

A. Восканьянц

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПРОКАТКИ

Учебное пособие



МГТУ им. Н.Э.Баумана

**Москва
2010**

А.А. ВОСКАНЬЯНЦ

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПРОКАТКИ

*Учебное пособие по курсу «Управление в технических системах.
Часть 2. Управление процессами прокатки»
для студентов, обучающихся по специальности
«Металлургические машины и оборудование»*

МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА
МОСКВА 2010

УДК 65.011.56 : 621.771

Рецензенты: *A.A. Филатов, В.П. Ступников*

Восканьянц А.А.

Автоматизированное управление процессами прокатки: Учеб. пособие / А.А. Восканьянц; Московский гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2010. – 85 с.

Рассмотрены вопросы автоматизации металлургических машин и агрегатов на примере систем автоматизированного управления прокатными станами. Пособие знакомит читателей с современным состоянием и основными задачами автоматизированного управления технологическими процессами прокатки, принципами построения и функционирования автоматизированных систем управления прокатными станами и примерами их технической реализации. Особое внимание удалено принципам регулирования ряда технологических параметров прокатки, структуре и алгоритмам функционирования соответствующих локальных систем управления, непосредственно влияющих на качество продукции.

Для студентов старших курсов специальности «Металлургические машины и оборудование» (150404), изучающих дисциплины «Управление в технических системах» и «Управление и автоматизация металлургических машин и агрегатов».

Ил. 33. Библиогр. 26 назв.

УДК 65.011.56 : 621.771

© А. Восканьянц, 2010

Введение

Металлургия – одна из отраслей промышленности, в которой вопросы автоматизации производства и управления традиционно имеют ключевое значение при решении задач повышения эффективности производства и обеспечения качества продукции. Класс metallurgических машин охватывает большое количество видов технологического оборудования, при этом каждый вид такого оборудования имеет свои особенности и специфику. Для большинства metallurgических машин и агрегатов характерны:

- значительная (до нескольких сотен метров) протяженность оборудования, задействованного в едином технологическом процессе;
- широкий диапазон технологических характеристик оборудования, – скорости до нескольких десятков м/с, единичные мощности отдельных агрегатов до нескольких тысяч кВт, технологические силовые нагрузки до нескольких десятков МН;
- высокие требования по точности поддержания технологических параметров;
- тяжелые и очень тяжелые условия работы (ударные нагрузки, высокая вибрация, высокая загазованность и запыленность окружающей среды, повышенная температура этой среды, работа оборудования с продолжительностью включения близкой к 100 %, во многих случаях непрерывный режим работы оборудования);
- жесткие требования по надежности и безотказности работы оборудования.

Очевидно, что перечисленные факторы, обусловленная ими необходимость освобождения человека от непосредственного участия в управлении metallurgическими машинами на многих стадиях технологического процесса, равно как и исключительная сложность самих metallurgических технологий, предопределили разработку и внедрение систем автоматизированного управления для metallurgических агрегатов.

Развитие и совершенствование систем управления и автоматизации в metallurgическом производстве связано как с развитием и усложнением самих metallurgических машин и реализуемых на них технологических процессов, так и с развитием смежных отраслей промышленности, прежде всего приборостроения, техники электроприводов, электронной и вычислительной техники.

В полной мере все сказанное относится к самым распространенным и наиболее сложным в аспекте автоматизации и управления metallurgическим технологическим комплексам – прокатным станам. Работы по автоматизации прокатного производства в нашей стране были развернуты в конце 50-х – начале 60-х годов XX века [1]. К этому времени относятся работы по комплексной автоматизации блюминга № 2 Магнитогорского metallurgического комбината. В 1960 г. на непрерывно-заготовочном стане «730/450» этого комбината была внедрена система автоматизированного управления раскрем проката на базе специализированной вычислительной машины

«Сталь». В эти же годы были разработаны и изготовлены фотоэлектрические измерители ширины полосы, первые отечественные радиоизотопные и рентгеновские измерители толщины горячего и холодного листа, созданы измерители силы прокатки, натяжения прокатываемых полос, температуры металла и других показателей процесса прокатки.

Начало 70-х годов ознаменовалось появлением специализированных промышленных управляющих вычислительных машин (УВМ) и созданием на их базе принципиально новых сложных комплексов автоматизации технологических процессов прокатки. На блюминге «1500» Нижнетагильского металлургического комбината была внедрена автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) на базе УВМ М-6000, которая обеспечивала программное управление режимом обжатий и оптимизацию выбора программ прокатки в зависимости от пластических свойств металла. АСУ управляла рациональным раскроем металла на ножницах, обеспечивала сбор и обработку технологической информации на участках рабочей клети и ножниц блюминга. Для пущенного на том же комбинате в 1976 г. цеха широкополосных балок была разработана и введена в эксплуатацию АСУ ТП на базе трех УВМ М-7000. Система обеспечивала управление механизмами участка печей с соблюдением требований темпа прокатки, а также нажимными механизмами клети «1300», механизмами промежуточных и чистовой клетей, рациональным раскроем и безупорным резом металла на участке пил горячей резки.

К середине 70-х на всех непрерывных станах холодной прокатки были внедрены комплексные системы автоматического регулирования толщины и натяжения полосы, обеспечивающие поддержание заданной толщины полосы с погрешностью 1...2% во всем диапазоне сортамента прокатываемого металла. В эти же годы сортовой стан «450» Западно-Сибирского металлургического комбината был оснащен четырьмя УВМ, обеспечивающими слежение за прохождением прокатываемого металла от загрузки в методические печи до склада готовой продукции, управление режимами работы стана, перестройку механизмов стана на прокатку металла другого размера, раскрой проката с учетом заказов.

Новым и принципиально важным этапом в развитии отечественных автоматизированных металлургических агрегатов стало создание и ввод в эксплуатацию в 1975 г. непрерывного широкополосного стана «2000» горячей прокатки на Череповецком металлургическом заводе. Это был один из первых опытов сотрудничества отечественных машиностроителей со специалистами фирмы Siemens AG (Германия), оснастившей стан «2000» новейшими на тот момент управляющими ЭВМ, средствами автоматики и контроля технологических параметров. Комплексная АСУ ТП стана осуществляла управление нагревательными печами (расчет и выдача заданий локальным регуляторам, слежение за слябами в районе печей, управление механизмами загрузки и выгрузки слябов из печей), расчет плана прокатки,

управление последовательностью операций и режимами работы стана, дистанционную перестройку механизмов стана на прокатку полосы нового размера, регулирование температуры смотки полосы, слежение за металлом в течение всего технологического цикла. Система обеспечила точную горячую прокатку тонкого листа с максимальной погрешностью по толщине, не превышающей $\pm 0,05$ мм.

Богатый научно-технический опыт, приобретенный отечественными специалистами в ходе работ по созданию систем управления стана «2000» и аналогичных агрегатов, а также мировой прогресс в области электроники, информационных систем и измерительной техники, появление принципиально новых технологий и технических решений определили основное направление автоматизации отечественного прокатного производства в 80-х годах прошлого столетия. Им стало создание интегрированных автоматизированных систем управления на основе широкого применения мини- и микро-ЭВМ (в том числе в локальных системах автоматического управления отдельными устройствами и подсистемами) и оснащение всего технологического оборудования надежными, эффективными и высокоточными измерительными устройствами.

Научной основой для создания систем автоматизации прокатных станов стала теория прокатных станов как объектов управления, базирующаяся на положениях теории прокатки. Современная теория прокатки и конструкции прокатных станов получили развитие в значительной мере благодаря работам отечественных ученых А.И. Целикова, А.П. Чекмарева, Г.Л. Химича, В.С. Смирнова, И.М. Павлова, И.Я. Тарновского, В.Л. Колмогорова, П.И. Полухина. Значительный вклад в разработку теории прокатных станов как объектов управления и создание систем автоматизации прокатных станов внесли Н.Н. Дружинин, И.М. Меерович, Ю.Д. Железнов, Г.Г. Григорян, А.Б. Челюсткин, А.С. Филатов, В.И. Попельных, В.К. Хотулев, Б.Н. Дралюк, В.Л. Стефанович, Б.Б Тимофеев, В.И. Архангельский, А.Н. Чернышев и многие другие.

Революционные изменения, произошедшие за последние десятилетия в области микроэлектроники, производстве средств вычислительной техники и информационных технологиях привели к смене концепций управления во всех сферах промышленности. Прогресс в области электронных и информационных технологий существенным образом изменил как подходы к проектированию систем управления производственными машинами и агрегатами, так и их элементную базу. Современные системы управления строятся по модульному принципу на базе унифицированных аппаратных и программных средств вычислительной техники и объединяют функции технологической подготовки производства, управления технологическими комплексами и отдельными агрегатами, графического представления оперативной информации, работы с большими базами данных и численного анализа на основе сложных математических моделей в реальном времени.

Компьютерные сети передачи данных обеспечивают многотерминальный доступ к управляющим системам и объектам управления со стороны операторов технологических машин, технического и управленческого персонала.

Все перечисленное создало предпосылки к разработке принципиально новых и коренной модернизации существующих систем управления металлургическими агрегатами. Системы управления современных прокатных станов обеспечивают:

- максимальную эксплуатационную готовность всех агрегатов, входящих в состав стана;
- повышение производительности за счет оптимального согласования различных технологических операций;
- максимальную технологическую гибкость прокатного оборудования и минимальную длительность его наладки;
- оптимальную экономичность за счет комплексного планирования работы стана, минимизации количества отходов и сокращения простоев оборудования;
- существенное повышение качества готовой продукции при минимальных производственных допусках;
- максимально возможные удобство управления и информативность для обслуживающего персонала с использованием легко осваиваемого интерфейса «человек-машина».

Современный высокомеханизированный и автоматизированный прокатный стан создается и эксплуатируется при тесном взаимодействии технологов и механиков, специалистов по электроприводу, автоматическому управлению, технологическим измерениям, компьютерным системам и информационным технологиям, экономистов и специалистов других профилей. В этих условиях специалисты должны располагать знаниями, обеспечивающими возможность их совместной эффективной работы.

Настоящее учебное пособие имеет целью познакомить студентов специальности 150404 «Металлургические машины и оборудование» с современным состоянием и основными задачами автоматизированного управления технологическими процессами прокатки, принципами построения и функционирования автоматизированных систем управления прокатными станами и примерами их технической реализации.

1. Прокатные станы как объекты автоматизированного управления

Основная задача прокатного производства состоит в обеспечении требуемого качества проката, т.е. в обеспечении соответствия геометрических размеров, формы, физико-механических свойств и состояния поверхности проката заданным требованиям.

Процесс производства проката осуществляется в несколько стадий, каждая из которых включает следующие основные технологические операции:

- подготовка металла к прокатке;
- нагрев металла перед прокаткой (при горячей прокатке);
- прокатка металла;
- отделка проката.

Прокатка металла является основной технологической операцией процесса производства проката. Остальные технологические операции обеспечивают возможность осуществления прокатки и получение требуемого качества проката.

Оборудование прокатного стана подразделяется на *основное* и *вспомогательное*. Основное оборудование обеспечивает собственно прокатку металла и состоит из одной или нескольких рабочих клетей, в которых размещаются прокатные валки, а также приводов вращения прокатных валков. Вспомогательное оборудование стана включает агрегаты, устройства и системы, предназначенные для перемещения прокатываемого металла, его разматывания и сматывания в бунты или рулоны, подогрева и охлаждения, резки и выполнения других вспомогательных операций.

Современные прокатные станы оснащены автоматизированными системами управления технологическим процессом прокатки (АСУ ТП прокатных станов) на основе микропроцессорных контроллеров и управляющих электронно-вычислительных машин (УВМ).

Обычно АСУ ТП строится как иерархическая система управления. Непосредственное управление станом осуществляется *локальными управляющими устройствами*, составляющими нижний уровень иерархии. Следующий уровень образуют локальные системы, управляющие отдельными участками (зонами) стана, например, зоной нагревательных печей, черновой группой клетей стана и т.п. На верхнем уровне иерархии располагается система управления станом в целом, взаимодействующая с его зональными системами управления. АСУ ТП различных технологических агрегатов, в свою очередь, могут быть подчинены системе управления всем технологическим комплексом предприятия. В последнем случае следует говорить уже не об АСУ ТП, а об автоматизированной системе управления предприятием (АСУП).

Функциональные задачи АСУ ТП прокатного стана могут быть классифицированы по следующим признакам:

- стадия управления;
- вид объекта управления;
- период управления;
- характер задачи управления;
- вид управляемых показателей.

В зависимости от стадии управления функции АСУ ТП подразделяются на *информационные* и *управляющие*. К информационным функциям относят сбор информации о состоянии стана и представление ее в удобном для дальнейшего использования виде. К управляющим функциям относят выработку и реализацию управляющих воздействий на основании информации о состоянии стана.

По виду объекта управления функциональные задачи АСУ ТП прокатного стана подразделяются на задачи управления:

- прокатным станом в целом;
- зонами (участками) стана и агрегатами технологической линии,
- отдельными устройствами и системами стана и агрегатов.

В зависимости от количества полос, прокатываемых за период управления, целесообразно различать задачи управления станом при прокатке:

- последовательности партий полос;
- отдельных партий полос;
- отдельных полос;
- при осуществлении отдельных проходов.

По характеру функциональные задачи АСУ ТП можно подразделить на задачи *подготовки* стана к прокатке и задачи *непосредственного управления* прокаткой.

Управляемые показатели процесса прокатки на стане можно подразделить на *переменные устройства стана*, характеризующие работу приводов, устройств и систем стана (угловые скорости вращения валков, перемещения нажимных механизмов и т.п.), и *технологические переменные стана*, непосредственно характеризующие процесс прокатки (размеры поперечного сечения прокатываемой полосы и т. п.). В соответствии с этим по виду управляемых показателей функциональные задачи АСУ ТП прокатного стана можно подразделить на задачи управления переменными устройствами и технологическими переменными стана.

Рассмотрим характерные функциональные задачи АСУ ТП прокатного стана (рис. 1.1):

Слежение за прохождением прокатываемого металла по всей технологической линии от склада заготовок до склада продукции является важнейшей информационной функцией АСУ ТП стана.

Управление станом при прокатке партии полос складывается из подготовки стана к прокатке и управления процессом прокатки партии полос.

Подготовка стана к прокатке очередной партии полос включает: расчет программы прокатки; настройку стана.



Рис. 1.1. Функциональные задачи АСУ ТП прокатного стана

Расчет программы прокатки партии полос заключается в определении законов изменения заданий локальным системам в функции времени и положения полос, обеспечивающих оптимальную прокатку партии полос.

Настройка стана заключается в выдаче локальным системам заданий, обеспечивающих приведение стана в исходное состояние для прокатки очередной партии полос, и реализацию этих заданий локальными системами. Расчет программы прокатки выполняется зональными УВМ на основании характеристик партии полос таким образом, чтобы обеспечить оптимальное протекание процесса прокатки.

Управление прокаткой партии полос включает управление темпом прокатки и управление станом при прокатке отдельных полос партии. *Управление темпом прокатки* имеет цель обеспечить прокатку полос на стане с оптимальными интервалами между ними. Оно осуществляется УВМ зоны нагревательных устройств на основании программы прокатки с учетом информации о фактическом положении полос в линии стана путем выработки команд на выдачу заготовок из нагревательных устройств стана. *Управление станом при прокатке отдельной полосы партии* можно подразделить на подготовку стана к прокатке полосы и управление процессом ее прокатки.

Подготовка стана к прокатке очередной полосы партии включает коррекцию программы прокатки и подстройку стана. *Коррекция программы прокатки* выполняется с целью обеспечить оптимальную прокатку очередной полосы с учетом ее фактических характеристик. *Подстройка стана* заключается в приведении его устройств и систем в исходное

состояние для прокатки очередной полосы в соответствии с откорректированной программой прокатки. Коррекция программы прокатки проводится зональными УВМ. При прокатке первой полосы партии коррекция выполняется на основании информации об отклонении фактических характеристик полосы от характеристик партии, на основании которых рассчитывалась программа. При прокатке последующих полос коррекцию целесообразно осуществлять на основании информации об отклонениях характеристик очередной полосы от характеристик предыдущей. Коррекция программы прокатки и подстройка для отдельных зон (агрегатов) стана может проводиться после прохождения полосой предыдущих зон (агрегатов) стана и уточнения фактических значений ее характеристик.

Управление процессом прокатки отдельной полосы партии сводится к изменению заданий локальным системам стана в функции времени и положения прокатываемой полосы в соответствии с откорректированной программой прокатки полосы и реализации этих изменений локальными системами.

Расчет программы прокатки проводится перед началом прокатки партии полос, а ее коррекция может осуществляться перед прокаткой очередной полосы партии и перед очередным проходом.

2. Структура автоматизированной системы управления технологическим процессом современного прокатного стана

Для обеспечения высокого качества проката системы автоматизированного управления процессами прокатки должны отвечать весьма жестким требованиям, которые, в свою очередь, обусловливают определенные требования к технологическому процессу прокатки и технологическому оборудованию. *Требования к технологическому процессу* включают, прежде всего, допустимые пределы изменения показателей качества исходной заготовки, а также энергоносителей и других материалов, используемых в процессе прокатки. Общими *требованиями к технологическому оборудованию* являются достаточная мощность, быстродействие и надежность, а также возможность установки, эксплуатации и обслуживания технических средств автоматизации.

Автоматизация управления процессом прокатки обеспечивает увеличение доли проката высших категорий качества по геометрии и механическим свойствам. Достигаемое при автоматизированном управлении повышение скорости и темпа прокатки, сокращение времени настройки и перенастройки стана, а также сокращение времени простоев, вызванных нарушениями технологического процесса, повышает производительность прокатных станов.

Автоматизированное управление процессом прокатки существенно облегчает условия труда оперативного персонала прокатных станов и повышает его производительность, обеспечивает существенное сокращение расхода электроэнергии и топлива. Наряду с автоматизацией основного технологического оборудования прокатных станов имеет большое значение также автоматизация агрегатов подготовки металла к прокатке и отделки проката, в том числе травильных агрегатов, линий отжига, дрессировочных станов, агрегатов резки и т.д.

Структуру и принципы работы системы автоматизированного управления технологическим процессом прокатки рассмотрим на примере непрерывного широкополосного стана (НШС) горячей прокатки.

Цель автоматизации сложного металлургического агрегата, каким является непрерывный широкополосный стан – *обеспечение независимости качества проката и производительности стана от обслуживающего персонала*. При этом должны предотвращаться перегрузки оборудования, а затраты на обслуживание при полном использовании оборудования должны поддерживаться на минимальном уровне. Необходимо предусмотреть возможность использования более низких уровней автоматизации, т.е. должна обеспечиваться возможность частичного или полного ручного управления станом.

В соответствии с ГОСТ 24.103-84 АСУ ТП прокатного стана должна функционировать в следующих режимах:

- в информационно-советующем режиме, при котором средства вычислительной техники вырабатывают и выдают оперативному персоналу рекомендации по рациональному управлению процессом
- в комбинированном режиме, при котором средства вычислительной техники автоматически изменяют уставки и параметры настройки локальных систем регулирования;
- в режиме прямого управления, при котором средства вычислительной техники обеспечивают непосредственное управление исполнительными устройствами.

АСУ ТП современного широкополосного стана горячей прокатки осуществляет автоматическое управление технологическим процессом, начиная от взвешивания слябов перед нагревательными печами и заканчивая маркированием рулонов на конвейерах моталок. На рис. 2.1 приведена функциональная блок-схема такой системы для стана, выдающего продукцию в виде рулонов.

Входной узел системы решает задачу *выбора очередности прокатки партий слябов*, предусмотренных плановым заданием. Выбранная очередность должна обеспечивать минимально возможное число перевалок рабочих валков при прокатке всех партий данного планового задания и в то же время минимум простоев стана из-за недостаточного прогрева слябов в печах. Оценка выбираемой очередности прокатки партий осуществляется по величине суммарных простоев, вызванных как перевалками, так и неготовностью слябов в печах.

Определение оптимальной последовательности прокатки партий слябов, предусмотренных плановым заданием (например, суточным) представляет собой задачу *математического программирования*, решаемую на *математической модели стана и печей*. Такая модель устанавливает зависимость искажения профиля полосы и износа валков от количества и характеристик прокатанных слябов; ограничения на искажение профиля в зависимости от толщины и ширины полосы; длительность машинного времени как функции типоразмера сляба и полосы; длительность нахождения слябов в печи в зависимости от их типоразмеров и очередности загрузки.

Найденный оптимальный план-график прокатки партий слябов является одновременно планом-графиком подачи слябов со склада для посадки их в нагревательные печи. Этот график передается на склад слябов и в соответствии с ним на загрузочный рольганг стана подаются партии слябов. Одновременно с подачей слябов в систему передается необходимая информация, позволяющая организовать процесс их нагрева и прокатки. На основании этой информации решается задача *выбора распределения слябов по печам* и осуществляется управление их посадкой в печи. Операция посадки слябов в печи обычно сочетается с операциями выдачи нагретых слябов, которые регламентируются темпом прокатки, определяемым либо по длительности машинных времен прокатки полос, либо из условий нагрева слябов, если узким местом становятся нагревательные печи.

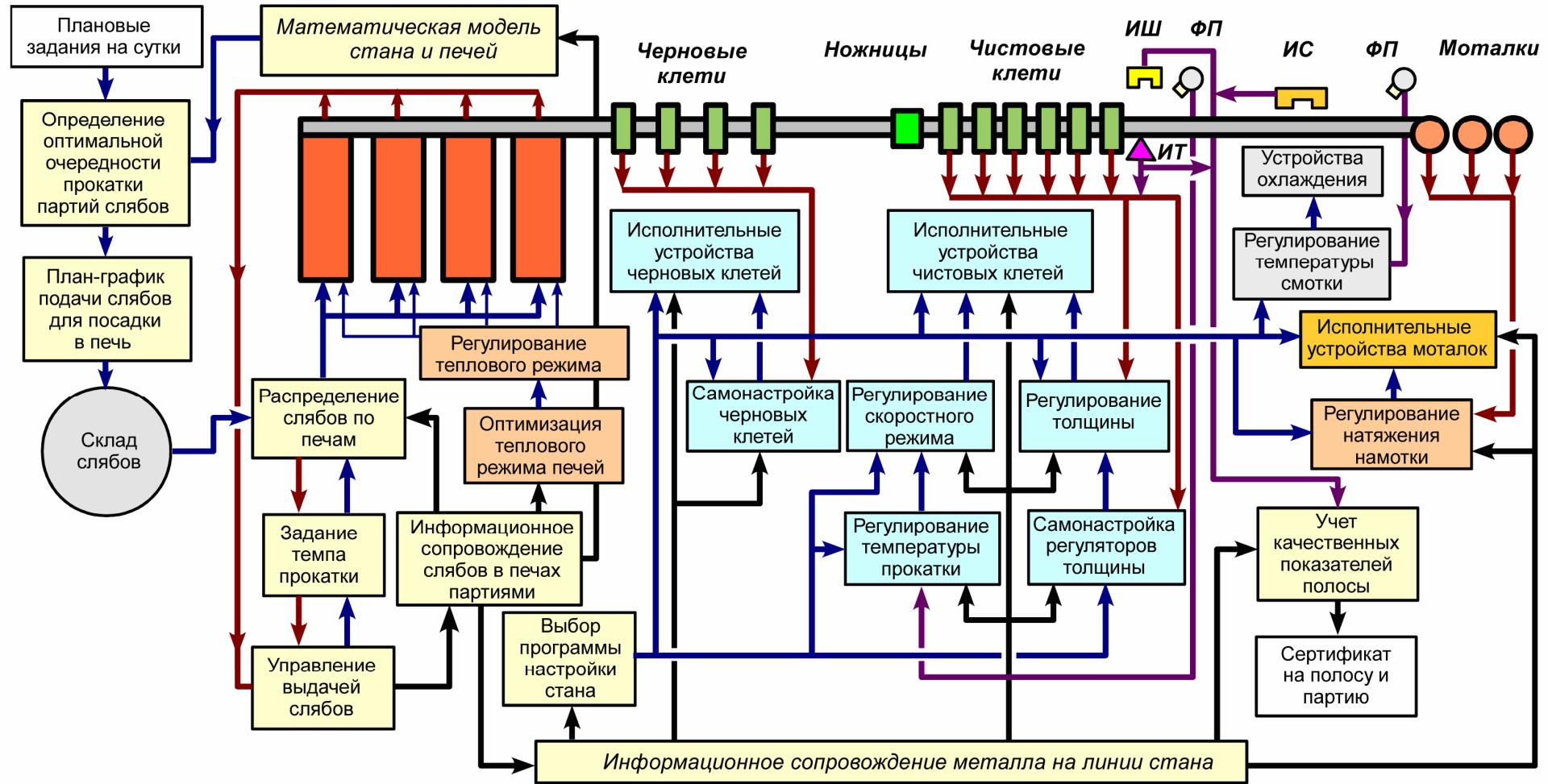


Рис. 2.1. Информационно-управляющая система непрерывного широкополосного стана горячей прокатки

За продвигаемыми через печи слябами осуществляется непрерывное слежение, позволяющее определять положение отдельных слябов в печи относительно зон и получать о них всю необходимую информацию.

Такое *информационное сопровождение слябов в печах* обеспечивает одновременно с выдачей из печи очередного сляба выдачу всей информации об этом слябе, поступающей в систему информационного сопровождения металла на линии стана. Кроме того, информация о положении слябов разных партий в печи относительно зон используется для решения задачи *оптимизации теплового режима печей*. Это позволяет в условиях переменной скорости продвижения слябов с различными характеристиками через зоны печи устанавливать в этих зонах такие тепловые режимы, при которых достигаются минимальные колебания теплосодержания выдаваемых из печей слябов.

Система информационного сопровождения металла на линии стана получает сигналы от фотореле, установленных на секциях рольганга, у клетей и от нагрузочных реле этих клетей, чем осуществляется слежение за движением каждого сляба по линии стана вплоть до передачи раскатанной и свернутой в рулон полосы на охлаждающий конвейер.

Особо осуществляется слежение за прохождением через линию стана последнего сляба данной партии, что позволяет давать автоматически разрешение на перестройку клетей и механизмов стана, после того как последний сляб партии пройдет через них. *Перестройка стана осуществляется в соответствии с заранее разработанными программами*, хранящимися в устройствах памяти (например, записанными на магнитной ленте, либо магнитных дисках). Каждая такая программа соответствует определенным размерам сляба, марке стали и конечным размерам полосы, которые являются кодом распознавания программы. Так как марка стали, размеры сляба и полосы являются составными частями информации, поступающей в систему информационного сопровождения слябов на линии стана, то при выдаче очередного сляба из печи одновременно осуществляется поиск в устройстве хранения *программы настройки стана*, соответствующей данной информации о выданном слябе.

Программа настройки представляет собой набор команд-заданий исполнительным устройствам, осуществляющим перестройку стана на новый типоразмер полосы. Такими устройствами являются позиционирующие устройства нажимных винтов клетей и направляющих линеек и задающие устройства регуляторов скорости клетей, а также регуляторов толщины, температуры и натяжения полосы.

Программа настройки стана рассчитывается на номинальные для данного типоразмера слябов пластические свойства, которые в реальных условиях имеют значительные разбросы как вследствие колебаний теплосодержания сляба, так и вследствие вариаций химического состава стали. Поэтому *величины давлений металла на валки оказываются отличными от расчетных*, что приводит к отклонениям толщин металла по

клетям и искажению профиля полосы на выходе из стана. Чтобы эти искажения были минимальными, предусматривается *самонастройка* клетей. Для черновой группы эта самонастройка осуществляется на основании расчета фактических пластических свойств данного сляба по величинам приращений давления металла на валки клетей.

Ухудшение пластических свойств прокатываемого металла означает увеличение давления металла на валки, и как следствие, увеличение толщин металла на выходе из клетей. Это увеличение в относительных единицах будет наиболее значительным в последних клетях стана, поскольку повышение в них давлений будет обусловливаться как ухудшением пластических свойств металла, так и увеличением его входных толщин вследствие повышенных давлений в предыдущих клетях. Таким образом, *уточнение обжатий* означает *перераспределение обжатий по клетям*, обеспечивающее за счет некоторого увеличения величин обжатий в первых клетях возможно меньшие изменения давления в последних клетях.

