

**В.В.Вернев, В.И.Большаков, А.М.Юнаков**

### **МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОКАТНЫХ СТАНАХ**

Целью работы являлось совершенствование моделей динамических процессов в прокатных станах с учетом нелинейности упругих связей. Представлены разработанные в Институте черной металлургии несколько базовых моделей переходных процессов в зависимости от решаемой задачи. Приведена систематизация компьютерных моделей, применяемых для исследования динамических процессов в главных линиях и клетях прокатных станов. На базе моделей обоснованы, разработаны и успешно реализованы технические предложения по увеличению скорости прокатки и улучшению технических характеристик прокатных станов.

**прокатные станы, главные линии, клетки, динамические процессы, компьютерные модели, увеличение скорости прокатки**

**Целью работы** являлось совершенствование моделей динамических процессов в прокатных станах с учетом нелинейности упругих связей.

**Постановка задачи.** В работах [1,2] представлены методические вопросы, касающиеся исследований динамических нагрузок в металлургических машинах. Излагается последовательность исследования нелинейных электромеханических систем с упругими связями, начиная с общего анализа машины и схемы её привода, составления расчетных схем, математического описания и заканчивая определением максимальных нагрузок. Основы данной методики заложены чл.–корр. НАНУ С.Н. Кожевниковым [3]. За более чем полувековой период методика развивалась учениками его школы на базе опытно–промышленных исследований станов различного типа: обжимных, непрерывно–заготовочных, листопрокатных, сортовых, проволочных, трубных, колесопрокатных. Успешное внедрение на разных металлургических предприятиях разработок подтверждает правильность и эффективность разработанной методики, в основе которой лежит математическое описание (модель) переходных процессов.

Разработка той или иной модели зависит от постановки конкретной задачи [4...10]. Наибольшие динамические процессы и уровень динамических нагрузок формируются в главных линиях привода валков клеток в период захвата полосы валками. На начальном этапе исследований (1954–1964 гг.), когда моделирование велось на аналоговых вычислительных машинах, главная линия представлялась рядной электромеханической многомассовой расчетной схемой с разветвлением после шестеренной клетки через шпиндели на верхний и нижний рабочие валки. В первую очередь вычислялись парциальные и собственные частоты, на основе их анализа делались выводы о возможности явления биений момента сил упругости, резонанса, связи с колебаниями в электрической системе главного привода. Определялись динамические нагрузки и пути их уменьшения. По мере расширения теоретических и накопления данных экспери-

ментальных исследований многомассовые расчетные схемы моделей совершенствовались и упрощались. На каждом этапе решался вопрос идентификации модели. В частности, проверялось условие совпадения основных собственных частот и форм колебаний исходной и упрощенной схемы и их близость к частотам, определенным экспериментальным путем.

С развитием цифровой вычислительной техники и программного обеспечения расширилось применение моделей многомассовых расчетных схем. С помощью таких моделей, в частности, определяют динамические нагрузки в тех узлах, которые недоступны для измерений, устанавливают взаимосвязь переходных процессов в разных участках системы, определяют информативные и диагностические признаки. Для решения системы дифференциальных уравнений, описывающих движение многомассовых моделей, требуется подготовка большого количества исходных данных. Во многих случаях в близко расположенных упругих связях переходные процессы идентичны. Поэтому большая часть информации является как бы избыточной, слабо информативной и не используется для аналитических выводов. В связи с этим в большинстве применяемых моделей используются семи – пяти – или трехмассовая крутильные системы главной линии прокатной клети (рис.1) с учетом нелинейности упругих связей.

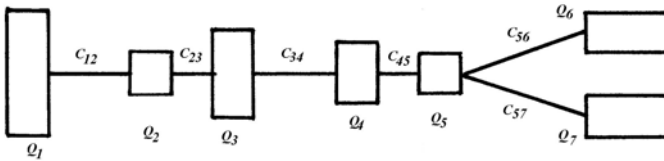


Рис.1. Многомассовая расчетная схема линии главного привода

### **Изложение основных материалов исследования.**

В Институте черной металлургии разработаны и успешно применяются несколько базовых моделей переходных процессов в зависимости от решаемой задачи. Составление расчетных схем, уравнений движения в переходных процессах линии привода (в форме С.Н. Кожевникова), упругой системы клети и электродвигателя является отработанной процедурой. Поэтому отметим особенности основных моделей и дадим примеры решаемых задач.

