

*Посвящается 110-летию со дня рождения  
чл.-корр. АН УССР, проф., д.т.н. Сергея Николаевича Кожевникова,*

**В. И. Большаков, К. П. Лопатенко, А. М. Юнаков, А. А. Чернышев**

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЧИСТОВОГО ПРОКАТНОГО БЛОКА ПРОВОЛОЧНОГО СТАНА**

*Институт черной металлургии им З. И. Некрасова НАН Украины*

Целью работы является разработка математического и программного обеспечения для исследования переходных процессов, возникающих при управлении чистовым блоком стана прокатного стана 150. Изучались перемещения, скорости, ускорения и крутящие моменты в различных связях чистового блока. Для оценки интегральных характеристик нагруженности блока использован конечномерный механический аналог в виде разветвленной системы дискретных масс, связанных упруго-диссипативными элементами (линейный механический аналог). Расчетные схемы блока включают двигатели, распределительный редуктор, два трансмиссионных вала для прокатных валков горизонтальных и вертикальных клетей блока. Математическая модель для анализа частот колебаний блока представлена системой линейных дифференциальных уравнений второго порядка. Приведены уравнения изменения тока привода в цепи якоря двигателя и в цепи возбуждения, уравнения движения якоря (ротора) электродвигателя, уравнения для определения момента двигателя. Для численного интегрирования уравнений движения применяется метод Рунге-Кутты-Фельберга 4-5 порядка с автоматическим выбором величины шага интегрирования. По результатам исследований стана 150 установлен диапазон скоростей прокатки вне резонансных зон и обоснована возможность увеличения скорости прокатки на 10%. Анализ частот, уровня и характера динамических нагрузок позволил разработать техническое решение, обеспечивающее снижение динамики линии привода путем изменения передаточного числа редуктора. Исследование динамики прокатного блока первого на Украине высокоскоростного двухниточного проволочного стана 150, введенного в эксплуатацию на Макеевском металлургическом комбинате, позволило дать объективную оценку оптимальности конструктивных параметров его оборудования, надежности и гарантированного ресурса.

**Ключевые слова:** прокатный стан 150, чистовой блок, переходные процессы, математическая модель, исследование,

**Введение.** Исследование динамики современных проволочных станов на сегодняшней территории СНГ начаты при вводе в эксплуатацию, освоении и совершенствовании первого стана 150 нового типа на Белорецком металлургическом комбинате. Основное принципиальное отличие этого стана от традиционных проволочных станов старого типа – чистовые группы клетей выполнены в виде прокатных блоков.

Для успешного освоения стана Института черной металлургии (ИЧМ) было поручено разработать и освоить технологию производства катанки широкого марочного сортамента, исследовать и оптимизировать режимы работы оборудования, установить и использовать его резервы. В связи с этим проведен ряд комплексных исследований технологии и оборудования. По методологии С. Н. Кожевникова [1] проведены теоретические и промышленные исследования динамических и статических нагрузок в главных линиях прокатных клетей стана, в том числе впервые проведены промышленные исследования динамических нагрузок в трансмиссии привода горизонтальных и вертикальных клетей прокатного блока.

Результаты промышленных, лабораторных и теоретических исследований, этапов разработки и реализации технологии и оптимальных режимов работы оборудования представлены в многочисленных публикациях, основными из которых являются [2-7].

В связи с мировой тенденцией повышения скорости прокатки до 120-150 м/с машиностроительный комбинат СКЭТ (Германия), как разработчик и поставщик проволочных станов, заказал ИЧМ в рамках контракта выполнить разработку динамической модели прокатного блока для оценки нагрузок в линии его привода в составе действующих станов и выбора конструктивных параметров проектируемых блоков, оптимальных по критерию «минимизация динамики переходных процессов».

**Цель.** Разработка математического и программного обеспечения для: определения собственных частот колебаний механической системы, состоящей из привода, трансмиссии и собственно прокатных клетей;

исследования переходных процессов, возникающих при управлении двигателями, захвате и выбросе полосы блоком;

оценки влияния конструктивных параметров системы на величину и характер динамических нагрузок в линии привода чистового прокатного блока проволочного стана.

