

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 62-34/-38:621.771

Цапко  
Дмитрий Николаевич

Система управления прокатного стана

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 1-53 80 01 Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами по отраслям

---

Научный руководитель  
Лукьянец Степан Валерьянович  
кандидат технических наук, профессор

---

Минск 2015

## ВВЕДЕНИЕ

Прокатное производство представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных технологических переделов, определяющих в значительной степени технико-экономические показатели работы предприятия.

Анализ существующей системы управления станом 850 открытого акционерного общества «Белорусский металлургический завод (БМЗ) – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания (БМК)» выявил ряд существенных недостатков: сложный алгоритм передачи управления скоростью рольгангов между контроллерами участков реверсивной клетки и кантующего холодильника; отсутствие согласованности скоростей рольгангов, что приводит к повышенному износу роликов; управление скоростью позиционирования заготовки на подвижном упоре построено по разомкнутому циклу; несовершенство метода измерения длины раската; большое количество операций при резке заготовок выполняется в ручном режиме. Кроме того многие средства управления станом построены на базе ПЛК SIMATIC S5 фирмы SIEMENS AG, которые морально и технически устарели.

В связи с отмеченным целью диссертационного исследования является совершенствование системы автоматизированной резки прокатанной заготовки с применением современных технических средств и информационных технологий. Для ее достижения необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ прокатного стана как объекта управления и наметить пути устранения выявленных недостатков в его работе.
2. Разработать структурно-компоновочную схему управления объектами автоматизации и мероприятия по перераспределению функций управления технологическим процессом между контроллерами участков реверсивной клетки и кантующего холодильника, обосновать приемлемый метод измерения длины и скорости движения раската.
3. Разработать меры по согласованию скоростей рольгангов клетки и холодильника, а так же осуществить синтез и моделирование системы управления этими рольгангами.
4. Провести имитационное моделирование технологического процесса участка кантующего холодильника, оценить предлагаемые в работе решения.

В связи с недостаточными сведениями о теоретических аспектах проектирования и функционирования рассматриваемых объектов работа имеет наряду с научной направленностью также практико ориентированный характер на базе анализа характеристик существующего оборудования и информационного обеспечения.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена на 80 страницах, содержит 20 рисунков, 7 таблиц.

Она состоит из введения, четырёх глав и заключения, в которых рассмотрены сформулированные задачи. При решении их использованы современные подходы к разработке элементной базы, анализу и синтезу систем управления, моделированию процессов в средах Simulink и GPSS World.

Первая глава посвящена анализу прокатного стана как объекта управления. В результате выполненного анализа выявлены основные недостатки системы управления и намечены направления дальнейшего исследования для их устранения.

Во второй главе на основании разработанной структурной схемы предложено произвести перераспределение функция управления технологическим процессом между контроллерами участка реверсивной клетки и кантующего холодильника с целью исключения из технологической цепочки сложного алгоритма передачи управления между контроллерами и унификации элементной базы. Разработана схема управления рольгангами после модернизации, рекомендованы необходимые средства управления и сигнализации и произведен выбор элементов станции распределенной периферии.

Также проанализированы различные методы измерения длины и скорости раската, обоснована целесообразность использования лазерного доплеровского измерителя, произведен его выбор.

В третьей главе выполнены расчеты статических и динамических параметров, выбор мощности электродвигателей для согласования скоростей рольгангов, обоснован принцип построения системы управления, рассмотрена динамика силовой части электроприводов рольгангов, разработан и программно реализован на языке STEP 7 и в среде Simulink алгоритм позиционного регулятора системы управления электроприводами рольгангов.

Четвертая глава содержит результаты имитационного моделирования в среде GPSS World работы участка кантующего холодильника для основных типов проката, подтверждены ранее предложенные в работе решения, направленные на повышение эффективности функционирования прокатного стана.

В заключении сформулировали основные результаты работы.

Основные положения диссертации отражены в работах автора [1-А, 2-А, 3-А].

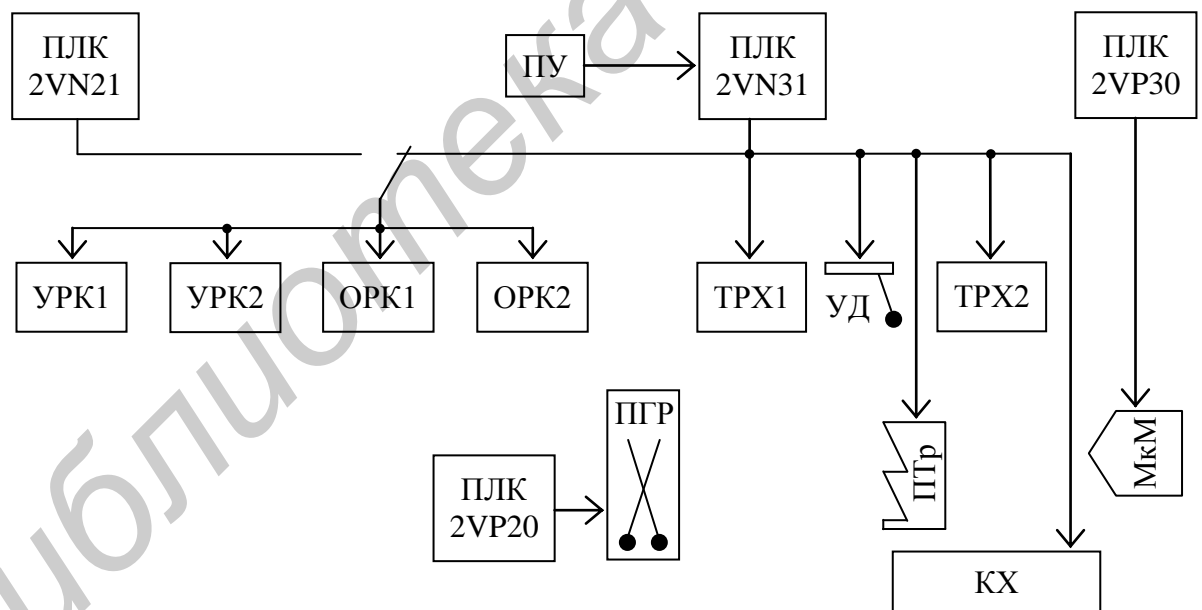
# СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

