

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ СПЕЦИАЛЬНЫХ СПЛАВОВ

**С.И. Малафеев, А.А. Малафеева (ВлГУ им. А.Г. и Н.Г. Столетовых),  
В.И. Коняшин (Компания «Объединенная Энергия»)**

*Рассмотрен мехатронный комплекс малотоннажного прокатного производства нихрома и других специальных сплавов, включающий клеть ТРИО-500 (черновая клеть) и многоклетевой стан ДУО-300. Приведено описание основных компонентов системы управления комплексом, обеспечивающих повышение эффективности и качества работы прокатного оборудования.*

*Ключевые слова: автоматизация, прокатный стан, мехатроника, электропривод, управление, моделирование.*

Современное малотоннажное прокатное производство прецизионных сплавов — уникальный автоматизированный комплекс, в состав которого входит множество машин и механизмов и систем автоматического управления [1, 2]. Для специальных сплавов процессы прокатки имеют специфические особенности и в каждом конкретном случае требуют индивидуального подхода, а также «гибкого» и перенастраиваемого прокатного оборудования [3, 4]. Для эффективного управления прокатным оборудованием требуются адекватные аналитические модели компонентов мехатронной системы прокатного станa и процессов при прокатке металлов, ориентированные на анализ и синтез регулирующих устройств и выполнение вычислительных процедур при компьютерном моделировании [5, 6].

Рассмотрим функциональную схему и основные компоненты АСУ прокатным производством нихрома и других сплавов, разработанных сотрудниками ООО Компания «Объединенная Энергия» (Москва).

Схема автоматизированной системы показана на рисунке. В состав технологического комплекса входят: приемный, рабочий, качающийся и индивидуальный рольганги, две методические печи и манипулятор со слиткодержателем, цепной транспортер, подъемно-качающийся стол, 100-тонные и летучие ножницы, прокатные станы ТРИО-500 и ДУО-300. Управление оборудованием осуществляется с помощью специального ПЛК, разработанного Компанией «Объединенная Энергия».

Методические печи обеспечивают нагрев сырья до необходимой температуры. Загрузка и выгрузка слитков из печей производится манипулятором с приводным асинхронным электродвигателем и двухступенчатым червячно-цилиндрическим редуктором с двухзаходной червячной и косозубой цилиндрической парами. Для управления двигателем используется преобразователь частоты фирмы «Веспер» Е2-8300-005Н. Система управления приводом манипулятора замкнута по положению. Предусмотрена возможность ручного вывода манипулятора из печи в аварийной ситуации. Управление работой методических печей осуществляется с местного пульта управления. Для контроля температуры слитков используются высокотемпературные пирометры AR892 с интерфейсом RS-232. Для подключения к общей сети использу-

