

# Автоматическое управление остановкой проката

*Александр Другов, Игорь Иерусалимов, Вячеслав Маркович, Виталий Рыбкин, Артём Юлайханов*

**В статье описана система автоматического управления остановкой проката. Для определения положения проката применена оптическая камера. Управление приводами рольгангов осуществлялось с помощью контроллеров по специальному алгоритму. Рассказано о принципах определения координат проката и управления приводами.**

При производстве проката в металлургии (рис. 1) присутствуют операции, связанные с остановкой горячего проката в заданных точках рольганга. Как правило, остановка проката производится вручную операторами. Оператор визуально определяет текущее положение проката и, управляя приводами рольганга, производит остановку проката в требуемой позиции. Если количество точек остановки невелико, то для точной остановки проката используют выдвижной механический упор. При этом задача оператора сводится к плавному снижению скорости и подво-

ду проката на малой скорости к механическому упору. Такой способ остановки вполне приемлем при невысоком темпе проката. Однако при высоком темпе проката (до 5 штанг проката в минуту) нагрузка на оператора возрастает, и на обеспечение ритмичности прокатки оказывает влияние квалификация самого оператора. Особенно это критично при прокатке строительных балок.

При остановке проката с помощью механического упора происходит удар торцов проката об упор. Если производится прокатка штанг простого сече-

ния (квадрат или круг), это не является существенным, однако в случае прокатки строительных балок при ударе торцов штанг об упор могут образовываться дефекты на их концах, что приводит к снижению количества годной продукции.

Представляется целесообразным разработать автоматизированную систему управления остановкой проката в заданной позиции. Причём для повышения выхода годного проката необходимо исключить механический упор как средство остановки.

Естественным образом поставленная задача включает в себя две проблемы. Во-первых, необходимо разработать полностью автоматизированную систему технического зрения, которая определяет наличие и положение горячих штанг на рольганге. Система технического зрения должна быть полностью автономной, выдавать с необходимым быстродействием положения штанг и не требовать сложной настройки. Во-вторых, необходимо разработать автоматизированную систему управления приводами рольганга. Такая система



Рис. 1. Прокатный цех



Рис. 2. Внешний вид оптической камеры R3M

Основные технические характеристики электронного блока

Температура объекта измерения, °С	От 500 до 1000
Расстояние до объекта измерения, м	От 2 до 100
Поле зрения $L$ (на расстоянии 40 м), м	Не менее 15
Точность измерения (на расстоянии 40 м), мм	Не хуже 30
Количество обнаруживаемых краёв	До 8
Темп выдачи информации, Гц	50
Тип интерфейса связи камеры	RS-232/RS-485
Допустимая температура окружающей среды, °С	От 0 до +50
Напряжение питания, В	220±10%
Степень защиты	IP45
Вес оптического блока, кг	Не более 3
Размеры оптического блока, мм	Не более 190×125×260

должна принимать информацию о положении штанг от системы технического зрения и на её основе выдавать (по специальному алгоритму остановки) управляющие воздействия на приводы рольганга.

Система управления остановкой проката, способная решать приведённые задачи, была разработана и внедрена специалистами Нижнетагильского металлургического комбината и ООО «Группа компаний АСК».

### АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Известно немного систем технического зрения, которые позволяют определять положение концов проката. Пример реализации такой системы показан в работе [1]. Её принцип основан на получении на экране компьютера цифрового изображения горячего слитка. Для позиционирования края слитка относительно выбранной точки рольганга изображение с телекамеры программно совмещают с предварительно формируемой координатной сеткой. Такая система упрощает работу оператора, однако она не позволяет автоматически производить расчёт координат проката в реальном времени и поэтому не может поставлять данные в систему управления рольгангами.

В соответствии с поставленной задачей была разработана собственная система технического зрения на основе оптических камер с линейными матричными фотоприёмниками. На рис. 2 показан внешний вид разработанной оптической камеры РЗМ. Эта камера позволяет определять координаты краёв объектов в режиме реального времени. Она предназначена для работы в качестве самостоятельного контрольно-измерительного прибора, а также в составе автоматизированных систем управления металлургическим производством.

