

## РАЗРАБОТКА МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ ГЛАВНОГО ПРИВОДА СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

К. В. Лицин<sup>1,2</sup>, А. А. Клименко<sup>2</sup>, Р. Н. Калинин<sup>2</sup>,  
И. А. Ореховский<sup>2</sup>, Д. Р. Азибаева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет  
(г. Челябинск, Россия),

<sup>2</sup> Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС»  
(г. Новотроицк, Россия)

Рассмотрена работа стана холодной прокатки труб АО «Синарский трубный завод». Предложено решение по модернизации главного привода стана путем образования четырех подсистем: главный привод, обеспечивающий движение основного механизма (клетки) во время прокатки труб; привод рабочей подачи заготовки на 15 – 30 мм при прохождении клетью крайних положений; привод поворота переднего патрона; привод поворота патрона стержня, который обеспечивает поворот заготовки на 30 град. Разработана мехатронная система, охватывающая каждую из подсистем и позволяющая осуществлять общее управление. Разработана и исследована математическая модель контура регулирования технологических координат привода. Разработанная мехатронная система позволит повысить производительность стана холодной прокатки и надёжность его работы при уменьшении влияния механических нагрузок.

**Ключевые слова:** мехатронная система, прокатный стан, преобразователь частоты, асинхронный двигатель.

Существующий электропривод стана холодной прокатки имеет сравнительно низкую степень автоматизации, что отражается на производительности и качестве конечного продукта [1 – 6].

Температура нагрева металла при ХП не приводит к преобразованию структуры [3, 4]. В процессе производства заготовка проходит через стан ХПТ для охлаждения и отвода избыточного тепла, а также для придания стенке необходимой толщины и уменьшения диаметра трубы (может прокатываться несколько раз в зависимости от требуемых размеров), после чего подается на волочильные станы (для придания конечных размеров).

При холодной прокатке имеет место ряд проблем с приводами стана. В частности, в статье [1] рассматривается проблема отсутствия позиционных приводов подачи-поворота трубы. Для решения предлагается использовать позиционные электроприводы, выполненные на базе вентильных двигателей. В качестве датчика можно использовать инкрементный импульсный датчик. В статье [2] представлена проблема завышенной установленной мощности силового оборудования. Решение данной проблемы возможно путем понижения среднеквадратичного тока в цепи якоря, если в замкнутой системе электропривода будет обеспечено ослабление механической части.

В настоящей работе рассмотрен стан ХПТ-55, который установлен в АО «Синарский трубный завод», и предлагается к внедрению мехатронная система с целью повышения эффективности работы для увеличения объемов выпуска и расширения сортамента продукции.

Для достижения поставленной цели решали следующие задачи:

анализ текущего состояния прокатного производства;

разработка системы автоматизации стана холодной прокатки;

разработка и исследование математической модели главного привода стана холодной прокатки.

Научная новизна исследования заключается в разработке и апробировании алгоритмов работы стана холодной прокатки. Сформулирован общий подход к способу повышения надежности и эффективности работы стана холодной прокатки путем внедрения автоматизированной системы управления.

**Описание системы.** Стан холодной прокатки ХПТ 55-3 имеет главный привод, кинематическая схема которого приведена на рис. 1. Основная проблема данного привода заключается в отсутствии мехатронной системы, позволяющей управлять им в автоматическом режиме, и устаревшем электрооборудовании [4]. В частности, электродвигатель не позволяет развивать скорость до 128 двойных ходов в минуту. С целью уменьшения скачков мощности в крайних мертвых точках и достижения необходимой мощности для повышения надежности за счет уменьшения механических элементов предлагается видоизменить кинематическую схему (рис. 2). Кроме того, предлагается заменить распределительно-подающий механизм, который выработал свой ресурс, четырьмя модулями: главный привод, привод рабочей подачи заготовки, привод поворота переднего патрона и привод поворота стержня. Это позволит увеличить ремонтпригодность стана и снизить нагрузку на главный привод.