## 1 Анализ прокатного стана как объекта управления

Прокатный стан 850 включает в свой состав нагревательную печь, реверсивную двухвалковую клеть со вспомогательным оборудованием, кантующий холодильник, участок дефектоскопии и зачистки. Управление технологическим процессом осуществляется при помощи локальных систем управления, построенных с применением программируемых логических контроллеров SIEMENS AG серии SIMATIC S5 и SIMATIC S7 [1].

В диссертации рассматривается один из основных участков прокатного стана – участок кантующего холодильника, который предназначен для резки и охлаждения готового сортового проката до необходимой температуры (200-300°С).

Структурно-компоновочная схема участка со средствами управления объектами автоматизации представлена на рисунке 1.



ПЛК – программируемый логический контроллер; ПУ – пост управления; УПК – удлинительные рольганги клетки; ОПК – отводящие рольганги клетки; ПГР – абразивно-отрезной станок горячей резки; ТРХ – транспортные рольганги холодильника; УД – упор длины; ПТр - поперечный транспортер; МкМ – маркировочная машина; КХ – кантующий холодильник

Рисунок 1 – Структурно-компоновочная схема участка кантующего холодильника

Среди задач, решаемых системой управления участком кантующего холодильника, выделены три основные: управление временем, скоростью и точностью позиционирования заготовки на подвижном упоре; расчет позиции подвижного упора; управление временем и скоростью позиционирования штанги на подвижном упоре.

Рассмотрен используемый метод измерения длины и скорости прокатанной заготовки, выявлено, что погрешность измерения данного метода зависит от многих факторов и колеблется в пределах 1-2%.

Для анализа работы системы автоматизированного раскроя и резки прокатанной заготовки используются два графика, полученные при прокатке круглой заготовки диаметром 0,14 м., которые позволяют оценить время, необходимое для прокатки одного бляма (рисунок 2) и время, необходимое для резки раскатанной заготовки на мерные длины (рисунок 3).