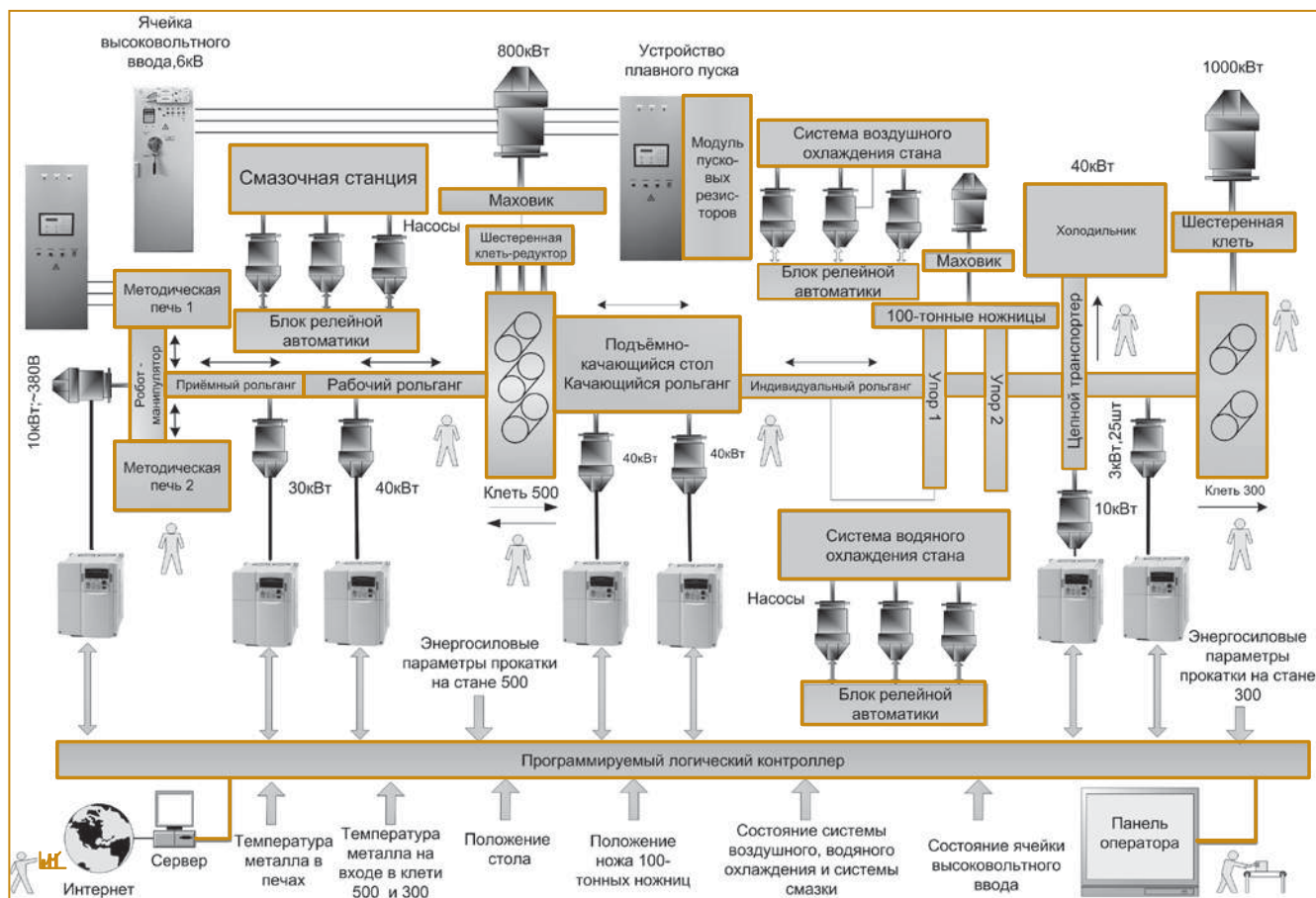
ются преобразователи RS-232/485. Передача данных о температуре слитков в печи в ПЛК производится по интерфейсу RS-485.

Приемный рольганг обеспечивает прием слитков из печи и их транспортировку на рабочий рольганг. В приводе рольганга используется асинхронный двигатель (11 кВт, 955 об./мин.) с двухступенчатым цилиндрическим редуктором (передаточное число 4,95). Угловая скорость рольганга регулируется с помощью преобразователя частоты фирмы Веспер Е2-8300-020Н. Для быстрого старта рольганга в преобразователе частоты применено скалярное управление с повышенным пусковым моментом.

Рабочий рольганг установлен между приемным рольгангом и клетью ТРИО-500 и предназначен для приема раската и подачи его в клеть. Привод рольганга — групповой; состоит из двигателя постоянного тока КПДН-5Ш (37 кВт, 220 В, 690 об./мин.) и цилиндрического двухступенчатого редуктора (передаточное число 3,78).

Качающийся рольганг на подъемно-качающемся столе и предназначен для подачи полосы в валки и отвода ее от клетки ТРИО-500. Вращательное движение от двигателя (КПДН-5Ш, 37 кВт, 220 В, 690 об./мин.) к валкам осуществляется через карданную передачу и редуктор (передаточное число 3,5). Подъемно-качающийся стол установлен за клетью ТРИО-500. Он предназначен для подачи проката в верхнюю пару валков клетки «ТРИО» — с задней стороны на переднюю и состоит из двигателя постоянного тока (КПДН-5Ш, 37 кВт, 220 В, 690 об./мин.), редуктора (передаточное число 20) с установленным командоаппаратом, гидротолкателя и механического тормоза. Система управления электроприводом замкнута по напряжению; в качестве датчика верхнего и нижнего положений стола применен командоаппарат: по сигналу «верхнее положение» или «нижнее положение» включается гидротолкатель, активирующий механический тормоз, а на аналоговый вход задания скорости подается нулевой сигнал.

Для управления электроприводами подъемно-качающегося стола, рабочего и качающегося рольгангов использованы тиристорные преобразователи Компании «Объединенная Энергия», обеспечивающие стабилизацию тока обмотки возбуждения двигателя, регулирование скорости вращения путем изменения



Структурная схема АСУ прокатным производством никхрома и других сплавов

напряжения на якорной обмотке с регулируемым ограничением тока и реверсирование двигателя изменением направления тока обмотки якоря [7].