**Система автоматического управления стана.** В настоящее время стан ХПТ 55 не оснащен системой автоматизации, вынуждая оператора выполнять набор необходимых действий вручную. На рис. 3 показана разработанная архитектура системы автоматизации.

НМИ-панель соединяется с программируемым логическим контроллером (ПЛК) при помощи про-

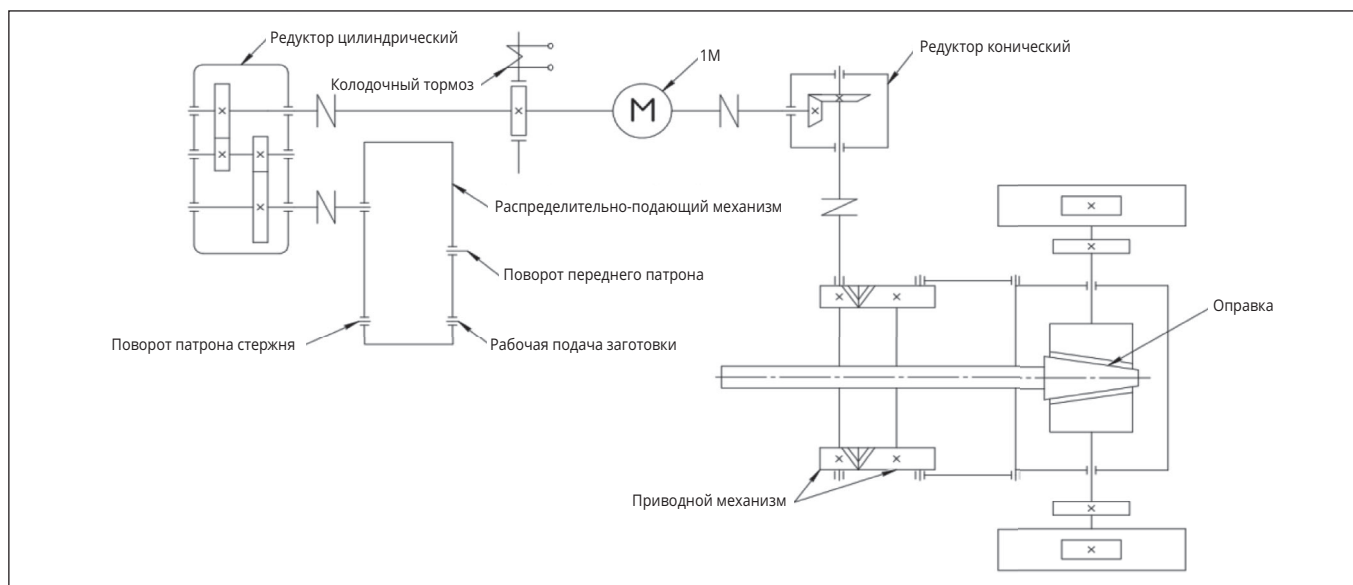


Рис. 1. Кинематическая схема главного привода стана ХПТ

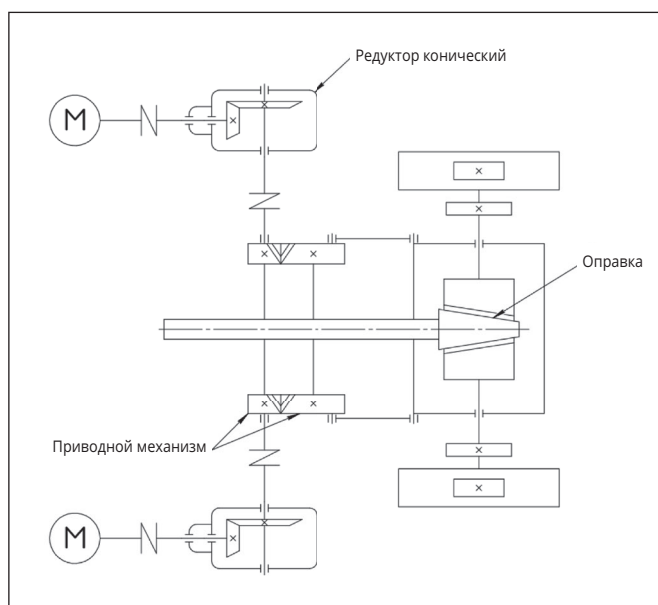


Рис. 2. Новая кинематическая схема главного привода

тока Profinet. ПЛК соединяется с частотно-регулируемым приводом (ЧРП) через протокол «Modbus RTU». Наряду с ПЛК и датчиками емкости, также с инкрементальными энкодерами и ЧРП, используется интерфейс RS-422.

В качестве панели выбрана операторская панель «КТР700 BASIC». Основное назначение операторских моделей компании Siemens Simatic HMI Basic Panel заключается в том, что благодаря программируемым клавишам и цветным сенсорным экранам возможно управление оборудованием. Работа устройств обеспечивается использованием таких сетей, как Profibus и Profinet/Ethernet, через интерфейсы RJ45, RS-485, RS-422. Через USB-порты обеспечивается подключение дополнительных устройств и оборудования [7].

Для данной системы автоматизации предлагается использовать ПЛК Siemens CPU 1215C. Также к данному процессору, являющемуся базовым, необходи-