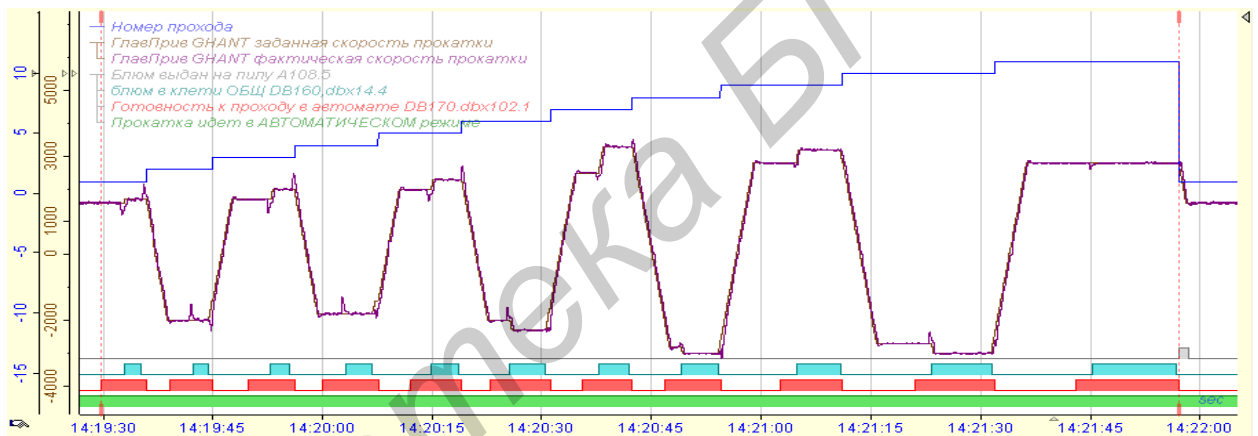


Рисунок 2 – Циклограмма прокатки бляма

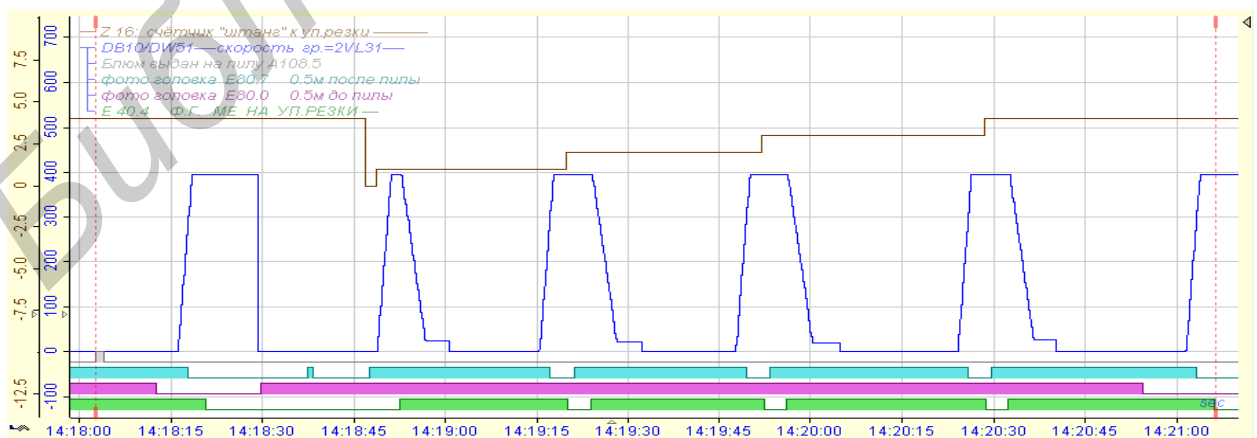


Рисунок 3 – Циклограмма резки раскатанной заготовки

Из рисунка 2 видно, что прокатка осуществляется в автоматическом режиме; блюм раскатывается за 11 проходов; заданная скорость прокатки составляет  $V_{\text{прок.зад}} = 2,8 \text{ м/с}$ ; время прокатки блюма от момента позиционирования перед рабочей клетью и готовности всех механизмов для прохода в автоматическом режиме до момента формирования сигнала «Блюм выдан на пилу» составляет  $t_{\text{прок}} = 2 \text{ мин. } 27 \text{ с}$ .

Из рисунка 3 следует, что раскатанная заготовка разрезается на 4 штанги; подвижной упор выставлен в позиции  $L_{\text{гор}} = 8,372 \text{ м}$ ; время раскроя заготовки от момента формирования сигнала «Блюм выдан на пилу» до момента уборки последней штанги с рольганга составляет  $t_{\text{раскр.}} = 3 \text{ мин. } 04 \text{ с}$ .

Время позиционирования одной штанги на упоре составляет  $t_{\text{поз.штг}} \approx 16,8 \text{ с}$ , из которого: время разгона заготовки до максимальной скорости  $t_{\text{разг}} = 2,3 \text{ с}$ ; время движения на максимальной скорости  $t_{V_{\text{max}}} = 6,5 \text{ с}$ ; время торможения  $t_{\text{торм}} = 3,9 \text{ с}$ ; время движения на минимальной скорости  $t_{V_{\text{min}}} = 4,1 \text{ с}$ .

Из анализа полученных графиков, сделан вывод о невозможности поднятия скорости прокатки до максимального значения, так как время, необходимое на резку раскатанной заготовки, значительно больше времени, затрачиваемого на ее прокатку.

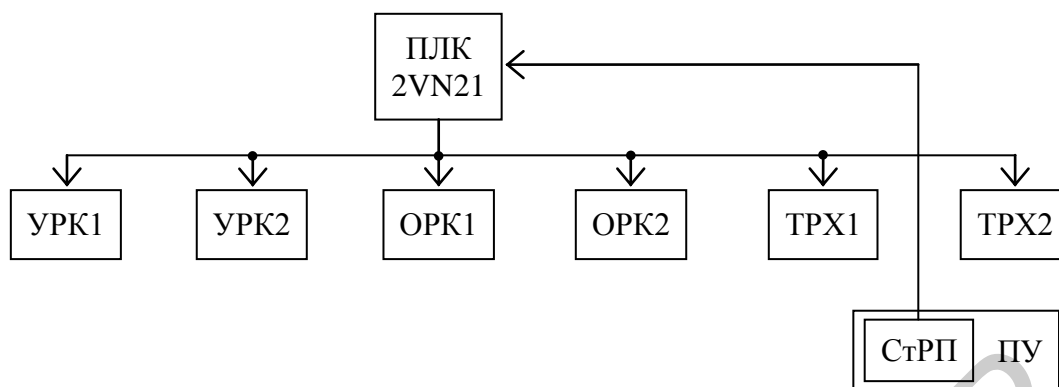
## **2 Перераспределение функций управления технологическим процессом и измерение скорости и длины раската**

Управление задним раскатным и отводящим рольгангами клетки осуществляется поочередно двумя разными ПЛК - SIMATIC S7 (2VN21) со стороны участка реверсивной клетки и SIMATIC S5 (2VN31) со стороны участка холодильника.

На рисунке 4 графически изображен принцип передачи управления отводящими рольгангами клетки и транспортными рольгангами холодильника контроллеру участка реверсивной клетки (2VN21).

На основании разработанной структурной схемы управления рольгангами рекомендованы необходимые средства управления и сигнализации, а так же произведен выбор элементов станции распределенной периферии [2].

Выполненное перераспределение позволяет решить ранее намеченные задачи.