Индивидуальный рольганг для транспортировки проката к клети ДУО-300 содержит 25 асинхронных двигателей АЗРФ-44/16 (3 кВт, 225 об./мин.) с управлением с помощью преобразователей частоты фирмы Веспер E2-8300-005Н. В преобразователях применено скалярное управление с повышенным пусковым моментом.

Цепной транспортер предназначен для транспортировки полос с рольганга в холодильник. Ведущие звездочки расположены на общем трансмиссионном валу, приводимом во вращение асинхронным двигателем через ременную передачу. В электроприводе цепного транспортера применен асинхронный электродвигатель МТ-31/6 (11 кВт, 950 об/мин), управляемый преобразователем частоты E2-8300-005 Н с векторным алгоритмом управления.

100-тонные ножницы кривошипного типа с нижним резом предназначены для раскроя полосы на равные длины. Максимальное число резов – 15 рез/мин, ход ножа – 150 мм. На участке ножниц установлены упоры для остановки проката. Подъем упоров – пневматический. Участок 100-тонных ножниц состоит из асинхронного двигателя АК-18 (20 кВт, 750 об./мин.), маховика, двух ножей (ось вращения ножей соединяется с осью маховика через электромагнитную муфту)

и двух упоров, управляемых пневмораспределителем. Алгоритм работы ножей и упоров реализован аппаратно и заключается в своевременной активации электромагнитной муфты и пневмораспределителей по сигналам с командоаппарата и датчика металла. Предусмотрена возможность работы 100-тонных ножниц в ручном режиме. В этом случае оператор самостоятельно контролирует момент реза. После окончания реза ножи возвращаются в исходное положение.

Клеть ТРИО-500 – основной элемент черновой линии прокатки. Приводной двигатель прокатного стана – асинхронная машина АKN-2-16-57-12 с фазным ротором (мощность 800 кВт, напряжение 6 кВ, номинальная частота 490 об./мин.). Ротор двигателя соединен с клетью с помощью редуктора с передаточным числом 4,08. В приводе использован накопитель механической энергии – маховик на валу двигателя с моментом инерции 10 тыс. кг·м<sup>2</sup>. Высоковольтная ячейка обеспечивает электропитание приводного двигателя напряжением ~6 кВ. Устройство оснащено микропроцессорным многофункциональным устройством защиты и электронным счетчиком расхода электроэнергии.

Для управления высоковольтным асинхронным двигателем с фазным ротором использовано специальная система «мягкого» пуска [7]. Управление приводным агрегатом прокатного стана ТРИО-500 осуществляется с операторской панели. Мехатрон-

ная система позволяет выбрать оптимальный режим пуска (номинальные значение пусковых резисторов, ток или время переключения ступеней), технологические параметры прокатки (температура и скорость прокатки, обжатие за проход); предусмотрена возможность передачи данных, собранных с датчиков, по сети Internet на удаленные серверы баз данных.

Стан ДУО-300 — основной элемент чистой линии, содержит пять клетей типа «ДУО» (многоклетевой стан) [8]. Электропривод стана ДУО-300 — постоянного тока с двигателем МП 1500/300 Р (1000 кВт, 330 об./мин.), тиристорным нереверсивным преобразователем электропитания якорной обмотки и реверсивным преобразователем электропитания обмотки возбуждения. Электропривод обеспечивает регулирование скорости вращения путем изменения напряжения на якорной обмотке с регулируемым ограничением тока: и переключаемой главной обратной связью: при больших значениях ошибки регулирования в главном контуре работает обратная связь по напряжению, а при маленькой — обратная связь по скорости. Для снижения динамических нагрузок и колебаний крутящего момента, обусловленных электромагнитной инерционностью приводного двигателя и наличием люфта в механической передаче и возникающих на начальном этапе прокатки, в контуре регулирования тока применен предиктивный пропорционально-интегральный регулятор [9]. Примененный способ коррекции обеспечивает снижение динамических нагрузок при прокатке более чем в 2 раза [10].

В приводе имеется UART-передатчик с гальванической развязкой, осуществляющий передачу измеренных мгновенных значений тока и напряжения на якорной обмотке электродвигателя в информационную систему. В подшипниках всех клетей стана ДУО-300, шестеренной клетки, а так же в приводном двигателе установлены датчики температуры, подключенные к модулю аналогового ввода, связанного с ПЛК по RS-485: при превышении температуры допустимого уровня происходит отключение двигателя путем обнуления сигнала задания.