1. *Модель взаимодействия упругих систем линии привода и клети.* Практика натуральных измерений показала, что коэффициент динамичности на участке между двигателем и редуктором существенно больше, чем на остальных участках, между которыми эта разность незначительная. Это дало основание в качестве базовой модели принять трехмассовую расчетную схему линии привода (рис.2). Здесь момент инерции колес редуктора объединен в одну массу  $Q_2$ , а момент инерции валков шестеренной клети

и коренной муфты соответствующим образом разнесен между редуктором и валковой системой прокатной клети  $Q_3$ . Две низшие собственные частоты  $\beta_1$  и  $\beta_2$  этой системы незначительно (до 10 %) отличаются от частот многомассовой системы. Поэтому трехмассовая система с достаточной для практических целей точностью отражает переходные процессы на моторном и шпиндельном участках, в которых учитываются угловые зазоры.

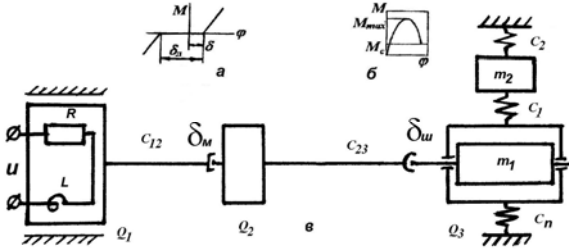


Рис.2. Расчетная схема линии главного привода и упругой системы клети (в), модель люфта и зазора (а), вид момента технологического сопротивления на валках в процессе захвата полосы (б)

Упругая система клети представлена в виде двухмассовой расчетной схемы (рабочий  $M_1$  и опорный  $M_2$  валок) с жесткостью клети  $C_K = C_1 + C_2$  и полосы  $C_n$  в очаге деформации. По мере заполнения очага металлом жесткость полосы увеличивается от нуля до постоянного значения  $C_n \approx 0,5 \cdot P / \Delta h$ . Соответственно этому изменяется частотная характеристика упругой системы клети. Перед прокаткой частота собственных колебаний

клети равна  $\beta_K = \sqrt{\frac{C_K}{m}}$ , после заполнения очага металлом и во время

прокатки  $\beta_K = \sqrt{\frac{C_K + C_n}{m}}$ , где  $m$  – приведенная масса клети. Частотные

свойства клетей, как видим, зависят не только от конструктивных параметров, которые постоянны для всех клетей непрерывной группы, но и от технологических параметров, которые изменяются от клети к клети. Жесткость клетей кварто непрерывных групп ШПС составляет 4000÷4500 кН/мм. Жесткость полосы в первой чистовой клети стана горячей (холодной) прокатки равна  $(0,1 \div 0,3)C_K$  ( $(0,5 \div 1,5)C_K$ ), в последней клети  $(1,5 \div 2)C_K$  ( $(2 \div 5)C_K$ ), т.е. влияние  $C_n$  на собственные частоты клетей может быть существенным, а в ряде клетей определяющим. Для моделирования вибрационных процессов (учета высокочастотных колебаний) достаточно принять четырехмассовую расчетную схему клети и в модель ввести

уравнение для нажимного устройства. Данная модель впервые предложена в работах [6,7]. Затем в [11] даны её уточнения, касающиеся частотных свойств клетей. Модель оказалась весьма плодотворной и позволила получить ряд новых закономерностей.

*Клетки обжимных станов и непрерывных полосовых холодной прокатки* содержат индивидуальный привод валков. Для них расчетная схема составлена также в виде трехмассовой системы: валковая система клетки асимметрично расположена между двумя массами, соответствующими моментам инерции привода верхнего и нижнего валка. При этом для обжимных станов модель упругой системы клетки можно не учитывать.

*2. Модель технологической нагрузки.* Традиционно силу и момент прокатки, действующие на валки во время заполнения очага деформации металлом, задают в виде мгновенного нагружения либо линейной или параболической функции угла захвата. Для многих случаев принятие таких законов роста нагрузки оправдано на основе механики процесса. Однако в тонколистовых станах имеется существенная особенность: в фазе заполнения очага деформации при захвате тонкой полосы формируется специфический (горбо- или куполообразный) характер изменения момента сопротивления на валках [7,12,13]. Впервые это явление обнаружено во время исследований стана 2800 холодной прокатки карточек. Здесь коэффициент динамичности составлял величины  $4\div 9$ .