Клети чистовой группы оборудуются *регуляторами толщины полосы*, в которых по положению нажимного устройства и величине давления металла на валки, измеряемой с помощью месдоз, рассчитывается зазор между валками, т.е. толщина металла на выходе из валков. При отклонении рассчитанной величины зазора от заданного значения регулятор толщины, воздействуя на привод нажимного устройства, устраниет это отклонение.

Так как толщина металла в клетях рассчитывается по показаниям датчика положения нажимного устройства и величине давления металла на валки, то при износе валков и их тепловой деформации возникает ошибка. В результате этой ошибки толщина полосы, выходящей из стана, может иметь отклонение от требуемого значения. Для подстройки задания регуляторам толщины за последней клетью чистовой группы устанавливают *рентгеновский или радиоактивный измеритель толщины ИТ*, с показанием которого сопоставляется расчетная толщина полосы в последней клети стана.

Помимо величин обжатий по клетям, программа настройки стана выдает также *уставки регуляторов скоростей клетей*, уточняемые по изменению положений роликов петлодержателей. Если скорость валков последующей клети неточно соответствует скорости предыдущей, то петля между этими клетями, образуемая петлодержателем, будет либо увеличиваться, либо уменьшаться. Выявленное при этом изменение петли по изменению положения ролика петлодержателя вызывает соответствующее изменение уставки регулятора скорости клети, приводящее к восстановлению петли.

Как уже указывалось выше, *управление температурой конца* прокатки осуществляется изменением скоростного режима клетей чистовой группы. При достаточно быстром повышении скорости прокатки увеличение теплосодержания металла полосы компенсирует потерю тепла вследствие охлаждения из-за лучеиспускания в окружающую среду и соприкосновения металла с валками клетей, в результате чего температура полосы на выходе из стана может не только сохраняться неизменной, но даже повышаться к

концу полосы. Для достижения заданного перепада температур полосы по ее длине, на выходе из чистовых клетей для каждого типоразмера полосы может быть найден требуемый закон изменения скорости прокатки в чистовой группе. В простейшем случае этот закон определяется величиной ускорения приводов клетей, задаваемой программой настройки стана при переходе с одного типоразмера полосы на другой. Для контроля скорости полосы на выходе из чистовой группы установлен *измеритель скорости ИС*. *Фотопиrometer ФП*, установленный за последней клетью стана, выявляя отклонение фактической температуры полосы от допустимых пределов, осуществляет корректировку величины ускорения, задаваемого программой настройки.

Регулирование температуры смотки полосы осуществляется изменением расхода охлаждающей воды по длине участка охлаждения. Температура, до которой охлаждается полоса, и скорость снижения температуры определяют механические свойства полосы и зависят как от марки стали (содержание углерода в стали), так и от геометрических размеров (толщины полосы). Для каждого типоразмера полосы заранее находится оптимальный закон снижения температуры, задающий расходы воды, подаваемой по секциям участка охлаждения. Корректировка этого распределения охлаждающей воды осуществляется с помощью пирометра, контролирующего фактическую температуру полосы перед моталками.

Контроль геометрических размеров прокатанной полосы осуществляется с помощью рентгеновского или радиоактивного измерителя толщины *ИТ* и *фотоэлектрического измерителя ширины ИШ*, установленных за последней клетью стана. Показания измерителя толщины, как это было показано выше, используется для сравнения с расчетной величиной зазора в последней клети и подстройки установок регулятора толщины. Измеритель ширины является только указателем отклонения ширины от номинальной и наравне с измерителем толщины используется для оценки качества полосы, поступающей на смотку. Для оценки качественных показателей всей полосы измеряются не только отклонения толщины, ширины и температуры полосы от их номинального значения, но и длины участков полос, где эти отклонения имеются. Результаты этой оценки протоколируются системой и вносятся в *сертификат качества* данной полосы и партии полос.

3. Локальные системы автоматизированного управления технологическими параметрами прокатки

Как уже указывалось, управляемые переменные прокатного стана как объекта управления можно подразделить на две группы: переменные устройств стана и технологические переменные стана (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Управляемые переменные прокатного стана

К управляемым переменным устройств стана, характеризующим функционирование его устройств и систем, относятся:

- координаты и скорости движения рабочих органов устройств стана;
- силы и моменты, развивающиеся устройствами стана;
- расходы и давления охлаждающей жидкости и т. п.

Технологические переменные стана непосредственно характеризуют процесс прокатки и включают:

- координаты и скорости движения полос;
- показатели геометрии полос (размеры поперечного сечения, характеристики формы полосы и ее длина);
- силы и моменты прокатки, натяжение полос между клетями;
- температуру прокатываемого металла.

Управление перечисленными переменными реализуют входящие в состав АСУ ТП локальные системы управления, которые в соответствии с классификацией управляемых переменных стана можно подразделить на

системы управления *переменными устройствами* стана и системы управления *технологическими переменными* стана.

Системы управления переменными устройствами стана, или просто *системы управления устройствами* стана подразделяются на системы управления:

- положением и скоростью устройств;
- силами (моментами) устройств;
- расходами жидкости через устройства и т. п.

В свою очередь, системы управления технологическими переменными стана можно подразделить на системы управления:

- положением и скоростью перемещения проката;
- геометрическими параметрами прокатываемых полос;
- показателями состояния полос между клетями;
- температурой прокатываемого металла.

К системам автоматического управления геометрией проката относятся системы регулирования размеров поперечного сечения и показателей формы прокатываемых полос, а также системы раскроя полос. Автоматическое регулирование размеров поперечного сечения и показателей формы прокатываемых полос является основным средством получения проката, имеющего требуемые размеры поперечного сечения и форму. Автоматический раскрой проката обеспечивает прорезку прокатанных полос на части требуемой длины с минимальными отходами.

Системы автоматического управления состоянием проката между клетями включают системы регулирования прогиба (провисания) полосы и системы регулирования натяжения полосы между клетями при непрерывной прокатке, или системы регулирования петли и натяжения. Автоматическое управление состоянием полосы между клетями при непрерывной прокатке имеет целью, прежде всего, обеспечить осуществление процесса непрерывной прокатки, который невозможен без постоянного управления этими показателями. Кроме того, управление состоянием полосы между клетями непрерывного стана способствует получению проката с требуемыми размерами поперечного сечения и требуемой формы.

Системы автоматического управления температурой прокатываемого металла осуществляют регулирование температуры металла на различных этапах процесса прокатки с целью получения требуемых физико-механических характеристик проката.

Рассмотрим структуру основных локальных систем автоматического управления и математические зависимости, на которых базируется их реализация.

3.1. Система позиционного управления

Системы позиционного управления обеспечивают автоматическое управление подъемными столами, сталкивателями, приемниками слябов,

направляющими линейками, нажимными устройствами горизонтальных и вертикальных валков клетей, механизмами установки раствора тянувших и формирующих роликов моталок и кареток измерителей ширины. Основа этих систем – следящий привод, который представляет собой замкнутую активную динамическую систему, управляющую перемещением объекта регулирования. При этом регулируемая величина с той или иной степенью точности воспроизводит перемещение, заданное управляющим воздействием.

В измерительном устройстве *ИУ* (рис. 3.2) производится сравнение текущего значения регулируемой величины с управляющим воздействием (заданием) и на основе этого сравнения формируется *сигнал ошибки* — первичный сигнал управления.

Информация о текущем значении регулируемой величины поступает в измерительное устройство по каналу *главной обратной связи*.

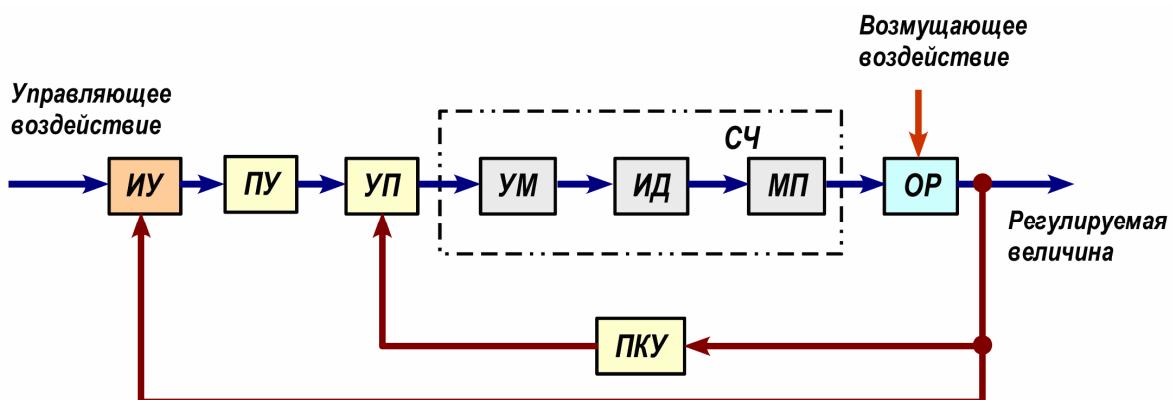


Рис. 3.2. Структурная схема следящего привода

Преобразующее устройство *ПУ* следящего привода служит для преобразования сигнала ошибки к виду, удобному для дальнейшего использования. Предварительный усилитель *УП* предназначен для усиления сигнала по напряжению и мощности до значений, достаточных для управления усилителем мощности *УМ*.

В этом усилителе производится также сравнение названного сигнала с сигналом, поступающим от параллельного корректирующего устройства *ПКУ*. Назначение *ПКУ* – улучшение качества регулирования. Так, при подсоединении датчика перемещения к выходу объекта регулирования *ОР* для повышения устойчивости следящего привода организуют дополнительный канал обратной связи с использованием сигнала от датчика скорости.

Регулирующее воздействие (например, в виде врачающего момента), непосредственно прикладываемое к объекту регулирования *ОР*, создается с помощью силовой части *СЧ* следящего привода. Силовая часть состоит из усилителя мощности *УМ* (например, тиристорного преобразователя), исполнительного двигателя *ИД* и механической передачи *МП*.

Перемещение исполнительным двигателем объекта регулирования происходит в направлении уменьшения сигнала ошибки. Если сигнал ошибки равен нулю, то значение регулируемой величины совпадает со значением управляющего воздействия (задания).

3.1.1 Позиционное управление нажимными устройствами рабочей клети

В качестве примера реальной позиционирующей системы рассмотрим цифро-аналоговую систему управления винтовыми нажимными устройствами черновой клети листового стана (рис. 3.3). Цель управления нажимными устройствами – переместить верхний рабочий валок в положение, при котором зазор между валками S будет равным некоторому заданному значению S_0 , то есть обеспечить выполнение условия:

$$\Delta S = S_0 - S = 0 ,$$

где ΔS – рассогласование между заданным и фактическим зазорами.

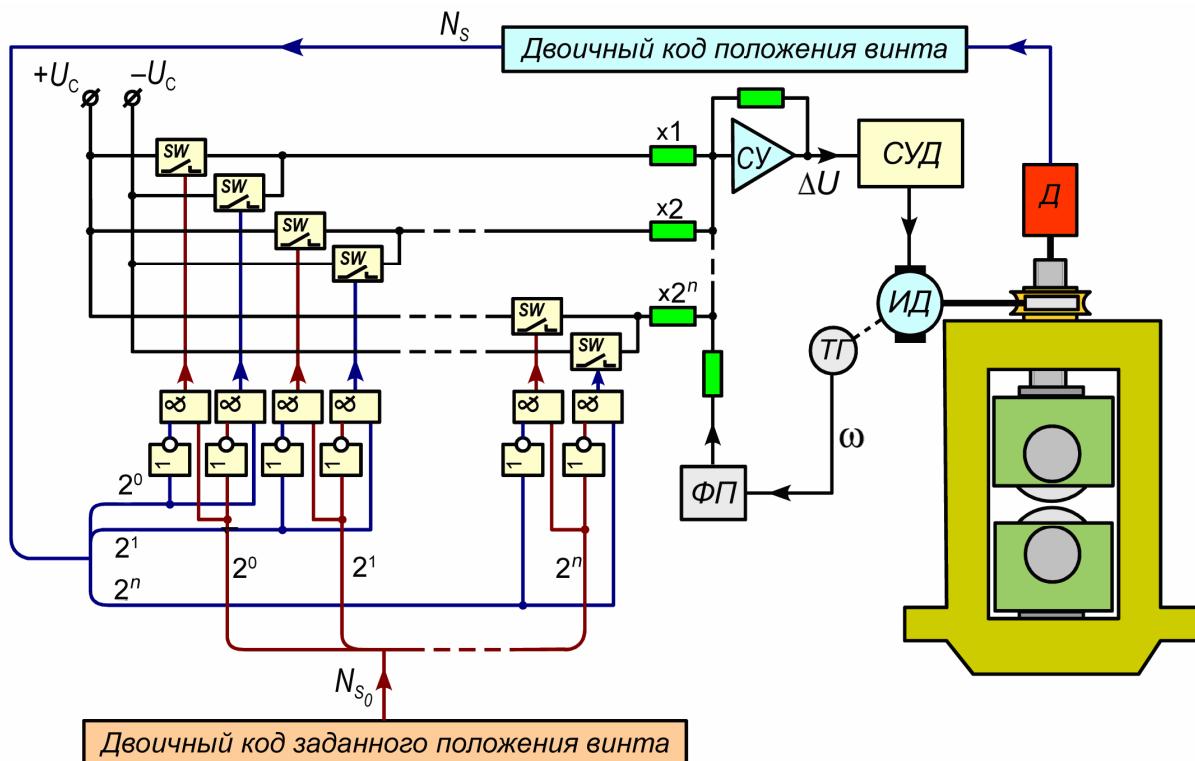


Рис. 3.3. Система позиционного управления нажимными устройствами рабочей клети в цифро-аналоговом исполнении

Нажимные винты приводятся во вращение исполнительным электродвигателем $ИД$ через червячные редукторы. В канале главной обратной связи по перемещению используется цифровой датчик $Д$, связанный с нажимным винтом через кинематический редуктор. Датчик преобразует угол поворота винта в n -разрядный двоичный код N_s . Этот код поразрядно подается на n входов цифро-аналогового преобразователя. На

другие n входов подается управляющее воздействие – код Ns_0 заданного положения нажимного винта, которое должно быть отработано системой.

Одноименные разряды кодов Ns и Ns_0 попарно поступают на логические ячейки, состоящие в каждом разряде из двух элементов «НЕТ» и двух элементов «И». Каждый элемент «И» управляет своим электронным ключом SW . Появление логической «1» на выходе элемента «И» вызывает замыкание ключа. В результате на соответствующий вход суммирующего усилителя CY подается постоянное напряжение U_c от стабильного источника. Полярность напряжения U_c зависит от того, какой из сравниваемых кодов (Ns_0 или Ns) по данному разряду больше.

Сумматор CY по каждому из n входов имеет свой коэффициент усиления ($1, 2, 4 \dots 2^n$) в зависимости от того, какому разряду кода данный вход соответствует. Таким образом, на выходе CY формируется напряжение ΔU , пропорциональное разности чисел, представленных кодами Ns_0 и Ns . Это напряжение подается в систему управления двигателем CUD нажимного механизма и вызывает вращение двигателя, перемещающего нажимные винты в направлении уменьшения рассогласования.

Для обеспечения необходимого предварения торможения нажимного механизма в системе предусмотрен дополнительный канал обратной связи по скорости. На дополнительный вход CY подается напряжение с функционального преобразователя ΦP , подключенного к тахогенератору TT , измеряющему частоту вращения двигателя ω . При соответствующем выборе параметров ΦP достигается своевременное изменение полярности напряжения на выходе CY , что обеспечивает интенсивное торможение механизма и его остановку при $\Delta S \approx 0$.

3.2. Система автоматического регулирования натяжения в черновой группе клетей

Характерной чертой современных конструкций непрерывных широкополосных станов горячей прокатки является объединение в непрерывные группы не только чистовых, но и черновых клетей. Так на станах «2286» (Франция), «2250» (Япония), «2300» (ФРГ) две последние черновые клети объединены в непрерывную черновую подгруппу. На стане «2000» ОАО «Северсталь» и стане «2000» ОАО «ММК» (РФ) в непрерывную подгруппу объединены три последние черновые клети. Создание непрерывных черновых подгрупп позволило повысить температуру металла на входе в чистовую группу клетей за счет сокращения теплоизлучения раската в межклетевых промежутках. Что же касается систем управления главными приводами горизонтальных валков клетей этих подгрупп, то они соответствующим образом усложнились, поскольку потребовалось осуществить регулирование межклетевого натяжения. Принцип регулирования натяжения основан на зависимости [2]:

$$\frac{M_i}{PR} = \varphi \pm \delta = \beta, \quad (3.1)$$

- где M_i – полный момент на рабочем валке с учетом натяжения полосы;
 P – вертикальная составляющая равнодействующей контактных сил в очаге деформации N (сила прокатки);
 R – радиус рабочего валка;
 φ – центральный угол, соответствующий положению точки приложения равнодействующей контактных сил;
 δ – угол между равнодействующей контактных сил N и ее вертикальной составляющей P .

Знак «плюс» в формуле (3.1) соответствует случаю $T_0 > T_1$, где T_0 и T_1 – соответственно силы заднего и переднего натяжения полосы. Таким образом, при прокатке с преобладающим задним натяжением полный момент на валке $M_i > M_P = PR\varphi$, где M_P – момент, создаваемый силой P . Случаю $T_0 < T_1$ соответствует «минус» в (3.1), при этом $M_i < M_P$.

В непрерывной подгруппе из двух клетей заданный закон регулирования реализуется системой управления двигателем привода горизонтальных валков первой (по ходу прокатки) клети. При этом вторая клеть может иметь нерегулируемый привод, например, от синхронного двигателя переменного тока. В трехклетевой непрерывной подгруппе все клети имеют регулируемый привод горизонтальных валков.

Для двигателя постоянного тока

$$M_i = C_M \Phi I, \quad (3.2)$$

- где C_M – конструктивная постоянная;
 Φ – поток возбуждения;
 I – сила тока в цепи якоря двигателя.

При работе двигателя с неизменным потоком возбуждения закон регулирования межклетевого натяжения описывается зависимостью

$$I/P = \text{const}. \quad (3.3)$$

Рассмотрим процесс регулирования натяжения в трехклетевой непрерывной подгруппе. Средняя (вторая) клеть не регулируется, она является базовой. Регулирование натяжения осуществляется приводами первой и третьей клетей.

На рис. 3.4 приведена блок-схема системы регулирования натяжения применительно к регулирующей клети. Величины I и P измеряются соответственно датчиками тока двигателя главного привода $ДГП$ и измерителями силы прокатки $ИС$ (месдозами).

После входа металла в первую клеть и до его входа во вторую клеть осуществляется свободная (без натяжения) прокатка. За этот промежуток времени измеряется величина тока якоря двигателя главного привода I_{cb} и сила прокатки P_{cb} . Значения этих величин поступают в делительное устройство $ДУ$, где вычисляется отношение I_{cb}/P_{cb} . Вычисленная величина I_{cb}/P_{cb} запоминается в устройстве памяти $ЗУ$, после чего вход

запоминающего устройства отключается от выхода делительного устройства. После входа металла во вторую клеть эта клеть оказывается связанной с первой клетью через прокатываемый металл, что может привести к возникновению натяжения между этими клетями.

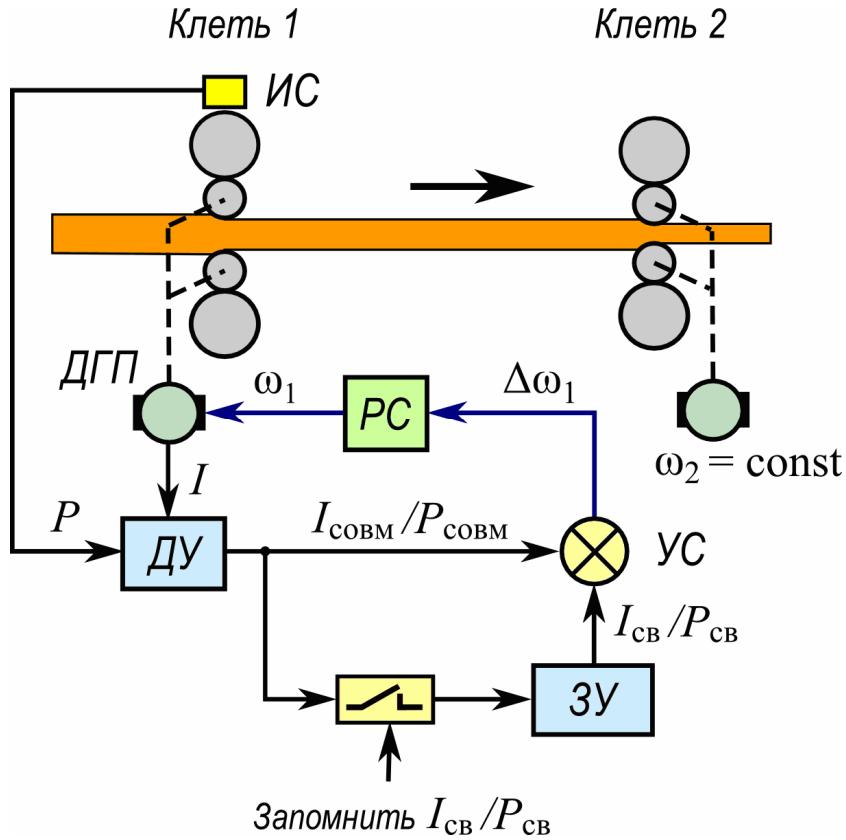


Рис. 3.4. Блок-схема системы регулирования натяжения в непрерывной черновой группе клетей

Целью регулирования является минимизация межклетевого натяжения, для чего измеряют значение силы тока $I_{совм}$ и силы $P_{совм}$ в первой клети при совместной прокатке металла. На делительном устройстве вычисляется отношение $I_{совм}/P_{совм}$, после чего оно сравнивается с запомненным ранее отношением $I_{св}/P_{св}$ в устройстве сравнения YC . В результате операции сравнения на регулятор скорости первой клети PC подается команда на изменение скорости привода. Задача регулирования скорости – выполнение условия

$$\left| \frac{I_{св}}{P_{св}} - \frac{I_{совм}}{P_{совм}} \right| \approx 0. \quad (3.4)$$

Таким образом поддерживается минимальное натяжение между первой и второй клетью, близкое к свободной прокатке.

Натяжение между второй и третьей клетями регулируется аналогично. До входа металла в третью клеть запоминается отношение $I_{св}/P_{св}$ для второй

клети. После начала прокатки в третьей клети измеряется $I_{\text{совм}}/P_{\text{совм}}$ для второй клети, и в случае возникновения натяжения система регулирования воздействует на скорость третьей клети до тех пор, пока натяжение не исчезнет.

3.3. Системы автоматического регулирования натяжения в чистовой группе клетей

Ширина полосы формируется в основном в черновой группе клетей и затем стабилизируется в чистовой группе за счет функционирования системы автоматического регулирования натяжения (САРН). Изменение межклетевого натяжения при горячей прокатке в наибольшей мере влияет на ширину прокатываемой полосы. Установлено, что для непрерывных широкополосных станов горячей прокатки максимальная величина удельного натяжения, при которой обеспечивается стабилизация ширины полосы, не должна превышать $10\dots15 \text{ Н}/\text{мм}^2$. Изменение межклетевого натяжения в процессе прокатки в непрерывной чистовой группе влияет также и на продольную разнотолщинность прокатываемой полосы.

В настоящее время САРН широкополосных станов горячей прокатки выполняются на базе:

- гидравлических или пневматических петледержателей, в конструкции которых заложен принцип независимости усилий в определенном интервале угла поворота рычага-петледержателя при неизменном давлении рабочего тела в цилиндрах [3];
- статических петледержателей, в которых натяжение измеряется специальными датчиками, вмонтированными в опору ролика петледержателя [3];
- электромеханических петледержателей с безредукторным приводом от специальных бесколлекторных двигателей или двигателей постоянного тока с независимым возбуждением [3].

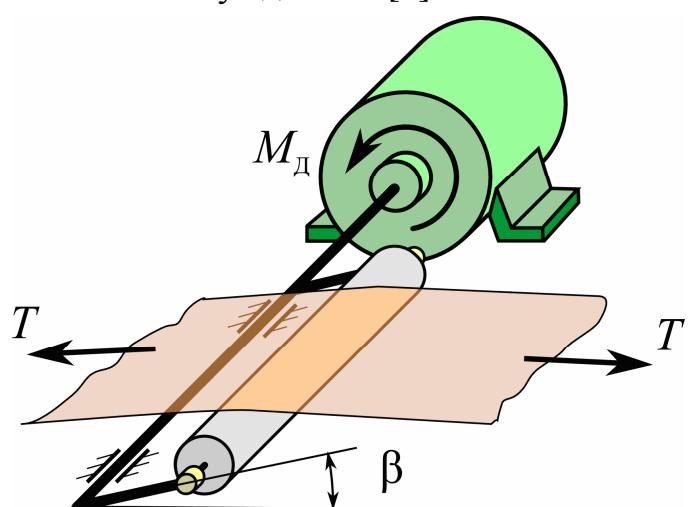


Рис. 3.5. Электромеханический петледержатель с безредукторным приводом от специального двигателя постоянного тока

Последний из перечисленных видов САРН (рис. 3.5) нашел наиболее широкое распространение на прокатных станах. В основу подобных систем положен принцип косвенного измерения натяжения в межклетевых промежутках.

Момент электродвигателя электромеханического петледержателя с безредукторным приводом уравновешивает сумму моментов внешних сил, составляющих статический момент нагрузки механизма:

$$M_{\text{д}} = M_{\text{нат}} + M_{\text{изг}} + M_{\text{неур}} + M_{\text{п}} \pm M_{\text{тр}}, \quad (3.5)$$

где $M_{\text{нат}} = \frac{2\sigma B h R^2}{L} \sin 2\beta$ – момент от натяжения;
 $M_{\text{изг}} = \frac{2\sigma_s B h^2 R}{L} \cos \beta$ – момент от изгиба;
 $M_{\text{неур}} = M'_{\text{неур}} \cos \beta$ – момент от неуравновешенных частей петледержателя;
 $M_{\text{п}} = 0,5\gamma B h L R g \cos \beta$ – момент от массы полосы в межклетевом промежутке;
 $M_{\text{тр}}$ – момент сил трения в механизме петледержателя;
 σ – удельное натяжение в межклетевом промежутке;
 B, h – ширина и толщина полосы;
 R – радиус рычага петледержателя;
 L – расстояние между осями смежных чистовых клетей;
 β – угол поворота рычага петледержателя относительно горизонтали;
 σ_s – предел текучести металла в межклетевом промежутке;
 γ – удельный вес полосы;
 $M'_{\text{неур}}$ – момент от неуравновешенных частей при горизонтальном положении петледержателя ($\beta = 0$).

Анализ конструктивных и эксплуатационных параметров регуляторов натяжения чистовых групп широкополосных станов показывает, что основной составляющей статического момента механизма петледержателя является момент от натяжения. Соответственно, при определении закона регулирования натяжения моментом неуравновешенных частей механизма, моментом сил трения и моментом от изгиба полосы можно пренебречь. В этом случае (3.5) можно представить в виде

$$M_{\text{д}} = \frac{4\sigma B h R^2}{L} \sin \beta \cos \beta. \quad (3.6)$$

Из формулы (3.6) следует, что

$$dM_{\text{д}} = \frac{4BhR^2}{L} [\sin \beta \cos \beta d\sigma + \sigma (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta) d\beta]. \quad (3.7)$$

Следовательно, для стабилизации натяжения (обеспечения $d\sigma = 0$) система регулирования должна обеспечить выполнение условия:

$$dM_{\Delta} = \frac{4BhR^2\sigma}{L}(\cos^2 \beta - \sin^2 \beta) d\beta = \frac{4TR^2}{L}(\cos^2 \beta - \sin^2 \beta) d\beta, \quad (3.8)$$

где $T = \sigma B h$ – сила натяжения полосы.

Уравнение (3.8) определяет структуру САРН: она должна иметь в своем составе устройства ввода исходных параметров (σ, B, h, β), вычислительные арифметические устройства, канал регулирования петли и канал регулирования момента двигателя. Структурная схема подобной САРН приведена на рис. 3.6.