Пуск стана ДУО-300, как и стана ТРИО-500, осуществляет оператор под надзором начальника смены нажатием на кнопку с ключ-биркой «Пуск». Контроллер формирует сигнал «Включить возбуждение», после чего через 4 с ПЛК формирует аналоговый сигнал задания скорости.

Управление оборудованием: рольгангами, подъемно-качающимся столом, транспортером и др., осуществляется ПЛК по интерфейсу RS-485.

ПЛК второго иерархического уровня автоматизированной системы выполняют следующие функции:

1. Проверка питания в силовых цепях и цепях управления (предусмотрены сухие контакты в локальных системах управления).

2. Перевод системы в режим «Готовность»: установка манипулятора печей и слиткодержателя в нулевое положение, остановка всех рольгангов (при-

емный, рабочий, качающийся, индивидуальный) и цепного транспортера, перевод ножей 100-тонных ножниц в нижнее положение, установка горизонтального положения подъемно-качающегося стола, блокировка включения электроприводов станов ТРИО-500 и ДУО-300, включение вспомогательных систем (водяного и воздушного охлаждения, смазки).

3. Разрешение на запуск электроприводов станов ТРИО-500 и ДУО-300.

4. Контроль состояния и проверка технологических блокировок в реальном времени:

— проверка уровня воды в системе водяного охлаждения (дискретный сигнал), давления в системе смазки (дискретный сигнал), питания в системе воздушного охлаждения (дискретный сигнал), температуры в контрольных точках станов ТРИО-500 и ДУО-300 (аналоговый сигнал);

— запрет обратного движения («Назад») приемного рольганга при работающем манипуляторе или поднятом слиткодержателе;

— запрет прямого движения («Вперед») рабочего рольганга при поднятом подъемно-качающемся столе;

— запрет движения («Вперед/Назад») качающегося рольганга при работающем подъемно-качающемся столе;

— запрет запуска качающегося и индивидуального рольгангов при поднятом ноже 100-тонных ножниц;

5. Инициализация системы: установка требуемых частот вращения рольгангов, электропривода стана ДУО-300 и летучих ножниц, скорости цепного транспортера

6. Мониторинг температуры слитков в методических печах, на входе в клетки ТРИО-500 и ДУО-300), а так же энергосиловых параметров прокатки на станах ТРИО-500 и ДУО-300.

7. Удаленное управление локальными системами.

8. Индикация состояния локальных систем.

В автоматизированной системе предусмотрено предварительное моделирование процесса прокатки на многоклетевом стане ДУО-300. Для этого используется разработанное специальное математическое описание процессов в мехатронной системе, основанное на использовании классических уравнений электромеханики, описывающих процессы в приводном двигателе, уравнениях электромагнитных процессов в системе электропитания, аналитических уравнений обработки информации в системе управления и уравнениях, описывающих деформационные процессы при прокатке [8]. При этом обеспечивается учет взаимосвязей процессов в электрической системе, электромеханическом преобразователе и деформируемом металле. Нагрузка привода в процессе прокатки вычисляется с использованием уравнений деформации металла в зависимости от угловой скорости валков, температуры слитка, характеристик прокатываемого металла и параметров стана. Для контроля процессов используется сформированная база данных, содержащая типовые образы процессов прокатки при

нормальном протекании процесса обработки металла и при различных отклонениях процесса от расчетных значений. При прокатке осуществляется регистрация тока приводного двигателя прокатного стана. На основании данных непрерывных измерений вычисляют коэффициент детерминации, то есть основной показатель, отражающий меру соответствия модельного и реального процессов, и выполняют сравнение реальной диаграммы с типовыми образами процессов. Результаты сравнения позволяют определить вероятную причину отклонения процесса прокатки от расчетного и оценить состояние и режимы технологического оборудования в зависимости от принадлежности полученной диаграммы тока в базе типовых образов к области нормальных, допустимых или не допустимых режимов. Компьютерная визуализация процесса прокатки обеспечивает возможность непрерывной субъективной оценки работы прокатного стана, в том числе, с использованием удаленного мониторинга.

Прокатное производство прецизионных сплавов организовано на Владимирском заводе прецизионных сплавов и точного литья. В настоящее время на реализованном мехатронном комплексе прокатного стана освоено производство нихрома Х20Н80, Х15Н60, никелевых сплавов, сплавов с заданным температурным коэффициентом линейного расширения и др.