**Изложение основных результатов исследования. Математическое моделирование.** Чистовой прокатный блок стана 150 состоит из общего распределительного редуктора и двух соосно-расположенных электродвигателей главного привода, пяти вертикальных и пяти горизонтальных прокатных клетей, каждая из которых включает в себя редукторную и валковую кассеты. Крутящий момент электродвигателей через распределительный редуктор передается на приводные валы горизонтальных и вертикальных рабочих клетей. При подаче питающего напряжения на якорь двигателя начинается переходной процесс, связанный с вращением валов и кассет блока. До момента выхода электромеханической системы на установившийся уровень частоты вращения (холостой ход) происходит разгон блока. Предусмотрено, что управление приводом в процессе прокатки может осуществляться путем

изменения напряжения на двигателе по любому заданному графику. Режим захвата полосы характеризует динамику блока с момента начала захвата полосы первой чистовой клетью и до установившегося процесса прокатки. При захвате полосы блоком происходит последовательное заполнение прокатных клетей металлом. В процессе нагружения происходит выборка и закрытие (раскрытие) зазоров в упругих связях, в том числе и в зубчатых передачах. Нагрузки в связях привода могут фиксироваться как при разгоне (торможении), так и при установившемся процессе прокатки. Режим выброса полосы блоком начинается с момента выхода металла из первой клетки и заканчивается выходом блока на установившийся режим холостого хода после выброса металла из последней клетки блока. Описанный цикл нагружения блока может многократно повторяться. При нормальной работе блока после выполнения намеченного количества циклов прокатки происходит снятие напряжения на якоре двигателя и остановка блока. Колебания момента сил упругости в линии привода на этом участке его работы характеризуют режим торможения.

Для оценки интегральных характеристик нагруженности (перемещения, скорости, ускорения и крутящие моменты в различных связях блока) его несущих элементов использован конечномерный механический аналог в виде разветвленной системы дискретных масс, связанных упруго-диссипативными элементами (линейный механический аналог). Возможное проявление зазоров в зубчатых соединениях и муфтах воспроизводится заданием нелинейных (кусочно-линейных) жесткостных характеристик соответствующих связей (нелинейный механический аналог).

В зависимости от необходимой степени детализации линия привода блока может быть исследована в виде одной из расчетных схем. Каждая из расчетных схем состоит из рядной части, включающей двигателя и распределительный редуктор, а также разветвленной, представляющей два трансмиссионных вала, посредством которых момент двигателей передается прокатным валкам горизонтальных и вертикальных клетей блока. Наиболее простая (пяти массовая) расчетная схема содержит две приведенные массы редукторных и рабочих каскет соответственно горизонтальных и вертикальных клетей. Более сложная схема (13 масс) включает приведенные массы редукторных и рабочих каскет всех десяти клетей блока в отдельности. В расчетной схеме с наибольшей детализацией линии привода валков блока (23 массы) выделены отдельно массы редукторных и рабочих каскет.

Математическая модель для анализа собственных частот колебаний блока, представляет собой систему обыкновенных линейных дифференциальных уравнений второго порядка

$$[Q]\ddot{\varphi} + [C]\dot{\varphi} = 0, \quad (1)$$

где  $[Q]$  – матрица моментов инерции механической системы;  $[C]$  – матрица жесткости механической системы;  $\varphi$  – вектор угловых перемещений системы.

При определении собственных частот механической системы применяется численный метод Якоби для действительных симметрических матриц.

Математическая модель, описывающая динамику блока при указанных режимах движения, представляет собой систему обыкновенных линейных или нелинейных (в зависимости от рассматриваемой механической аналогии) дифференциальных уравнений второго порядка

$$[Q]\ddot{\varphi} + [H]\dot{\varphi} + [C]\varphi = F(t), \quad (2)$$

где  $[H]$  – матрица коэффициентов демпфирования в связях между дискретными массами;  $F(t)$  – вектор нестационарных внешних воздействий, характеризующих заданные крутящие моменты прокатки, трения, а также моменты, передающиеся со стороны привода;  $t$  – время.