Влияние технологических параметров на динамические процессы проявляется через силу  $P$  и момент  $M$  прокатки, которые входят в правые части системы дифференциальных уравнений. Во время прокатки партии полос одного сорта размера технологические параметры (температура, толщина и др.) изменяются в некоторых пределах. Это сказывается на изменении силы и момента на валках. С помощью разработанной модели определены сочетания отклонений параметров, при которых динамическая составляющая существенно увеличивается [14]. Показано, что при этом необходимо учитывать влияние угловых зазоров, которые заметно изменяют характер зависимостей. В частности, увеличение коэффициента динамичности при уменьшении момента в установившемся режиме прокатки. Установлена зависимость максимальных динамических нагрузок от скорости захвата полосы [13]. С помощью модели определены условия, при которых усиливается влияние момента на максимальные динамические нагрузки. В частности, показано [15], что в полосовых станах холодной прокатки, при определенном сочетании скорости захвата и частотных свойств линии привода, в последней формируются максимальные динамические нагрузки  $M_{\text{дmax}}$  и коэффициент динамичности  $K_{\text{д}}$ . Подобные закономерности получены для коэффициента динамичности в чистовых клетях ШПС горячей прокатки [16].

*3. Модель зазоров* [17,18]. В линии привода рассмотренной модели приняли во внимание угловые зазоры на шпиндельном  $\delta_{\text{ш}}$  и моторном  $\delta_{\text{м}}$  участке. При этом в отличие от известных решений в математическом

описании зазоров учли максимальную величину зазора, т.е. люфт  $\delta_l$ , образованный суммарным износом контактируемых сочленений, и составляющую люфта, на которую он открывается к моменту захвата полосы. Эта составляющая, т.е. фактически угловой зазор, оказывает непосредственное влияние на динамические нагрузки. Таким образом учитывается собственно зазор и его тыльная часть, как это показано на рис. 2,а. Их сумма составляет угловой люфт. На основании измерений установлено, что тыльная сторона люфта на моторном участке замыкается после первого пика момента сил упругости и тогда происходит обратный удар (закрутка участка в обратную сторону), по нагрузке соизмеримый с моментом прокатки.

Определены сочетания положения зазоров и люфтов на обоих участках и их значения, при которых наблюдаются процессы, установленные во время опытно-промышленных измерений: 1) замыкание – размыкание тыльной части люфта на моторном участке после первого, второго, иногда и третьего пиков момента; 2) превышение второго пика момента над первым (рис.3,4).

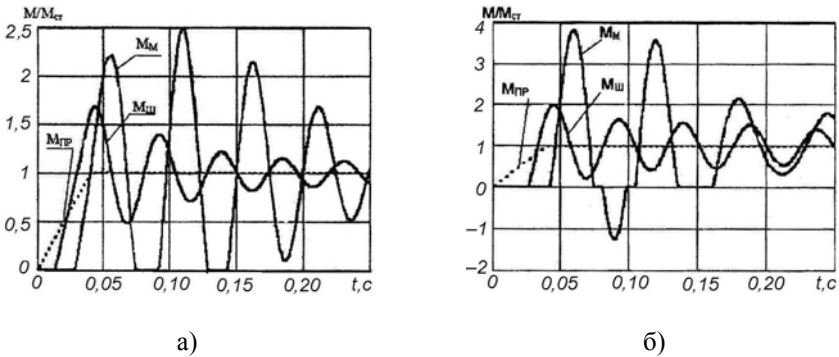


Рис.3. Переходные процессы (в относительных величинах) на моторном (м) и шпиндельном (ш) участках при разном состоянии зазоров (рад) в черновой клетке 4 – 1700М: а)  $\delta_{лм} = 0,002$ ;  $\delta_m = 0,0$ ;  $\delta_{лу} = 0,020$ ;  $\delta_{ш} = 0,01$ ; б)  $\delta_{лм} = 0,002$ ;  $\delta_m = 0,001$ ;  $\delta_{лу} = 0,02$ ;  $\delta_{ш} = 0,01$

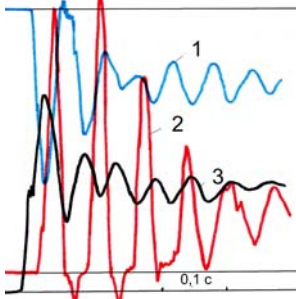


Рис.4. Переходный процесс в линии главного привода при захвате полосы валками, клеть 4 стана 1700: момент сил упругости на нижнем (1) и верхнем (3) шпинделе и промежуточном валу (2)

Учет зазоров на двух участках линии привода позволил смоделировать и установить пило- и скачкообразный характер изменения коэффициента динамичности на шпиндельном и моторном участках во время длительной работы прокатной клетки с учетом периодов замен шпинделей [19]. При регулярном построении подобных кривых одновременно для клеток черновой или чистовой группы удастся отслеживать связь динамических нагрузок с техническим состоянием главных линий. Это дает основание определять наиболее загруженные в динамическом отношении клетки и путем, например, перераспределения обжатий, добиваться уменьшения ударных нагрузок.