Применение модели на предприятии позволило сократить объем экспериментальных работ, уменьшить затраты на подготовку производства и выполнять анализ причин отклонений технологического процесса от расчетных параметров.

#### Список литературы

1. Грудев А.П. Теория прокатки. М.: Металлургия. 1988. 240 с.
2. Flat-Rolled steel processes: advanced technologies, ed. Vladimir B. Ginzburg. CRC Press. Taylor & Francis Group, 2009, 372 p. ISBN 978-1-4200-7292-1.
3. Schausberger F., Steinboeck A., Kugi A. Feedback Control During the Rolling Pass // IEEE Transactions on Control Systems Technology. Vol. 26, Issue: 3, May 2018, pp. 842 - 856.
4. Веревев В.В., Большаков В.И., Юнаков А.М. Модели динамических процессов в прокатных станах // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. тр. Вып.19. Днепропетровск. 2009. С. 346 - 358.
5. Wang Q.Y., Zhu Y., Gao R.J., Zhao Y. "Theoretical Study of the Dynamic Effects Based on Work-Roll Model in Metal Sheet Rolling Process", Advanced Materials Research, Vols. 538-541, 2012, pp. 595-600.
6. Kim Y., Kim C., Lee S., Park H. "Dynamic Modeling and Numerical Analysis of a Cold Rolling Mill". — International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. Vol. 14, No. 3, March 2013. pp. 407 - 413.
7. Малафеев С.И., Коняшин В.И. Автоматизация приводного агрегата прокатного стана 500 // Автоматизация в промышленности. 2014. № 11. С. 51 - 53.
8. Малафеев С.И., Малафеева А.А., Коняшин В.И. Компьютерное моделирование процессов при прокатке металлов на стане 300 // Автоматизация в промышленности. 2013. № 7. С. 10 - 13.
9. Малафеев С.И., Малафеева А.А., Коняшин В.И. Коррекция в мехатронном комплексе прокатного стана для демпфирования колебаний // Вестник машиностроения. 2018. №3. С. 28- 31.
10. Малафеев С.И., Малафеева А.А., Коняшин В.И. Контроль процесса прокатки на многоклетьевом стане // Трибология - машиностроению. Сборник тр. конференции. Институт машиноведения им. А.А. Благонравова. М. Ижевск. Институт компьютерных исследований. 2018. С. 312 - 314.

**Малафеев Сергей Иванович** — д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник  
ООО Компания «Объединенная Энергия», проф. Владимирского государственного  
университета им. А. Г. и Н. Г. Столетовых,

**Малафеева Алевтина Анатольевна** — д-р техн. наук, проф. Владимирского государственного  
университета им. А. Г. и Н. Г. Столетовых,

**Коняшин Владимир Игоревич** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник  
ООО Компания «Объединенная Энергия».

Контактный телефон (495) 558-88-18.

E-mail: sim\_vl@nm.ru

#### ABB провела испытания дистанционного управления пассажирским паромом

В конце декабря 2018 г. компания АВВ и Городское транспортное предприятие г. Хельсинки провели испытание дистанционного управления паромом в столичном порту Финляндии. Передовые технологии, успешно протестированные на пассажирском пароме, могут быть установлены на судно любого типа.

Паром «Суоменлинна II» оснащен новой системой динамического позиционирования АВВ Ability™ Marine Pilot Control, а управление судном велось с берега из центра в Хельсинки.

Эти уникальные испытания очень важны для привлечения интереса и повышения доверия к судовым системам автоматизированного управления. Ожидается, что в ближайшие десятилетия решения по автономной работе изменят международное судоходство, так как отрасль оправилась от спада, вызванного финансовым кризисом 2008 г. Согласно данным Международной палаты судоходства, спрос на

морские перевозки в мире за последнее десятилетие вырос на 30 %, более 10 млрд т грузов транспортируется морем каждый год.

Обычно «Суоменлинна II» курсирует между Хельсинки и островной крепостью Суоменлинна (объект Всемирного наследия ЮНЕСКО).

При тестировании дистанционного управления паром отошел от причала на Рыночной площади г. Хельсинки (Кауппатори), и капитан, используя систему АВВ Ability™ Marine Pilot Control, с берега провёл судно по отведенному для испытаний участку в районе акватории порта Хельсинки.

Испытания провели в нерабочие часы, на удаленном от берега расстоянии, без пассажиров на борту и в отсутствие вблизи других судов. Судно и экипаж продолжают принимать участие в дальнейшей исследовательской работе.

[Http://www.abb.ru](http://www.abb.ru)