В состав камеры РЗМ входят оптический и электронный блоки. В оптическом блоке располагаются объектив и линейный матричный фотоприёмник. Электронный блок содержит платы АЦП для оцифровки видеосигнала, блок питания и встроенный компьютер формата PC/104 (PCM-3350 фирмы Advantech). Схема и конструкция электронного блока во многом такие же, как у электронного блока оптического измерителя скорости проката, представленного в работе [2]. Основ-

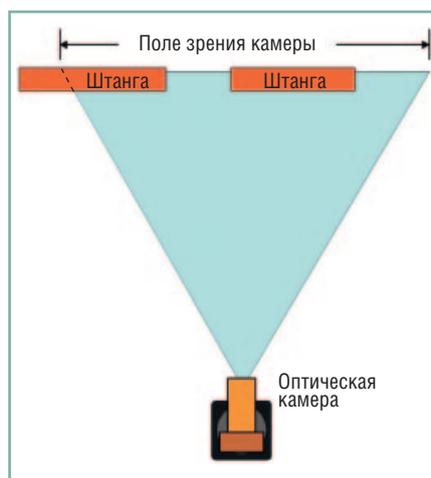


Рис. 3. Взаимное расположение объектов и камеры

ные технические характеристики электронного блока представлены в табл. 1.

На фотоприёмнике камеры с помощью объектива формируется изображение объекта. Пространственное распределение интенсивности излучения объекта на фотоприёмнике определяется как геометрическими характеристиками оптической камеры, так и самим объектом. На рис. 3 показано взаимное расположение камеры и объектов.

Оптическая камера располагалась на расстоянии 40 метров от траектории движения штанг. На таком расстоянии ширина поля зрения камеры составила 15 метров. Длина штанг обычно находилась в диапазоне от 6 до 12 метров, поэтому на практике оказалось, что максимально в поле зрения камеры попадают 4 края штанг. Фотография, представленная на рис. 1, сделана с места постоянного размещения камеры, а рис. 4 показывает место размещения камеры на этапе испытаний.



Рис. 4. Размещение оптической камеры при испытаниях

Изображение объекта после оцифровки видеосигнала передаётся в ОЗУ встроенного компьютера в виде массива пиксельных амплитуд. Длина этого массива ( $N$ ) соответствует количеству пикселей линейного фотоприёмника, а значение каждого элемента массива пропорционально освещённости соответствующего пикселя. На рис. 5 показан пример типичного массива пиксельных амплитуд ( $A$ ). Краям изображений объектов, находящихся в поле зрения камеры, соответствуют резкие перегибы видеосигнала. В применённом алгоритме полагается, что пиксельная координата края соответствует положению точки на видеосигнале, в которой первая производная имеет локальный максимум, превышающий по абсолютной величине некоторое заданное пороговое значение. На диаграмме рис. 5 обозначены точки, соответствующие краям изображений объектов; в этих точках первая производная видеосигнала имеет локальные максимумы по абсолютной величине.

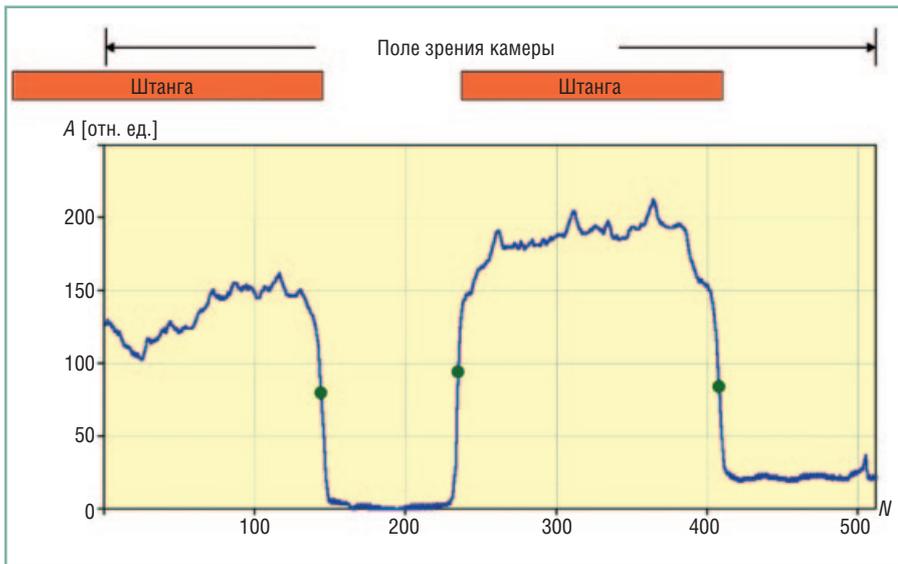


Рис. 5. Изображение объектов в поле зрения камеры в виде массива пиксельных амплитуд

Кроме пиксельной координаты, каждому обнаруженному краю присваивается знак, соответствующий знаку производной видеосигнала в этой точке.