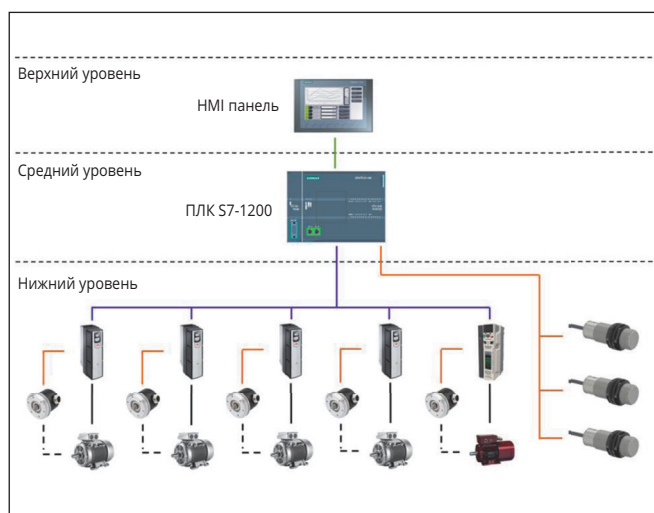


Рис. 3. Архитектура системы автоматизации

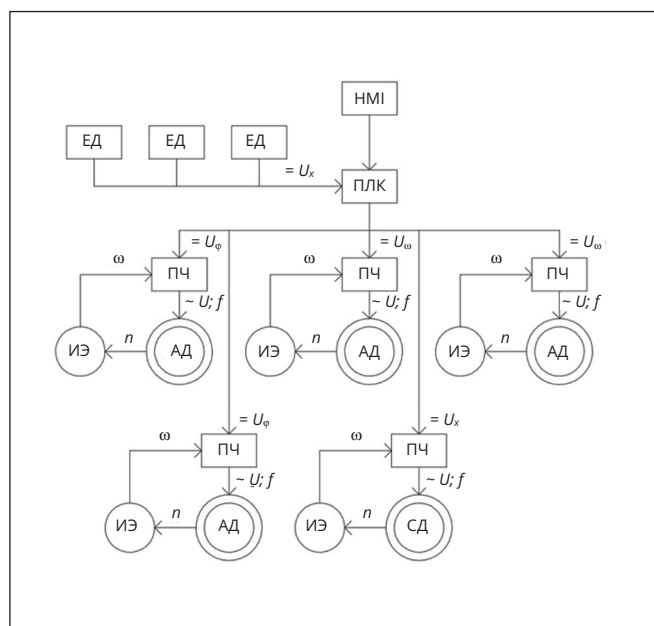


Рис. 4. Функциональная схема системы автоматизации

