып. 2. Мариуполь, –1997 – С.58–68.
45. *Большаков В.И., Буцукин В.В.* Особенности динамических нагрузок в главных линиях рабочих клетей стана 1700 //Межвузовский тематич. сб. «Защита металлургических машин от поломок». Вып. 2. Мариуполь, –1997. – С.25–32.
46. *Динамика процессов прокатки / С.Л. Коцарь, В.А. Третьяков, А.Н. Цупров и др.* // М.: Металлургия, –1997. – 225с.
47. *Поваляев В.Д.* Динамика главного привода рабочих валков в условиях нестационарного процесса асимметричной прокатки // Межвузовский тематич. сб. «Защита металлургических машин от поломок». Вып. 2. Мариуполь, –1997. – С.39–49.
48. *Динамические процессы в главных линиях клетей широкополосных станов / В.В. Веренев, В.И. Большаков, Ю.Н. Белобров и др.* / Металлургическая и горнорудная промышленность, – 1998. – № 4. – С. 64–66.
49. *Уменьшение динамических нагрузок в приводе широкополосных станов / В.В. Веренев, В.И. Большаков, Ю.Н. Белобров и др.* /Сталь, 1999, № 1. – С.35–38.
50. *Плахтин В.Д.* Подбор рабочих валков широкополосных станов в зависимости от угловых зазоров в линии привода// Сталь, –1999. –№3. – С.29–32.
51. *Большаков В.И.* Методика исследования динамики приводов металлургических машин. // Металлургическая и горнорудная промышленность, –2000. – №3. – С.10–13.
52. *Большаков В.И., Поздняков В.П.* Результаты и новые задачи исследований нагрузок приводов клетей тонколистового стана 1680 горячей прокатки // Межвузовский тематич. сб. «Защита металлургических машин от поломок». Вып. 5. Мариуполь, – 2000. – С.27–33.
53. *Веренев В.В., Большаков В.И., Подобедов Н.И.* Моделирование взаимодействия линии главного привода и упругой системы клетки // Межвузовский тематич. сб. «Защита металлургических машин от поломок». Вып. 5. Мариуполь, – 2000. – С.34–42.
54. *Веренев В.В., Даличук А.П.* Взаимодействие смежных клетей непрерывного стана через прокатываемую полосу // Межвузовский тематич. сб. «Защита металлургических машин от поломок». Вып. 5. Мариуполь, –2000. – С.43–47.
55. *Веренев В.В., Большаков В.И., Подобедов Н.И.* Частотные свойства главных приводных линий клетей широкополосных станов. // Сталь, – 2001. – № 4. – С.55–58.

56. *Молчанов А.И.* Исследование динамических нагрузок в черновых клетях широкополосного стана 1680 при прямой прокатке слябов. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*, – 2002. – № 4. – С.36–39.
57. *Веревев В.В., Путнюки А.Ю., Клевцов О.М.* Экспериментальное исследование взаимодействия черновых клетей стана 1680 при непрерывной прокатке слябов / *Металлургическая и горнорудная промышленность*, – 2003. – № 2. – С.51–53.
58. *Большаков В.И., Буцукин В.В.* Оценка влияния податливого элемента на жесткость механической системы / *Металлургическая и горнорудная промышленность*, – 2003. – № 2. – С.87–89.
59. *Оценка* предельных нагрузок в трансмиссии металлургических машин / Р.Ш.Адамия, Г.В. Кашакашвили, В.М. Лобода и др. // *Сталь*, – 2003. – №3. – С.49–51.
60. *Артюх В.Г.* Совершенствование защиты металлургических машин от перегрузок и поломок // *Сталь*, –2003. –№3. – С.54–56.
61. *Определение* динамических нагрузок в шестеренных клетях и редукторах прокатных станов / А.А. Филатов, С.Д. Гарцман, А.А. Жуков и др. // *Сталь*, – 2003. –№8. – С.41–45.
62. *Карпущин И.И.* Снижение динамических нагрузок и повышение долговечности машин широкополосных станов горячей прокатки // *Бюллетень «Черная металлургия»*, ОАО Черметинформация, – 2004. – №07. – С.31–35.
63. *Влияние* зазоров на динамические характеристики главных линий клетей черновой группы НШСГП / И.П. Мазур, В.В. Барышев и др. // *Вибрация машин. Измерение, снижение, защита*. – Выпуск 1. – 2005.
64. *Большаков В.И.* Особенности математического описания электроприводов с частотным регулированием скорости при исследовании динамики машин. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*,–2005.–№ 3. – С.104–107.
65. *Руденко В.И., Нижник Н.В.* Анализ нестационарных процессов главной линии прокатного стана как системы с распределенными параметрами // *Защита металлургических машин от поломок*. Мариуполь, –2005. –Вып.8. – С.19–23.
66. *Веревев В.В.* Взаимосвязь колебательных процессов в упругих системах прокатной клетки / *Металлургическая и горнорудная промышленность*, – 2005. – № 1. – С. 100–103.
67. *Анализ* динамики главной линии привода брикетировочных вальцов / Э.Д.Броладзе, Б.Г. Кашакашвили, С.А. Мебония и др. // *Сталь*, – 2005. –№9. – С.61–64.
68. *Система* защиты оборудования от аварийных поломок / П.Н. Кирильченко, В.Г. Артюх, Г.В. Артюх и др. // *Сталь*, – 2007. –№1. – С.65–67.

*Статья рекомендована к печати канд.техн.наук В.В.Веревевым*