Уравнения изменения тока привода в цепи якоря двигателя и в цепи возбуждения имеют вид

$$L\dot{I} = U(t) - RI - C_E I_B \omega, \quad L_B \dot{I}_B = U_B(t) - R_B I_B, \quad (3)$$

где  $L, L_B$  – индуктивности соответственно в цепи якоря двигателя и в цепи возбуждения;  $I, I_B$  – ток соответственно в цепи якоря двигателя и в цепи возбуждения;  $U, U_B$  – напряжение соответственно в цепи якоря двигателя и в цепи возбуждения;  $R, R_B$  – активное сопротивление соответственно в цепи якоря двигателя и в цепи возбуждения;  $C_E$  – постоянная двигателя, определяемая в соответствии с его паспортными данными;  $\omega$  – угловая скорость вращения двигателя.

Уравнение движения якоря (ротора) электродвигателя представлено в виде

$$J\dot{\omega} = M_D - M_R, \quad (4)$$

где  $J$  – приведенный момент инерции двигателя;  $\omega$  – угловая скорость вращения двигателя;  $M_D, M_R$  – приведенные величины момента двигателя и момента сопротивления (момента в упругой связи).

В случае применения в приводе асинхронного двигателя с регулируемой частотой питания момент двигателя определяется по формуле

$$M_D = M_N (\omega_y - \omega_1) / (\omega_0 - \omega_n), \quad \omega_y = 2\pi f / p, \quad (5)$$

где  $M_N$  – номинальный момент двигателя при номинальной (паспортной) частоте питания;  $\omega_0, \omega_n$  – синхронная и номинальная угловые скорости вращения ротора при номинальной частоте питания, рад/с;  $\omega_y, \omega_1$  – синхронная скорость вращения ротора при заданной частоте питания и фактическая скорость вращения, получаемая в результате решения предыдущего уравнения,  $f$  – заданная частота питания;  $p$  – число пар полюсов электродвигателя.

Момент в упруго-диссипативной связи с зазором имеет вид

$$M = \begin{cases} 0, & 0 \leq \varphi \leq d, \\ c(\varphi - d) + h\dot{\varphi}, & \varphi > d, \\ c\varphi + h\dot{\varphi}, & \varphi < d, \end{cases} \quad (6)$$

где  $c$  – элемент матрицы жесткости системы;  $h$  – элемент матрицы демпфирования;  $d$  – приведенный зазор в связи.

Начальное значение угла поворота вычисляется по формуле

$$\varphi_0 = d d_0, \quad 0 < d_0 < 1, \quad (7)$$

где  $d_0$  – параметр, характеризующий величину раскрытия зазора в соединении ( $d_0 = 0$  – соответствует закрытому зазору,  $d_0 = 1$  – полностью раскрытому зазору).

Для численного интегрирования уравнений движения применяется метод Рунге-Кутты-Фельберга 4-5 порядка с автоматическим выбором величины шага интегрирования.

**Программное обеспечение.** Для численной реализации описанных математических моделей разработана программа «Блок», которая позволяет решать следующие задачи.

1. Расчет собственных частот колебаний механической системы, состоящей из привода, трансмиссии и прокатных чистовых клетей.

2. Расчет статических нагрузок при прокатке металла в установившемся режиме (после затухания колебаний момента в трансмиссии блока).

3. Расчет динамических нагрузок (крутящих моментов) в связях между элементами блока при следующих нестационарных процессах:

прокатка металла блоком в установившемся режиме (после затухания колебаний); захват полосы блоком; выброс полосы блоком; управление главным приводом блока (разгон, торможение).

Предусмотрено введение электромеханических характеристик электродвигателей и воспроизведение внешнего воздействия на них путем изменения напряжения питания в контурах якорной цепи двигателя и

цепи возбуждения, а также при изменении частоты питающего напряжения. Реализуется возможность исследования блока с двигателями постоянного тока или асинхронными.

Расчет динамических нагрузок в упругих связях привода и других элементов блока может быть проведен путем использования линейного механического аналога в виде системы дискретных масс с упруго-диссипативными связями или нелинейного механического аналога, обусловленного учетом зазоров в связях. Программа позволяет проводить сравнительную оценку нагрузок в упругих связях блока при изменениях:

распределения нагрузок между клетями;

величин зазоров;

параметров линии привода и ее деталей.