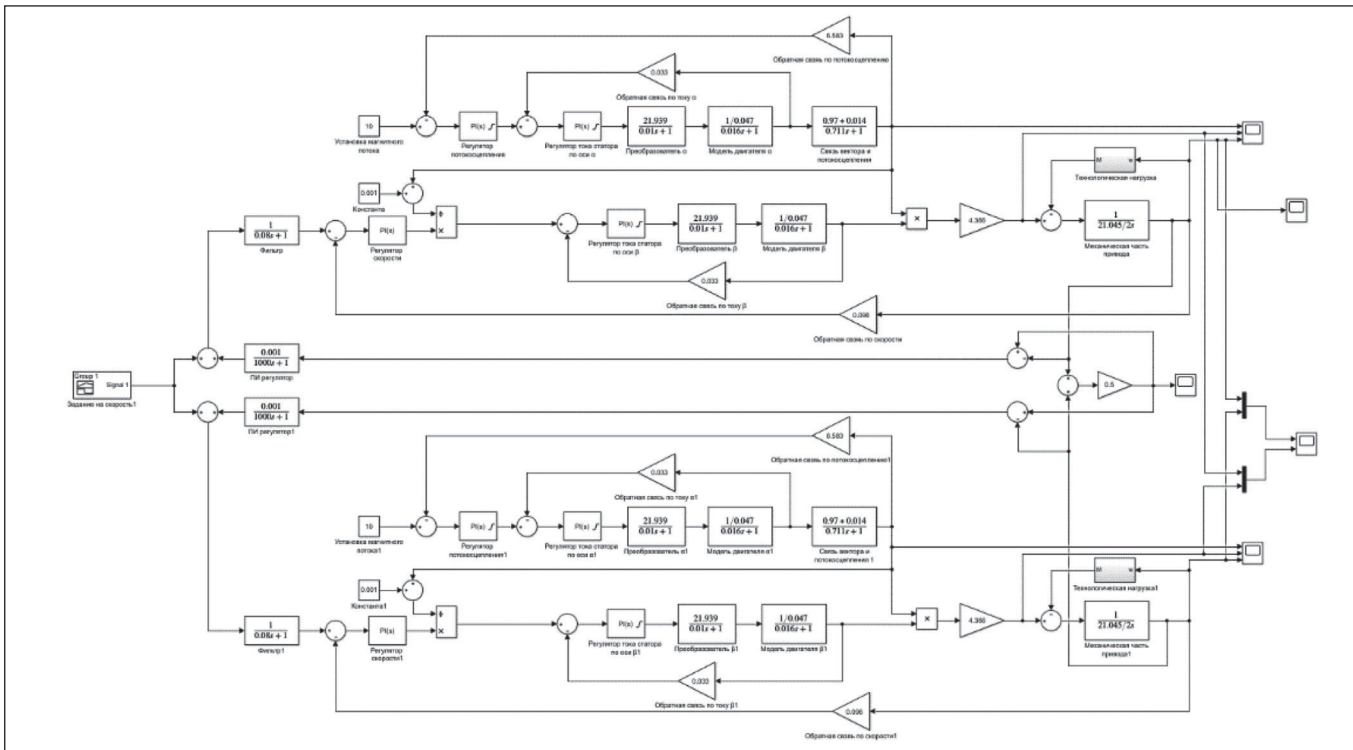


Рис. 5. Математическая модель контура регулирования технологических координат главного привода прокатного стана