4. *Модель влияния конструктивных (упруго-массовых) параметров линии привода, клетки и двигателя*, по сути, отражается коэффициентами при неизвестных переменных в системе дифференциальных уравнений. Их влияние на динамику переходного процесса определяется путем численного решения системы уравнений с вариацией параметров. Оптимизация конструктивных параметров путем численного решения системы дифференциальных уравнений требует много времени для расчетов. Поэтому, на основе рядной трехмассовой расчетной схемы, разработан аналитический метод выбора рациональных конструктивных параметров (включая длину и диаметр основных элементов) и их влияние на максимальные динамические нагрузки [20].

5. *Модель динамики продольной разнотолщинности*. Модель на рис.2, в отражает силовое взаимодействие через очаг деформации линии привода и упругой системы клетки. Вертикальные колебания клетки оказывают непосредственное влияние на толщину прокатываемой полосы. Получено уравнение продольной разнотолщинности в динамике [11]:

$$\Delta \ddot{x} + 2k \cdot \Delta \dot{x} + (C_k + C_n) / m \cdot \Delta x = \Delta P / m,$$

из которого, как частный случай, следует известное уравнение разнотолщинности в статике. Поскольку сила прокатки через среднее давление зависит от сопротивления деформации, скорости прокатки, коэффициента трения и др., с помощью модели исследовали влияние их колебаний, продольной разнотолщинности подката и эксцентриситета валковой системы на вибродинамические процессы в клетке и на разнотолщинность полосы на выходе из клетки. Определяли условия усиления динамической составляющей упругого момента при пропуске через клетки непрерывного стана сварного соединения.

Таким образом, модель по п.1 с включением в нее п.п. 2–5, по сути, является комплексной моделью, в которой учтены конструктивные параметры двигателя, линии главного привода и клетки, технологические параметры и угловые зазоры, обусловленные износом сочленений.

С помощью этой модели в Институте при выполнении НИР решались следующие задачи:

1. Оптимизация конструктивных параметров линии привода;

2. При заданных конструктивных параметрах определение технологических параметров и режимов работы (с учетом ограничений на диапазон их изменения), при которых они оказывают наименьшее влияние на максимальные динамические нагрузки;

3. Определение оптимального сочетания конструктивных и технологических параметров исходя из условия наименьших динамических нагрузок;

4. Определение конструктивных и технологических параметров, при которых влияние угловых зазоров на динамику существенно уменьшается;

5. Влияние продольной разнотолщинности подката и эксцентриситета валковой системы клеток на динамические процессы в оборудовании и динамику разнотолщинности готовой полосы;

6. Данная модель положена в основу при решении задачи статистического моделирования влияния случайных факторов и возмущений на динамические нагрузки.

6. *Модель взаимодействия двух смежных клеток через толстую полосу.* Отличительная особенность этой модели состоит в учете влияния упругих колебаний в линии привода и системы клетки на параметры очага деформации, межклетевое усилие и толщину полосы. В её основу положена базовая модель 1 (рис.5).