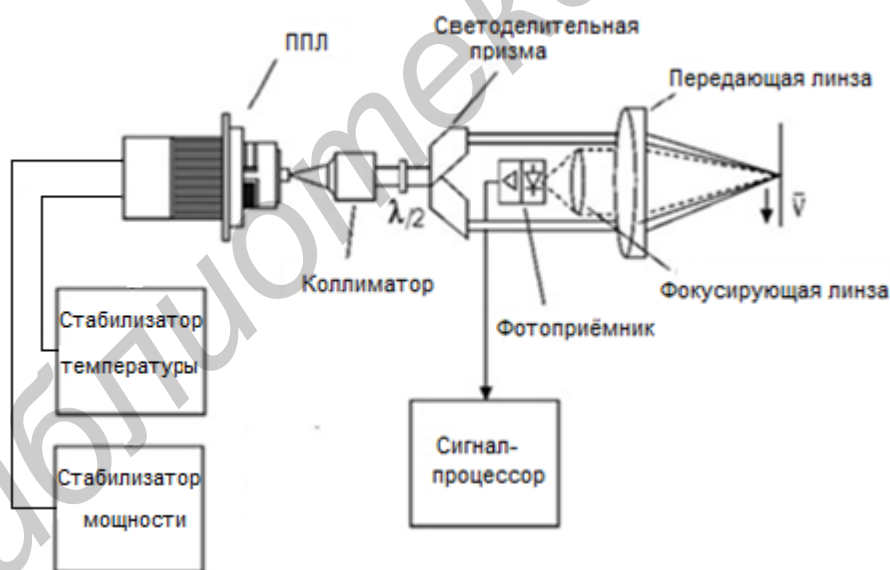


СтРП – станция распределенной периферии ET 200M; ПУ – пульт управления

**Рисунок 4 - Структурная схема управления рольгангами после модернизации**

В результате сравнения характеристик различных методов которые могут быть применены для измерения длины и скорости проката сделан выбор датчиков на основе эффекта Доплера.

Оптическая схема лазерного доплеровского измерителя (ЛДИС) представлена на рисунке 5 [3].



**Рисунок 5 – Оптическая схема лазерного доплеровского измерителя**

Скорость движущегося объекта определяется из выражения  $v = K_{гр} \cdot f$ , где  $K_{гр}$  - градуированный коэффициент прибора, а  $f$  - выходная частота лазерного датчика.

Длина объекта  $L = \int_0^t v(t) dt$ , где  $t$  - время измерения.

Наиболее подходящим для измерения длины и скорости раската является измеритель LS9000-325 фирмы Beta LaserMike предназначенный для бесконтактного измерения скорости движущихся материалов и их длины в металлургической промышленности. Он также позволяет проводить измерение нулевой скорости и автоматически определять направление движения материалов [4].

Такой же измеритель необходимо использовать в качестве датчика обратной связи по координате и скорости при управлении скоростью позиционирования прокатанной заготовки в процессе резки.

### **3 Согласование скоростей рольгангов клетки и холодильника, синтез и моделирование системы управления рольгангами**

Скорость роликов рабочих и отводящих рольгангов должна быть на 5-10% выше скорости прокатки. Для рольгангов, подводящих металл к печам или к стану, скорость должна составлять 1,5-2,2 м/с, для транспортных рольгангов она выбирается в соответствии с заданной производительностью в пределах 1,5-12 м/с.

За номинальную скорость рассчитываемого рольганга принимается максимальная скорость прокатки  $V_{\max \text{ прок.}} = 5,4 \text{ м/с}$ .

С учетом максимальной скорости прокатки рассчитывается требуемая скорость вращения двигателя  $\omega_{\text{треб}} = 150 \text{ рад/с}$ , и его необходимая мощность  $P_{\text{треб}} = 3850 \text{ Вт}$ .

В качестве электродвигателя выбран двигатель серии 4A100L4 УЗ [5] с номинальным моментом

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{4000}{147,7} = 27,1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Рассчитав динамические моменты и ускорения при движении раската по роликам без проскальзывания, определяется время разгона и торможения

$$t_p = \frac{\sum J \cdot \omega_{\text{ном}}}{M_{\text{пуск}} - M_{\text{ст.тр}}}, [\text{с}]; \quad t_T = \frac{\sum J \cdot \omega_{\text{ном}}}{M_{\text{торм}} + M_{\text{ст.тр}}}, [\text{с}].$$



$\sum J$  - суммарный момент инерции системы (с учетом момента инерции транспортируемого металла), приведенный к валу двигателя,  $M_{тр}$  - момент транспортирования металла по ролику,  $M_{ст.тр}$  - полный статический момент транспортирования металла по рольгангу при отсутствии буксирования и добавочных сопротивлений,

Проведенные расчеты позволили определить необходимое ускорение при разгоне и торможении, а так же показали, что предлагаемые решения позволяют уменьшить время позиционирования заготовки до  $t_{пози} = t_p + t_T \approx 4,2$  с.

Силовая часть электропривода каждого рольганга состоит из частотного преобразователя и группы электродвигателей. Структурная схема электропривода представлена на рисунке 6 [6].