На следующем шаге алгоритма расчёта определяются реальные координаты краёв объектов. В камере принята линейная зависимость реальной координаты края от её пиксельного значения. Далее приводится формула (1), используемая в камере для пересчёта пиксельных координат краёв в реальные.

$$KR_i = \text{GAMMA} \times (KP_i - \text{SHIFT}), \quad (1)$$

где  $KP_i$  – пиксельная координата  $i$ -го края объекта [пиксел],  $KR_i$  – реальная координата  $i$ -го края объекта [мм],  $\text{SHIFT}$  – пиксельная координата реальной точки, которая принимается за нулевую точку реальной системы координат [пиксел];  $\text{GAMMA}$  – оптическое увеличение камеры.  $\text{GAMMA}$  рассчитывается по формуле (2):

$$\text{GAMMA} = LR / LP, \quad (2)$$

где  $LR$  – реальный размер объекта [мм],  $LP$  – размер объекта в пиксельных координатах камеры [пиксел].

По завершении работы алгоритма в камере формируется информационная телеграмма, в которой содержатся:

$n$  – количество обнаруженных краёв;

$KR(n)$  – массив координат обнаруженных краёв;

$z(n)$  – массив знаков производной в точке края.

После включения питания камера R3M по последовательному порту (интерфейс RS-485) непрерывно выдаёт в линию связи информационные телеграммы с темпом 50 телеграмм в секунду. Длина телеграммы – 32 байта, скорость передачи – 115 200 бод.

При работе в цеховых условиях оптическая камера располагалась над стеллажом с горячими штангами на высоте 5 метров. В таких условиях, особенно в летний период, корпус камеры нагревался до температуры  $65^\circ\text{C}$ , однако никаких мер по охлаждению камеры не потребовалось. Элементная база, использованная при создании камеры, вполне обеспечила её работоспособность при таких температурных условиях.

### АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДАМИ РОЛЬГАНГА

Автоматизированная система управления приводами рольганга обеспечивает выполнение следующих основных функций:

- управления перемещением штанг на секциях рольгангов;
- остановки штанг на секциях рольгангов по заданным параметрам;

- формирования и отображения отчёта о прохождении металла через рольганг;
- отображения текущего состояния оборудования и заготовок на рольгангах.

При создании автоматизированной системы требовалось, чтобы система могла управлять позиционированием штанг различного профиля и с разными значениями длин. В табл. 2 приведены характеристики штанг, поступающих на рольганги для позиционирования.

Рольганговые секции состоят из приводных роликов. Каждый ролик вращается электрическим двигателем постоянного тока мощностью 16 кВт. Все двигатели рольганговой секции подключены к групповому тиристорному преобразователю, который, в свою очередь, управляется собственной системой управления. Тиристорный преобразователь – реверсивный с отдельным управлением.

Система управления реализована с помощью принципов подчинённого регулирования и состоит из трёх замкнутых контуров.

Внутренним контуром является контур напряжения. Он подчинён контуру регулирования тока и необходим для сглаживания нелинейности внешних характеристик тиристорного преобразователя. Объектом управления является тиристорный преобразователь. В качестве датчика напряжения используется измерительный делитель напряжения.

Контур тока является внешним по отношению к контуру регулирования напряжения. Контур регулирования тока предназначен для формирования переходных процессов в якорной цепи двигателя и стабилизации тока якоря в установившихся режимах. Объектом управления выступает контур регулирования напряжения.

Контур скорости является внешним по отношению к контуру регулирования тока. В данном случае применяется контур скорости с обратной связью по эдс. Объектом управления является замкнутый контур регулирования тока.