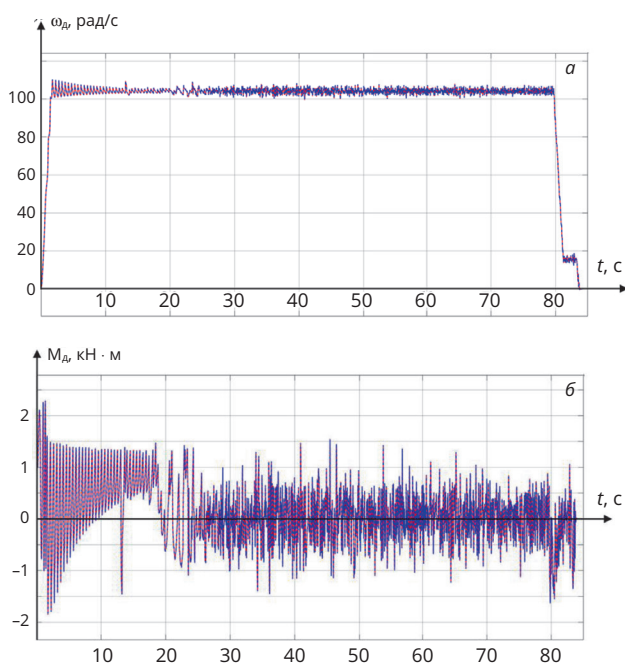


Рис. 6. Исследования разработанной модели контура регулирования технологических координат главного привода прокатного стана: а – тахограмма; б – нагрузочная диаграмма

мо добавить дополнительный модуль коммуникации CM 1241 6ES7 241-1CH32-0XB0. Датчик E2K-C25MF1 нужен для индикации положения (производитель – компания «Sensor365»). Обратная связь для асинхронных двигателей обеспечивается инкрементальными энкодерами производства «Sensor365».

В соответствии с выбранным оборудованием была разработана функциональная схема (рис. 4), позволяющая представить необходимые сигналы. Принцип

работы данной системы регулирования строится следующим образом: режим работы задается на панели НМІ. Далее с ПЛК на преобразователи частоты поступает сигнал управления:

двигатели главного привода – задание на скорость ( $=U\omega$ );

двигатели механизмов поворота – задание на угол поворота ( $=U\varphi$ );

двигатель привода подачи – задание на перемещение ( $=Ux$ ).

О достижении рабочей клетью среднего положения и положений, близких к крайним, оповещают емкостные датчики  $EM (=Ux)$ .

**Модель контура регулирования технологических координат.** Регулировать основные параметры двигателя, такие как скорость и момент главного привода, возможно разными методами, например векторным регулированием. Данный метод реализуем посредством замены асинхронного двигателя на эквивалентную схему замещения, в которой электромагнитная связь заменяется электрической [9 – 11].

Вращающаяся система координат используется для реализации управления приводом. В данной системе двигатель переменного тока можно использовать как двигатель постоянного тока с независимым возбуждением благодаря векторному математическому описанию. Это позволяет реализовать принцип подчиненного регулирования, согласно которому приводы переменного тока строятся на основе векторного управления и имеют возможность использования стандартных настроек контуров в них [12].

Электрическая часть модели электродвигателя разбита на два апериодических звена, расположенных по

осям  $\alpha$  и  $\beta$ , которые служат звеньями первого порядка. Для управления необходимо знать модуль вектора потокосцепления  $|\psi|$  и угловую скорость. Структурная схема, используемая для математического описания, представлена на рис. 5.

Главный привод системы состоит из двух двигателей, и для того, чтобы избежать рассинхронизации, необходимо использовать систему выравнивания скорости [13 – 15]. Чтобы устранить разницу в скоростях двигателей, необходимо применить устройство для демпфирования и корректировки. На входе регуляторов суммируются сигналы задания и ПИ-регуляторов, которые пропорциональны разнице скоростей двигателей, которые имеют одинаковое значение, но противоположный знак. Результаты исследования разработанной модели контура регулирования технологических координат главного привода прокатного стана представлены на рис. 6.