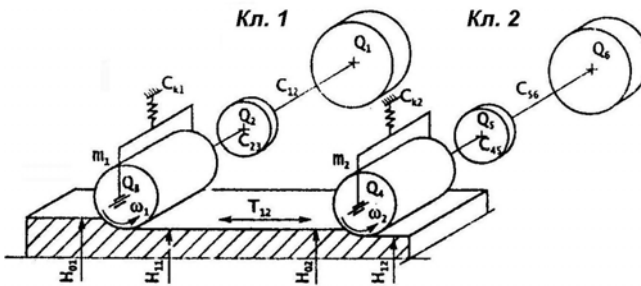


Рис.5. Модель взаимодействия двух клеток через полосу

Для описания модели использованы известные уравнения переходных процессов, к которым добавлено уравнение межклетевого усилия в полосе [21]. С помощью этой модели впервые в условиях стана 1680 исследовано взаимодействие через толстую полосу пар клеток дуо – № 1, № 2 – № 3 и № 3 – № 4 при захвате полосы валками [22]. Путем измерений крутящих моментов в главных линиях установлено, что при захвате сляба валками клетки № 1 в линии клетки дуо формируется переходный процесс с пиковой нагрузкой, соизмеримой с максимальной нагрузкой при захвате сляба клетью дуо. Результаты моделирования показали, что при согласованном скоростном режиме клеток из-за нагружения линии клетки № 1 в первое время уменьшается частота вращения валков. Это влечет за собой уменьшение

скорости входа  $V_{вх1}$  полосы в клеть № 1, тогда как скорость выхода полосы  $V_{вых0}$  из клетки до некоторого времени остается постоянной. Межклетевое усилие пропорционально интегралу разности скоростей  $\Delta V = V_{вых0} - V_{вх1}$ , в результате в полосе формируется продольное усилие. Это усилие передается валкам клетки до в виде импульсного воздействия, которое, как и при захвате, вызывает в её линии привода крутильные колебания.

Впервые с помощью модели установлен характер формирования межклетевого усилия  $T$  при захвате толстой полосы. Колебания натяжения совершаются с частотой упругих крутильных колебаний главных линий клеток. Эти же колебания проявляются в опережении.

По данным моделирования разработаны рекомендации для скоростных режимов клеток до – № 1, № 2– № 3 и № 3 – № 4 при которых в межклетевом промежутке формируются наименьшие усилия. В частности, скорость выхода полосы из клетки до должна быть на 2–3 % меньше скорости прокатки в клетке № 1 в момент захвата.

*7. Модель взаимодействия клеток чистовой группы через тонкую полосу.* Эта модель, по сути, является расширением предыдущей на 6–7 клеток непрерывной группы. Существенное уточнение состоит в учете условия отсутствия межклетевого подпора из-за продольной неустойчивости полосы в промежутках [23]. С помощью этой модели установлен характер изменения натяжения и толщины полосы на выходе из непрерывной группы при действии в установившемся режиме прокатки таких возмущений, как регулирование скоростного режима, воздействие на нажимные винты, продольная разнотолщинность подката, биение валковой системы. Определены условия формирования наибольших межклетевых натяжений, влияние на динамику заполнения группы полосой отклонений параметров прокатки (температуры, толщины и др.) и динамических процессов в оборудовании на продольную разнотолщинность концевых участков полосы. Характер взаимодействия главных линий клеток (моментов сил упругости) соответствует измеренным. В зависимости от настройки скоростного режима клеток в некоторых промежутках возможны случаи кратковременной потери устойчивости полосы (петлеобразование). Заполнение и освобождение группы полос (прокатка участков полосы без натяжения) приводит к их продольной разнотолщинности. Определены условия прокатки и возмущения, при которых пики натяжений достигают существенных величин.

*8. Модель блока.* Методика исследования поведения электромеханических систем [3] многократно опробована применительно к тяжелым крупным прокатным станам (блюмингам, слябингам, листопрокатным и др.). Являясь универсальной, она применяется также для анализа динамики высокоскоростных чистовых прокатных блоков проволочных станов со скоростью прокатки более 100 м/с.



Чистовой блок представляет собой кинематически сложный агрегат и состоит из двух (трех) соосно–расположенных электродвигателей главного привода, общего распределительного редуктора, пяти вертикальных и пяти горизонтальных прокатных клетей, каждая из которых включает редукторную и валковую кассеты. Крутящий момент электродвигателей передается соответственно вертикальным и горизонтальным кассетам через трансмиссионные валы.

Для расчета собственных и вынужденных колебаний и моментов сил упругости в различных участках линия привода блока представлена в виде разветвленной системы дискретных масс, связанных упруго–диссипативными элементами (рис.6). Возможное проявление зазоров в зубчатых соединениях и муфтах описывается заданием нелинейных (кусочно–линейных) жесткостных характеристик соответствующих связей.