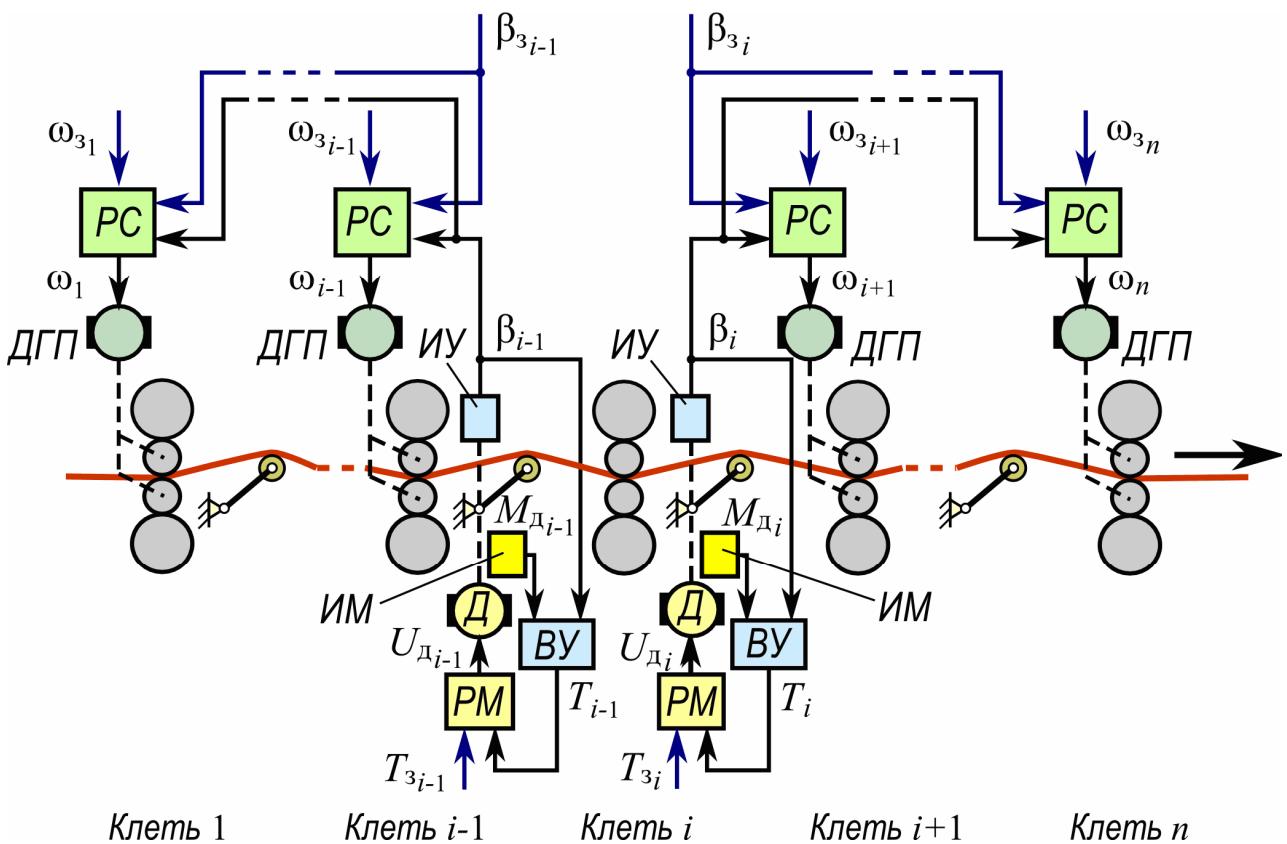


Рис. 3.6. Система регулирования натяжения в чистовой группе непрерывного широкополосного стана с электромеханическими петледержателями

Средняя клеть непрерывной группы принимается в качестве опорной (например, для группы из семи клетей опорной является четвертая). На участке до опорной клети (клеть i на рис. 3.6) сигналы коррекции натяжения подаются на предшествующие клети, на участке за опорной клетью – на последующие клети.

Рассмотрим работу САРН на участке между клетями i и $i+1$ (рис. 3.6). Рычаг петледержателя, расположенного в межклетевом промежутке, устанавливается в необходимое положение приводом петледержателя Δ . Угол подъема рычага β_i и момент на валу привода $M_{\Delta i}$ измеряются измерителями ИУ и ИМ.

Вычислительное устройство ВУ по значениям β_i и M_{di} определяет расчетное значение натяжения T_i , действующего в полосе между клетями i и $i+1$. Расчет выполняется с учетом моментов $M_{\text{п}}$, $M_{\text{изг}}$ и $M_{\text{нейр}}$. Регулятор момента РМ анализирует отклонение расчетного натяжения T_i от заданного значения T_{zi} и в функции этого отклонения вырабатывает управляющее воздействие U_{di} на двигатель привода петледержателя D , осуществляя регулирование величины T_i .

Заданное (рабочее) положение рычага петледержателя β_{zi} во время прокатки обеспечивается корректировкой частоты вращения валков клети $i+1$ относительно начальной уставки ω_{zi+1} . Регулятор скорости РС двигателя главного привода ДГП управляет частотой вращения валков ω_{i+1} в функции отклонения угла подъема рычага β_i от заданного значения β_{zi} .

Аналогично строятся САРН для остальных межклетевых промежутков (см. рис. 3.6).

На рис. 3.7 приведена структурная схема системы стабилизации натяжения (ССН), базирующейся на статическом петледержателе [3]. В исходном положении ролик петледержателя находится на уровне линии прокатки.

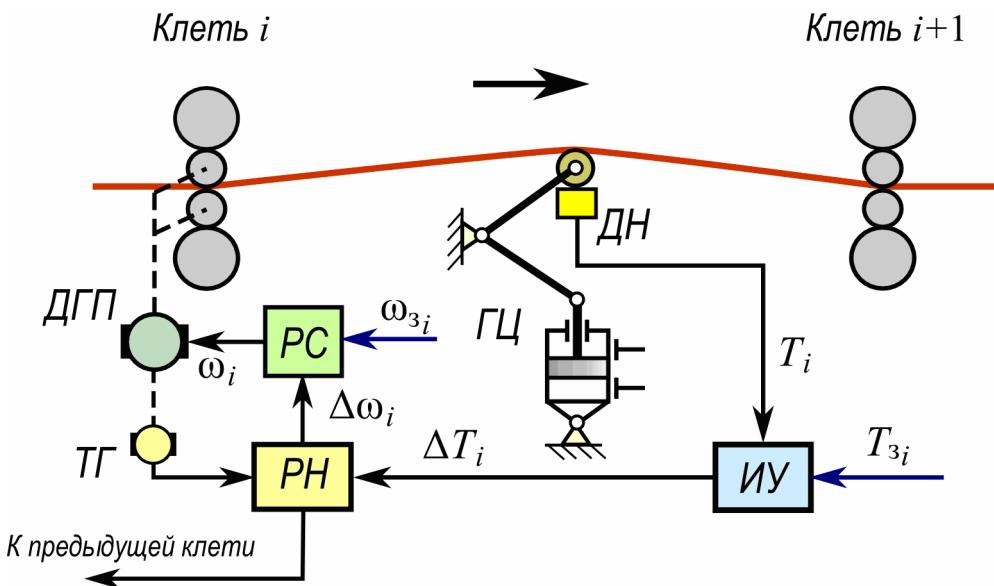


Рис. 3.7. Структурная схема системы стабилизации натяжения со статическим петледержателем и датчиком натяжения

После входа металла в клеть $i+1$ ролик петледержателя устанавливается гидроцилиндром ГЦ в рабочее положение, характеризующееся небольшим превышением над уровнем прокатки (порядка 50 мм). В этом положении ролик удерживается гидроцилиндром в течение всего цикла прокатки.

Измерение вертикальной составляющей действующей на ролик петледержателя силы от натяжения полосы, ее массы и момента изгиба осуществляется датчиками натяжения ДН, установленными в опорах ролика. Разница ΔT_i между заданным усилием T_{zi} и измеренным T_i вычисляется измерительным устройством ИУ и является регулирующим воздействием,

поступающим в регулятор натяжения полосы РН. Туда же поступает сигнал от тахогенератора ТГ о частоте вращения двигателя главного привода клети ДГП. Регулятор натяжения воздействует на регулятор скорости РС двигателя привода, обеспечивая стабилизацию заданного натяжения за счет корректировки частоты вращения рабочих валков.

3.4. Система автоматического регулирования ширины полосы

Принцип работы системы регулирования ширины базируется на прямом программном управлении приводами нажимных устройств вертикальных валков черновых клетей. В программу управления шириной вводится заданная ширина готовой полосы. Затем происходит предварительный расчет вероятного уширения в чистовой группе. Этим определяется заданная ширина подката после черновой группы как разность между шириной готовой полосы и уширением в чистовой группе.

После определения ширины подката следует рассчитать обжатия по ширине в черновой группе клетей. Делается попытка получить заданную ширину подката за счет обжатий в первых вертикальных клетях. В последующих вертикальных клетях производится лишь снятие ожидаемого уширения вследствие обжатия в горизонтальных клетях. В результате расчета определяются программы управления шириной и предварительные величины растворов валков для всех вертикальных клетей, выдаются уставки системам позиционного управления вертикальными валками. После каждого пропуска в вертикальной клети и следующего за ним пропуска в горизонтальной клети производится пересчет выходной ширины. Точность системы регулирования ширины существенно повышается, если обеспечено прямое измерение сил прокатки в вертикальных клетях.

Пересчитанная ширина подката на выходе из последней клети черновой группы сравнивается с замеренной шириной. Разность подлежит обработке статистическим методом. Результатом этого расчета является коррекция растворов валков вертикальных клетей.

Второй контур регулирования ширины получает информацию от измерителя ширины на выходе из чистовой группы клетей. Определяется разность между измеренной шириной полосы за чистовой группой клетей и измеренной шириной подката за черновой группой. Сравнение предварительно рассчитанного и измеренного уширений определяет величину коррекции расчетных значений уширения в чистовой группе клетей. Таким образом осуществляется адаптация параметров математической модели системы регулирования ширины к реальным условиям прокатки конкретной полосы.

Для определения уширения может быть использована зависимость [2]:

$$\Delta b = C_B C_\sigma a \left(\sqrt{R \Delta h} - \frac{\Delta h}{2\mu} \right) \ln \frac{h_0}{h_l}; \quad (3.9)$$

$$a = 0,5 + 0,48(1-\varepsilon)\varepsilon;$$

$$C_B = k(1-\varepsilon) \left(\frac{b_0}{\sqrt{R\Delta h}} - 0,15 \right) e^{\left(1 - \frac{b_0}{\sqrt{R\Delta h}} m \right)} + \varepsilon;$$

$$k = \delta^2 / (0,85\delta^2 - 1); \quad m = \delta^2 / (\delta^2 - 1);$$

$$\delta = 2\mu\sqrt{R/\Delta h}; \quad C_\sigma = 1 - (2\sigma/\sigma_\phi),$$

где Δb – уширение металла при прокатке в горизонтальных валках;
 R – радиус рабочего валка;
 $\varepsilon; \Delta h$ – относительное и абсолютное обжатия;
 $h_0; h_1$ – толщина металла перед клетью и за клетью;
 μ – коэффициент трения;
 b_0 – ширина металла перед клетью;
 σ – натяжение (σ_0 – заднее, σ_1 – переднее);
 σ_ϕ – фактическое сопротивление деформации с учетом температуры, скорости и степени деформации.

Эффективность обжатий в вертикальных клетях черновой группы неравнозначна. Характерной особенностью прокатки металла в вертикальных валках является локализация области интенсивной пластической деформации у контактной поверхности, что приводит к появлению значительного утолщения полосы у боковых кромок и уменьшению деформации средних по ширине слоев металла. При дальнейшей прокатке в горизонтальных валках металл из боковых утолщений течет преимущественно в направлении ширины, что в сочетании с естественным уширением приводит к уменьшению эффекта изменения ширины полосы за счет обжатия в вертикальных валках [3].

С уменьшением толщины прокатываемого металла эффективность обжатия в вертикальных валках снижается. Это накладывает дополнительные условия на систему регулирования ширины в части прогнозирования уширения при прокатке в горизонтальных валках и упреждающего обжатия в первых вертикальных клетях.

Для ликвидации утолщения металла у боковых кромок обжатие в вертикальных клетях должно определяться с учетом глубины проникновения пластической деформации. Границное условие перехода от прокатки с вытяжкой (без утолщения боковых кромок) к прокатке без вытяжки выражается уравнением [3]:

$$l/h_0 = 0,65 - 0,25\sqrt{b_0/l}, \quad (3.10)$$

что идентично

$$\Delta b = \frac{h_0^2}{R_B} \left(0,65 - 0,25 \frac{\sqrt{b_0}}{\sqrt[4]{R_B \Delta b}} \right)^2, \quad (3.11)$$

где $l = \sqrt{R_{\text{в}} \Delta b}$ – длина дуги захвата при прокатке в вертикальных валках;

$R_{\text{в}}$ – радиус вертикального валка.

При прокатке с вытяжкой левая часть уравнения (3.10) больше правой. Оптимальную величину абсолютного обжатия в вертикальных валках можно определить по формуле [3]:

$$\Delta b_{\text{опт}} = h_0^2 / R_{\text{в}}. \quad (3.12)$$

Системы регулирования ширины полосы с прямым процессорным управлением современных непрерывных широкополосных станов, обеспечивают прокатку со среднеквадратичным отклонением ширины полосы от заданного номинала не более 2 мм.

3.5. Системы автоматического регулирования толщины полосы в чистовой группе клетей

Система автоматического регулирования толщины полосы (САРТ) – одно из ключевых звеньев в АСУ ТП непрерывного широкополосного стана. Ее назначение – обеспечение минимальной продольной разнотолщинности готовой полосы. Основным критерием оценки САРТ является точность регулирования, обеспечиваемая совершенной аппаратурой управления и быстродействующими приводами изменения раствора валков.

3.5.1 САРТ на основе метода Головина – Симса

Наибольшее распространение в составе САРТ современных широкополосных станов горячей прокатки получили системы, реализующие зависимость Головина – Симса:

$$h_1 = S_0 + \frac{P}{C_k}, \quad (3.13)$$

где h_1 – толщина прокатываемой полосы;

S_0 – раствор ненагруженных валков (при отсутствии металла в клети);

P – сила прокатки (вертикальная составляющая силы давления металла на валки);

C_k – коэффициент жесткости клети в направлении силы прокатки.

Другими словами, сила прокатки определяет величину деформации клети (растяжение станины, сжатие нажимных винтов, прогиб валков и т.д.), из-за чего зазор между валками при прокатке и, соответственно, толщина прокатанной полосы увеличиваются. Коэффициент C_k представляет собой обобщенную оценку жесткости клети и является для данной клети константой.

В соответствии с (3.13) для обеспечения полной компенсации продольной разнотолщинности (поддержания постоянной величины h_1)

необходимо регулировать раствор валков S_0 в процессе прокатки в зависимости от изменения силы прокатки P , выполняя условие

$$\Delta S = \Delta P / C_k, \quad (3.14)$$

где ΔS – изменение раствора валков, необходимое для обеспечения заданной толщины полосы h_1 при изменении силы прокатки на величину ΔP .

Таким образом, при увеличении силы прокатки относительно некоторого номинального значения на ΔP , система регулирования должна уменьшить раствор валков на величину ΔS и наоборот. Очевидно, что изменение раствора валков повлечет за собой изменение силы прокатки. Процесс стабилизируется при изменении силы прокатки на величину

$$\Delta P_0 = \delta h (C_n + C_k), \quad (3.15)$$

где δh – величина скомпенсированной продольной разнотолщинности при идеально работающем регуляторе толщины;
 C_n – коэффициент жесткости прокатываемой полосы, $C_n = -dP/dh_1$;
 ΔP_0 – изменение силы прокатки при полной компенсации разнотолщинности.

Недостатком метода является невозможность устранения отклонений толщины, обусловленных эксцентриситетом валков. При уменьшении величины раствора вследствие эксцентриситета валков увеличивается сила прокатки, что воспринимается системой регулирования как увеличение раствора, для компенсации которого требуется включить привод нажимного устройства в сторону сведения валков. В результате система регулирования вместо увеличения раствора и возвращения его величины к заданному значению будет, наоборот, уменьшать этот зазор, увеличивая тем самым колебания толщины полосы.

Структурная схема САРТ на основе метода Головина – Симса применительно к регулятору толщины одной клети приведена на рис. 3.8. Рабочая клеть снабжена измерителем силы прокатки IS (мездоза) и датчиком положения нажимных винтов $ДП$, с помощью которого измеряется раствор валков. При настройке регулятора толщины ему задаются номинальное значение силы прокатки P_3 и соответствующая этой силе начальная величина раствора валков S_3 .

В устройстве сравнения $YC1$ вырабатывается сигнал отклонения ΔP как разность действительной P_d и заданной P_3 сил прокатки. С выхода $YC1$ напряжение, пропорциональное ΔP , подается на вход фильтра Φ , который подавляет гармонические составляющие сигнала ΔP , обусловленные эксцентриситетом валков. С выхода фильтра Φ сигнал без гармоник $\Delta P_{ср}$ поступает на вход суммирующего усилителя CU . Коэффициент передачи CU по этому входу настраивается таким образом, чтобы обеспечить учет коэффициента жесткости клети C_k в соответствии с (3.14).

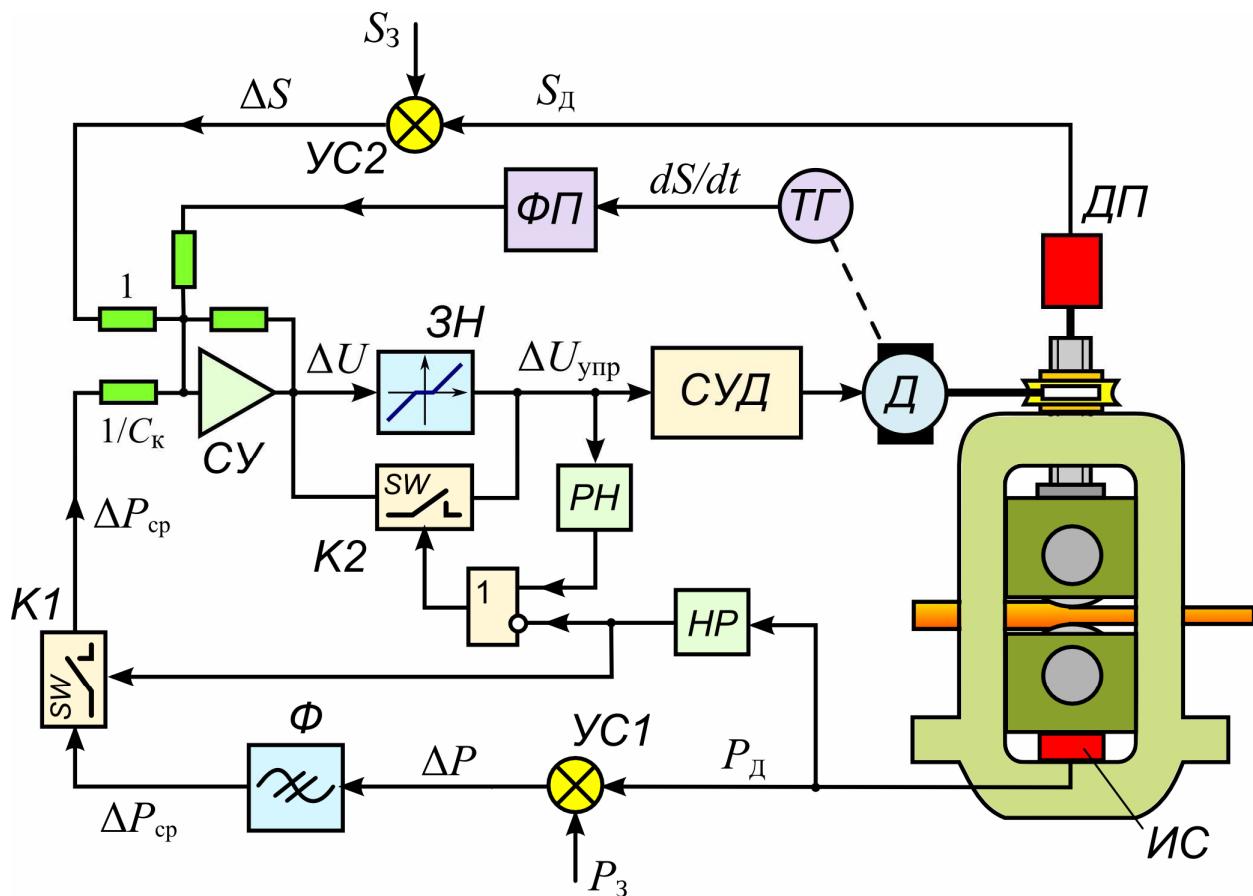


Рис. 3.8. САРТ, реализующая зависимость Головина – Симса

Подача напряжения с выхода Φ на вход СУ осуществляется только в том случае, если металл находится в валках, что обеспечивается электронным ключом $K1$. Сигнал на замыкание ключа – логическая «1» поступает с нагрузочного реле HP , срабатывающего при появлении сигнала $P_{\text{д}}$ на выходе измерителя силы ИС . Отключение сигнала ΔP при отсутствии прокатки необходимо для начальной настройки нажимного механизма на заданный размер S_3 .

На второй вход сумматора СУ поступает сигнал отклонения ΔS , формируемый устройством сравнения $\text{УС}2$ как разность действительного $S_{\text{д}}$ и заданного S_3 растворов валков.

Если в процессе прокатки сила $P_{\text{д}}$ не отличается от номинального значения P_3 , а установленный раствор валков $S_{\text{д}}$ равен заданному S_3 , сигналы ΔP и ΔS равны 0, и напряжение на выходе сумматора СУ , соответственно, отсутствует. Изменение силы прокатки, вызванное колебаниями толщины подката, наличием участков с различной температурой и другими факторами, приводит к возникновению сигнала $\Delta P \neq 0$, что вызывает появление на выходе СУ управляющего напряжения ΔU . Это напряжение поступает на вход системы управления двигателем привода нажимного устройства СУД . Двигатель запускается и начинает перемещать валки в направлении, при котором знак ΔS противоположен знаку ΔP . При этом напряжение ΔU , пропорциональное сумме $\Delta S + \Delta P/C_k$, начинает уменьшаться по мере

перемещения валка (по мере увеличения ΔS). Работа привода прекращается при достижении $\Delta U = 0$ на выходе сумматора CU .

Допустим, что на вход клети поступил участок полосы с повышенной толщиной. Увеличение обжатия в клети вызовет увеличение силы прокатки, в результате чего толщина полосы на выходе из клети также увеличится. Появление на выходе $YC1$ положительного напряжения, пропорционального ΔP , вызовет появление на выходе CU отрицательного напряжения $-\Delta U \approx \Delta P$. В результате привод нажимных винтов переместит верхний валок вниз, т. е. в сторону уменьшения раствора валков, чему соответствует отрицательная величина ΔS . Перемещение верхнего валка вниз означает увеличение обжатия, а, следовательно, и увеличение силы прокатки, что приведет к некоторому росту уровня сигналов P и ΔP , однако уровень сигнала ΔS на входе CU в процессе сведения валков изменяется быстрее, чем напряжение ΔP , поэтому результирующее напряжение на выходе CU уменьшается и достигает величины $\Delta U = 0$.

Помимо сигналов ΔP и ΔS на сумматор CU через функциональный преобразователь ΦP поступает напряжение с тахогенератора TT двигателя привода нажимного устройства, пропорциональное скорости движения механизма (см. рис. 3.8). При соответствующем выборе параметров ΦP достигается своевременное изменение полярности ΔU на выходе CU , что обеспечивает перевод двигателя в тормозной режим и его точную остановку.

В процессе работы регулятора толщины при малых отклонениях толщины от заданного значения напряжение на входе CUD может оказаться слишком малым, чтобы обеспечить в силовой цепи двигателя ток, достаточный для создания крутящего момента, превышающего момент сил трения покоя в механизме. В результате неподвижный якорь двигателя длительное время может находиться под током, что вызовет его перегрев. Чтобы исключить эту возможность, в схеме регулятора предусмотрен блок зоны нечувствительности ZH (см. рис. 3.8). Ширина зоны нечувствительности определяется величиной порогового напряжения U_n . Блок ZH обеспечивает вычитание из ΔU независимо от его полярности порогового напряжения U_n . Эта разность напряжений поступает на вход CUD только в том случае, если $\Delta U > +U_n$ или $\Delta U < -U_n$.

Таким образом, при малом уровне ΔU двигатель нажимного устройства обесточен. При превышении напряжением ΔU порогового значения U_n на входе CUD появляется напряжение, равное разности $\Delta U - U_n$. Это напряжение вызывает срабатывание реле напряжения RH , подключенного к входу CUD (см. рис. 3.8). Срабатывание RH , в свою очередь, вызывает появление логической «1» на выходе элемента «ИЛИ», что приводит к замыканию электронного ключа $K2$, соединяющего выход CU со входом CUD напрямую, минуя блок ZH . В результате напряжение на входе CUD увеличивается скачком с $\Delta U - U_n$ до ΔU . Такое увеличение напряжения гарантирует возникновение в силовой цепи тока, при котором момент двигателя выше момента статического сопротивления покоя.

Следует отметить, что зона нечувствительности включается в работу только тогда, когда металл находится в валках, что обеспечивается подачей инвертированного сигнала нагрузочного реле *HP* на второй вход элемента «ИЛИ», управляющего электронным ключом *K2*.

Очевидно, что динамические показатели двигателей привода нажимного устройства являются одним из основных факторов повышения точности регулирования, а частота и продолжительность включений двигателей определяются частотой возмущающих воздействий и шириной зоны нечувствительности регулятора. В этой связи на станах горячей прокатки все более широкое распространение получают гидравлические нажимные устройства (например, в виде гидроцилиндров, установленных под подушками нижнего опорного вала), которые совмещают в себе функции силового канала регулирования толщины и защиты клети от перегрузок.

3.5.2 Устранение влияния эксцентрикситета валков на толщину полосы

Как уже отмечалось, САРТ на основе метода Головина – Симса не может устранить отклонения толщины, обусловленные эксцентрикситетом валков. Применительно к непрерывному листовому стану эта проблема характерна для последней клети чистовой группы, поскольку для других клетей стана отклонения толщины, обусловленные эксцентрикситетом валков предыдущей клети, устраняются при прокатке в последующей клети.

В последней клети чистовой группы снижение разнотолщинности, обусловленной эксцентрикситетом валков, может быть достигнуто путем реализации так называемого *режима «мягкой» клети*. Продольная разнотолщинность, вызванная эксцентрикситетом валков, слагается из двух составляющих – наследственной разнотолщинности, образованной в предпоследней ($n - 1$)-й клети, и собственной разнотолщинности, образованной в последней n -й клети. В самом неблагоприятном случае, когда эксцентрикситеты верхнего и нижнего валков направлены навстречу друг другу, разнотолщинность в указанных клетях можно определить как:

$$\delta h_{\exists n-1} \approx \frac{\Sigma S_{\exists n-1}}{1 + C_{\Pi n-1}/C_{K n-1}}; \quad (3.16)$$

$$\delta h_{\exists n} = \frac{\delta h_{\exists n-1}}{1 + C_{K n}/C_{\Pi n-1}} + \frac{\Sigma S_{\exists n}}{1 + C_{\Pi n}/C_{K n}}, \quad (3.17)$$

где $\delta h_{\exists n-1}$ – разнотолщинность от эксцентрикситета валков, возникшая при прокатке в предпоследней клети;
 $\delta h_{\exists n}$ – суммарная разнотолщинность от эксцентрикситета валков на выходе из последней клети;
 ΣS_{\exists} – суммарная величина эксцентрикситета валков.