Для ограничения максимального ускорения разгона и торможения штанг на рольганге сигнал задания на регулятор скорости (РС) проходит через задатчик интенсивности (ЗИ) первого порядка. Крутизна характеристики ЗИ определяется, исходя из критического ускорения проскальзывания

Таблица 2

Характеристики штанг, поступающих на рольганги для позиционирования

Диапазон длин штанг, м	От 6 до 15
Диапазон масс штанг, т	От 0,2 до 3
Максимальная скорость штанг, м/с	5,0
Профиль штанг	Балка, квадрат, круг
Температура штанг, °C	От 500 до 800

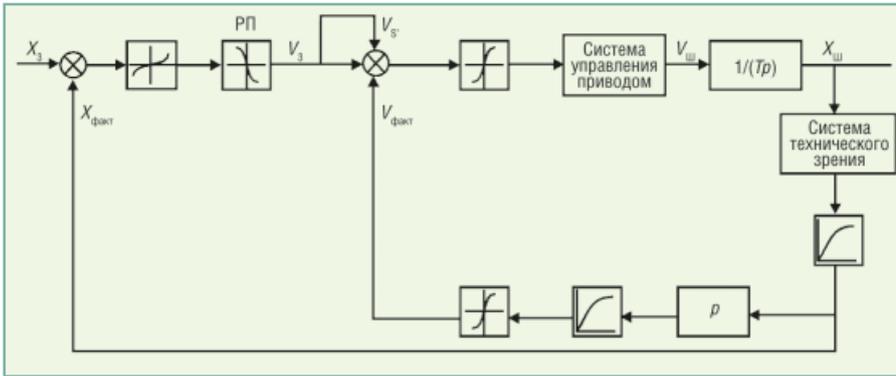


Рис. 6. Структурная схема перемещения и остановки штанг

между штангой и роликами рольганга. Входным сигналом для ЗИ является сигнал, которым управляет оператор. Автоматического контура регулирования положения в системе управления нет. Фактически до создания автоматизированной системы обратной связью по положению являлся оператор.

Основу разработанной автоматизированной системы остановки составляет модель поведения отдельной штанги на рольганге. На структурной схеме, приведённой на рис. 6, показана общая идеология перемещения и остановки штанг.

Система технического зрения (оптическая камера) регистрирует координату

$X_{ш}$  края штанги, значение координаты  $X_{ш}$  фильтруется и сравнивается с заданной координатой остановки края штанги  $X_3$ . Сигнал рассогласования, пройдя через ограничение, подаётся на вход регулятора положения РП. Регулятор положения выдаёт значение задания скорости  $V_3$ . Для компенсации момента инерции штанги в контур регулирования положения вводится коррекция по вычисленной скорости движения края штанги. Скорость движения края штанги вычисляется как производная по времени от координаты края штанги. Затем данный сигнал фильтруется и пропускается через ограничение. Вынос сигнала обратной

связи по скорости в контур регулирования положения выражается в виде  $V_3' = 2 \times V_3 - V_{факт}$ . Вычисленное значение  $V_3'$ , пройдя через ограничение, подаётся на вход системы управления приводом.

В результате предварительных экспериментов по управлению приводами секций рольганга было установлено, что на существующих приводах позиционирование штанги возможно только на малых скоростях. По этой причине система управления использует такой регулятор положения, который осуществляет в требуемой точке резкое уменьшение скорости штанги. После этого производится точная остановка штанги на малой скорости.

Структурная схема системы управления приводами рольганга приведена на рис. 7. При создании системы были применены контроллеры типа WinCon с операционной системой Windows CE. В качестве средства разработки использовалась среда ISaGRAF. На рис. 7 также показана схема участка рольганга, на котором производится торможение и остановка штанги. Фотобарьерные датчики ФБ1 и ФБ2 предназначены для запуска цикла позиционирования штанги.