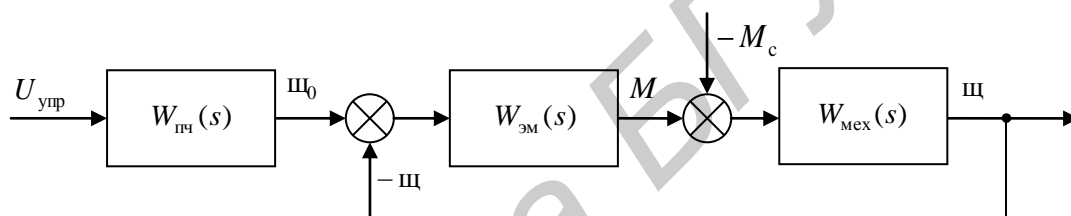


Рисунок 6 - Структурная схема электропривода

Динамические свойства преобразователя частоты с блоками измерения и преобразования координат могут быть учтены аperiodическим звеном с передаточной функцией

$$W_{пч}(s) = \frac{k_{пч}}{T_{пч}s + 1} \cdot \frac{2p}{p_n},$$

Модель электромагнитной составляющей асинхронного двигателя имеет вид:

$$W_{эм}(s) = \frac{\beta_e}{T_{эм}s + 1} \cdot \frac{3}{2} p_n k_2,$$

Модель механической части асинхронного двигателя представляется интегрирующим звеном с передаточной функцией

$$W_{мех}(s) = \frac{1}{Js},$$

Для управления скоростью позиционирования заготовки разработан алгоритм позиционного регулятора, произведен расчет статического момента транспортирования металла по рольгангу при отсутствии пробуксования и добавочных сопротивлений, для заготовок с диаметром 0,09; 0,12; 0,15 метров.

Учтены исходные данные, вытекающие из требований к технологическим характеристикам электроприводов и предварительных расчетов. Так, максимальная скорость движения штанги  $V_{max} = 5,4 \text{ м/с}$ , ускорение  $a_y = 2,2 \text{ м/с}^2$ , замедление  $a_3 = 2 \text{ м/с}^2$ , позиционный допуск  $d = 0,01 \text{ м}$ , максимальное напряжение управления  $U_{max} = \pm 10 \text{ В}$ , наружный диаметр ролика  $d_p = 0,36 \text{ м}$ .

Рассчитаны необходимые коэффициенты:  $k_{зад} = 1,8 \frac{\text{Вс}}{\text{М}}$ ,  $k_V = k_L = 0,18 \text{ м}$ .

Схема моделирования системы управления электроприводами рольгангов в среде Simulink при позиционировании штанги диаметром  $D = 0,09 \text{ м}$  и длиной  $L = 12,291 \text{ м}$  представлена на рисунке 7.

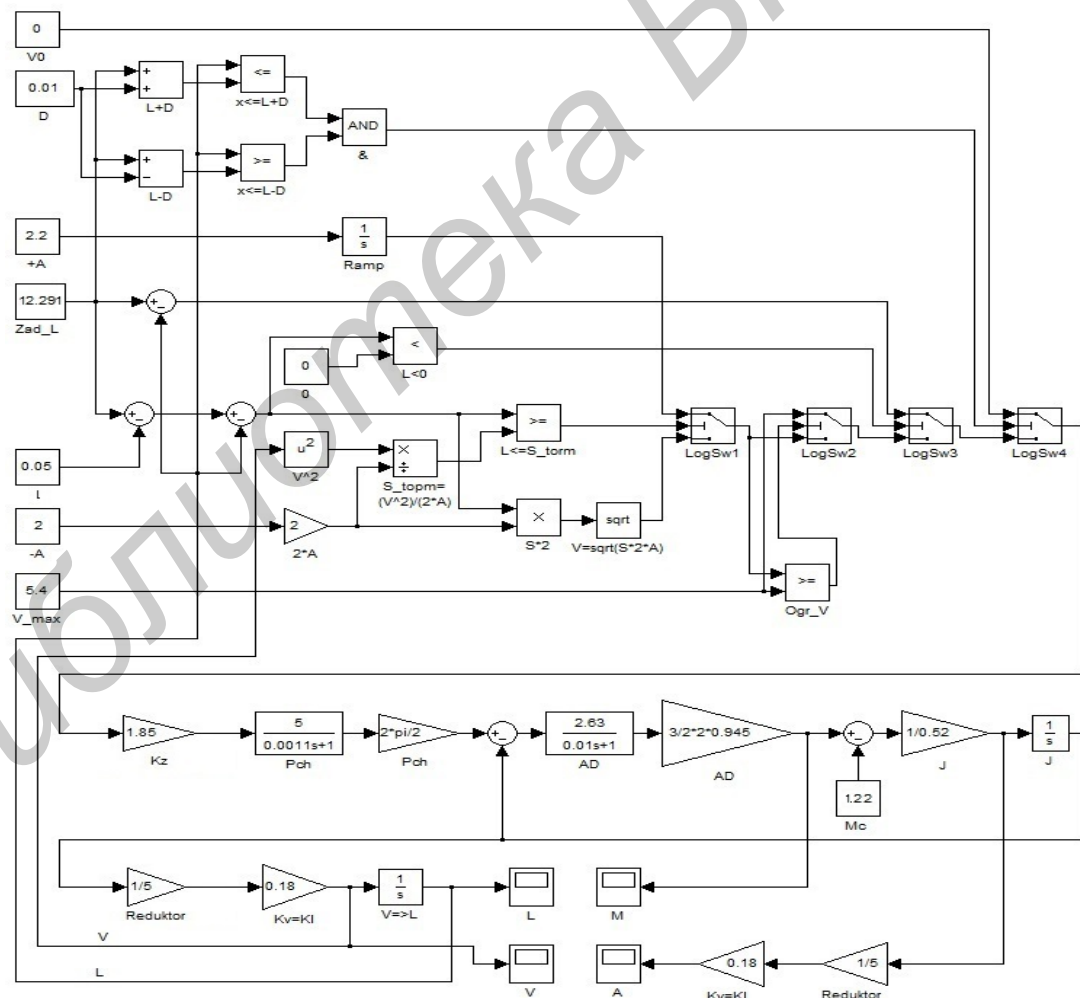


Рисунок 7 - Схема моделирования системы управления электроприводами рольгангов

В результате моделирования системы управления получены следующие динамические характеристики, представленные в виде графиков на рисунке 8.