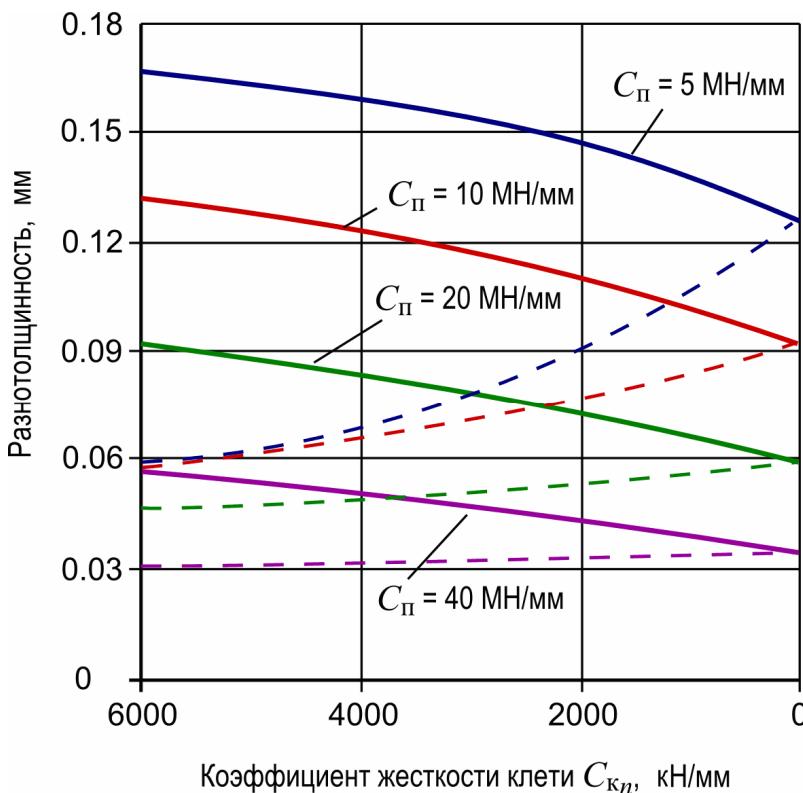


Рис. 3.9. Влияние жесткости n -й клети на разнотолщинность, обусловленную эксцентризитетом валков. Сплошные линии графика соответствуют суммарной разнотолщинности δh_{sum} , пунктирные — ее наследственной составляющей от эксцентризитета в $(n - 1)$ -й клети

Анализ зависимостей (3.16) и (3.17) показывает, что уменьшение коэффициента жесткости клети C_k («мягкая» клеть) позволяет снизить влияние эксцентризитета валков на толщину полосы. На рис. 3.9 приведены расчетные зависимости $\delta h_{\text{sum}} = f(C_{kn})$ для четырех значений коэффициентов жесткости полосы $C_{\Pi,n} = 5; 10; 20$ и 40 МН/мм в случае $\Sigma S_{\text{sum}} = \Sigma S_{n-1} = 0,2$ мм. При расчете принималось, что коэффициент жесткости полосы в предпоследней клети $C_{\Pi,n-1} = 0,66 C_{\Pi,n}$, а коэффициент жесткости предпоследней клети $C_{kn-1} = 6000$ кН/мм [3].

Из графика на рис. 3.9 следует, что при снижении коэффициента жесткости клети до нуля (абсолютно «мягкая» клеть) разнотолщинность от эксцентризитета валков уменьшается на $0,02\dots0,04$ мм и определяется исключительно наследственной составляющей от разнотолщинности, образовавшейся в предыдущей клети.

Таким образом, в отличие от традиционного регулирования толщины полосы по методу Головина – Симса, когда САРТ регулирует зазор между валками в соответствии с (3.14) с целью обеспечения условия $h_1 = \text{const}$ (так называемый режим «естественной клети»), в режиме «мягкой клети» регулятор САРТ обеспечивает условие $P = \text{const}$. Очевидно, что режим «мягкой клети» может быть обеспечен путем инвертирования (смены знака) сигнала отклонения силы прокатки ΔP .

Колебания толщины полосы, вызванные эксцентрикитетом валковой системы, имеют достаточно высокую частоту (порядка 2...6 Гц), определяемую частотой вращения валков. Очевидно, что реализовать регулирование толщины в таком режиме электромеханические нажимные устройства не могут, что определило внедрение на современных станах горячей и холодной прокатки быстродействующих гидравлических нажимных устройств с цифровым управлением. Современные системы управления нажимными устройствами обеспечивают их работу в режимах как «естественной», так и «мягкой» клети в зависимости от особенностей технологического процесса и настройки стана по командам САРТ или по сигналам оператора с центрального поста управления станом [4].

3.5.3 САРТ на основе измерения толщины металла в очаге деформации по положению опор прокатных валков

Рассмотренные САРТ основываются на косвенном методе измерения толщины в очаге деформации по показаниям измерителей силы прокатки (месдоз). Как следует из изложенного выше, необходимость устранения влияния эксцентрикитета валков ведет к существенному усложнению схемы системы регулирования толщины.

От указанного недостатка свободны системы, в которых измерение толщины полосы осуществляется на основе измерения расстояния между подшипниковыми опорами или непосредственно между шейками рабочих валков. По сути, этот метод – эквивалент прямого измерения толщины металла в очаге деформации.

Для измерения расстояния между опорами валков могут применяться различные типы измерителей и методы измерения, например:

- индуктивные датчики или гидравлические щупы, измеряющие зазор между подушками рабочих валков. Такие измерители размещаются непосредственно в подушках и при смене (перевалке) валков демонтируются вместе с подушками;
- датчики давления в гидравлической системе распора рабочих валков. Изменение расстояния между подушками в этом случае измеряется косвенным методом по колебаниям давления в замкнутом объеме жидкости в гидросистеме [5]. Использование подобного метода измерения существенно упрощает эксплуатацию информационного канала САРТ, так как датчик давления располагается вне клети;
- индуктивные или оптические датчики положения подушек валков, стационарно смонтированные на станине рабочей клети. При перевалке валков такие датчики не требуют демонтажа. Наиболее точные результаты в этом случае, очевидно, дает измерение расстояния непосредственно между шейками рабочих валков (если конструкция клети допускает возможность такого измерения), либо измерение расстояния между их подушками. Вариант конструкции подобного измерительного устройства представлен на рис. 3.10.

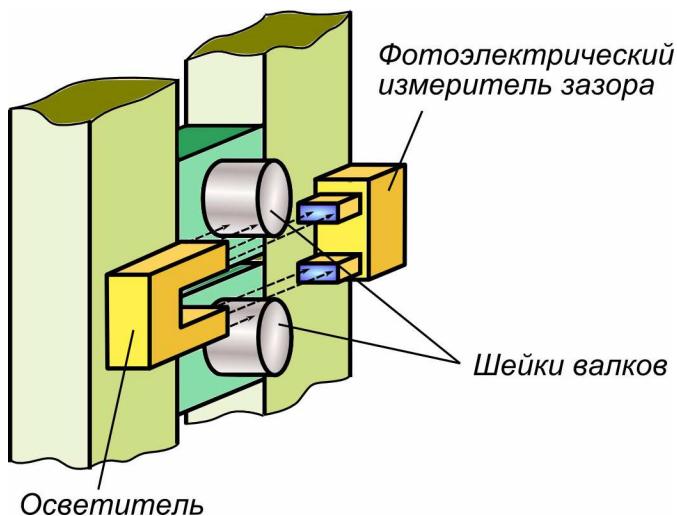


Рис. 3.10. Фотоэлектрический измеритель расстояния между шейками рабочих валков [6]

Схема САРТ, в которой использован метод измерения зазора между валками по расстоянию между шейками рабочих валков, приведена на рис. 3.11. Расстояние между шейками валков определяется по величине просвета, через который на фотодатчики измерителя (рис. 3.10) проходят параллельные пучки света от специального осветителя.

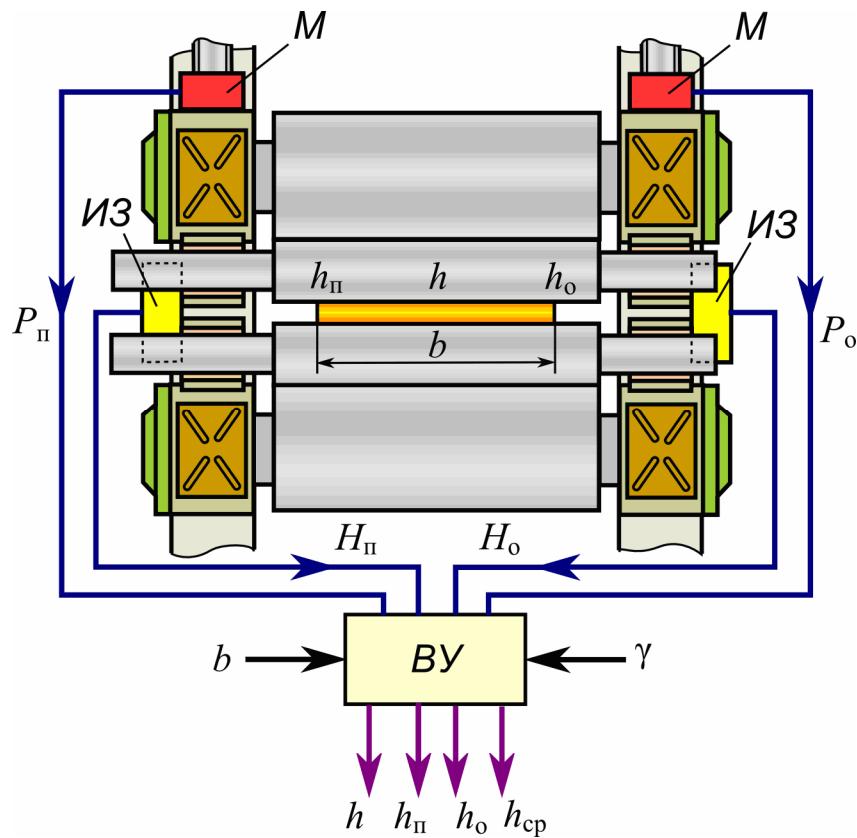


Рис. 3.11. Схема измерения толщины полосы по расстоянию между шейками рабочих валков

Осветители и фотодатчики располагаются непосредственно на стойках станины, как со стороны обслуживания, так и со стороны привода, обеспечивая измерение зазора с обеих сторон рабочих валков по их длине (рис. 3.11). Очевидно, что простого измерения зазоров между шейками валков еще не достаточно для определения величины зазора между самими валками, поскольку она зависит еще и от величины прогиба валков и их профилировки.

Прогиб валков под действием сил, действующих в очаге деформации при прокатке, определяется как величиной этих сил, так и характером их распределения по длине бочки валка. Если равнодействующая указанных сил (сила прокатки) приложена в середине длины валка, то максимальный прогиб имеет место также в середине. Если же равнодействующая смешена относительно середины длины валка, то смещается и точка максимального прогиба.

Таким образом, величина зазора между валками зависит как от величины стрелы прогиба, так и от начального профиля валков, а вычисление толщины полосы и ее поперечной разнотолщинности необходимо выполнять по показаниям измерителей зазора между шейками валков *ИЗ* и измерителей силы – месдоз *M* (рис. 3.11) с учетом заданной профилировки комплекта валков.

В представленной на рис. 3.11 системе эти вычисления осуществляются с помощью вычислительного устройства *ВУ*. Исходной информацией для расчета являются показания измерителей зазоров H_p и H_o , установленных на клети, соответственно, со стороны привода и со стороны обслуживания, сигналы месдоз (силы P_p и P_o), а также номинальная ширина b прокатываемой полосы и параметр γ , характеризующий профилировку валков. На основании этих данных *ВУ* рассчитывает и выдает значения толщины полосы по ее середине и по краям h , h_p , h_o , а также величину среднего значения h_{cp} , которое и используется для регулирования толщины полосы по длине.

Хотя рассмотренный метод измерения толщины полосы, как и метод Головина – Симса, также является косвенным, он свободен от недостатка, обусловленного наличием эксцентрикитета опорных валков. Этот эксцентрикитет будет вызывать изменение расстояния между шейками рабочих валков, идентичное изменению зазора между самими валками.

4. Современные принципы построения промышленных систем автоматизированного управления [7,8]

В последней четверти прошлого столетия в странах с передовой технологией были сформулированы принципиально новые концепции развития систем управления технологическими комплексами и производственными системами. Предпосылками к этому стали устойчивая тенденция увеличения доли цифровых методов преобразования, обработки, передачи и хранения информации во всех сферах деятельности человека, и регулярная смена поколений технических средств обработки информации и информационного обмена. Эти средства могут непосредственно не затрагивать традиционные области автоматизации: датчики, приводы, регуляторы, однако меняют среду существования средств автоматизации в целом.

В период бурного развития микропроцессорной техники (80-е годы XX века) было разработано и внедрено в различных отраслях промышленности огромное количество технических устройств для систем автоматического управления с жёсткой логической структурой, обладавших вполне удовлетворительными характеристиками. Вместе с тем становилось ясно, что только использование перепрограммируемых и универсальных устройств обеспечит будущее технических средств автоматики. На этом этапе произошло разделение путей развития систем управления на две линии:

- на основе универсальных ЭВМ;
- на основе более простых ЭВМ и контроллеров, оптимизированных для требуемой задачи и поэтому не уступающих в эффективности при использовании в рамках именно этой задачи.

Разумное сочетание указанных технических решений обеспечивает высокое качество систем автоматического управления. Для современных систем управления технологическими объектами наряду с развитием и совершенствованием традиционных средств автоматизации характерно широкое использование готовых стандартизованных аппаратных и программных технологий. Построение АСУ ТП на основе стандартных компонентов обеспечивает системе такие важные свойства, как *модульность* и *масштабируемость* (способность системы адаптироваться к расширению предъявляемых требований и возрастанию объемов решаемых задач).

Подобный подход к разработке систем автоматизированного управления получил название *концепции открытых систем*. Создание АСУ ТП в этом случае требует *системной интеграции*, подразумевающей, что аппаратно-программные средства различных фирм-производителей совместимы снизу доверху и разработчик АСУ ТП (*фирма-интегратор*) по спецификации заказчика подбирает все необходимое оборудование и программное обеспечение. Всякая открытая система строится по иерархическому принципу и состоит из множества подсистем, при этом внутренняя архитектура каждой подсистемы в иерархии подобна глобальной архитектуре

системы. Это означает, что программное обеспечение для систем любого уровня создаётся на общих принципах и является достаточно универсальным.

Таким образом, современные системы автоматизированного управления должны быть *распределенными* и обладать *открытой архитектурой*. Выполнение этих условий обеспечивает живучесть системы, возможность ее совершенствования и развития.

Прогресс в области микропроцессорной техники и сетевых технологий сделал возможным и экономически оправданным строить системы автоматики, в полной мере удовлетворяющие перечисленным выше требованиям. Стало целесообразным выделять в общей структуре системы отдельные локальные задачи, решение которых поручать локальным *программируемым контроллерам*. Контроллеры при этом связаны между собой и другими компонентами в иерархической структуре АСУ ТП компьютерными сетями передачи данных. Сеть позволяет контроллерам в качестве аргументов для вычисления управляющего вектора использовать переменные других контроллеров, обеспечивая связанность системы управления в целом. Такая архитектура существенно увеличивает производительность, надежность и масштабируемость систем.

4.1 Программируемые контроллеры



Рис. 4.1. PLC SIMATIC S7-400
фирмы Siemens AG [10]

Программируемый логический контроллер (PLC – Programmable Logic Controller) – это специализированное микропроцессорное устройство со встроенным аппаратным и программным обеспечением, которое используется для выполнения функций управления технологическим оборудованием [9]. PLC состоит из двух основных блоков: *процессорного модуля* и *системы ввода/вывода* внешних сигналов. Процессорный модуль управляет всей логикой работы PLC и включает в себя

процессор и память. Систему ввода/вывода PLC подключают к *полевым устройствам* (датчики, реле-усилители, выключатели, пускатели, и другие устройства автоматики, расположенные непосредственно на технологическом оборудовании). Система ввода/вывода обеспечивает интерфейс между процессорным модулем и информационными (входами) и управляющими (выходами) каналами. С помощью входных интерфейсов процессор «читает» входные данные с подключенных полевых устройств, затем выполняет управляющую программу, которая загружена в память процессорного модуля, и через выходные интерфейсы выдает управляющие

сигналы объекту управления. Этот процесс, называемый циклом сканирования, выполняется в одной последовательности без остановки и меняется только тогда, когда вносятся изменения в управляющую программу.

Для определения состояния объекта управления PLC часто используются *дискретные* входы и выходы (например, сигналы путевых выключателей «Включено»/«Выключено» или команды приводам «Пуск»/«Останов»). При управлении непрерывными процессами PLC может принимать и выдавать *аналоговые* сигналы. Программа контроллера в этом случае отслеживает непрерывно изменяющиеся во времени данные и осуществляет обслуживание оборудования, которое по своему принципу действия также может быть аналоговым (например, управление положением клапанной задвижки, регулирующей температуру, по сигналу температурного датчика). Подобные применения называют непрерывными приложениями, поскольку обычно они не имеют определенного начала или конца. После инициализации всего алгоритма PLC должен поддерживать обслуживаемый процесс в «устойчивом» состоянии.

Таким образом, программируемый промышленный контроллер:

- осуществляет в модулях ввода преобразование входных аналоговых сигналов в цифровой код, либо принимает цифровые сигналы от дискретных источников;
- выполняет обработку полученной информации в процессорном модуле согласно алгоритму, заданному в прикладной программе;
- формирует выходные сигналы управления с помощью модулей вывода;
- обменивается информацией с другими устройствами системы автоматического регулирования по каналам связи с помощью интерфейсных модулей.

4.2. Интеллектуальные датчики и исполнительные устройства

В системах автоматизированного управления обычно имеется большое количество разнообразных датчиков и измерителей физических величин, таких, как температура, давление, расход жидкостей, скорость и т.п. Датчики преобразуют исходную физическую величину в некоторую стандартную величину другой физической природы, как правило, в электрическое напряжение. Преобразование этой промежуточной величины в цифровую форму для дальнейшей обработки на ЭВМ выполняет система ввода/вывода PLC.

Сравнительно недавно появилось и стремительно развивается новое поколение датчиков и измерителей, в которых имеются встроенные контроллеры, осуществляющие необходимые преобразования сигнала. Такой *интеллектуальный датчик* сам становится элементом вычислительной сети, поддерживающим сетевой протокол и передающим данные в цифровой форме. Часто в контроллере интеллектуального датчика производится

предварительная цифровая обработка сигнала, например, коррекция систематической погрешности преобразователя, предварительная фильтрация случайных помех, а также контроль работоспособности. Всё больше технических средств систем автоматизированного управления становятся чисто цифровыми, в которых преобразование физических данных происходит непосредственно в цифровую форму, подготовленную к передаче по каналу связи.

Интеллектуальными (со встроенными микроконтроллерами) в системах автоматизированного управления могут быть и другие аппаратные компоненты, в первую очередь исполнительные механизмы и сервоприводы. *Интеллектуальный исполнительный механизм* способен совершать сложные траекторные движения, контролировать свое состояние и адаптироваться к изменениям внешней среды.

Одним из основных принципов, реализованных при создании исполнительных механизмов нового поколения, является перенос функциональной нагрузки от механических узлов к интеллектуальным (электронным, компьютерным и информационным) компонентам, которые гораздо легче перепрограммируются под новые задачи. К числу таких задач относятся изменение и расширение диапазонов регулирования скоростей, ускорений и моментов, развиваемых исполнительным механизмом; координация управления пространственным перемещением данного исполнительного устройства с управлением другими внешними устройствами

Примером интеллектуальных исполнительных механизмов могут служить получившие в последнее время широкое распространение в технологических машинах и агрегатах *системы векторного частотного управления* трехфазными асинхронными двигателями [11].

Как и интеллектуальные датчики, интеллектуальные исполнительные механизмы поддерживают сетевые протоколы и могут участвовать в обмене цифровыми данными как элементы вычислительной сети.

4.3. Сетевые компоненты систем автоматизированного управления

Для передачи информации в системах автоматизированного управления технологическими комплексами всё шире используются не традиционные каналы связи (многожильные кабели, телефонные каналы и т.п.), а локальные компьютерные сети (LAN – Local Area Network). Существенная разница при этом заключается не столько в виде физической среды передачи информации, сколько в гораздо более сложных и эффективных способах кодирования и сжатия информации. К сожалению, современные решения для построения локальных информационных сетей не всегда оказываются приемлемыми в силу негарантированного времени доставки информации (что малопригодно для систем реального времени) и сложности аппаратных решений, особенно для скоростных сетей.

В АСУ ТП часто используют сегменты обычных локальных и глобальных (WAN – Wide Area Network) сетей, например, сети стандарта Ethernet. Большинство локальных сетей имеет выход в глобальную сеть предприятия или сеть Internet, но характер передаваемой информации, принципы организации обмена, режимы доступа к ресурсам внутри локальной сети, как правило, сильно отличаются от тех, что приняты в глобальной сети. По локальной сети может передаваться самая разная цифровая информация: данные, изображения, телефонные разговоры, электронные письма и т.д.

Чаще всего локальные сети используются для совместного использования таких ресурсов, как дисковое пространство, принтеры и выход в глобальную сеть. Абонентами (узлами) сети могут быть не только компьютеры, но и устройства отображения и документирования информации, операторские пульты и т.п. Локальные сети дают возможность организовать систему параллельных вычислений на всех компьютерах сети, что позволяет многократно ускорить решение сложных математических задач. С помощью локальных сетей можно также управлять работой сложной технологической системы с нескольких компьютеров одновременно.

Следует отметить, что специфика задач, решаемых в АСУ ТП, предъявляет исключительно высокие требования к быстродействию и надежности сети. В первую очередь это относится к локальным сетям, обеспечивающим обмен данными между программируемыми контроллерами и системами человека-машинного интерфейса, обмен данными между контроллерами и подключение к контроллерам удаленных интеллектуальных датчиков и исполнительных устройств.

Связь между элементами систем автоматизированного управления на уровне датчиков, приводов, исполнительных механизмов и контроллеров в АСУ ТП обеспечивают *промышленные сети передачи данных*. Эти сети используются для:

- передачи данных между контроллерами, датчиками, измерительными устройствами и исполнительными механизмами;
- диагностики и удалённого конфигурирования датчиков, приводов и исполнительных механизмов;
- калибрования датчиков и измерителей технологических параметров;
- питания датчиков и исполнительных механизмов;
- передачи данных между интеллектуальными датчиками и исполнительными механизмами, минуя центральный контроллер;
- связи между интеллектуальными датчиками, интеллектуальными исполнительными механизмами, PLC и АСУ ТП верхнего уровня.

Для передачи данных в промышленных сетях применяют кабели, волоконно-оптические линии и беспроводную связь (радиомодемы и Wi-Fi). Часто промышленную сеть называют *сетью полевого уровня* или *полевой шиной*. Термин «полевая шина» является дословным переводом английского термина «fieldbus», используемого в зарубежной технической литературе.

Примером промышленной сети может служить очень широко распространенная в европейском машиностроении и управлении промышленным оборудованием мощная сеть полевого уровня Profibus (Process Field Bus), разработанная компанией Siemens AG (Германия) для своих промышленных контроллеров SIMATIC [12]. Profibus обеспечивает обмен данными между *ведущими* и *ведомыми* устройствами или между несколькими ведущими устройствами и позволяет объединять разрозненные устройства автоматизации в единую систему на полевом уровне. Так, например, Profibus может связывать PLC с удаленными ведомыми модулями распределенного ввода/вывода, расположенными вблизи конкретных полевых устройств, либо с индикаторными панелями и органами управления на пультах операторов.

Говоря о сетевых компонентах систем автоматизированного управления, нельзя не упомянуть о таких важнейших понятиях теории сетей, как сервер и клиент. Сервером называется абонент (узел) сети, который предоставляет свои ресурсы другим абонентам, но сам не использует ресурсы других абонентов. Серверов в сети может быть несколько, и не обязательно сервер – самый мощный компьютер. Выделенный сервер – это сервер, занимающийся только сетевыми задачами. Невыделенный сервер может заниматься помимо обслуживания сети и другими задачами. Клиентом (рабочей станцией) называется абонент сети, который только использует сетевые ресурсы, но сам свои ресурсы в сеть не отдает. В принципе, каждый компьютер может быть одновременно как клиентом, так и сервером.

4.4. Архитектура современных автоматизированных систем управления производством

Общая структурная схема современной системы автоматизированного управления производством представлена на рис. 4.2.

Нижний уровень системы составляют датчики, устройства измерения технологических параметров, приводы и исполнительные устройства, установленные на технологическом оборудовании и предназначенные для сбора первичной информации и реализации исполнительных воздействий. Этот уровень называют уровнем *ввода-вывода* (I/O) или *полевым* (Field) уровнем. Устройства полевого уровня могут быть интеллектуальными, в этом случае обмен информацией с ними может осуществляться непосредственно по сети передачи данных.

Следующий уровень системы – программируемые контроллеры. Они выполняют функцию непосредственного автоматического управления технологическими процессами. Управление исполнительными механизмами осуществляется по определенным алгоритмам путем обработки данных о состоянии технологических параметров, полученных посредством измерительных приборов. Этот уровень получил наименование уровня *непосредственного управления* (Control).

Серверы технологических данных и автоматизированные рабочие места (АРМ) операторов технологического оборудования (рис. 4.2) образуют так называемую SCADA-систему, верхний уровень АСУ ТП.

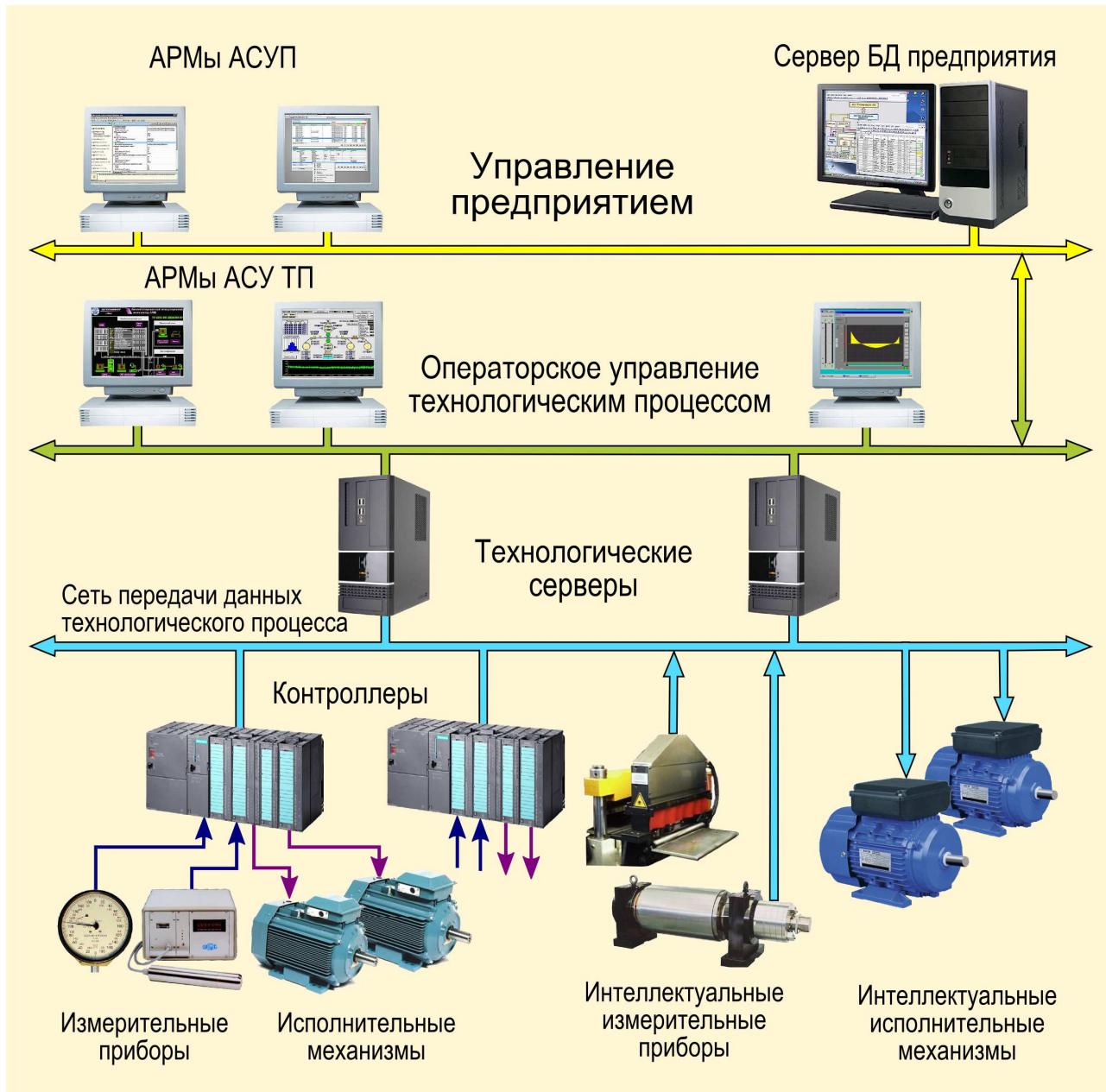


Рис. 4.2. Структура современной промышленной системы автоматизированного управления производством

SCADA – аббревиатура от английского Supervisory Control and Data Acquisition, что переводится как «сбор данных и диспетчерское управление». Серверы обеспечивают работу SCADA-системы, поддерживая протокол обмена данными с технологическими устройствами (контроллерами, интеллектуальными датчиками и исполнительными механизмами) и протокол работы с сетью персональных компьютеров. Основными функциями SCADA-систем являются:

- сбор, первичная обработка и накопление информации о параметрах технологического процесса и состоянии оборудования от промышленных контроллеров и других цифровых устройств, непосредственно связанных с технологической аппаратурой;
- отображение информации о текущих параметрах технологического процесса на экранах АРМ операторов и технического персонала в виде графических мнемосхем;
- отображение графиков текущих значений технологических параметров в реальном времени за заданный интервал;
- операторское управление технологическим процессом;
- обнаружение критических (аварийных) ситуаций;
- вывод на экраны АРМ операторов технологических и аварийных сообщений;
- архивирование истории изменения параметров технологического процесса;
- предоставление данных о параметрах технологического процесса для их использования в системах управления предприятием.