Программа «Блок» имеет графическую оболочку, позволяющую осуществить удобную предпроцессорную обработку входной информации и постпроцессорную обработку и сравнительный анализ результатов расчетов собственных частот колебаний и динамики проволочного блока. При работе программы предполагается ее взаимодействие с пакетом MS Office Excel-97. Программа-оболочка написана на языке MS Visual Basic 6.0 в среде WINDOWS NT 4.0 или WINDOWS 98 для IBM совместимых компьютеров.

Посредством представленного математического и программного обеспечения были исследованы динамические процессы в линиях приводов первых на предприятиях СНГ прокатных блоков проволочных станов 150 Белорецкого и Череповецкого меткомбинатов. По результатам исследований на первом из указанных станов был установлен диапазон скоростей прокатки вне резонансных зон и тем самым обоснована возможность увеличения скорости прокатки на 10%. Применительно ко второму стану, анализ частот, уровня и характера динамических нагрузок позволил разработать техническое решение (изменение передаточного числа редуктора), обеспечивающее снижение динамики линии привода.

Исследование динамики прокатного блока первого на Украине высокоскоростного двухниточного проволочного стана 150, введенного в эксплуатацию на Макеевском металлургическом комбинате, позволило дать объективную оценку оптимальности конструктивных параметров его оборудования и, следовательно, надежности и гарантированного ресурса, что согласовывалось с официальным экспертным заключением специалистов института на базе аналитических оценок и результатов испытаний отдельных узлов блока и блока в сборе в условиях специальных стендов машиностроительного комбината, германского разработчика и поставщика оборудования современных проволочных станов.

**Выводы.** Разработано математическое и программное обеспечение, которое предназначено для решения задач определения динамических

нагрузок в связях трансмиссии при различных режимах работы, оценки влияния конструктивных параметров на величину и характер изменения нагрузок, а также выбора рациональных конструктивных параметров привода блоков прокатного стана с двигателями постоянного или переменного тока.

Из приведенных примеров практической реализации результатов исследований динамической модели блока следует, что ее использование эффективно как для анализа действующих, так и при проектировании новых прокатных блоков.

1. *Кожевников С.Н. Динамика машин с упругими звеньями* / С.Н. Кожевников – Киев: Изд-во АН УССР, 1961. – 160 с.
2. *Внедрение эффективной технологии высококачественной катанки* / Г. П. Борисенко, А. А. Горбанев, А. М. Юнаков // Ежегодник БСЭ.-М.: БСЭ, 1988. – С. 541 – 542.
3. *Большаков В. И. Исследования нагруженности оборудования при освоении, эксплуатации и развитии проволочного стана* / В. И. Большаков, А. М. Юнаков, Е. А. Евтеев // В сб. научн. трудов ИЧМ «ФППЧМ». – вып. 19. – 2009. – С. 325 – 345.
4. *Математическое моделирование процесса прокатки в чистовых блоках проволочных станов* / Г. П. Борисенко, А. А. Горбанев, Б. Н. Колосов и др. // Деп. Черметинформация, ЗД/2778. – № 5. – 1985. – 18 с.
5. *Оптимизация режимов прокатки в высокоскоростных чистовых блоках стана 150* / В. С. Емченко, А. М. Юнаков, Д. А. Деркач, А. А. Чернышев, О. В. Лихов // Сталь. 1985. №5 – С. 52 – 54.
6. *Юнаков А. М. Анализ статических и динамических нагрузок в линиях приводов прокатных клетей и резервов оборудования – база реконструкции проволочного стана* / А. М. Юнаков, А. А. Горбанев, Е. А. Евтеев // Производство проката. – 2002. – №9. – С. 22 – 26.
7. *Большаков В. И. Исследования динамики и диагностика прокатных блоков* / В.И.Большаков, А. М. Юнаков, Е. Л. Мамыкин, Е. А. Евтеев // Вибрация машин – измерение, снижение, защита. – 2011. – № 1. – С. 28 – 35.