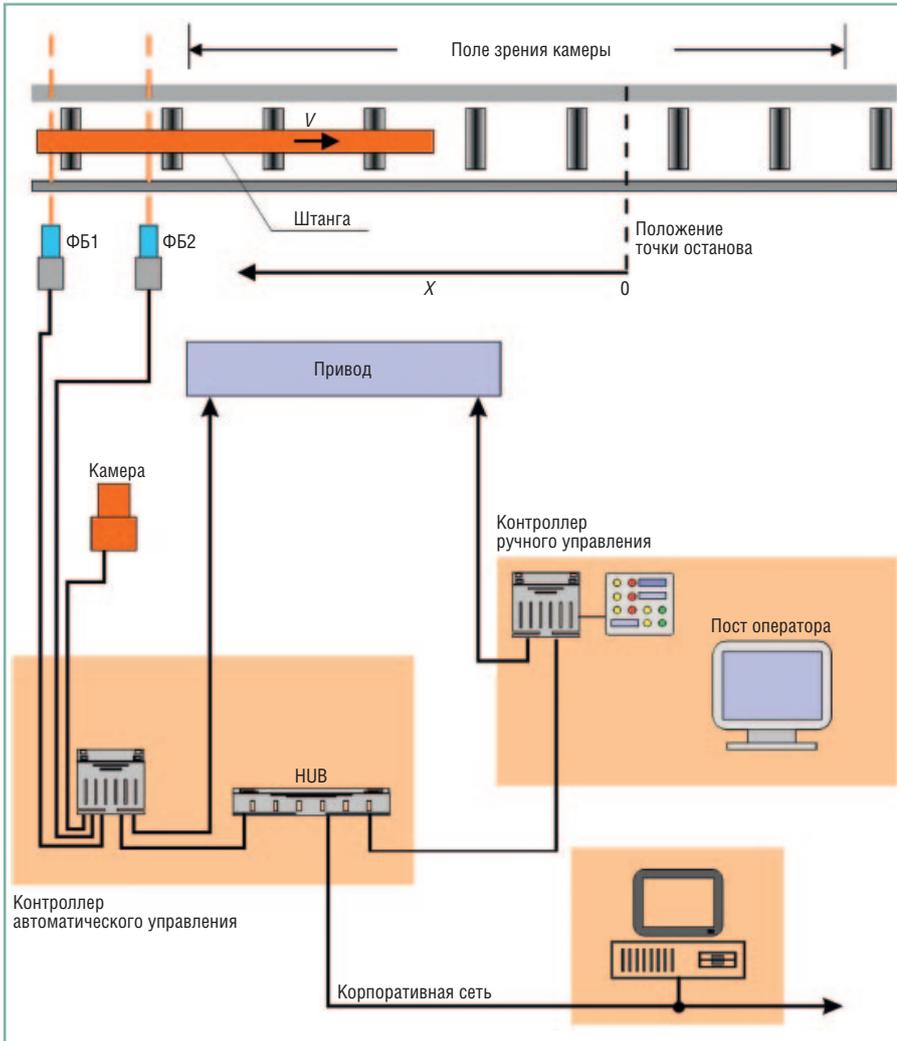


Рис. 7. Структурная схема системы управления приводами рольганга

На рис. 8 приведена характеристика работы регулятора положения. В её основе лежит составная функция зависимости скорости задания на привод от координаты края штанги;  $V_{оп}$  — опорная кривая скорости, жирной кривой обозначена фактическая кривая задания. Такая зависимость используется на практике во многих автоматизированных системах [3].

На начальном участке опорная кривая  $V_{оп} = V_H$ , где  $V_H$  — константа. Задача начального участка — провести штангу на постоянной скорости до следующего участка.

В момент прохождения передним краем штанги первого фотобарьерного датчика (ФБ1) начинается процесс позиционирования. На привод выдаётся максимальное задание  $V_3 = V_{max}$ , аппаратно ограниченное оператором до некоторого значения. В момент попадания края штанги в зону видимости камеры и после прохождения второго фотобарьерного датчика (ФБ2) вычисляется значение скорости движения штанги  $V_{ФБ}$ . Данное значение задаётся

на привод секции рольганга  $V_3 = V_{ФБ}$ . В момент, когда значение  $V_3 = V_{ФБ}$  превысит соответствующее данной координате значение скорости опорной кривой  $V_{оп1} = V_{оп1}(X)$ , на привод будет подаваться  $V_3 = V_{оп1}(X)$  — значение опорной кривой. Задача этого этапа — снизить скорость штанги до малых значений. По достижении краем заготовки соответствующей координаты ( $X_H$ ) наступает последний этап  $V_3 = V_{оп2}(X)$ . Задача этого этапа — осуществить точную остановку штанги на малой скорости. Опорные кривые  $V_{оп1}(X)$  и  $V_{оп2}(X)$  имеют форму кубических парабол.