Выше АСУ ТП различных технологических комплексов предприятия в иерархии системы управления расположены:

- *система организации производства MES (Manufacturing Execution System)*. Эта система выполняет упорядоченную обработку информации о ходе изготовления продукции в различных цехах предприятия, обеспечивает управление качеством и предоставляет в реальном времени необходимую информацию для следующих уровней управления предприятием;
- системы *материально-производственного планирования MRP (Manufacturing Resource Planning)* и *планирования производственных ресурсов предприятия ERP (Enterprise Resource Planning)*. В России системы этого уровня больше известны под названием АСУП (автоматизированные системы управления предприятием). Они предназначены для автоматизации планирования производства и финансовой деятельности, снабжения и продаж, анализа, прогнозирования и т.д. [13].

Рассмотренную модель комплексной автоматизации предприятия можно упрощать, объединяя любые два соседних уровня иерархии, но принципиально подход остается одинаковым.

В соответствии с современной идеологией основные задачи управления решаются на нижних уровнях системы, что позволяет повысить быстродействие системы и разгрузить вычислительную сеть от передачи излишней информации. На верхние уровни управления возлагаются только те задачи, для выполнения которых вычислительные средства нижних уровней не приспособлены, например, отображение текущего состояния автоматизируемого производства, работа с большими базами данных (БД), документальное сопровождение деятельности предприятия и т.д.

4.5. Типовая структура современной промышленной АСУ ТП

Комплексные решения в области средств автоматизации управления технологическими процессами в настоящее время предлагает ряд зарубежных и отечественных фирм, таких, например, как Siemens AG (Германия), Octagon Systems (США), Omron (Япония), ЭМИКОН (Россия). Независимо от конкретного разработчика, который, как правило, выступает и в роли системного интегратора, все современные АСУ ТП строятся на основе единых принципов, изложенных выше. Рассмотрим в качестве примера типовой вариант двухуровневой промышленной системы автоматизации, предлагаемый концерном Siemens AG (рис. 4.3).

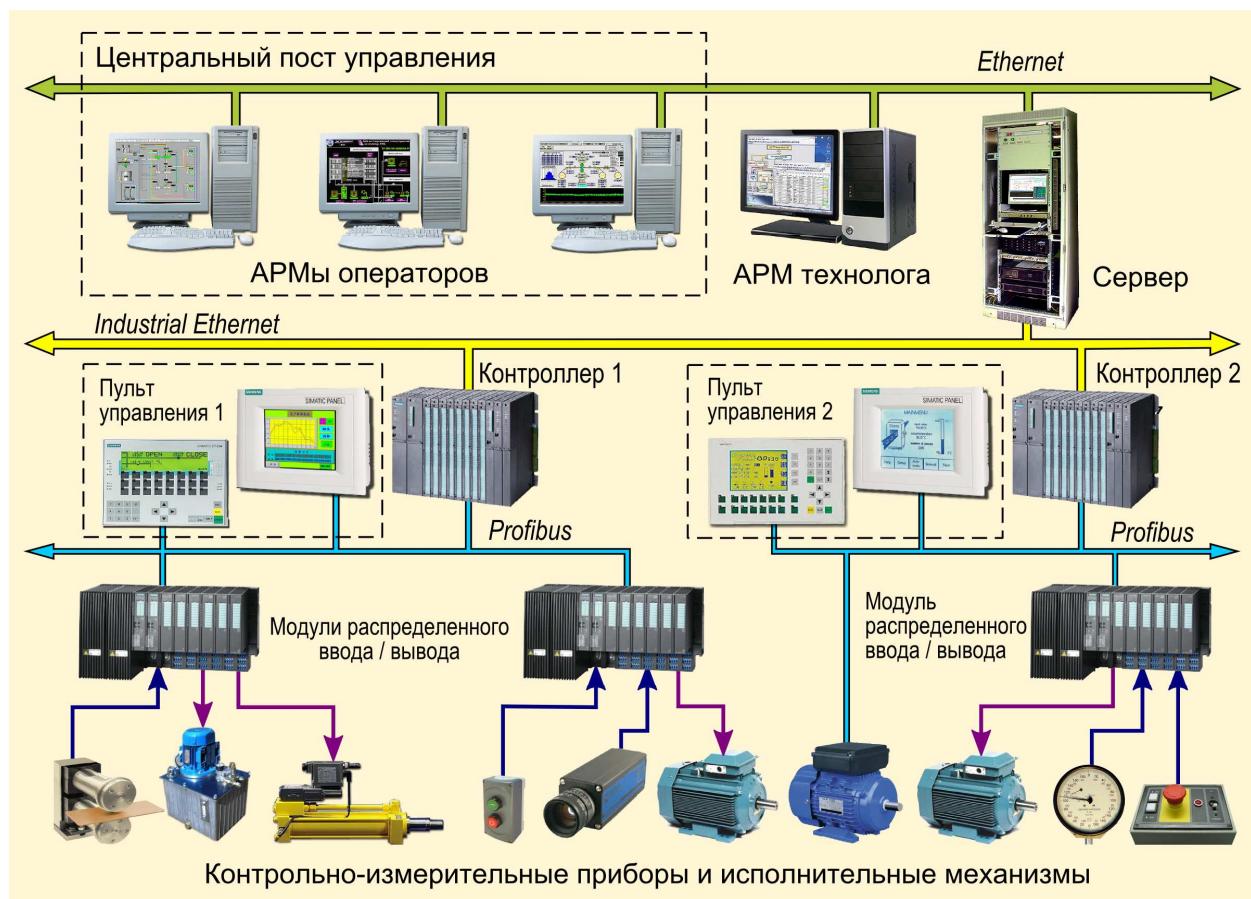


Рис. 4.3. Типовая структура промышленной системы автоматизации фирмы Siemens AG (Германия)

Нижний уровень (уровень управления агрегатом) системы включает программируемые контроллеры и систему шин полевого уровня Profibus, объединяющую контроллеры, модули удаленного распределенного ввода/вывода, кнопочные пульты управления со встроенными панелями оператора и дисплеями, интеллектуальные датчики и приводы. Основным оборудованием нижнего уровня являются PLC семейства SIMATIC [10,12], которые широко используются в различных отраслях промышленности и имеют специализированный язык программирования STEP, доступный для

широкого круга пользователей. Модули распределенного ввода/вывода обеспечивают сбор сигналов от датчиков, измерителей и органов управления и выдачу сигналов управления исполнительным механизмам и силовым приводам.

Аппаратно-программные средства нижнего уровня подобной системы должны соответствовать следующим основным требованиям:

- обеспечение работы системы управления в режиме реального времени;
- предельно высокая надежность (на уровне надежности основного оборудования);
- возможность встраивания аппаратуры в основное оборудование;
- возможность функционирования в цеховых условиях (загрязненная атмосфера, большие перепады температур, сильные электромагнитные поля и помехи, вибрационные и ударные нагрузки и т.п.).

Верхний уровень системы управления (SCADA) объединяет АРМы операторов технологического оборудования и АРМы управленческого персонала (например, АРМ технолога цеха). Второй уровень обеспечивает:

- диспетчерское наблюдение за технологическим процессом в реальном масштабе времени;
- расчет и выбор законов управления, настроек и уставок, соответствующих заданным показателям качества управления и текущим (или прогнозным) параметрам объекта управления;
- хранение и дистанционную загрузку управляющих программ в PLC;
- оперативное сопровождение моделей объектов управления типа «агрегат», «технологический процесс», корректировку моделей по результатам обработки информации от первого уровня;
- синхронизацию и устойчивую работу систем типа «агрегат» для группового управления технологическим оборудованием;
- ведение в реальном времени единой базы данных технологического процесса;
- конфигурирование комплекса для различных режимов работы (в том числе переход на резервную схему в нештатной ситуации);
- связь с верхними уровнями системы управления предприятием.

Компьютеры верхнего уровня объединены обычной локальной сетью стандарта Ethernet (см. рис. 4.3) и могут иметь выход в глобальные сети, например, глобальную сеть предприятия или сеть Internet. Программируемые контроллеры связаны между собой сетью Industrial Ethernet (вариант сети Ethernet, адаптированный для работы в промышленных условиях [14]), образуя *сеть контроллеров*. Связь контроллеров с устройствами нижнего уровня обеспечивается промышленными сетями (системой полевых шин) Profibus.

Сеть верхнего уровня полностью независима от сети контроллеров для исключения взаимного влияния. Связь между сетями при этом осуществляется сервером, что позволяет обеспечить:

- высокую степень защиты при передаче информации;

- стандартную структуру сообщений;
- возможность «горячего» подключения и отключения отдельных модулей и узлов при работе сети;
- возможность автономной работы при отказах комплексов управления верхних уровней;
- возможность использования сетевых компонентов других производителей;
- возможность передачи информации по электрическим, оптическим и инфракрасным каналам связи;
- простую архитектуру сети.

Сети полевого уровня Profibus, в свою очередь, независимы от сетей Ethernet, поэтому при отключении или «зависании» обмена данными по верхней и нижней сетям Ethernet контроллеры и другие устройства нижнего уровня могут продолжать выполнять свои функции по управлению технологическим агрегатом.

Следует отметить, что системы управления на базе PLC SIMATIC компании Siemens AG в последние двадцать лет исключительно широко используются в отечественной металлургической промышленности, фактически приобретя статус стандарта АСУ ТП в отрасли. Концепция полностью интегрированной системы автоматизации обеспечивает единообразную среду автоматизации от уровня цеха до высших уровней управления.

5. Примеры промышленных систем автоматизированного управления прокатными станами

Рассмотрим в качестве примера промышленной реализации описанных выше принципов и конструктивных решений несколько различных систем автоматизированного управления прокатными станами, внедренных на металлургических предприятиях Российской Федерации.

5.1. Система автоматического управления непрерывного широкополосного стана «1700» холодной прокатки

На непрерывном широкополосном стане «1700» холодной прокатки прокатываются горячекатаные травленые полосы шириной 700...1550 мм из углеродистых и электротехнических сталей. Толщина исходных полос – 1,5...6 мм. Толщина полос после прокатки – 0,25...3 мм.

Стан (рис. 5.1) представляет собой непрерывную группу из 5 клетей «кварто». Диаметр рабочих валков клетей – 600 мм, длина бочки – 1700 мм. Опорные валки имеют диаметр 1500 мм. Электроприводы рабочих валков – тиристорные, постоянного тока, индивидуальные для нижнего и верхнего валка. Приводы имеют аналоговые пропорциональные регуляторы скорости *PC* с быстродействием около 10 рад/с.

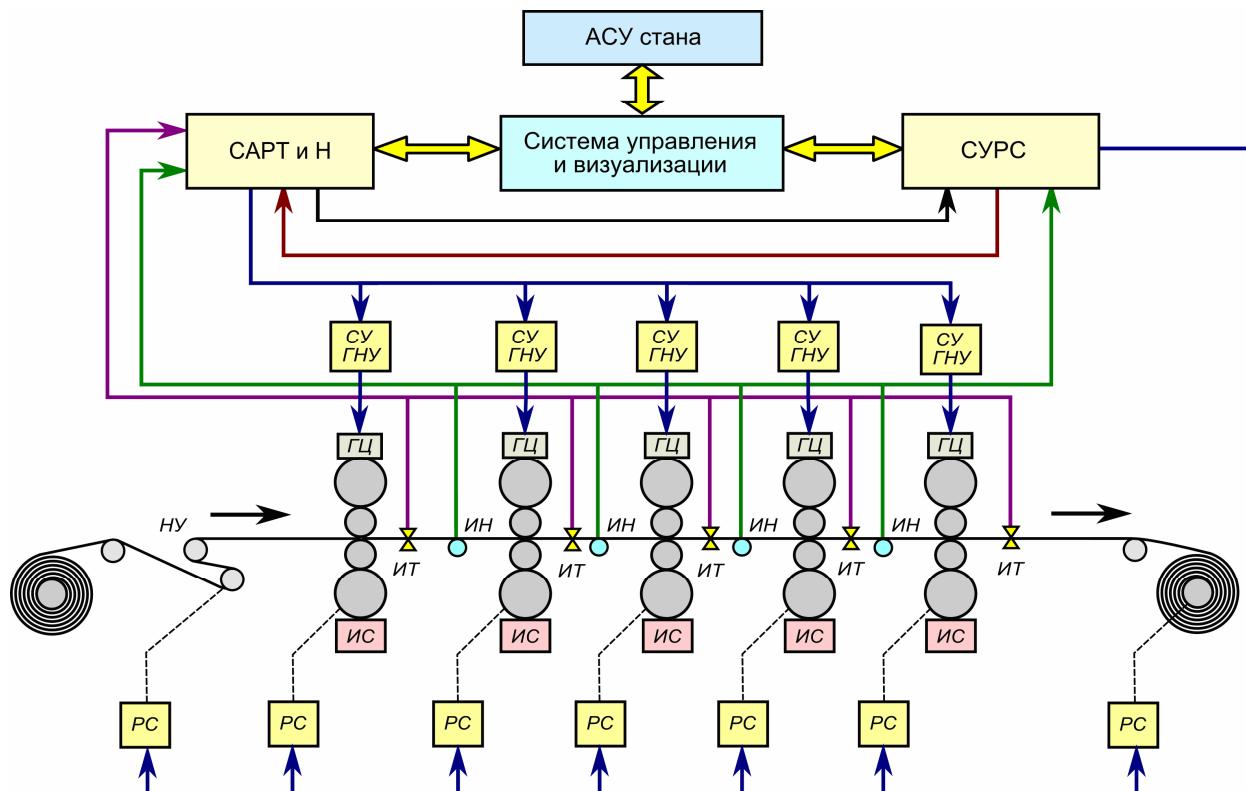


Рис. 5.1. Структура АСУ ТП непрерывного стана «1700» холодной прокатки

Прокатка осуществляется с натяжением полосы на входе в стан (между натяжным устройством *НУ* и первой клетью), между клетями и на выходе из

стана (между пятой клетью и моталкой) с контролем натяжений и толщин измерителями натяжений *ИН* и толщиномерами *ИТ*, установленными на входе, выходе стана и в промежутках между клетями. Для контроля сил прокатки под подушками нижних опорных валков в клетях стана установлены измерители силы (мессодзы) *ИС*.

Клети оснащены быстродействующими гидравлическими нажимными устройствами (ГНУ), обеспечивающими регулировку межвалкового зазора путем вертикального перемещения верхнего полукомплекта валков с помощью силовых нажимных гидроцилиндров *ГЦ*.

Функционально в составе АСУ ТП стана «1700» [15] можно выделить системы *базового уровня* автоматизации и системы *верхнего уровня*.

К базовому уровню автоматизации относятся системы управления гидравлическими нажимными устройствами *СУГНУ*, системы управления главными электроприводами прокатных валков, моталок, разматывателей, вспомогательных механизмов и система управления подачей технологической смазки.

Верхний уровень АСУ ТП стана «1700» составляют система управления режимом стана (*СУРС*), система автоматического регулирования толщины и натяжения (*САРТ* и *Н*) и система визуализации и контроля.

Системы управления гидравлическими нажимными устройствами обеспечивают:

- регулирование положения верхнего полукомплекта валков и, соответственно, межвалкового зазора (режим «естественной клети»), регулирование взаимного положения штоков *ГЦ* (синхронизация). Статическая точность регулирования положения составляет ± 3 мкм;
- регулирование силы прокатки (режим «мягкой клети»). Переход из режима регулирования усилия прокатки («мягкая клеть») в режим регулирования положения («естественная клеть») и обратно производится безударно по сигналам от *САРТ*, а для 5-й клети – по сигналу оператора с центрального поста управления станом;
- автоматическое сведение валков до достижения заданной силы прокатки;
- автоматическое сведение/разведение валков до заданного раствора валков;
- ограничение сил и перемещений в аварийных ситуациях, аварийное разведение валков, выдачу соответствующих предупредительных и аварийных сообщений на пульт оператора и в систему визуализации;
- выдачу информации о величине раствора валков, их перекосе, силе прокатки и разности сил по сторонам клети в систему визуализации и контроля.

СУРС выполняет следующие функции:

- формирование текущих заданий скоростей и ускорений для регуляторов скорости вращения рабочих валков в режимах разгона, торможения стана, работы на установившейся скорости с учетом

воздействий от регуляторов САРТ и Н и введенных оператором диаметров рабочих валков;

- создание «натяжений покоя» перед троганием стана и поддержание заданных натяжений регулированием скоростей клетей при малой скорости (примерно до 1 м/с), выше которой функция регулирования натяжений возлагается на САРТиН;
- «тонкая» коррекция скоростей рабочих валков (отдельные, подключаемые в определенных режимах цифровые каналы регуляторов скорости);
- выравнивание нагрузок (токов) приводов верхнего и нижнего рабочих валков;
- обеспечение некоторых специальных, обусловленных особенностями технологии, режимов управления скоростью валков (прогрев валков, заправка полосы и т.п.);
- диагностика электроприводов валков и подсистем СУРС.

САРТ и Н включает в себя 22 регулятора толщины и натяжений, а также узлы слежения за толщиной полосы по ходу прокатки (блоки регулируемого запаздывания). В системе используются регуляторы толщины двух видов, – «быстрые» и «медленные». «Быстрые» регуляторы реализуют управление по возмущению, с автоматической подстройкой коэффициентов математической модели регулирования. «Медленные» (интегральные) регуляторы работают по отклонению.

Функциями САРТ и Н являются:

- регулирование толщин после клетей воздействием на соотношения скоростей валков;
- регулирование межклетевых натяжений воздействием на ГНУ;
- ограничение межклетевых натяжений на уровне допустимых значений воздействием на соотношения скоростей валков (это ограничение имеет более высокий приоритет по отношению к регулированию толщин);
- контроль качества прокатываемой полосы по разнотолщинности, – создание гистограммы выходной толщины в ходе прокатки;
- диагностика работы САРТ и Н.

СУРС и САРТ и Н участвуют в управлении технологическим процессом прокатки на всех стадиях, включая настройку стана и контроль готовой продукции. Настройка клетей по обжатиям (толщинам) осуществляется регулировкой соотношений скоростей вращения рабочих валков в смежных клетях. Настройка межклетевых натяжений выполняется путем регулирования положения гидронажимных устройств. В процессе прокатки САРТ и Н автоматически корректирует соотношения скоростей и положения ГНУ с целью поддержания толщин на выходе из клетей и натяжений в межклетевых промежутках в заданных пределах.

Имеются несколько фиксированных заданий скоростей прокатки, достигаемых по соответствующим командам: заправочная скорость, скорость

прокатки шва, скорость прокатки при минимальном запасе полосы в накопителе, скорость при резе полосы летучими ножницами, рабочая скорость. Темп разгона стана при начале прокатки – переменный, увеличивающийся пропорционально скорости. Темп торможения стана – постоянный и может иметь два значения: темп нормального торможения и темп форсированного торможения. Режим торможения задается соответствующей командой оператора. По команде оператора «так держать» прерывается процесс разгона или торможения и прокатка может происходить на любой промежуточной скорости.

Ход технологического процесса, текущие значения технологических и эксплуатационных параметров стана и информация о работе вспомогательных устройств отображаются на рабочих местах операторов системой визуализации и управления (рис. 5.2). Эта система решает задачи взаимодействия персонала стана с АСУ ТП, ввода и корректировки программы прокатки, управления технологическими агрегатами, контроля технологических параметров процесса, индикации готовности и состояния систем стана, диагностики работы оборудования, сбора и архивирования производственной информации.

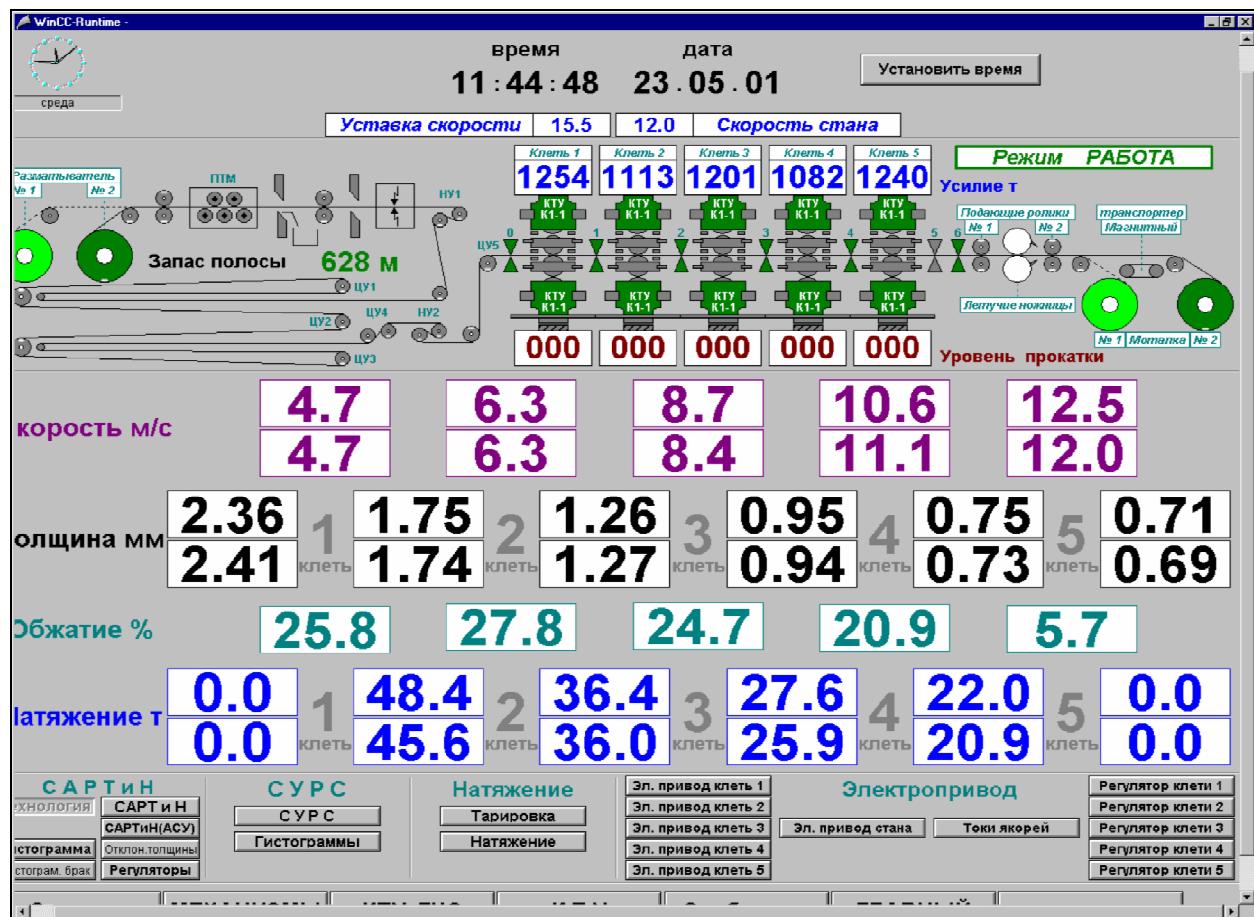


Рис. 5.2. Отображение хода технологического процесса прокатки на видеомониторе рабочего места оператора стана «1700» [15]

Внедрение описанной АСУ ТП на стане «1700» позволило существенно повысить качество прокатываемого на стане стального листа. Система гарантирует допуск по толщине для всего спектра прокатываемых листов в 3...5 раз меньше допуска, предусмотренного ГОСТ.

5.2. Система автоматического регулирования плоскостности полосы непрерывного стана холодной прокатки

Система автоматического регулирования плоскостности полосы (САРП) относится к системам верхнего уровня автоматизации в составе АСУ ТП и совместно с САРТ обеспечивает качество готовой продукции. САРП управляет работой одновременно нескольких локальных систем управления отдельными устройствами и механизмами стана на основании данных о ходе процесса прокатки и результатов измерения плоскостности полосы с помощью специальных измерителей.

Все современные полосовые станы холодной прокатки, как правило, оснащаются системами регулирования плоскостности полосы. Например, на пятиклетевом стане «1700» (см. предыдущий раздел) системой САРП снабжена чистовая 5-я клеть [16]. Базой САРП является прибор, позволяющий определить плоскостность полосы в реальном режиме времени. Основным способом определения плоскостности полосы на станах холодной прокатки в настоящее время является косвенное определение плоскостности по распределению натяжения по ширине полосы.

Измеритель плоскостности полосы представляет собой отклоняющий ролик, размещаемый на выходе стана перед моталкой. Ролик разделен по длине бочки на зоны шириной 25...52 мм, в которых размещены специальные датчики. Эти датчики измеряют радиальные силы, действующие на ролик со стороны полосы. Анализ распределения сигналов датчиков по зонам позволяет определить картину распределения натяжения по ширине полосы, а, следовательно, получить информацию о поперечной разнотолщинности и плоскостности (планшетности) полосы.



Рис. 5.3. Ролик для измерения распределения натяжения по ширине полосы

В качестве датчиков в измерительных роликах различных производителей обычно применяются магнитоанизатропные, или пьезоэлектрические измерители силы [17,18]. На рис. 5.3 показан

измерительный ролик системы САРП с пьезоэлектрическими датчиками [18], имеющий следующую конструкцию:

- в сплошном стальном теле ролика вблизи поверхности бочки с шагом по окружности 60° высверлены 6 продольных осевых каналов. На рабочую поверхность бочки ролика нанесено упрочняющее карбидо-вольфрамовое покрытие;
- в осевых каналах размещены комплекты пьезоэлектрических датчиков, воспринимающих деформацию поверхности бочки под действием силы натяжения прокатываемой полосы;
- измерение распределения силы натяжения по ширине полосы производится по зонам, зоны имеют разную ширину, – по краям ролика ширина зоны уже, чем в середине. Это необходимо для более точного определения положения кромки полосы;
- цапфы ролика врачаются в подшипниковых опорах, одна из цапф снабжена выходным валом для присоединения к вспомогательному приводу, обеспечивающему раскрутку ролика на стадии начала прокатки;
- на второй цапфе смонтировано оптоэлектронное устройство для бесконтактной передачи сигнала измерителей с вращающегося ролика на стационарную аппаратуру САРП. При передаче сигнала используется импульсно-кодовая модуляция PCM (Pulse Code Modulation).

На рис. 5.4 представлена структура системы автоматического регулирования плоскостности полосы 5-й клети стана «1700» [16]. В состав САРП входят:

- 8 гидроцилиндров, обеспечивающих *отрицательный изгиб* рабочих валков («противоизгиб»), т.е. изгиб валков в направлении, противоположном прогибу от действия силы прокатки;
- 8 гидроцилиндров *положительного изгиба* рабочих валков;
- сервоклапаны управления цилиндрами изгиба валков;
- система зонного охлаждения рабочих валков, обеспечивающая регулировку распределения температуры поверхности валков по длине бочки;
- измерительный ролик (см. рис. 5.3) в комплекте с модулем импульсно-кодовой модуляции PCM (передатчик и приемник PCM с декодером);
- программируемый логический контроллер (контроллер PLC) со средствами связи по сети Ethernet с PCM-декодером, системой визуализации и автоматизированными рабочими местами (АРМ);
- сетевые средства связи и аналоговые модули для обмена данными с локальными системами управления (СУ ГНУ, СУ изгибом валков, системой зонного охлаждения валков);
- АРМ системы визуализации на посту управления станом;
- АРМ настройки и калибровки измерительного ролика;
- система осциллографирования результатов измерения.