***В. І. Большаков, К. П. Лопатенко, О. М. Юнаков, А. А. Чернышов***

**Математичне і програмне забезпечення для дослідження динаміки чистового прокатного блоку дротового стану**

Метою роботи є розробка математичного та програмного забезпечення для дослідження перехідних процесів, що виникають при управлінні чистовим блоком стану прокатного стану 150. Вивчалися переміщення, швидкості, прискорення і крутний момент в різних зв'язках чистового блоку. Для оцінки інтегральних характеристик навантаженості блоку використано лінійний механічний аналог у вигляді розгалуженої системи дискретних мас, пов'язаних пружно-дисипативними елементами. Розрахункові схеми блоку включають двигуни, розподільний редуктор, два трансмісійних вала для прокатних валків горизонтальних і вертикальних клітей блоку. Математична модель для аналізу частот коливань блоку представлена системою лінійних диференціальних рівнянь другого порядку.

*«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»,  
Сборник научных трудов ИЧМ. – 2018. - Вып.32*

Наведено рівняння зміни струму приводу в ланцюга якоря двигуна і в ланцюзі збудження, рівняння руху якоря (ротора) електродвигуна, рівняння для визначення моменту двигуна. Для чисельного інтегрування рівнянь руху застосовується метод Рунге-Кутта-Фельберга 4-5 порядку з автоматичним вибором величини кроку інтегрування. За результатами досліджень стану 150 встановлено діапазон швидкостей прокатування поза резонансних зон і обгрунтовано можливість збільшення швидкості прокатування на 10%. Аналіз частот, рівня і характеру динамічних навантажень дозволив розробити технічне рішення, що забезпечує зниження динаміки лінії приводу шляхом зміни передавального числа редуктора. Дослідження динаміки прокатного блоку першого на Україні високошвидкісного двоохниткового дрогового стану 150, введеного в експлуатацію на Макіївському металургійному комбінаті, дозволило дати об'єктивну оцінку оптимальності конструктивних параметрів його обладнання, надійності та гарантованого ресурсу.

Ключові слова: прокатний стан 150, чистової блок, перехідні процеси, математична модель, дослідження.

**V. I. Bolshakov**, K. P. Lopatenko, A. M. Yunakov, A. A. Chernyshev

#### **Mathematical and software for the study of the dynamics of the finished rolling mill block wire mill**

The aim of the work is the development of mathematical and software for the study of transients arising from the management of the finishing unit of the mill of the rolling mill 150. The movements, speeds, accelerations and torques in various connections of the finishing unit were studied. The linear mechanical analogue in the form of an extensive system of discrete masses connected by elastic-dissipative elements was used to estimate the integral characteristics of the block load. Block design calculations include engines, a distribution gearbox, two transmission shafts for rolling rolls of horizontal and vertical stands of the block. The mathematical model for analyzing the oscillation frequencies of a block is represented by a system of second-order linear differential equations. The equations for changing the drive current in the armature circuit of the motor and in the excitation circuit, equalizing the motion of the armature (rotor) of the electric motor, the equations for determining the motor torque are presented. According to the results of studies of the mill 150, the range of rolling speeds outside the resonant zones was established and the possibility of increasing the rolling speed by 10% was justified. Analysis of the frequencies, the level and nature of dynamic loads allowed us to develop a technical solution to reduce the dynamics of the drive line by changing the gear ratio of the gearbox. The study of the dynamics of the rolling unit of the first in Ukraine high-speed double-strand wire mill 150, put into operation at the Makeevka metallurgical combine, allowed an objective assessment of the optimality of the design parameters of its equipment, reliability and guaranteed life.

**Key words:** wire rolling mill 150, finishing block, transient processes, mathematical model, research.

*Статья поступила в редакцию сборника 01.11.2018 года, прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания редакционной коллегии сборника №1 от 26 декабря 2018 года)*

*Рецензенты: к.т.н.М.Б.Соболевская, д.т.н. С.А.Воробей, к.т.н. Н.И.Подобедов*

*«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»,  
Сборник научных трудов ИЧМ. – 2018. - Вып.32*