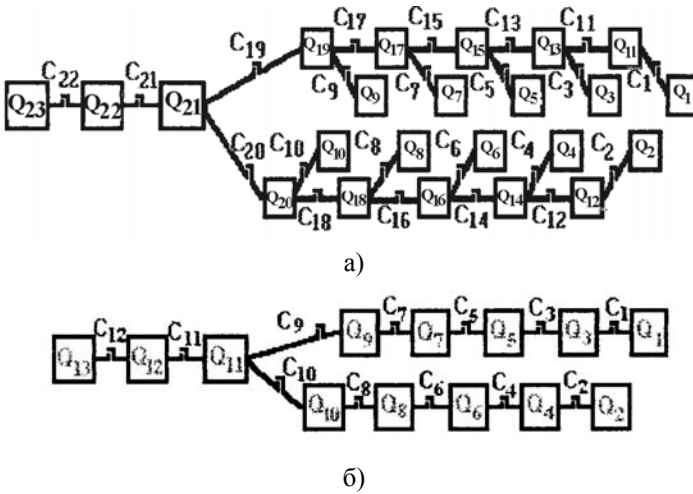


Рис. 6. Варианты расчетных схем линии привода блока: а – полная, б – упрощенная

Математическое описание модели представлено уравнениями в форме С.Н. Кожевникова совместно с уравнениями электропривода. Модель блока идентифицирована по закономерности изменения моментов сил упругости в линиях реальных блоков, измеренных в промышленных условиях, в частности, по низкой собственной частоте линии, проявляющейся при нестационарных режимах движения (при захвате металла, разгоне, торможении привода) и коэффициенту динамичности. Широкие функциональные возможности модели позволили определить: диапазон резонансных скоростей, когда наступает совпадение частот собственных колебаний с частотой вращения линии привода; максимальные динамические

нагрузки на участках трансмиссионных валов между четными и нечетными клетями; нагрузку редукторных касет каждой прокатной клетки в блоке. Зависимость динамических нагрузок в упругих связях от режимов работы (прокатки) блока, в частности, от скорости прокатки и от конструктивных параметров (жесткостей, моментов инерции, размеров валов).

На базе моделей обоснованы, разработаны и реализованы следующие технические предложения: по увеличению скорости прокатки в чистовых блоках стана 150 БМК (без изменения конструкции и состава оборудования); по уменьшению уровня динамических нагрузок в линии привода и также повышению скорости прокатки в блоках стана 150 ЧерМК (с изменением конструкции редуктора и заменой двигателей). Динамическая модель блока передана в рамках контракта машиностроительному комбинату СКЭТ, Германия для выбора оптимальных (по критерию «минимизация уровня динамики») параметров оборудования при разработке новых конструкций блоков.

*9. Диагностическая модель.* Модели для исследования динамических процессов и нагрузок одновременно представляют собой и диагностические модели, которые привлечены для того, чтобы параметры переходных процессов использовать в целях определения технического состояния оборудования. При этом на первый план выступает потребность определения угловых зазоров в сочленениях линии привода, которые характеризуют ТС оборудования. Зазоры в шпиндельном сочленении  $\delta_{ш}$  (на участке 23, см. рис.2) и зубчатом зацеплении редуктора  $\delta_{м}$  (на моторном участке) при большом износе вносят наибольший вклад в формирование ударных нагрузок.

Исследованиями на модели установлены зависимости информативных признаков – коэффициента динамичности и времени запаздывания реакции участков линии от угловых зазоров. На этом основании разработан ряд методов диагностирования [24].

Следует отметить, что в последнее время появились публикации о моделировании динамических процессов, в которых приводятся результаты, не подтвержденные опытными данными и не соответствующие общеизвестным проверенным экспериментально положениям [25,26)]. Не уделяется должного внимания идентификации моделей. Например, в работе [25] авторы, моделируя 17–массовую линию привода, учитывают открытое состояние угловых зазоров к моменту захвата полосы одновременно во всех упругих связях, в то же время размыкание зазора возможно только в шпиндельном сочленении ввиду специфики его конструкции и кинематики работы. Автор работы ставит [26] задачу оптимизации угловых зазоров по участкам линии привода, ошибочно полагая, что величину зазоров можно подобрать (расставить) таким образом, чтобы ударные нагрузки были наименьшими. Подобные публикации приводят к заблуждениям и при всем желании авторов не достигается цель углубленного изучения динамических процессов и установления количественных зависимостей.