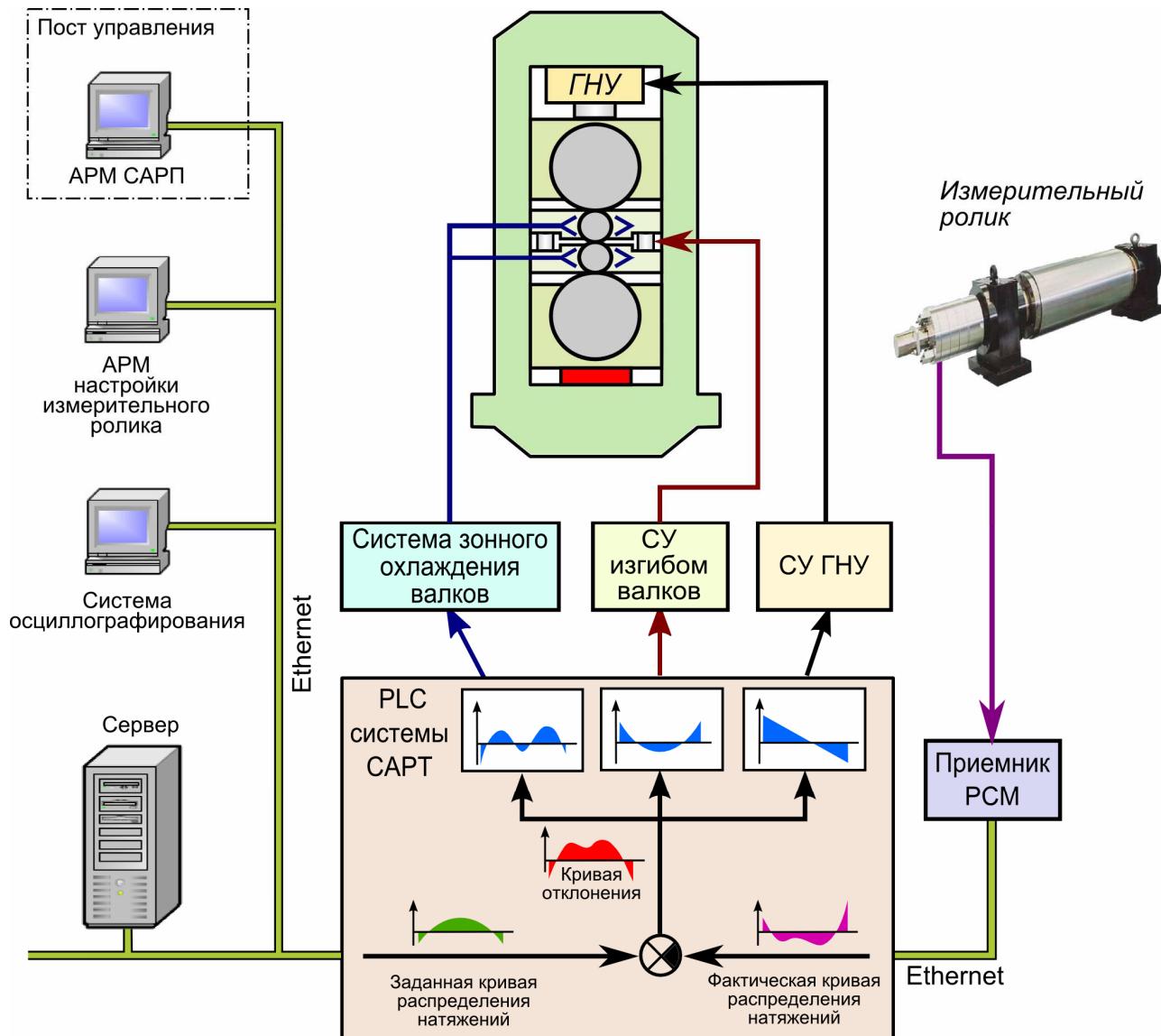


Рис. 5.4. Структурная схема системы автоматического регулирования плоскостности полосы 5-й клети стана «1700» [16]

Закон распределения натяжений по ширине полосы, который должна обеспечить САРП в процессе прокатки, задается с АРМа на посту управления в виде кривой распределения натяжений. Ввод и корректировка закона распределения натяжений могут выполняться также системой автоматической настройки стана на основе результатов математического моделирования и фактических данных процесса прокатки.

Кроме того, в САРП поступают следующие сигналы и данные от других систем:

- идентификатор (номер) рулона, марка и свойства материала;
- толщина полосы на входе в стан;
- толщина полосы на выходе стана;
- ширина полосы;
- скорость полосы;

- фактические положения плунжеров цилиндров ГНУ клети;
- сила прокатки в клети;
- давления рабочей жидкости в цилиндрах системы изгиба валков;
- логические сигналы блокировок от различных систем.

От измерительного ролика САРП получает фактические значения распределения сил натяжения полосы по зонам, измеренные в режиме реального времени. САРП пересчитывает полученные значения сил в удельные натяжения по зонам. В дальнейшем при выполнении всех необходимых расчетов и визуализации плоскостности полосы САРП работает с отклонениями измеренных величин от среднего удельного натяжения полосы.

Заданная кривая распределения натяжений сравнивается с кривой фактического распределения натяжений по ширине полосы (см. рис. 5.4). Результатом сравнения является кривая ошибки (отклонения плоскостности от задания). Ошибка плоскостности поступает на входы регуляторов системы САРП, которые формируют задания для отработки ошибки плоскостности на исполнительные механизмы: Для регулирования плоскостности полосы могут использоваться следующие воздействия на исполнительные механизмы:

- задание перекоса валков в СУ ГНУ (рис. 5.5);
- задание изгиба рабочих валков в СУ изгибом через задание давления в гидроцилиндрах системы изгиба валков (рис. 5.6);
- задание расхода подаваемого на рабочие валки охладителя в системе зонного охлаждения валков для регулирования теплового профиля рабочих валков (рис. 5.7).

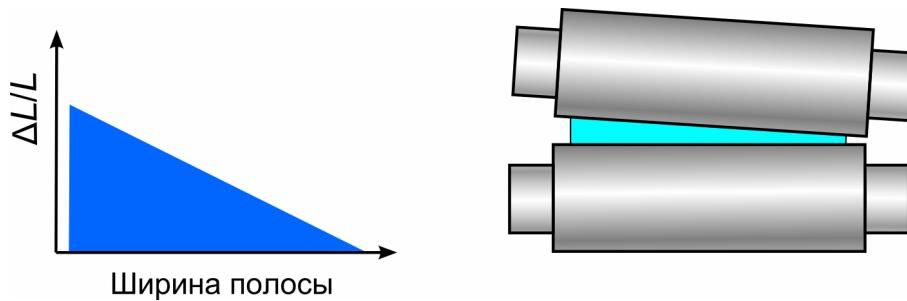


Рис. 5.5. Одностороннее отклонение плоскостности (длинная кромка). Регулирование плоскостности посредством перекоса валков

Регуляторы рассчитывают свое выходное воздействие, исходя из диапазона регулирования соответствующего исполнительного механизма. Для первого исполнительного механизма (в данном случае – ГНУ), основываясь на диапазоне регулирования этого устройства, регулятор определяет его долю ошибки в общей ошибке плоскостности и по ней рассчитывает управляющее воздействие. Эта доля ошибки вычитается из общей ошибки, и регулятору следующего исполнительного устройства (системе изгиба валков) передаётся уже уменьшенная на предыдущем шаге ошибка.

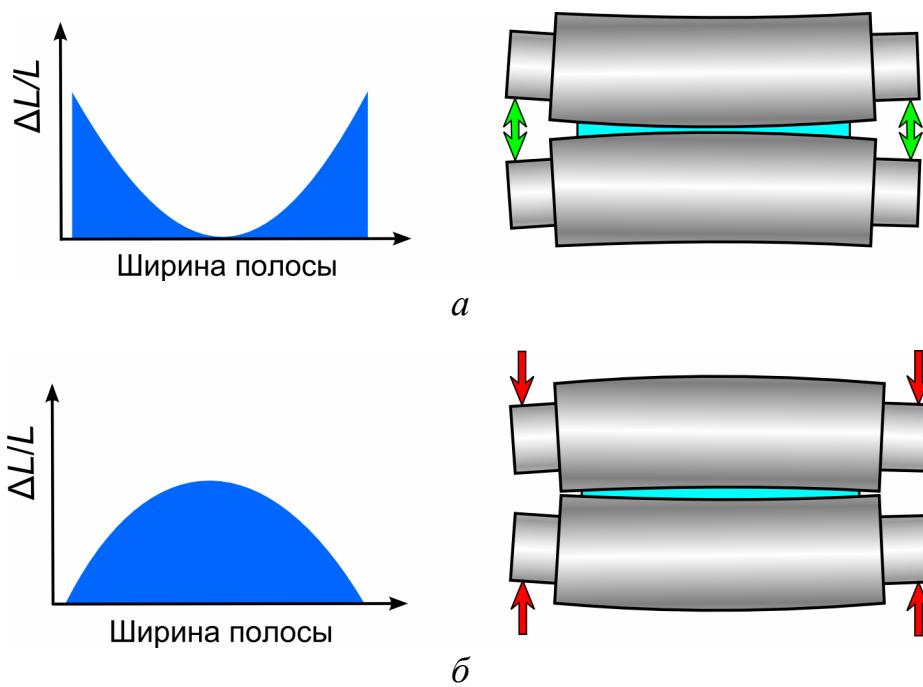


Рис. 5.6. Отклонения плоскостиности 2-го порядка – длинные кромки (*а*) или длинная середина полосы (*б*). Регулирование плоскостности посредством изгиба рабочих валков

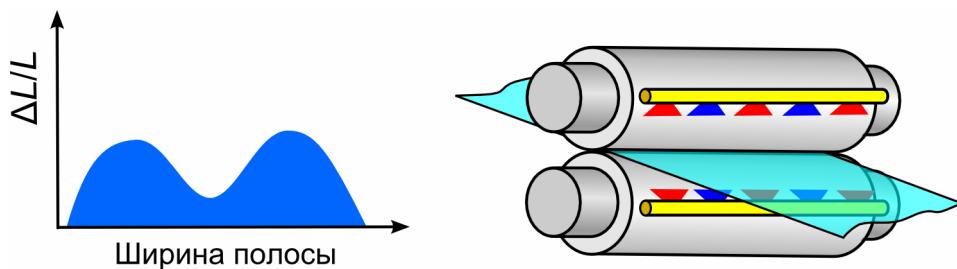


Рис. 5.7. Нерегулярные дефекты плоскостиности – отклонения 3-го порядка. Регулирование плоскостности посредством зонного охлаждения валков

Этот алгоритм действует согласно заданной очерёдности для всех механических исполнительных устройств. Нерегулируемая механическими устройствами остаточная ошибка устраняется системой зонного охлаждения рабочих валков.

Текущая информация о фактической плоскостности полосы и работе САРП отображается на АРМ, установленном на посту управления (см. рис. 5.4). Система визуализации АРМ САРП на базе промышленного персонального компьютера решает следующие задачи:

- предоставление оператору необходимой технологической информации о плоскостности полосы в реальном времени, состоянии исполнительных механизмов, а также индикация работы САРП. Для этой цели имеются несколько видеокадров, которые доступны всем операторам стана;
- сервисное обслуживание, установка параметров и настройка контуров управления САРП и тестирование отдельных узлов. Видеокадры,

- выполняющие эти функции, защищены паролем и доступны только опытному технологическому персоналу;
- выполнение диагностики САРП и выдача предупредительных и аварийных сообщений в АСУ ТП стана и на пост управления.

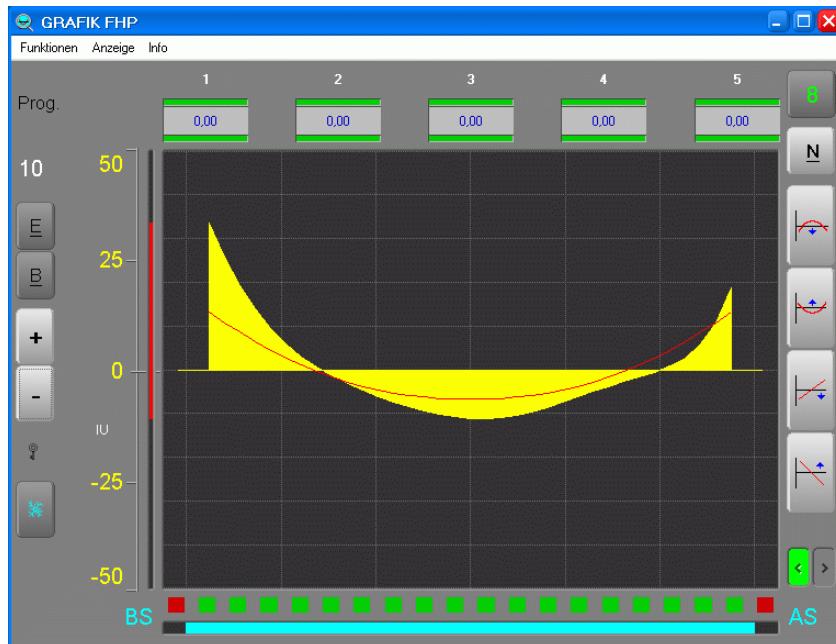


Рис. 5.8. Визуализация плоскости полосы в процессе прокатки в САРП фирмы «Vollmer» (Германия) [19]

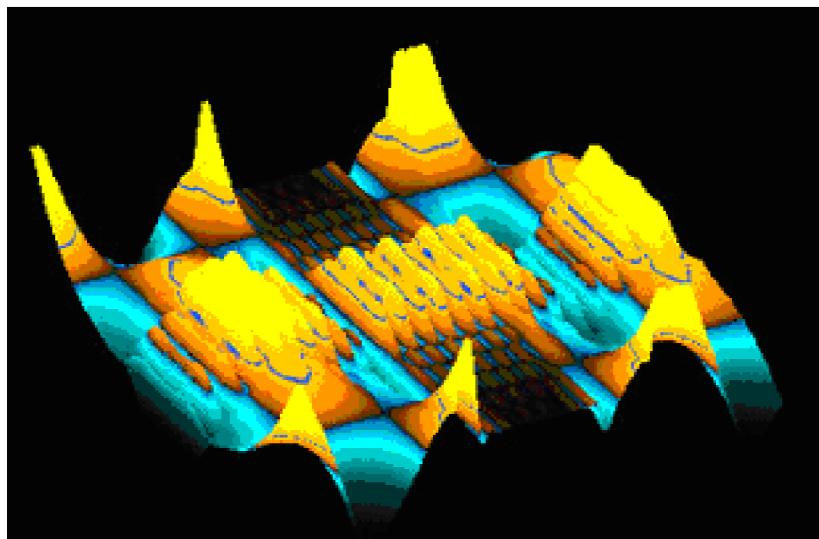
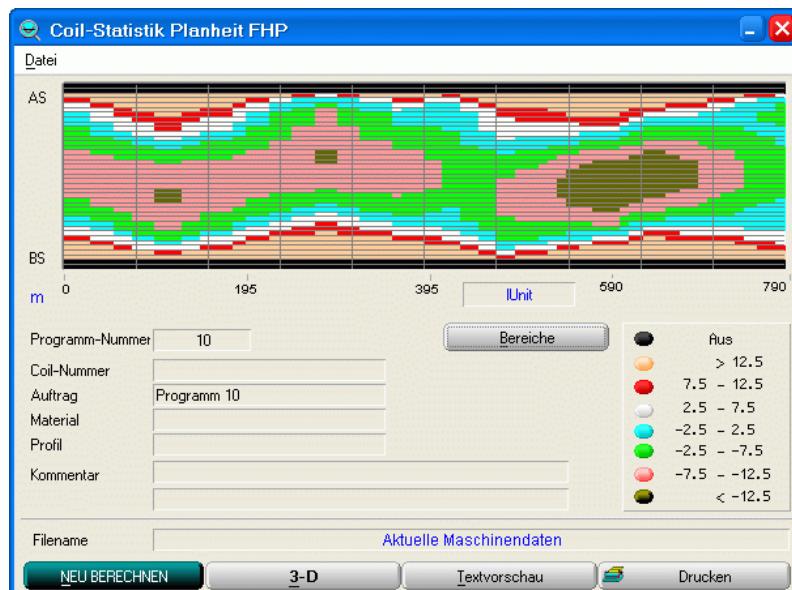


Рис. 5.9. Отображение плоскости полосы в 3-Д виде системой осциллографирования САРП стана «1700» фирмы Siemens AG [16]

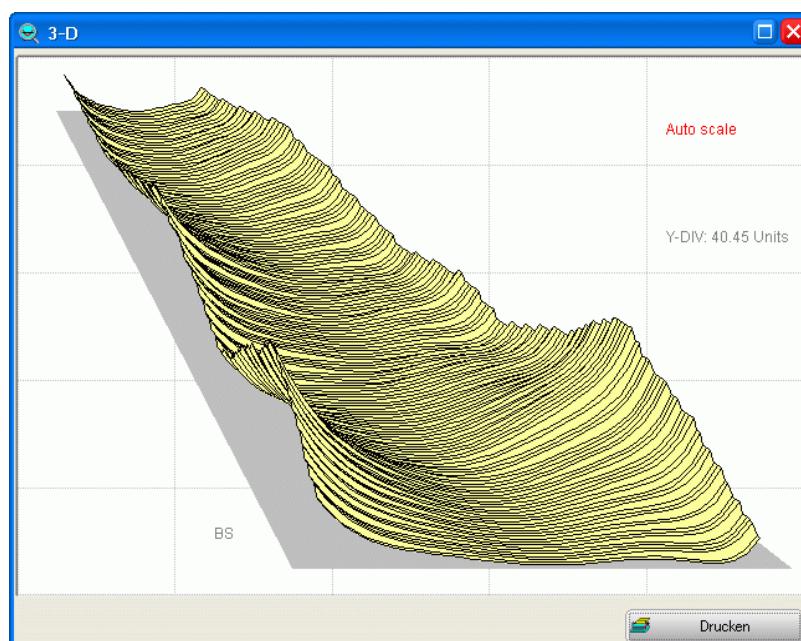
Помимо АРМ на посту управления станом в САРП предусмотрена система осциллографирования (см. рис. 5.4) на базе персонального компьютера, выполняющая следующие функции:

- запись статистических данных распределения плоскостности, заданий исполнительным механизмам, и фактического состояния механизмов в процессе прокатки полосы;
- отображение вышеупомянутых сигналов в графическом виде в реальном времени;
- анализ качества работы системы САРП;
- анализ нештатных ситуаций.

Примеры отображения данных о плоскостности полосы различными системами визуализации и осциллографирования показаны на рис. 5.8...5.10.



a



б

Рис. 5.10. Отображение статистических данных о плоскостности для конечного рулона в САРП фирмы «Vollmer» [20]:
а – «ковровый» график; *б* – 3-Д график

5.3. АСУ ТП реверсивного стана «Кварт 400»

Реверсивный стан холодной прокатки «Кварт 400» (рис. 5.11) предназначен для прокатки полос из медно-никелевых сплавов шириной до 600 мм и выходной толщиной до 0,4 мм.

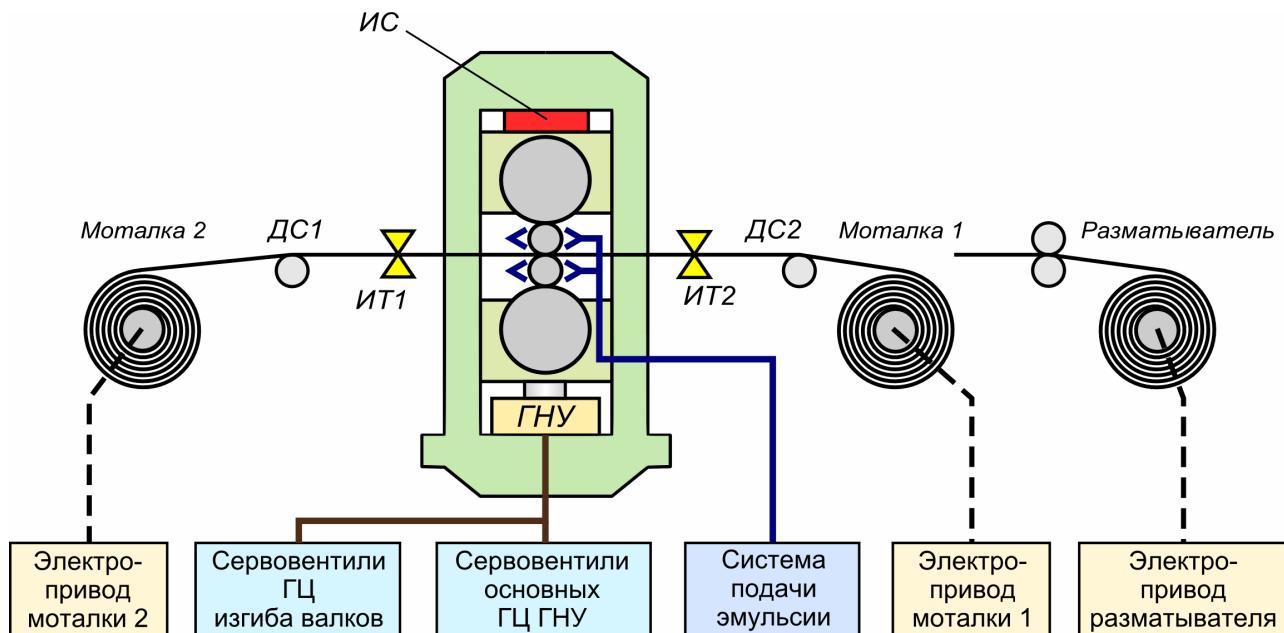


Рис. 5.11. Состав оборудования и основные системы стана холодной прокатки «Кварт 400» [21]

Четырехвалковая рабочая клеть стана оснащена гидравлическим нажимным устройством ГНУ, гидравлической системой противоизгиба и дополнительного изгиба рабочих валков, системой предварительного напряжения станины клети и измерителями силы прокатки (мессдозами) ИС. В состав оборудования стана входят разматыватель, две моталки, два контактных толщиномера ИТ1 и ИТ2, система подготовки и подачи эмульсии (технологической смазки), насосно-аккумуляторные станции с рабочим давлением 16 МПа и 32 МПа, обеспечивающие работу гидравлических систем, и различные вспомогательные механизмы. Стан укомплектован тиристорными электроприводами постоянного тока. Скорость полосы при прокатке измеряется контактным методом с помощью измерительных роликов, снабженных датчиками скорости ДС1 и ДС2.

АСУ ТП стана «Кварт 400» построена на базе двух программируемых логических контроллеров SIMATIC S7-400 (PLC1 и PLC2) фирмы Siemens AG (Германия) [21]. Функционально в составе АСУ ТП (рис. 5.12) можно выделить системы *базового уровня* автоматизации и системы *верхнего уровня*. К системам базового уровня автоматизации относятся:

- система управления электроприводами прокатных валков, моталок, разматывателя и вспомогательных механизмов (САУ ЭП), управляющая также электроприводами насосно-аккумуляторных станций (НАС) и системой подачи технологической смазки (эмulsionии);

- система управления гидронажимным устройством (СУ ГНУ).

Верхний уровень АСУ ТП стана «Кварт 400» составляют:

- система управления режимом стана (СУРС);
- система автоматического регулирования толщины полосы (САРТ);
- математическая модель стана, которая используется при наладке САРТ и для контроля работы самой САРТ;
- система автоматического регулирования плоскости и формы полосы (САРП и Ф);
- система визуализации и контроля.

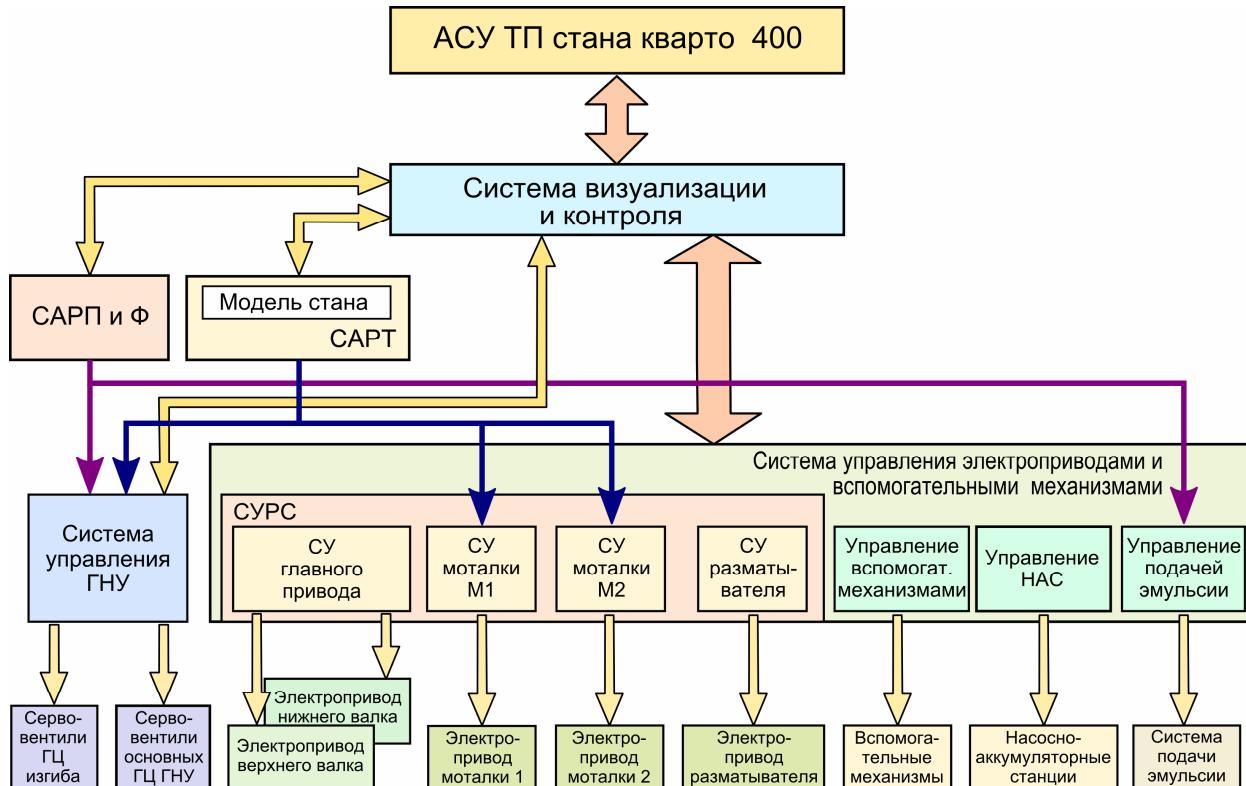


Рис. 5.12. Функциональная схема АСУ ТП стана «Кварт 400» [21]

На рис. 5.12 цветными стрелками показаны воздействия от систем верхнего уровня на базовые системы управления: синим цветом – задания от САРТ системе управления ГНУ и системам управления моталок; фиолетовым – задания в СУ ГНУ и систему подачи эмульсии от САРП и Ф.

Ниже приведены краткие описания и технические характеристики основных систем базового и верхнего уровней АСУ ТП стана «400».

Система управления электроприводами и вспомогательными механизмами

САУ ЭП управляет главными приводами верхнего и нижнего валков, приводами моталок и разматывателя. В системе использованы цифровые регуляторы скорости (реализовано в контроллере PLC1). Основными источниками сигналов управления главными приводами являются импульсные датчики на валах двигателей приводов и на измерительных роликах с разрешением 1000 импульсов/оборот. Кроме того, САУ ЭП

использует сигналы (ток якоря, напряжение на якоре, ток возбуждения) от тиристорных преобразователей приводов. Тиристорные преобразователи выполняют функции регулирования токов якоря и возбуждения, а также быстродействующей защиты от перегрузок.

САУ ЭП обеспечивает точность поддержания заданной скорости прокатки в установившемся режиме не хуже $\pm 0,5\%$ во всем диапазоне рабочих нагрузок. Точность поддержания натяжения полосы – не хуже $\pm 5\%$. Работая по командам СУРС, система управления электроприводами обеспечивает переходные процессы (разгоны и торможения стана) с минимальным отклонением натяжения полосы путем ограничения второй производной (рывка скорости) и задания величины ускорения как функции величин натяжения полосы и скорости прокатки.