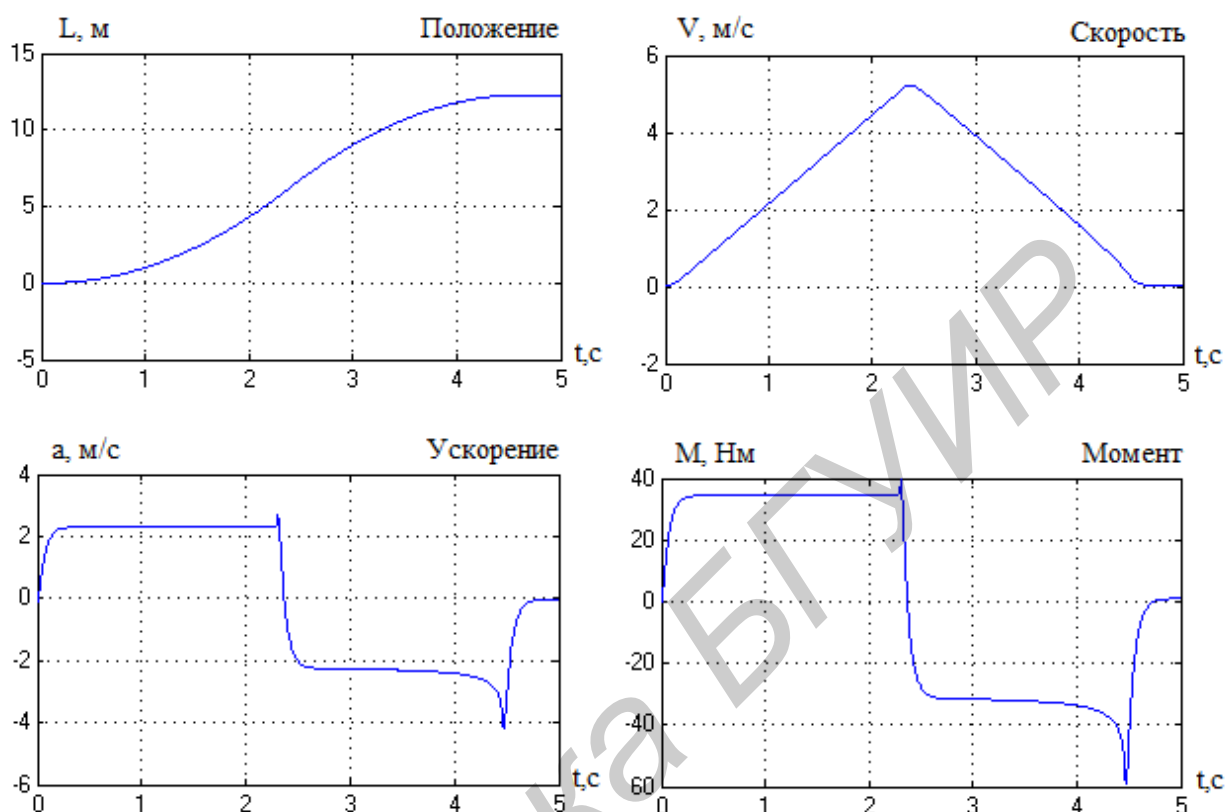


Рисунок 8 - Динамические характеристики системы

Выполненные компьютерные эксперименты показали, что штанга диаметром  $D=0,09$  м и длиной  $L=12,291$  м достигла заданной позиции через  $t=4,7$  с, штанга диаметром  $D=0,12$  м и длиной  $L=12,270$  м достигла заданной позиции через  $t=4,7$  с, а штанга диаметром  $D=0,15$  м и длиной  $L=12,075$  м - через  $t=4,6$  с.

#### 4 Имитационное моделирование технологического процесса участка кантующего холодильника

Для определения эффективности предлагаемых решений по необходимо произвести имитационное моделирование технологического процесса базового (исходного) и проектируемого вариантов и сравнить полученные данные.

В диссертации при моделировании работы участка кантующего холодильника используется программный пакет GPSS World [7].

Для построения временной диаграммы и разработки алгоритма моделирования технологического процесса были сделаны замеры длительности операций реального производства, установлены основные особенности процесса. С учетом этого построена временная диаграмма и разработан алгоритм имитационного моделирования, представленные на рисунках 9 и 10.