Настройка регулятора положения определяется выбором координат точки переключения опорных кривых  $V_{оп1}$  и  $V_{оп2}$  — координат  $X_H$  и  $X_C$ .

Остальные используемые параметры являются функциями этих координат.

На начальном этапе создания системы основное внимание уделялось системе технического зрения. Благодаря использованию оптической камеры РЗМ удалось добиться требуемой точности определения координат. На рис. 9 показан график зависимости скорости штанги от времени при остановке с помощью механического упора. График рассчитывался на основе полученной с помощью камеры зависимости положения штанги от времени. На графике можно видеть колебательное движение штанги при ударе об упор.

После отладки совместной работы системы технического зрения и системы управления приводами необходимость в использовании механического упора отпала. На рис. 10 приведена типичная зависимость скорости штанги от времени при полностью автоматизированной остановке.

График скорости, показанный на рис. 11, рассчитывался на основе полученной зависимости положения штанги от времени, которая, в свою очередь, приведена на рис. 12.

На основе полученных данных можно построить зависимость скорости штанги от положения при автоматизированной остановке. Такая типичная зависимость и представлена на рис. 10.

Зависимость скорости, показанная на рис. 11, хорошо соотносится с теоретической зависимостью, приведённой на рис. 8. Реальная кривая снижения скорости штанги на рис. 11 имеет два участка: первый участок — это резкое снижение скорости, и второй участок — позиционирование штанги в точку остановки. Достаточно высокая степень соответствия между теоретически ожидаемыми и реально полученными параметрами движения штанги подтвердила правильность

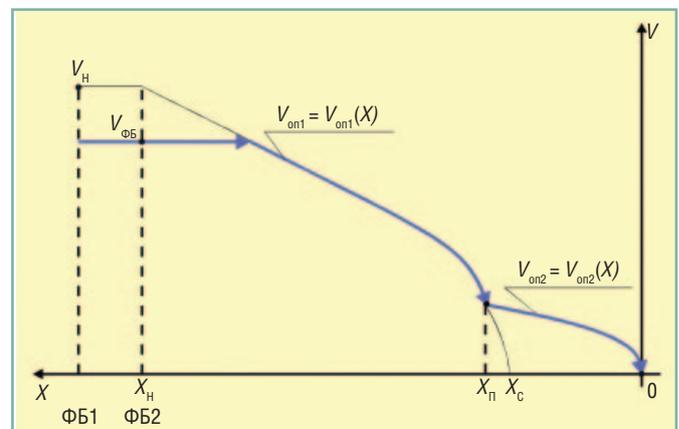


Рис. 8. Характеристика регулятора положения (торможение)

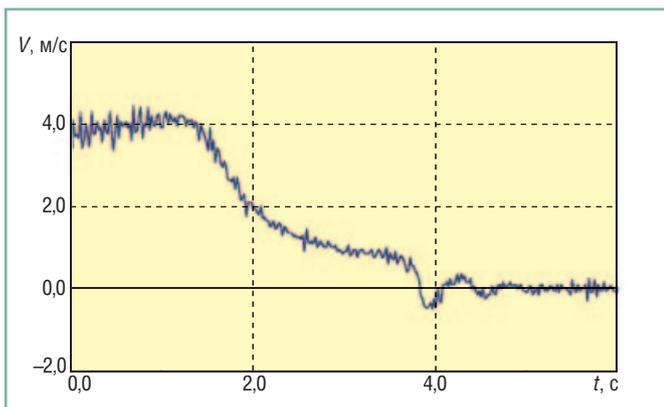


Рис. 9. Зависимость скорости штанги от времени при остановке в ручном режиме с использованием механического упора