Одной из функций САУ ЭП является сопровождение концов полосы, швов и дефектов с автоматическим снижением скорости и остановкой стана – слежение за прохождением концов полосы, швов и дефектов.

Другие функции САУ ЭП:

- работа под управлением САРТ;
- управление вспомогательными механизмами стана;
- управление насосно-аккумуляторными станциями НАС 16 МПа и НАС 32 МПа (контроллер PLC2);
- управление системой подачи эмульсии и смазки (контроллер PLC2);
- учет потребляемой станом электроэнергии;
- учет расхода эмульсии на стане.

Система управления гидронажимным устройством

СУ ГНУ работает под управлением систем верхнего уровня САРТ и САРП и Ф и обеспечивает выполнение следующих функций:

- регулирование положения гидронажимного устройства (работа в режиме «естественной клети»);
- регулирование взаимного положения гидроцилиндров ГНУ (синхронизация). Статическая точность регулирования взаимного положения ± 3 мкм
- регулирование силы прокатки (работа в режиме «мягкой клети») по сигналам от месдоз. Статическая точность регулирования силы ± 50 кН;
- регулирование давления в контурах «положительного» и «отрицательного» изгиба рабочего валка. Статическая точность регулирования давления $\pm 2\%$;
- автоматическая калибровка (контроль геометрии) валков
- ограничения и блокировки, анализ аварийных ситуаций и аварийное разведение валков.

Программы СУ ГНУ выполняются контроллером PLC2. В качестве датчиков положения ГНУ используются линейные инкрементные датчики. Для контроля перекоса на каждом силовом гидроцилиндре установлены по 2 датчика положения. В силовых полостях гидравлических цилиндров ГНУ, а

также в контурах цилиндров изгиба валков установлены датчики давления с диапазоном измерения 0,1...40 МПа. Измерение силы прокатки осуществляется двумя магнитоанизотропными месдозами фирмы «ASEA» (Швеция).

Система автоматического регулирования толщины

Измерение толщины полосы в САРТ производится контактными толщиномерами фирмы «Vollmer» (*IT1* и *IT2* на рис. 5.11) [22]. Регулирование толщины полосы в системе осуществляется по трем каналам:

1. Канал регулирования *по толщиномеру перед клетью*. Этот канал использует в качестве входного сигнала отклонение от заданной величины толщины полосы на входе в клеть, которое измеряется входным толщиномером, и воздействует на уставку натяжения в системах управления подающей и приемной моталок или на уставку положения нажимного устройства в СУ ГНУ таким образом, чтобы скомпенсировать это отклонение.
2. Канал регулирования *по постоянству секундного объема* прокатываемой полосы на входе и выходе из клети. В этом канале по скоростям полосы на входе и выходе из клети измеряется действительное обжатие полосы. Толщина полосы на выходе из клети рассчитывается, исходя из входной толщины и действительного обжатия. Если рассчитанная выходная толщина отличается от задания, то вырабатывается выходной сигнал на перемещение нажимного устройства, уменьшающий это рассогласование. Скорости полосы на входе и выходе определяются по сигналам импульсных датчиков, установленных на измерительных роликах по обе стороны клети (*DC1* и *DC2* на рис. 5.11).
3. Канал регулирования *по отклонению*. В качестве входного сигнала используется измеренное выходным толщиномером отклонение толщины проката от уставки. При наличии отклонения вырабатывается сигнал коррекции задания регулятору, сводящий рассогласование к нулю.

Основным показателем качества работы САРТ является отклонение выходной толщины от задания. Получаемые в процессе прокатки с САРТ на стане «Кварт 400» предельно допустимые отклонения толщины укладываются в 1/4 от допустимого отклонения, устанавливаемого ГОСТ 2208 - 91 для лент и полос повышенной точности (98% длины полосы в рулоне прокатывается с отклонением от задания не более ± 20 мкм).

Система визуализации и контроля

Система визуализации и контроля решает следующие задачи:

- обеспечение управления системами стана (узлами маслоподвала, системой подачи эмульсии, перевалкой валков, ввод программы прокатки) с АРМ оператора и пультов управления;
- контроль параметров технологического процесса;

- визуализация и диагностика работы оборудования АСУ ТП стана «Кварт 400»;
- индикация готовности и состояния систем стана;
- сбор и архивирование производственной информации (параметры прокатки относительно длины полосы, формирование паспорта рулона и т.п.).

Оператору и обслуживающему персоналу стана доступны около 30-ти различных видеокадров, отображающих на видеомониторах АРМ ход технологического процесса прокатки и значения рабочих параметров систем стана (рис. 5.13).

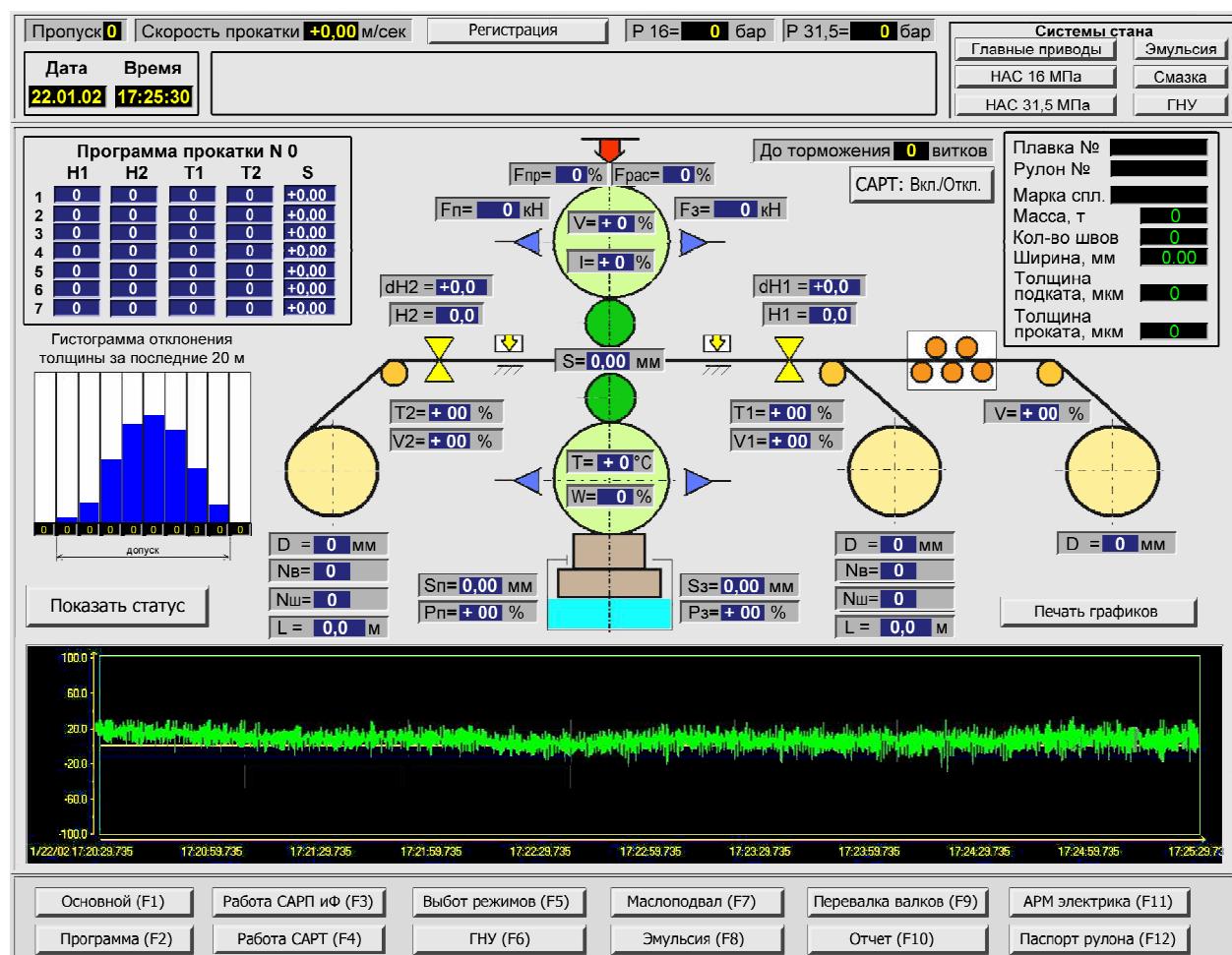


Рис. 5.13. Видеокадр, формируемый системой визуализации и контроля АСУ ТП стана «Кварт 400» на мониторе АРМ оператора [21]

5.4. АСУ ТП прокатки труб на непрерывном и редукционном станах трубопрокатного агрегата ТПА-80

Трубопрокатные агрегаты (ТПА) с непрерывным станом получили широкое распространение благодаря высокой производительности и качеству прокатанных труб, широкому сортаменту продукции, а также полной автоматизации основных и вспомогательных операций. Процесс прокатки

труб для всех ТПА с непрерывным станом практически одинаков и может быть рассмотрен на примере производства насосно-компрессорных труб и труб общего назначения на ТПА-80 [23].

Сплошную цилиндрическую катаную заготовку диаметром 90...120 мм и длиной 10 м после нагрева в печи и порезки на мерные длины 1,4...3,0 м подают в двухвалковый прошивной стан, на котором выполняется прошивка заготовки в толстостенную гильзу. Далее гильза поступает на 8-клетьевой непрерывный стан, где ее без промежуточного нагрева прокатывают на длинной плавающей оправке в черновую трубу диаметром до 92 мм с толщиной стенки 2,5...8,0 мм и максимальной длиной до 20 м.

После извлечения оправки черновая труба направляется на линию индукционного подогрева, где она нагревается до температуры 850...1020 °C с одновременным выравниванием температуры по длине, а затем задается со скоростью 2,0...2,5 м/с в 24-клетьевой редукционный стан, на котором из нее формируется готовая труба диаметром 25...90 мм с толщиной стенки 2,5...8,0 мм.

Особенности процесса прокатки труб на непрерывном стане

При прокатке черновой трубы на длинной оправке в непрерывном стане скоростной режим клетей должен строго соответствовать закону распределения относительных обжатий стенки трубы по клетям стана. Пример такого распределения представлен на рис. 5.14, а.

Прокатка в первой клети выполняется с небольшим обжатием, что связано с необходимостью обеспечения захвата металла валками на входе стана. Далее, в клетях 2...4 осуществляется грубое обжатие заготовки. В клетях 5 и 6 происходит более точное формирование стенки, а в клетях 7 и 8 обжатие отсутствует вовсе, при этом формируется необходимая геометрия черновой трубы (калибры не имеют выпусков) [24].

Основная особенность процесса непрерывной прокатки – взаимосвязь отдельных клетей непрерывного стана через прокатываемую трубу. Главным условием, определяющим работу непрерывных станов, является закон постоянства секундных объемов металла, проходящих через каждую клеть:

$$F_i v_i = F_{i+1} v_{i+1} = \text{const} , \quad (5.1)$$

где F_i и F_{i+1} – площадь сечения трубы при выходе из валков i -й и $(i+1)$ -й клетей; v_i и v_{i+1} – скорость выхода трубы из этих клетей.

В случае соблюдения закона постоянства секундных объемов прокатка соответствующего участка трубы в отдельной клети непрерывного стана происходит без влияния соседних клетей. Реальный процесс непрерывной прокатки из-за трудностей подбора необходимых скоростей, вытяжек и других параметров в большей или меньшей степени отличается от идеальной схемы. Соотношение секундных объемов двух смежных клетей называется коэффициентом кинематического натяжения:

$$\omega_{i+1} = F_{i+1} v_{i+1} / F_i v_i . \quad (5.2)$$

При $\omega > 1,0$ прокатка происходит с натяжением (секундный объем в последующей клети больше, чем в предыдущей), а при $\omega < 1,0$ – с подпором (предшествующая клеть может пропустить в единицу времени больший объем металла, чем последующая). Подпор и натяжение непосредственно сказываются на напряженном состоянии металла в очаге деформации и, как следствие, на толщине стенки и диаметре прокатываемой трубы.

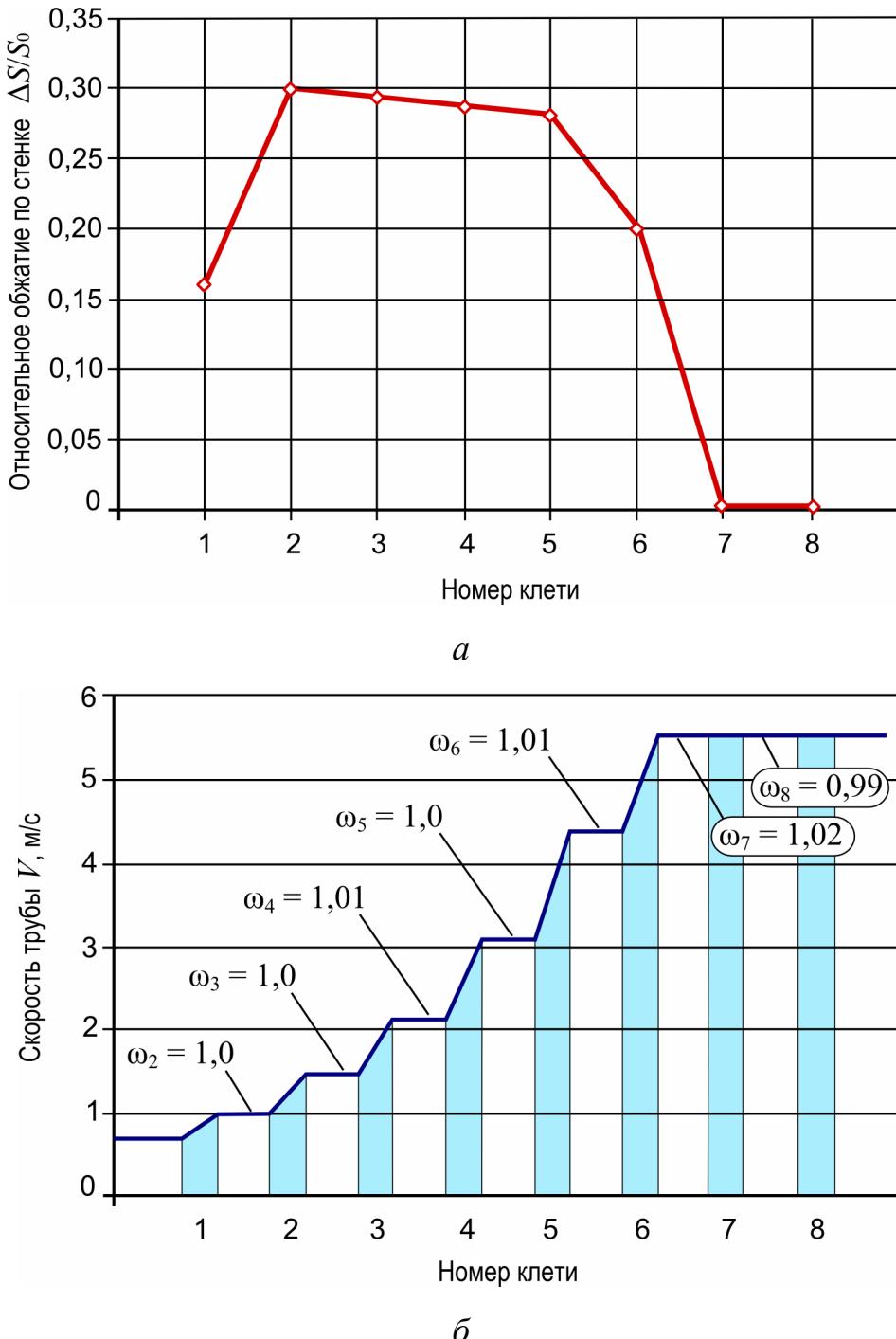


Рис. 5.14. Распределение относительного обжатия стени трубы (а), и изменение скорости движения трубы (б) по клетям непрерывного стана ТПА-80 при прокатке черновой трубы $D_t \times S_t = 91 \times 3$ мм из гильзы $D_g \times S_g = 125 \times 18$ мм

Как правило, в первых клетях современных непрерывных оправочных станов применяют кинематическое натяжение в пределах 0,5...1% (рис. 5.14, б). В последних клетях непрерывного стана ведут прокатку с подпором (не более 1%), в результате действия которого между стенкой трубы и поверхностью оправки формируется небольшой зазор. Это облегчает извлечение оправки из черновой трубы после прокатки.

Существенным недостатком традиционной технологии непрерывной прокатки труб является нестабильность размеров получаемых труб. При раскатке трубы на длинной подвижной оправке образуется концевая продольная разностенность, связанная с наличием неустановившихся режимов заполнения и освобождения клетей стана металлом. В эти моменты резко изменяются скорости оправки и рабочих валков, что создаёт дополнительные осевые напряжения натяжения или подпора, соответственно на переднем и заднем концах черновой трубы [25]. В результате возрастают или уменьшаются частные коэффициенты скольжения, вытяжки и уширения металла в калибрах. Соответственно изменяются силы и моменты прокатки, а также упругая деформация валков и других элементов рабочих клетей непрерывного стана. Следствием этого являются значительные колебания толщины стенки и наружного диаметра по длине черновой трубы.

Из-за повышенного межклетевого натяжения на стадии заполнения клетей стана металлом толщина стенки переднего конца трубы обычно на 0,05...0,3 мм меньше, чем в средней части трубы. При прокатке заднего конца возникает значительный межклетевой подпор, поэтому толщина стенки на этом участке трубы больше, чем в её середине на 0,2...0,3 мм и более. Длина участка с утолщенной стенкой примерно равна 2...3 межклетевым промежуткам. Продольная разностенность черновых труб сохраняется при последующем редуцировании и приводит к увеличению длины обрези концов готовых труб [25].

При прокатке последней трети черновой трубы также происходит и локальное увеличение ее наружного диаметра. Когда задний конец трубы выходит из обжимных клетей стана, в которых действует межклетевое натяжение, и попадает в чистовые клети, где есть подпор, диаметр трубы растет (особенно по линии разъема калибра). Кроме того, при прокатке заднего конца трубы в последних клетях стана скорость скольжения трубы по оправке уменьшается, что также приводит к росту диаметра трубы.

Перечисленные особенности скоростного режима прокатки обуславливают необходимость применения для всех клетей непрерывного стана индивидуального регулируемого электропривода. Управляя скоростным режимом прокатки в отдельных клетях (изменяя коэффициент кинематического натяжения), можно обеспечить регулирование продольной разностенности прокатываемых труб.

Особенности процесса прокатки на редукционном стане

Редуцирование полученной на непрерывном стане черновой трубы в редукционном стане осуществляется без оправки в круглых калибрах. Формоизменение металла при прокатке трубы на редукционном стане характеризуется сложным характером распределения напряжений и деформаций по сечению трубы и вдоль очага деформации.

В случае прокатки без натяжения с малыми обжатиями по диаметру сопротивление продольному истечению металла оказывается больше, чем сопротивление истечению внутрь трубы, что вызывает утолщение стенки. С увеличением обжатия по диаметру сопротивление истечению металла внутрь возрастает пропорционально утолщению стенки. При достижении толщиной некоторого максимума утолщение прекращается, и, далее, с увеличением обжатия начинает расти продольная вытяжка, а толщина стенки остается практически неизменной.

Результирующий диаметр после редуцирования определяется лишь размерами калибра, в то время как результирующая толщина стенки трубы зависит от многих факторов: степени обжатия, кинематического натяжения, исходной толщины стенки S_0 и диаметра трубы D_0 . Как правило, на редукционном стане прокатывают трубы с отношением $S_0/D_0 < 0,1$. Установлено, что при редуцировании труб с таким отношением S_0/D_0 без натяжения всегда происходит утолщение стенки. Противодействовать утолщению можно, применяя прокатку с натяжением. Регулируемое межклетевое натяжение позволяет реализовать регулирование толщины стенки трубы в процессе редуцирования. Максимальное утонение стенки за счет натяжения ограничивается механическими характеристиками материала трубы.

Характерной особенностью редукционного стана является утолщение стенки переднего и заднего концов трубы, связанное с неустановившимися переходными режимами в период заполнения и опорожнения стана. Утолщение концов трубы объясняется снижением натяжения на стадиях входа трубы в стан и выхода ее из стана по сравнению с установившимся режимом, когда прокатка идет во всех клетях стана. Концы труб с утолщенной сверх допуска стенкой отрезаются, что составляет основную долю суммарного расходного коэффициента металла. Уменьшить продольную разностенность трубы можно, регулируя кинематическое натяжение (изменяя скоростной режим клетей) по мере прохождения концов трубы через редукционный стан.

Особенности скоростного режима редуцирования и его непосредственное влияние на качество получаемых труб определяют требования к приводу клетей редукционного стана и системе управления приводом. Идеальным решением в данном случае является индивидуальный управляемый электропривод для всех клетей. На практике индивидуальным приводом оборудуются несколько первых и (или) последних клетей стана, в которых осуществляется регулирование натяжения на переходных режимах.

Остальные клети имеют дифференциально-групповой регулируемый электропривод [24].

Особенности температурного режима прокатки труб

Распределение температуры по длине прокатанной черновой трубы на выходе из непрерывного стана [26] характеризуется существенной неоднородностью, что обусловлено особенностями технологии прокатки на оправке:

- передний конец трубы имеет повышенную (на 80...150°C) температуру по сравнению с остальной частью трубы. Это объясняется малым временем теплообмена между передним концом и оправкой, поскольку длина прокатанной трубы превышает длину оправки, и выходящий из стана передний конец трубы с оправкой не контактирует;
- «хвост» трубы обычно имеет самую низкую температуру, так как в процессе прокатки он постоянно соприкасается с оправкой.

В поперечном сечении трубы наблюдаются перепады температуры по ее окружности, обусловленные максимальным остыванием металла в вершинах калибров валков, где имеет место максимальное давление на металл. Так как валки соседних клетей непрерывного стана расположены перпендикулярно друг другу, вдоль трубы наблюдаются 4 захоложенные «темные» полосы, расположенные с угловым шагом 90°.

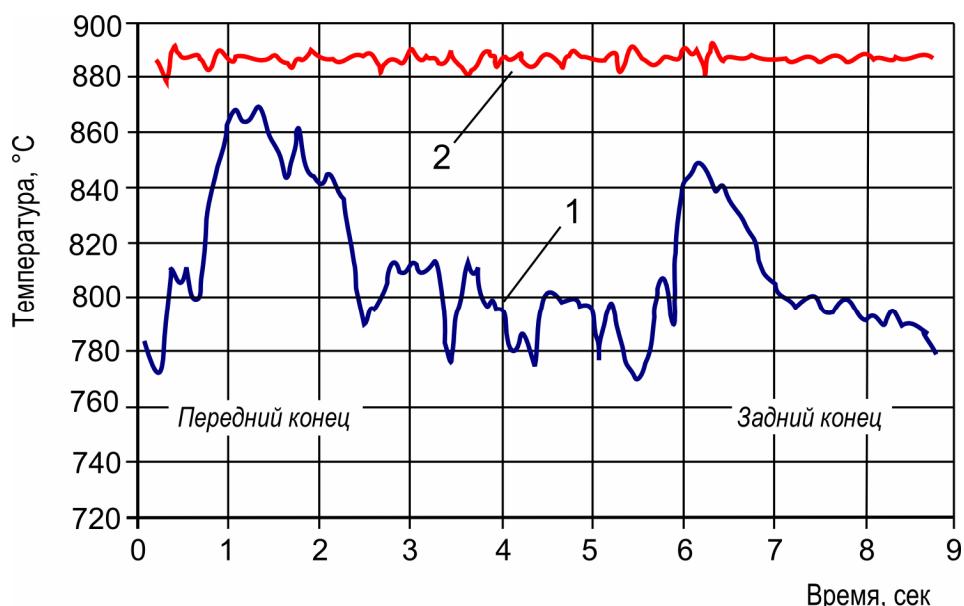


Рис. 5.15. Результаты измерения температуры черновой трубы диаметром 92 мм с толщиной стенки 3,2 мм при ее движении через индукционную проходную печь (ИПП) со скоростью 2,5 м/с:

1 – на входе в шестой блок ИПП; 2 – на выходе из ИПП

Из сказанного следует, что перед прокаткой черновой трубы в редукционном стане для обеспечения необходимой пластичности и однородности механических свойств заготовки необходимы ее подогрев и выравнивание температуры по всему объему. В противном случае

неодинаковость механических свойств заготовки неизбежно скажется на разнотолщинности стенки готовой трубы. Нагрев и выравнивание температуры заготовки перед редуцированием осуществляются на установках индукционного нагрева. На рис. 5.15 представлены результаты эксперимента по измерению температуры трубы на входе в шестой блок индукционной проходной печи (ИПП) ТПА-80 и на выходе из ИПП [26].

Структура и основные функции АСУ ТП ТПА-80

Основной целью создания АСУ ТП ТПА-80 и внедрения этой системы на действующем трубопрокатном агрегате было повышение качества и увеличение выхода годных труб за счет уменьшения их разностенности и сокращения длины обрези утолщенных концов.

Другими задачами АСУ ТП являются:

- повышение производительности, включая предотвращение аварийных режимов прокатки и сокращение времени настройки станов;
- экономия энергоресурсов, снижение расхода инструмента;
- улучшение условий труда вальцовщиков;
- сопровождение труб по технологической линии, учет расхода металла и другое информационное обеспечение организации и управления производством.

Автоматизированная система управления ТПА-80 состоит из подсистем управления непрерывным и редукционным становыми и подсистемы сопровождения технологического процесса и общестановой информации. Основу АСУ ТП составляют локальные системы автоматизированного задания и контроля скоростной настройки непрерывного (УЗС-Н) и редукционного (УЗС-Р) станов, система контроля и управления растворами валков непрерывного стана (СУРВ-Н), а также система контроля температуры и управления индукционным нагревом (СКТиУИН).

Функционально АСУ ТП ТПА-80 (рис. 5.16) подразделяется на системы верхнего и нижнего уровня. Система верхнего уровня объединяет все АРМы систем УЗС-Н, УЗС-Р, СКТиУИН и соединена сетью Ethernet через сервер с системой нижнего уровня. Нижний уровень составляют PLC-контроллеры локальных систем управления, различные датчики, исполнительные механизмы, нагревательные устройства и цифровой электропривод рабочих клетей, связанные сетями полевого уровня Profibus [23]. Сети полевого уровня независимы от сетей Ethernet, то есть при отключении или нарушении обмена данными по верхней и нижней сетям Ethernet устройства УЗС-Р, УЗС-Н и СКТиУИН могут продолжать выполнять свои функции по управлению процессом.