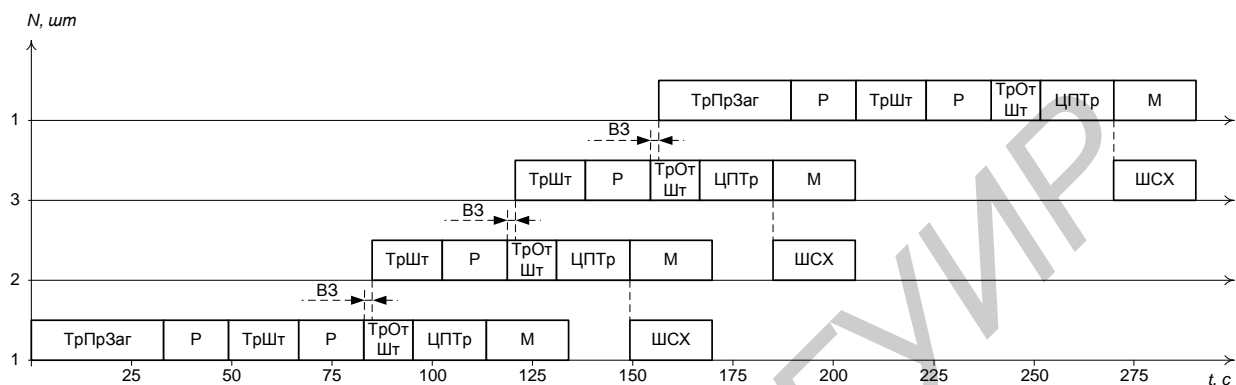


Рисунок 9 – Временная диаграмма технологического процесса

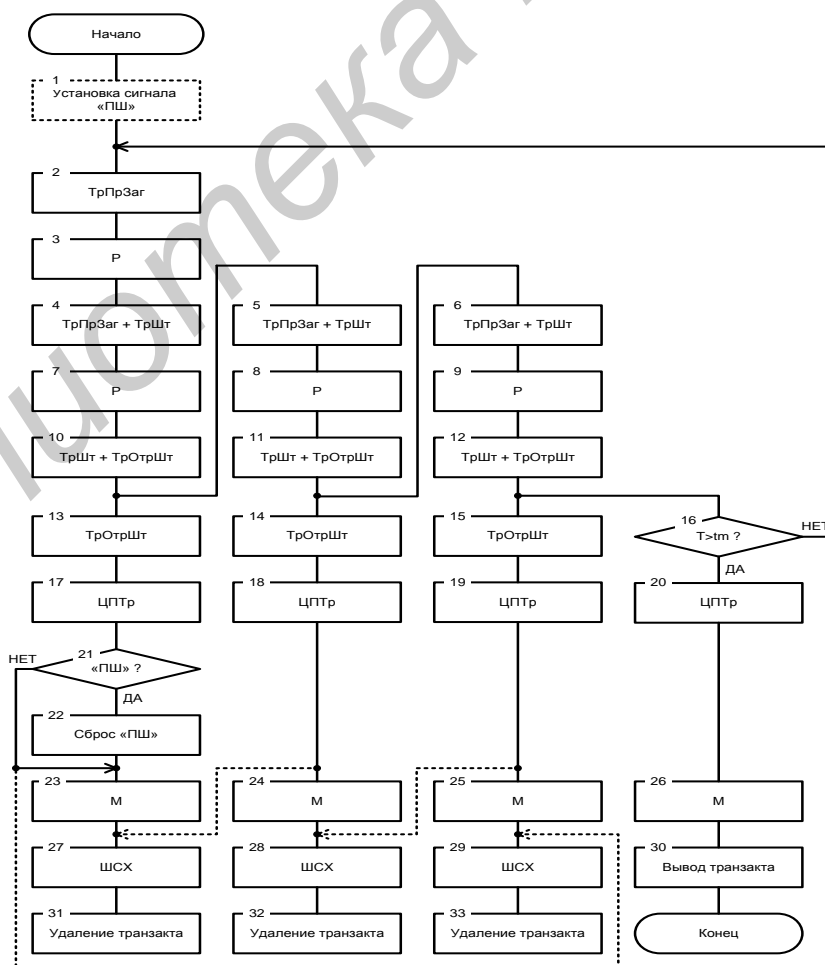


Рисунок 10 - Схема алгоритма имитационного моделирования технологического процесса участка кантующего холодильника

С использованием средства GPSS World разработана программа.

В результате компьютерного эксперимента подтверждено, что предложенные ранее меры позволяют существенно (на 55%) повысить пропускную способность участка кантующего холодильника.

Библиотека БГУИР

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации проведено исследование прокатного стана 850 на ОАО «Белорусский металлургический завод (БМЗ) – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания (БМК)», выполнен его анализ и выявлен ряд существенных недостатков:

- несовершенство методики измерения скорости прокатки, а также несовершенство метода измерения длины прокатанной заготовки, и, как следствие, невозможность использования режима оптимального раскрытия заготовки и повышенный расходный коэффициент выхода годного металла;
- скорость отводящего рольганга клетки значительно меньше скорости прокатки, и, как следствие, повышенный износ поверхности роликов при выдаче прокатанной заготовки из клетки;
- сложный алгоритм передачи управления между контроллерами в процессе выдачи прокатанной заготовки на участок холодильника и отсутствие алгоритма согласования скоростей рольгангов при передаче управления;
- система управления скоростью позиционирования заготовки на подвижном упоре построена по разомкнутому циклу;
- низкая производительность участка, так как время резки заготовки больше времени прокатки.

В соответствии с выявленными недостатками сформулированы цели и основные задачи для ее достижения.

Предусмотрено перераспределение функций управления рольгангами клетки и кантующего холодильника для исключения из технологической цепочки сложного алгоритма передачи управления между контроллерами, а также унификации элементной базы управляющей системы. Разработана схема управления рольгангами после модернизации и рекомендованы необходимые средства управления и сигнализации, а также произведен выбор элементов станции распределенной периферии.

Рассмотрены основные методы измерения длины и скорости, которые могут быть применены в процессе производства. Показано, что контактные методы непригодны для рассматриваемого процесса из-за возможного проскальзывания мерных роликов и ошибок измерения.