### **Заключение.**

Разработка расчетных схем и исследования с помощью моделей динамических процессов в электромеханических системах приводов с нелинейными упругими связями и комплексов привод – валковая система – подшипники и клеть прокатного стана, выполненных в течение 50 лет, всегда опирались на результаты промышленных натуральных экспериментов, включающих измерение нагрузок, частот колебаний, характеристики внешних нагрузок, интенсивность рассеяния энергии колебаний, величину характерных и максимальных зазоров, реакцию электропривода на нагружение и колебания линии привода. Проведение экспериментальных исследований на промышленных агрегатах весьма трудоемко и не всегда позволяет охватить весь диапазон изменения внешних нагрузок, величин зазоров и их изменение во времени, прокатку различных типоразмеров и других особенностей работы оборудования.

В настоящее время приводы и другие детали прокатных станов оснащаются современными датчиками измерения усилий, деформаций и нагрузок. Эти датчики объединяются в систему диагностики режимов работы и технического состояния оборудования. Автоматизированная обработка информации системы датчиков позволяет сохранять и анализировать изменения измеряемых параметров, оценивать влияние режимов работы, изменение во времени режимов работы состояния оборудования и величин нагрузок и зазоров в приводе и деталях оборудования прокатных станов. Использование такой информации позволяет организовать проведение ремонтов по фактическому изменению состояния оборудования, создавать обоснованные модели для исследования динамики процессов, разрабатывать обоснованные рекомендации по совершенствованию и выбору рациональных режимов работы оборудования, сделать новый шаг в исследовании динамики металлургических машин.

1. *Большаков В.И.* Исследование динамических нагрузок металлургических машин / В.И.Большаков // Защита металлургического оборудования от поломок. – Мариуполь, ПГТУ. 1999. – № 4. – С.6–14.
2. *Большаков В.И.* Методика исследования динамики приводов металлургических машин / В.И.Большаков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 3. – С.72–78.
3. *Кожевников С.Н.* Динамика машин с упругими звеньями / С.Н. Кожевников – Киев: Изд-во АН УССР, 1961. –160 с.
4. *Кожевников С.Н.* Исследование работы главной линии пилигримового стана на электронной модели / С.Н.Кожевников, А.В.Праздников, А.Н.Ленский, В.И.Большаков // «Механизация и автоматизация металлургического оборудования». Труды ИЧМ, т.XVI, Киев: АН УССР, 1962. – С.88–105.
5. *Кожевников С.Н.* Исследование динамики приводной линии вертикальных валков слябинга / С.Н.Кожевников, В.И.Большаков // «Модернизация и авто-

- матизация металлургического оборудования». Труды ИЧМ. – Т. XIX. – М.: Металлургия, 1965. – С.72–78.
6. *Кожевников С.Н.* Исследование на электронной модели динамики электромеханической системы привода уширительного стана / С.Н.Кожевников, В.И.Большаков // «Теория механизмов и машин». – Межведомственный сборник. – Изд. ХГУ. – Вып. 1. – 1966. –С.10–18.
  7. *Кожевников С.Н.* Взаимодействие упругих механических систем станины и привода машины при нагружении / С.Н.Кожевников, В.И.Большаков // В сб. «Теория механизмов и машин». – Вып. 10. – Харьков: ХГУ, 1970. – С.3–8.
  8. *Большаков В.И.* О математическом описании и некоторых особенностях работы замкнутых механических систем. // «Динамика металлургических машин». Труды ИЧМ. – Т. XXXI. – М.: Металлургия, 1969. – С.13–17.
  9. *Кожевников С.Н.* Взаимодействие упругих механических систем станины и привода машины при нагружении / С.Н.Кожевников, В.И.Большаков // Теория механизмов и машин. – 1971. – Вып. 10. – С. 3–8.
  10. *В.И.Большаков.* Влияние подшипников жидкостного трения на момент сопротивления при прокатке листа / В.И.Большаков, С.И.Большакова // Тез.докладов Второй всесоюзной конференции по прочности металлургических машин. – Жданов, 1969. – С.6–7.
  11. *Веренев В.В.* Исследование динамики главных линий непрерывных широкополосных станов горячей прокатки и влияния динамических процессов на продольную разнотолщинность полос: автореферат дис. на соискание научной степени канд. техн. наук: спец. 05.04.04 «Машины и агрегаты металлургического производства» / В.В. Веренев – Днепропетровск. ИЧМ. 1975. – 20 с.
  12. *Большаков В.И.* Исследование нелинейных электромеханических систем приводов прокатных станов с упругими связями на электронных моделях. Автореферат дис...канд. техн. наук.– Днепропетровск. ИЧМ. – 1966.– 18 с.
  13. *Большаков В.И.* Переходные процессы в электро– гидромеханических системах металлургических машин / В.И.Большаков, В.Е.Злобинский, Б.А.Харлан и др. – Днепропетровск. – 2002. – 324 с.
  14. *Веренев В.В.* Влияние технологических параметров на динамические нагрузки в прокатной клети. // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ, ДДМА. – 2003. – С.141–145.
  15. *Веренев В.В.* Влияние скорости захвата полосы на динамические нагрузки в линии привода прокатной клети / В.В.Веренев, В.И.Большаков, Н.И.Подобедов // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб.научн.тр.ИЧМ. – 2007. – № 14. – С.260–266.
  16. *Веренев В.В.* Влияние особенностей изменения момента технологического сопротивления на динамику главных приводных линий чистовых клетей / В.В.Веренев, В.И.Большаков, Н.И.Подобедов // «Защита металлургических машин от поломок». ПГТУ. – 1998. – № 3. – С.35–39.
  17. *Большаков В.И.* Применение электронной модели для выбора рациональных режимов работы слябинга. // «Прокатное производство». Труды ИЧМ. – Т. XXII. – М.: Металлургия, 1967. –С.328–332.
  18. *Кожевников С.Н.* Некоторые вопросы определения динамических нагрузок и выносливости главных линий прокатных станов / С.Н.Кожевников, В.И.Большаков // «Модернизация и автоматизация оборудования прокатных станов». Труды ИЧМ. – Т. XXVII. – М.: Металлургия, 1967. – С.11–17.