Система задания и контроля скоростной настройки непрерывного стана УЗС-Н управляет работой непрерывного стана и является двухуровневой, многофункциональной, распределенной (децентрализованной) информационно-управляющей системой реального времени. Система имеет модульную структуру, что обеспечивает возможность ее

функционального расширения с учетом перспектив развития и адаптации к изменяющимся технологическим условиям. Деление системы УЗС-Н на подсистемы выполнено по функциональному принципу:

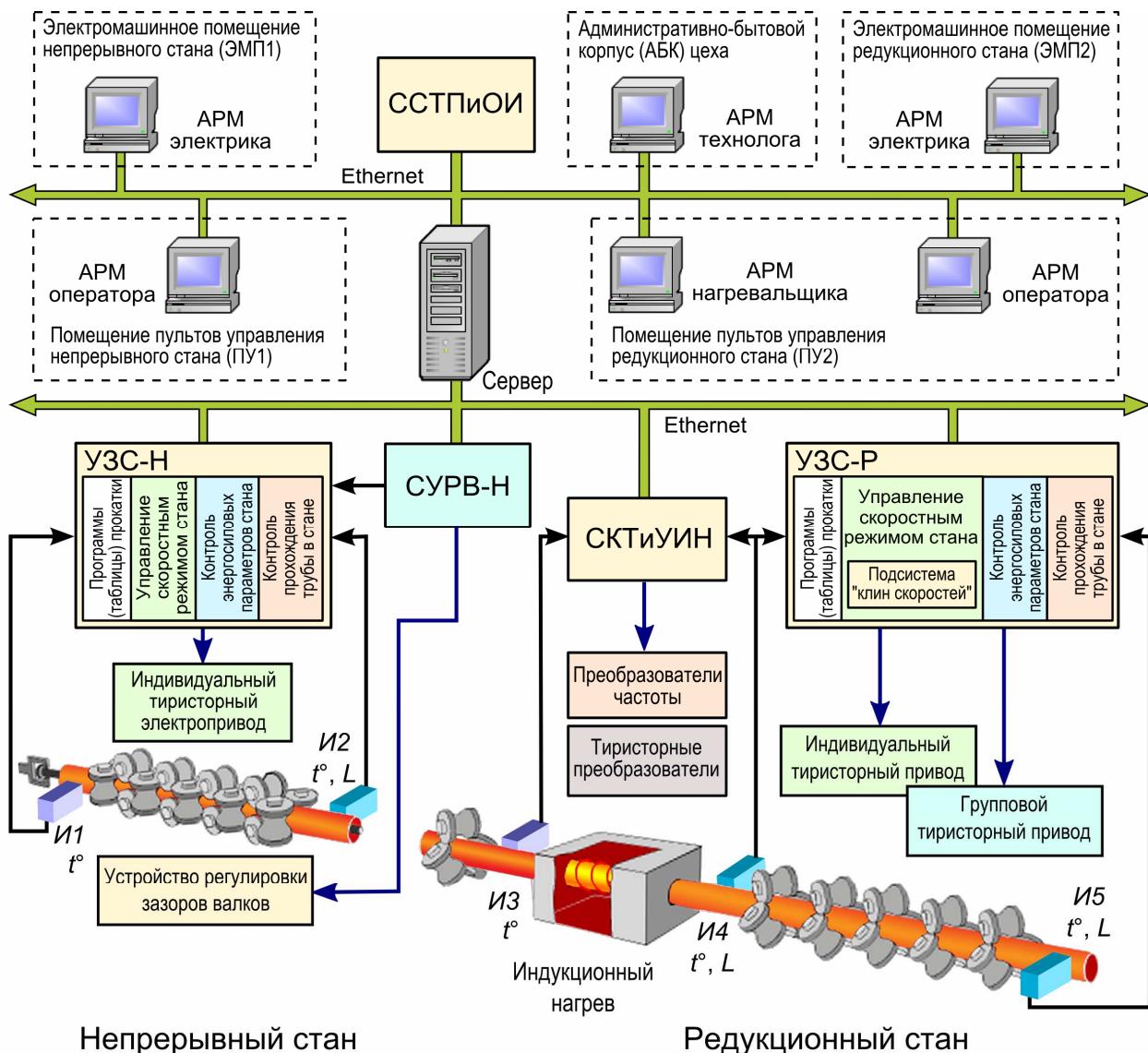


Рис. 5.16. Структура АСУ ТП трубопрокатного агрегата ТПА-80

- Подсистема *ввода исходных данных для настройки* стана. Позволяет уменьшить время настройки стана и увеличить точность труб нового сортамента за счет использования таблиц прокатки, которые хранятся в базе данных системы. Подсистема работает с базовой библиотекой программ прокатки, основанной на теоретически рассчитанных программах. В библиотеку вводятся и хранятся реальные рабочие программы для каждого сортамента труб.
- Подсистема *управления скоростными режимами* стана. Обеспечивает контроль и управление работой приводов рабочих клетей непрерывного стана путем задания установок скорости двигателям рабочих клетей. Формирует управляющие сигналы, реализующие различные режимы работы стана: пуск, установившийся режим,

нормальный останов, форсированный останов, аварийный останов, ход назад, коррекция скоростной настройки стана с целью обеспечения необходимых величин натяжения и подпора по клетям стана.

- Подсистема *контроля энергосиловых параметров* стана. Служит для вывода информации о работе приводов клетей, расчета и контроля фактических значений скорости и тока приводов стана, индикации и сигнализации контролируемых параметров на пультах системы. При приближении режима работы стана к аварийному система выполняет автоматическую остановку электропривода, что предотвращает образование «гармошки» и «закат» оправки, а также обеспечивает защиту механического и электрического оборудования стана в случае аварии.
- Подсистема *контроля прохождения трубы* в стане. Необходима для определения положения трубы в стане при ее движении путем контроля входа переднего конца трубы в валки рабочих клетей («захват») и выхода заднего конца трубы из валков («выброс»), индикации положения трубы в стане на пультах операторов. Подсистема формирует сигналы предупреждений и аварий в случае превышения времени прохождения трубой промежутка между соседними клетями. По показаниям специальных измерительных устройств (*I1...I5* на рис. 5.16) осуществляется измерение температуры трубы на входе и выходе стана, длины гильз, черновых и готовых труб. Определяются коэффициент вытяжки и число готовых труб, фиксируются текущие параметры настройки стана и оперативная информация о состоянии системы управления. Кроме того, выполняется мониторинг настройки рабочих валков в клетях непрерывного стана. Осуществляется запись информации о дате установки и перевалки каждой рабочей клети, а так же ведение архивов использования валков с учетом массы прокатанных труб.

Система контроля и управления растворами валков непрерывного стана СУРВ-Н (см. рис. 5.16) обеспечивает выполнение следующих функций:

- ввод и визуализация на АРМ заданий на установку раствора валков в клетях стана;
- регулировка растворов рабочих валков с точностью 0,1 мм в соответствии с заданиями;
- передача информации в УЗС-Н о фактической величине раствора валков;
- визуализация фактического значения раствора в валках клетей на стане;
- управление режимами работы электроприводов нажимных устройств, автоматическая диагностика и защита электроприводов;
- аварийное и предаварийное оповещение оператора о некорректных режимах работы;
- протоколирование аварийных ситуаций и действий оператора;
- ведение архива учета кампаний клетей.

Применение СУРВ-Н в составе АСУ ТП агрегата ТПА-80 позволяет увеличить производительность стана за счет сокращения времени настройки клетей. Обеспечиваемая СУРВ-Н высокая точность установки раствора валков дает возможность увеличить выпуск годной продукции.

Система задания и контроля скоростной настройки редукционного стана УЗС-Р построена по тем же принципам, что и УЗС-Н, и включает в себя подсистемы, аналогичные подсистемам УЗС-Н (см. рис. 5.16). Кроме того, в её состав дополнительно входит подсистема «клин скоростей», реализующая технологически настраиваемый алгоритм управления соотношением скоростей валков по мере прохождения концов трубы через клети редукционного стана (так называемая «бегущая волна»).

Подсистема «клин скоростей» предназначена для компенсации отсутствия или недостатка натяжения при редуцировании концевых участков трубы по сравнению с прокаткой ее средней части путем корректировки соотношения скоростей клетей стана, в которых находится концевой участок трубы. В результате удается существенно уменьшить длину утолщенных концевых участков трубы, обрезаемых после редуцирования, что приводит к снижению потерь металла и увеличению выхода годной продукции.

Система контроля температуры и управления индукционным нагревом СКТиУИН (см. рис. 5.16) служит для контроля и управления процессом нагрева труб в линии индукционного нагрева перед редукционным станом. В системе реализовано управление установкой индукционного нагрева на основе стохастической математической модели процесса нагрева трубных заготовок. Это позволило учесть значительные отклонения от средних значений в продольных распределениях температуры нагрева черновых труб и большой разброс этих распределений для разных заготовок. СКТиУИН обеспечивает точный нагрев трубных заготовок и минимальный разброс температуры по их длине, что является необходимым условием достижения требуемого качества продукции [26].

Система ведет запись температурных характеристик трубы по всей длине, выдает сигналы отбраковки для трубы при выходе параметров за заданные нормы. Записанные параметры сохраняются в архивах системы и учитываются при создании поплавочных и сменных отчетов по процессам термообработки труб.

Система сопровождения технологического процесса и общестановой информации (ССТПиОИ на рис. 5.16) решает в структуре АСУ ТП общие информационно-управленческие задачи:

- сопровождение труб по технологической линии, начиная от загрузки штанг в печь и заканчивая формированием пакетов готовых труб с присвоением номера каждой трубе в партии и учитывая изъятие отдельных труб из технологического потока;
- ведение учета расхода металла;

- создание и архивация отчетов о работе агрегата и цеха по плавкам или заказам посменно и посуготочно;
- подготовка сопроводительной документации для отгрузки готовой продукции со склада.
- контроль и диагностика работы оборудования технологической линии ТПА-80;
- ввод основных данных о заготовке, гильзе, черновой трубе в подсистемы непрерывного и редукционного станов.

Применение АСУ ТП на агрегате ТПА-80 позволило уменьшить расходный коэффициент металла и снизить себестоимость единицы производимой продукции, увеличить выход годной продукции, обеспечить экономию энергетических и материальных ресурсов, сократить время простоев и затраты времени при настройке стана на новый сортамент, свести к минимуму влияние на технологический процесс человеческого фактора.

Глоссарий

ERP	<p><i>Enterprise Resource Planning</i> (англ.) – планирование производственных ресурсов предприятия. ERP-система – это интегрированная информационная система для управления внутренними и внешними ресурсами предприятия (физические активы, финансовые, материально-технические и человеческие ресурсы). В основе ERP-систем лежит принцип создания единого хранилища данных, содержащего всю корпоративную бизнес-информацию и обеспечивающего одновременный доступ к ней любого необходимого количества сотрудников предприятия, наделённых соответствующими полномочиями. ERP-система формирует стандартизованное единое информационное пространство предприятия.</p>
Ethernet	<p>Пакетная технология передачи данных преимущественно в локальных компьютерных сетях (от лат. <i>aether</i> – эфир и англ. <i>net</i> – сеть). Описывается стандартами IEEE группы 802.3. Стандарты Ethernet определяют проводные соединения и электрические сигналы на физическом уровне, формат кадров передаваемых данных и протоколы управления доступом к сетевой среде. Ethernet стал самой распространённой технологией локальных вычислительных сетей в середине 90-х годов прошлого века.</p>
Fieldbus	<p>Промышленная сеть передачи данных (англ. «полевая шина»), связывающая различные датчики, исполнительные механизмы, промышленные контроллеры и используемая в промышленной автоматизации. Термин употребляется преимущественно в автоматизированной системе управления технологическими процессами (АСУ ТП).</p>
Industrial Ethernet	<p>Промышленный Ethernet – стандартизованный (IEEE 802.3 и 802.11) вариант Ethernet для применения в промышленности. Обычно используется для обмена данными между программируемыми контроллерами и системами человеко-машинного интерфейса, реже – для обмена данными между контроллерами и для подключения к контроллерам удаленного оборудования (датчиков и исполнительных устройств). В последнее время является одной из самых распространённых промышленных сетей. Широко применяется при автоматизации зданий и в приложениях, не требующих высокой надёжности.</p>

IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (англ.) – Институт инженеров по электротехнике и электронике. Международная некоммерческая ассоциация специалистов в области техники, мировой лидер в области разработки стандартов по радиоэлектронике и электротехнике.
IEEE 802	Семейство стандартов IEEE, касающихся локальных вычислительных сетей (LAN)
Internet	<i>Interconnected Networks</i> (англ.) – объединённые сети. Глобальная телекоммуникационная сеть информационных и вычислительных ресурсов. Часто упоминается как <i>Всемирная сеть</i> , <i>Глобальная сеть</i> , либо просто <i>Сеть</i> . Представляет собой хаотичное объединение автономных систем, что не гарантирует качества связи, но обеспечивает хорошую устойчивость и независимость функционирования системы в целом от работоспособности какого-либо ее участка. В настоящее время, при упоминании слова «Интернет» в обиходе чаще всего имеется в виду <i>Всемирная паутина</i> (World Wide Web или WWW) и доступная в ней информация, а не сама физическая сеть.
LAN (ЛВС)	<i>Local Area Network</i> (англ.) – локальная компьютерная сеть. Компьютерная сеть, покрывающая обычно относительно небольшую территорию или небольшую группу зданий (дом, офис, фирму, институт, предприятие). Существуют и локальные сети, узлы которых разнесены географически на расстояния более 12500 км (космические станции и орбитальные центры). Несмотря на такие расстояния, подобные сети всё равно относят к локальным.
MES	<i>Manufacturing Execution System</i> (англ.) – система организации производства. Системы такого класса решают задачи синхронизации, координируют, анализируют и оптимизируют выпуск продукции в рамках какого-либо производства.
MRP	<i>Manufacturing Resource Planning</i> (англ.) – материально-производственное планирование. Практика использования систем MRP в производстве связана с планированием и контролем процедур заказа и закупок материальных ресурсов, как правило, большой номенклатуры, для промышленных предприятий по изготовлению машиностроительной продукции.

PCM (ИКМ)	<p><i>Pulse Code Modulation</i> (англ.) – импульсно-кодовая модуляция. PCM используется для преобразования аналоговых сигналов в цифровые. Практически все виды аналоговых данных (звук, видео, данные телеметрии и т.п.) допускают применение PCM.</p>
PLC (ПЛК)	<p><i>Programmable Logic Controller</i> (англ.) – программируемый логический контроллер (промышленный контроллер). Специализированное компьютеризированное устройство, используемое для автоматизации технологических процессов. В отличие от компьютеров общего назначения, PLC имеют развитые устройства ввода-вывода сигналов датчиков и исполнительных механизмов, приспособлены для длительной работы без серьёзного обслуживания, а также для работы в неблагоприятных условиях окружающей среды. PLC являются устройствами реального времени.</p>
Profibus	<p><i>Process Field Bus</i> (англ.) – открытая промышленная сеть, прототип которой был разработан компанией Siemens AG для своих промышленных контроллеров SIMATIC. Очень широко распространена в Европе, особенно в машиностроении и управлении промышленным оборудованием. Profibus позволяет объединять разрозненные устройства автоматизации в единую систему на уровне датчиков и приводов.</p>
SCADA	<p><i>Supervisory Control And Data Acquisition</i> (англ.) – сбор данных и диспетчерское управление. Данное понятие обычно применяется к системе управления в промышленности: система контроля и управления процессом с применением ЭВМ. Процесс может быть технологическим, инфраструктурным (подача и распределение воды, электроэнергии и т.п.) или обслуживающим.</p>
WAN (ГВС)	<p><i>Wide Area Network</i> (англ.) – глобальная компьютерная сеть. Компьютерная сеть, охватывающая большие территории и включающая в себя десятки и сотни тысяч компьютеров. WAN служат для объединения разрозненных сетей, чтобы пользователи и компьютеры, где бы они ни находились, могли взаимодействовать со всеми остальными участниками глобальной сети. Некоторые WAN построены исключительно для частных организаций, другие являются средством коммуникации корпоративных LAN с сетью Internet или посредством Internet с удалёнными сетями, входящими в состав корпоративных.</p>

Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i> (англ. «беспроводная точность») – стандарт на оборудование беспроводных локальных сетей (Wireless LAN), разработанный международным консорциумом «Wi-Fi Alliance» на базе стандартов IEEE 802.11. Установка беспроводных сетей рекомендуется там, где развёртывание кабельной системы невозможно или экономически нецелесообразно.
АРМ	<i>Автоматизированное Рабочее Место</i> – программно-технический комплекс, предназначенный для автоматизации деятельности определенного вида. АРМ объединяет программные и аппаратные средства, обеспечивающие взаимодействие человека с компьютером, предоставляет возможность ввода информации (через клавиатуру, компьютерную мышь, сканер и т.п.) и её вывод на экран монитора, принтер, графопостроитель, звуковую систему или иные устройства вывода. Как правило, АРМ является частью АСУ (АСУ ТП).
АСУ	<i>Автоматизированная Система Управления</i> – комплекс аппаратных и программных средств, предназначенный для управления различными процессами и объектами в рамках технологического процесса, производства, предприятия. АСУ применяются в различных отраслях промышленности, энергетике, транспорте и т. п. Термин «автоматизированная» в отличие от термина «автоматическая» подчеркивает возможность участия человека в отдельных операциях, как в целях сохранения человеческого контроля над процессом, так и в связи со сложностью или нецелесообразностью автоматизации отдельных операций.
АСУ ТП	<i>Автоматизированная Система Управления Технологическим Процессом</i> – комплекс программных и технических средств, предназначенный для автоматизации управления технологическим оборудованием на предприятиях. Составными частями АСУ ТП могут быть отдельные системы автоматического управления (САУ) и автоматизированные устройства, связанные в единый комплекс. Для информационной связи всех подсистем АСУ ТП используются промышленные сети. АСУ ТП может иметь связь с автоматизированной системой управления предприятием (АСУП).

АСУП	<p><i>Автоматизированная Система Управления Производством</i> решает задачи организации производства, включая основные производственные процессы, входящую и исходящую логистику. Осуществляет краткосрочное планирование выпуска с учётом производственных мощностей, анализ качества продукции, моделирование производственного процесса.</p>
БД	<p><i>База Данных</i> – организованная в соответствии с определёнными правилами и поддерживаемая в памяти компьютера совокупность данных, характеризующая актуальное состояние некоторой предметной области и используемая для удовлетворения информационных потребностей пользователей. Применительно к промышленным предприятиям БД может рассматриваться как некоторый набор постоянно хранимых данных, используемых прикладными программными системами предприятия.</p>
САУ	<p><i>Система Автоматического Управления</i> – комплекс устройств, предназначенный для автоматического изменения одного или нескольких параметров объекта управления с целью установления требуемого режима его работы. САУ обеспечивает поддержание постоянства заданных значений регулируемых параметров или их изменение по заданному закону, либо оптимизирует определенный критерий качества управления. По типу управления САУ подразделяются на замкнутые, разомкнутые и комбинированные.</p> <p>В <i>замкнутой САУ</i> цепь прохождения сигналов образует замкнутый контур, включающий устройство управления и управляемый объект. Отклонения управляемой величины от желаемых значений компенсируются воздействием через обратную связь вне зависимости от причин, вызвавших эти отклонения. Такое управление называется <i>управлением по отклонению</i>.</p> <p>В <i>разомкнутой САУ</i> управление ведётся по жёсткой программе без анализа и учёта каких-либо факторов в процессе работы управляемого объекта, т.е. на устройство управления не поступают сигналы, несущие информацию о текущем состоянии объекта управления. В некоторых случаях измеряются и компенсируются лишь главные из возмущений (помех). Такое управление называется <i>управлением по возмущению</i>.</p> <p>В <i>комбинированных САУ</i> используются оба принципа управления (по отклонению и по возмущению).</p>

CAP	<i>Система Автоматического Регулирования</i> – разновидность систем автоматического управления. Обеспечивает автоматическое поддержание постоянства или изменение по требуемому закону некоторой физической величины, характеризующей управляемый процесс. Регулирование осуществляется приложением управляющих воздействий к исполнительным механизмам, непосредственно влияющим на ход процесса. Наиболее распространено автоматическое регулирование параметров технологических процессов, напряжения электрических сетей, скорости движения транспортных средств и т.д.
ТПА	<i>ТрубоПрокатный Агрегат</i> – система прокатных станов и других машин для производства металлических бесшовных труб. Трубопрокатные агрегаты различают по типу удлинительного стана (непрерывный, автоматический, или короткооправочный, трёхвалковый, пилягриковый).
УВМ	<i>Управляющая Вычислительная Машина</i> – вычислительная машина, включенная в контур управления техническими объектами (процессами, машинами, системами). УВМ принимают и обрабатывают информацию, поступающую в процессе управления, и выдают управляющую информацию либо в виде текстовых, табличных или графических данных, отпечатанных на бумаге или отображаемых на экране дисплея, либо в виде сигналов (воздействий), подаваемых на исполнительные органы объекта управления. Отличительная особенность УВМ – наличие в них наряду с основными устройствами, входящими в состав всех ЭВМ (процессором, памятью и др.), комплекса устройств связи с объектом управления. По способу представления информации УВМ делят на цифровые, аналоговые и гибридные – цифроаналоговые. Цифровые УВМ превосходят аналоговые по точности управления, но уступают им в быстродействии. В гибридных УВМ цифровые и аналоговые вычислительные устройства работают совместно, что позволяет в максимальной степени использовать их достоинства.

Список использованных источников

1. *Выдрин В.Н., Федосиенко А.С.* Автоматизация прокатного производства: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1984. – 472 с.
2. *Целиков А.И., Гришков А.И.* Теория прокатки. – М.: Металлургия, 1970. – 358 с.
3. *Фомин Г.Г., Дубейковский А.В., Гринчук П.С.* Механизация и автоматизация широкополосных станов горячей прокатки. – М.: Металлургия, 1979. – 232 с.
4. АСУ гидронажимными устройствами пятиклетевого стана «1700» // AUTOMATION-DRIVES.RU: Официальный сайт департаментов «Промышленная автоматизация» и «Технологии приводов» (IA&DT) ООО Сименс. 2008. URL http://www.automation-drives.ru/as/download/solutions/metal/ASY_Gidro_najimnimi_stana_1700.pdf (дата обращения: 12.12.2010).
5. Высокоточная стабилизация толщины полосы при горячей прокатке / П.С. Гринчук, Б.В. Иофин, Р.С. Кожевников и др. – Киев: Техніка, 1973. – 167 с.
6. *Челюсткин А.Б.* Автоматизация процессов прокатного производства. – М.: Металлургия, 1971. – 296 с.
7. *Туманов М.П.* Технические средства автоматизации и управления. Цифровые средства обработки информации и программное обеспечение: Учебное пособие / Под ред. А.Ф. Каперко. – М.: Московский государственный институт электроники и математики, 2005. – 71 с.
8. *Иванов В.М.* Электроприводы с системами числового программного управления: Учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 152 с.
9. Современные компоненты автоматизации // Конструктор-машиностроитель, 2007, №3. – С. 8 – 13.
10. Технологические контроллеры для систем управления перемещением и позиционирования // AUTOMATION-DRIVES.RU: Официальный сайт департаментов «Промышленная автоматизация» и «Технологии приводов» (IA&DT) ООО Сименс. 2010. URL http://www.automation-drives.ru/as/download/ascat/simatic_s7/s7_300/14_Technology_r.pdf (дата обращения: 12.12.2010).
11. *Фалк Г.Б.* Технические средства автоматизации и управления: исполнительные устройства: Учебное пособие / Под ред. А.Ф. Каперко – М.: Московский государственный институт электроники и математики, 2004. – 127 с.

12. Вегман Й., Килиан М. Profibus DP и SIMATIC-S7 // AUTOMATION-DRIVES.RU: Официальный сайт департаментов «Промышленная автоматизация» и «Технологии приводов» (IA&DT) ООО Сименс. 2010. URL http://www.automation-drives.ru/as/download/doc/simatic_net/profibus/01_Basic PROFIBUS.pdf (дата обращения: 12.12.2010).
13. Управляющие вычислительные комплексы: Учебное пособие / Н.Л. Прохоров, Г.А. Егоров, В.Е. Крассовский и др. – М. : Финансы и статистика, 2003. – 352 с.
14. Сети Industrial Ethernet // AUTOMATION-DRIVES.RU: Официальный сайт департаментов «Промышленная автоматизация» и «Технологии приводов» (IA&DT) ООО Сименс. 2010. URL http://www.automation-drives.ru/as/download/doc/simatic_net/ethernet/2_IndustrialEthernet_Networks_r.pdf (дата обращения: 12.12.2010).
15. Модернизация комплекса систем автоматического управления для пятиклетевого стана «1700» // AUTOMATION-DRIVES.RU: Официальный сайт департаментов «Промышленная автоматизация» и «Технологии приводов» (IA&DT) ООО Сименс. 2006. URL http://www.automation-drives.ru/as/download/solutions/metal/6_10_stan-1700.pdf (дата обращения: 12.12.2010).
16. Система автоматического регулирования плоскостности полосы пятиклетевого стана «1700» // AUTOMATION-DRIVES.RU: Официальный сайт департаментов «Промышленная автоматизация» и «Технологии приводов» (IA&DT) ООО Сименс. 2007. URL http://www.automation-drives.ru/as/download/solutions/metal/ASR_polosi_stana_1700.pdf (дата обращения: 12.12.2010).
17. Flat-rolled steel processes: advanced technologies / Edited by Vladimir B. Ginzburg. – Boca Raton: CRC Press, 2009. – 372 p.
18. Shapemeter Roll (BFI) // FRIEDRICHVOLLMER.DE: Offizielle Website des Vollmer GmbH: Meß- und Regeltechnik. 2008. URL http://www.friedrichvollmer.de/download/Planheit_BFI.pdf (дата обращения: 12.12.2010).
19. Регулирование плоскостности полосы // FRIEDRICHVOLLMER.DE/RU: Официальный сайт Vollmer GmbH: КИП и автоматика. 2008. URL http://www.friedrichvollmer.de/ru/bandplanheit_r.html (дата обращения: 12.12.2010).
20. Измерение плоскостности полосы // FRIEDRICHVOLLMER.DE/RU: Официальный сайт Vollmer GmbH: КИП и автоматика. 2008. URL http://www.friedrichvollmer.de/ru/bandplanheit_m.html (дата обращения: 12.12.2010).

21. АСУ ТП реверсивного стана «КВАРТО 400 ŠKODA» // AUTOMATION-DRIVES.RU: Официальный сайт департаментов «Промышленная автоматизация» и «Технологии приводов» (IA&DT) ООО Сименс. 2007. URL http://www.automation-drives.ru/as/download/solutions/metal/6_14_kvattro-shkoda.pdf (дата обращения: 12.12.2010).
22. Контактное измерение толщины полосы // FRIEDRICHVOLLMER.DE/RU: Официальный сайт Vollmer GmbH: КИП и автоматика. 2008. URL http://www.friedrichvollmer.de/ru/banddicke_m1.html (дата обращения: 12.12.2010).
23. Система автоматизации для трубопрокатного агрегата // AUTOMATION-DRIVES.RU: Официальный сайт департаментов «Промышленная автоматизация» и «Технологии приводов» (IA&DT) ООО Сименс. 2005. URL http://www.automation-drives.ru/as/download/solutions/metal/6_32_ASU_Truboprokat_Kamensk.pdf (дата обращения: 12.12.2010).
24. Журавлев В.Л. Технология производства труб // TP2.RU: Официальный сайт ООО «ПФ Тяжпромэлектропривод». Екатеринбург. 2007. URL <http://www.tp2.ru/index.php?inf=55> (дата обращения: 12.12.2010).
25. Применение АСУТП для совершенствования процессов непрерывной прокатки труб / Ю.В. Бодров, Д.В. Овчинников, А.А. Богатов и др. // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика А.И. Целикова (Москва, 14-15 апреля 2004 г.). / Под. ред. А.А. Восканьянца. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – С. 153 – 157.
26. Стохастическая управляемая система индукционного нагрева быстродвижущихся трубных заготовок / В.И. Лузгин, А.Ю. Петров, В.Х. Куляшов и др. // Электротехника, 2009, №6. – С. 50 – 56.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ПРОКАТНЫЕ СТАНЫ КАК ОБЪЕКТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ	7
2. СТРУКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ СОВРЕМЕННОГО ПРОКАТНОГО СТАНА	11
3. ЛОКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРОКАТКИ	17
3.1. СИСТЕМА ПОЗИЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ	18
3.2. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАТЯЖЕНИЯ В ЧЕРНОВОЙ ГРУППЕ КЛЕТЕЙ	21
3.3. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАТЯЖЕНИЯ В ЧИСТОВОЙ ГРУППЕ КЛЕТЕЙ	24
3.4. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ШИРИНЫ ПОЛОСЫ	28
3.5. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОЛЩИНЫ ПОЛОСЫ В ЧИСТОВОЙ ГРУППЕ КЛЕТЕЙ	30
4. СОВРЕМЕННЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ [7,8]	39
4.1 ПРОГРАММИРУЕМЫЕ КОНТРОЛЛЕРЫ	40
4.2. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА	41
4.3. СЕТЕВЫЕ КОМПОНЕНТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ	42
4.4. АРХИТЕКТУРА СОВРЕМЕННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ	44
4.5. ТИПОВАЯ СТРУКТУРА СОВРЕМЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ АСУ ТП	47
5. ПРИМЕРЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОКАТНЫМИ СТАНАМИ	50
5.1. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА «1700» ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ	50
5.2. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПЛОСКОСТНОСТИ ПОЛОСЫ НЕПРЕРЫВНОГО СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ	54
5.3. АСУ ТП РЕВЕРСИВНОГО СТАНА «КВАРТО 400»	61
5.4. АСУ ТП ПРОКАТКИ ТРУБ НА НЕПРЕРЫВНОМ И РЕДУКЦИОННОМ СТАНАХ ТРУБОПРОКАТНОГО АГРЕГАТА ТПА-80	65
ГЛОССАРИЙ	76
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	82