Среди бесконтактных методов в результате сравнения их характеристик обоснована целесообразность применения в процессе измерения длины и скорости раската, а также в технологическом процессе участка кантующего холодильника датчиков на основе лазерного доплеровского измерителя, обладающего высокой точностью и надежностью, был произведен выбор

измерителя LS9000-325 фирмы Beta LaserMike как наиболее подходящего для рассматриваемого технологического процесса.

Разработаны меры по согласованию скоростей отводящих рольгангов клетки и транспортных рольгангов холодильника. Осуществлен выбор двигателей электроприводов рольгангов. С учетом реальных характеристик прокатного стана таким двигателем может быть двигатель 4A100L4 У3 с номинальной частотой вращения 1430 оборотов в минуту и номинальным моментом  $27,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$  при коэффициенте полезного действия 84 %. Для определения времени разгона и торможения электропривода при транспортировке заготовки приведены выражения динамических моментов и ускорений. Даны рекомендации по выбору максимальной скорости движения заготовки. Для рассматриваемого электропривода  $V_{\text{max}} = 5,4 \text{ м/с}$ , а  $t_{\text{пози}} = 4,2 \text{ с}$ .

С использованием этих данных осуществлены синтез и моделирование системы управления электроприводами рольгангов.

Предлагаемая структурная схема электроприводов рольгангов прокатного стана включает апериодическое звено преобразователя частоты и безынерционное звено блоков измерения и преобразования координат, последовательно соединенные с охваченной местной обратной связью моделью двигателя в виде апериодического звена и интегратора. Приведенные аналитические выражения позволяют рассчитать параметры всех элементов схемы.

С учетом технологических требований к производственному процессу выполнен синтез алгоритма позиционного регулятора системы управления электроприводами рольгангов и разработана схема ее моделирования в среде Simulink, проведен компьютерный эксперимент. Результаты расчетов на ЭВМ подтвердили правильность предлагаемой модели приводов рольгангов, приемлемое совпадение расчетных и экспериментальных динамических характеристик системы управления и тем самым ее перспективность.

Рассмотрены вопросы применения имитационного моделирования техпроцесса участка кантующего холодильника для подтверждения целесообразности предложенных решений.

Для построения временной диаграммы и разработки алгоритма моделирования технологического процесса сделаны замеры длительности операций реального производства, установлены основные особенности процесса. С учетом этих факторов построена временная диаграмма и разработан алгоритм имитационного моделирования рассматриваемого процесса в среде GPSS World. Так же разработана соответствующая программа,

позволяющая выполнить компьютерный эксперимент при вариации всех необходимых параметров моделируемого процесса.

При проведении компьютерного эксперимента обоснованы значения времени моделирования для трех типов заготовок. Показано, что коэффициент использования рабочего времени в реальном производстве колеблется в пределах 0,75 ... 0,87. В результате компьютерного эксперимента подтверждено, что предложенные ранее меры позволяют существенно (на 55%) повысить пропускную способность участка кантующего холодильника.

Результаты исследования доложены на двух международных конференциях и опубликованы в печати [1-А, 2-А, 3-А].

Библиотека БГУИР



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

[1] Сборник научных трудов специалистов Белорусского металлургического завода, 2001-2008 гг. В 3т. Т. 2. Прокатное производство / сост. В.И. Грицаенко; под ред. Д.М. Кукуя, Н.В. Андриянова, В.А. Маточкина. – Минск: Тэхналогія, 2009. – 416 с.: ил.

[2] Бергер Г. Автоматизация посредством STEP 7 с использованием STL и SCL и программируемых контроллеров SIMATIC S7-300/400. – 2001г.

[3] Герасимов, В.Г. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий / В.Г. Герасимов, В.В. Ключев, В.Е. Шатерников. –М.: Энергопромиздат, 1983. – 272 с.

[4] [Электронный ресурс] Диагностические и измерительные приборы. – Электронные данные. – Режим доступа: [http://diagnost.ru/part\\_35.html](http://diagnost.ru/part_35.html)

[5] Справочник по электрическим машинам: В 2 т./ Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Т.1.- М.: Энергоатомиздат. 1988. – 456.: ил.

[6] Фираго, Б.И. Теория электропривода: Учеб. пособие / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлянчик. – Мн.: ЗАО “Техперспектива”, 2004. - 527 с.

[7] Юдинский, С. А. Управление дискретными процессами. Модели, анализ, синтез / С. А. Юдинский, В. З. Магергут. – М.: Машиностроение, 1987. 176., ил.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[1-А] Цапко, Д.Н. Модернизация системы управления прокатного стана / Д.Н. Цапко, В.И. Куполов, С.В. Лукьянец // Информационные технологии и системы 2013 (ИТС 2013): материалы международной научной конференции, БГУИР, Минск, Беларусь, 23 октября 2013 – С. 104-105.

[2-А] Цапко, Д.Н. Имитационное моделирование работы прокатного стана / Д.Н. Цапко, С.В. Лукьянец // Информационные технологии и системы 2014 (ИТС 2013): материалы международной научной конференции, БГУИР, Минск, Беларусь, 29 октября 2014 – С. 90-91.

[3-А] Цапко, Д.Н. Синтез и моделирование системы управления электроприводами рольгангов прокатного стана / Д.Н. Цапко, С.В. Лукьянец // Доклады БГУИР. – 2014. – №7(85). – С.55–60.