19. *Веренев В.В.* Закономерности изменения коэффициента динамичности в линии привода прокатной клети в процессе её эксплуатации. // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб. научн. тр. ИЧМ. – 2005. – № 10. – С.292–299.
20. *Веренев В.В.* Инженерная методика выбора оптимальных конструктивных параметров линии привода прокатного стана. // Сб. научн. тр. Национальной горной академии. Дн–ск. Навчальна книга. – 2002. – № 143. – Том 3. – С.9–12.
21. *Путноки А.Ю.* Модель динамического взаимодействия смежных клетей широкополосного стана при непрерывной прокатке / А.Ю.Путноки, В.В.Веренев // Металл и литье Украины. – 2002. – № 11. – С. 26–30.
22. *Веренев В.В.* Моделирование взаимодействия черновых клетей стана 1680 через полосу/ В.В.Веренев, А.Ю.Путноки, Н.И.Подобедов, О.М.Клевцов // Защита металлургического оборудования от поломок. Мариуполь. ПГТУ. – 2003. – № 7. – С.17–21.
23. *Веренев В.В.* Влияние динамического взаимодействия чистовых клетей ШПС на продольную разнотолщинность / В.В.Веренев, Н.И.Подобедов, А.Ю.Путноки, С.В.Мацко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Краматорськ. ДДМА. – 2006. –С. 129–132.
24. *Веренев В.В.* Диагностика и динамика прокатных станов. – Днепропетровск. ИМА–пресс, 2007. – 144 с.
25. *Мазур И.П.* Влияние зазоров на динамические характеристики главных линий клетей черновой группы НШС ГП / И.П.Мазур, В.В.Барышев, А.В.Бокуров, К.Ю.Ченцов. // Вибрация машин. Измерение, снижение, защита. – 2005. – Вып.1. – С. 69–73.
26. *Плахтин В.Д.* Оптимизация зазоров в соединениях звеньев трансмиссии привода прокатных валков. // Сталь. –1997. – № 8. – С.37–41.

*Статья рекомендована к печати:  
заместитель ответственного редактора  
раздела «Прокатное производство»  
канд.техн.наук, И.Ю.Приходько*

### ***В.В.Веренев, В.І.Большаков, О.М.Юнаков***

#### **Моделі динамічних процесів у прокатних станах**

Метою роботи є вдосконалення моделей динамічних процесів у прокатних станах з урахуванням нелінійності пружних зв'язків. Представлено розроблені в Інституті чорної металургії декілька базових моделей перехідних процесів залежно від вирішуваної задачі. Приведено систематизацію комп'ютерних моделей, що використовуються для дослідження динамічних процесів у головних лініях і клітках прокатних станів. На базі моделей обґрунтовано, розроблено і успішно реалізовано технічні пропозиції щодо збільшення швидкості прокатування і поліпшенню технічних характеристик прокатних станів.