Максимальное отклонение разработанная система имеет при времени 1,77 с. Величина перерегулирования при этом равна 6,1 %. Значение момента не превышает 2,3 кН · м, что соответствует выбранному электродвигателю.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Низкая надежность и малая эффективность стана холодной прокатки потребовали модернизации и разработки новой системы. В ходе работы была разработана и исследована мехатронная система привода стана холодной прокатки труб цеха 2 АО «Синарский трубный завод». Для решения поставленной задачи был разработан проект по разделению привода стана прокатки на несколько приводов, независимых друг от друга, которые построены и работают по системам «ПЧ-СДПМ», «ПЧ-АД», а также предложено решение по модернизации кинематической схемы главного привода. Таким образом, разработанная система состоит из четырех подсистем: непосредственно главный привод приводит в движение основной рабочий орган – клетку; привод рабочей подачи заготовки осуществляет подачу заготовки от 15 до 30 мм в моменты достижения рабочей клеткой крайних положений; приводы поворота переднего патрона и патрона стержня осуществляют поворот на 30 град.

Реализация проекта на предприятии потребует капитальных затрат в размере 656550 руб., в результате чего в течение трех лет ожидаемая прибыль составит 3461530 руб., значение ставки дисконтирования – 25 %.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Боровик А.А. Многодвигательный электропривод стана холодной прокатки труб // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2010. Вып. 3. Ч. 2. С. 242 – 248.
2. Виноградов К.М., Белоусов Е.В., Сычев Д.А. и др. Способы повышения энергоэффективности электропривода стана холодной прокатки труб // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика» 2016. Т. 16. № 1. С. 42 – 46.
3. Litsin K.V., Belykh D.V. Development of Visualization System for Oxygen Supply Machine // Steel in Translation. 2022. Vol. 52. No. 10. P. 956 – 960.
4. Электроприводы и управление механизмами станов ХПТ «32, 55 и 90-3-5 и 8»: техническое описание 3-405895ТО. 1962.
5. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов : учеб. для вузов. 2-е изд., стер. – М. : ИЦ «Академия», 2006. – 304 с.
6. Дементьев Ю.Н., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Электрический привод : учеб. пособ. – Томск : ТПУ, 2010. – 232 с.
7. Гриншпун М.И., Соколовский В.И. Станы холодной прокатки труб: теория, расчет и конструирование. – М. : Машиностроение. 1967. – 241 с.
8. Litsin K.V., Morkovnik D.A. Development of Digital Twin of Slag Forming Mix Feeder on the Basis of Algorithm for Calculation of Temperature Difference of Metal and Slag // Steel in Translation. 2022. 52 (9). P. 869 – 873.
9. Tsukanov A.V. Litsin K.V., Baskov S.N. Development of a control system for an asynchronous electric motor based on an adaptive model in the conditions of sheet rolling production // Chernye Metally. 2022. No. 5. P. 34 – 39.
10. Мещеряков В.Н., Толчеев В.М. Математическая модель взаимосвязанных электромеханических систем клетей непрерывного стана холодной прокатки // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 1. С. 14 – 18.
11. Бройдо Б.С. Синтез систем автоматического управления непрерывными станами холодной прокатки. – М. : Металлургия, 1978. – 160 с.
12. Браун А.Е., Капустин В.Б., Корнеев В.А. и др. Разработки в области электропривода и автоматизации на станах холодной прокатки полосы // Автоматизированные системы и комплексы. 2019. № 5. С. 43 – 45.
13. Xin Z., Xu L., Jie S. et al. A Strategy for Optimal Control in 6-High Tandem Cold Rolling Mill : 37th Chinese Control Conference (CCC), Wuhan, China, 2018. P. 5089 – 5093.
14. Li Q.-H., Wang X., Zhou L. et al. Fixed-time Backstepping Control for the Speed System of Cold Strip Main Rolling Mill Based on Extended State Observers : 40th Chinese Control Conference (CCC), Shanghai, China, 2021. P. 540 – 545.
15. Остроухов В.В. Электропривод стана холодной прокатки труб : дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 2012. – 153 с.

Статья поступила 15.05.2023