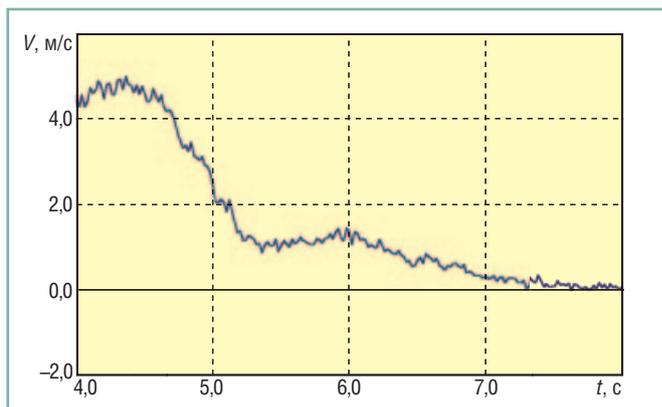


Рис. 10. Зависимость скорости штанги от времени при автоматизированной остановке

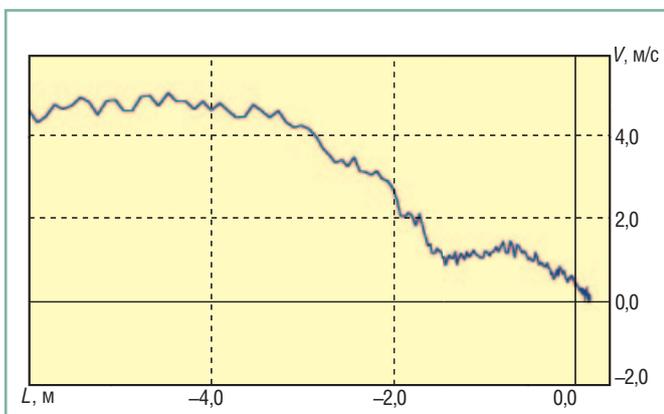


Рис. 11. Зависимость скорости штанги от её положения при автоматизированной остановке

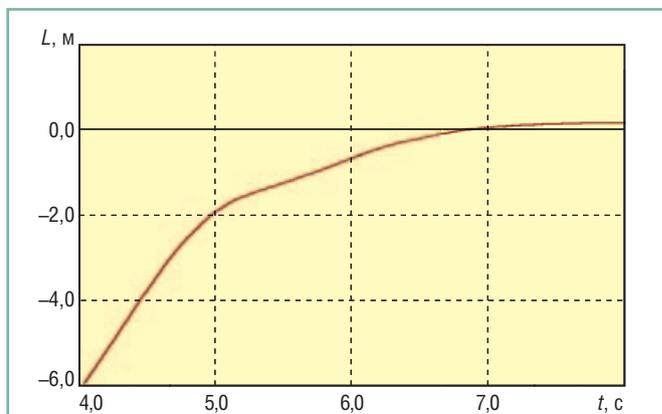


Рис. 12. Зависимость положения штанги от времени при автоматизированной остановке

выбранного способа управления приводами ролганга.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ

Новизна и трудности при реализации системы потребовали более года на решение задач, связанных с разработкой как системы технического зрения, так и системы управления приводами ролгангов. Однако автоматизированная система была успешно создана и к настоящему времени находится в активной промышленной эксплуатации уже более полутора лет. Следует отметить, что привыкание к автоматизированной системе произошло удивительно быстро, поскольку она сильно облегчила работу оператора (рис. 13).

Внедрение автоматизированной системы управления позволило отказаться от использования механического упора при остановке проката и тем самым уменьшить процент бракованных штанг. Также существенно снижена нагрузка на оператора при высоком темпе прокатки. Оператору теперь достаточно изредка контролировать тот участок ролганга, где производится автоматическая остановка штанг, и в случае необходимости переходить

на ручной режим управления. В целом на участке ролганга, где установлена автоматизированная система остановки, теперь приходится останавливать в ручном режиме управления не более 2% штанг, что для существующего производства явилось хорошим результатом.

Полученные в результате разработки системы технические решения имеют хорошие перспективы для применения в аналогичных задачах по автоматизированной остановке проката, например, при его сортировке или при порезке на заданные длины. ●

Полученные в результате разработки системы технические решения имеют хорошие перспективы для применения в аналогичных задачах по автоматизированной остановке проката, например, при его сортировке или при порезке на заданные длины. ●



Рис. 13. Пост оператора

## ЛИТЕРАТУРА

1. Азин Е., Будакова С., Кузьмин А., Фонов И. Информационная система резчика слябов в обжимном цехе // Современные технологии автоматизации. – 2001. – № 1. – С. 22–25.
2. Иерусалимов И., Карфидов Ю., Литвинов А. Контроль порезки слитков на блюминге // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 1. – С. 18–22.
3. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.

E-mail: igor\_tagil@mail.ru