

СТАРООСКОЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТ ИМ. А. А. УГАРОВА
(филиал) федерального государственного автономное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(СТИ НИТУ «МИСиС»)

На правах рукописи

ПЕТРОВ ВЛАДИСЛАВ АНАТОЛЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРОКАТНЫХ КЛЕТЕЙ НА ОСНОВЕ
ОПЕРАТИВНОЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ НАСТРОЙКИ**

Специальность 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (промышленность)»

ДИССЕРТАЦИЯ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ

доктор технических наук, профессор,
почетный работник высшего профессионального образования РФ
Еременко Юрий Иванович

Старый Оскол – 2019

Оглавление

Введение	5
Глава 1. Анализ проблемы повышения эффективности работы двухвалковых реверсивных прокатных клетей	11
1.1 Особенности организации технологии прокатного производства.....	12
1.2. Прокатные клетки.....	13
1.2.1. Черновые прокатные клетки	14
1.3. Электроприводы прокатных клетей.....	15
1.3.1. Требования к электроприводу	16
1.3.2 Принцип работы электрооборудования главного привода двухвалковой реверсивной клетки	17
1.3.3. Система регулирования скорости	18
1.3.4. Метод последовательной коррекции (подчиненного регулирования)	21
1.4 Особенности существующей системы управления главным приводом ДУО-реверсивной клетки	23
1.5. Анализ методов построения адаптивных систем управления электроприводом двухвалковой реверсивной клетки.....	25
1.5.1 Адаптивные регуляторы	25
1.5.2 Оптимальное управление	28
1.5.3 Интеллектуальные методы	31
1.5.4 Анализ методов настройки регуляторов в САУ электроприводом	35
1.5.5. Интеллектуальные методы настройки ПИД-регуляторов	39
Выводы по главе 1.....	46
Глава 2. Построение нейросетевого настройщика для системы управления главным электроприводом двухвалковой реверсивной прокатной клетки в режиме отработки графика заданий	47
2.1 Структура настройщика.....	47
2.1.1. Определение структуры нейронной сети	48
2.1.2 Исследование зависимости качества переходных процессов от коэффициентов настраиваемых линейных регуляторов	52

2.2. Экспериментальная часть.....	56
2.2.1 Построение модели главного электропривода прокатной клетки	56
2.2.2 Эксперименты с настройщиком в контуре тока	59
2.2.3 Эксперименты с настройщиком в контуре скорости	64
2.2.4. Разработка алгоритма совместной работы настройщиков	71
2.2.4 Сравнение эффективности нейросетевого настройщика и системы управления, основанной на эталонной модели	76
Выводы по главе 2.....	78
Глава 3. Построение нейросетевого настройщика линейных регуляторов электропривода постоянного тока в условиях компенсации возмущающих воздействий.....	79
3.1. Постановка задачи	79
3.2 Нейросетевой настройщик для режима компенсации возмущающих воздействий.....	82
3.2.1 База правил для компенсации возмущений	82
3.3 Экспериментальная проверка работоспособности настройщика	83
3.3.1 Эксперимент на математической модели прокатной клетки без упругих связей	84
3.3.2. Эксперимент на математической модели прокатной клетки с учетом влияния упругих связей	85
Выводы по главе 3.....	91
Глава 4. Аппаратно-экспериментальная проверка эффективности нейросетевого настройщика для управления электроприводом постоянного тока	92
4.1 Описание экспериментального стенда	92
4.2 Компенсация дрейфа параметров электропривода в условиях изменения задания.....	96
4.2.1 Эксперименты с использованием настройщика параметров ПИ-регулятора тока	96

4.2.2 Эксперименты с использованием настройщика параметров П-регулятора скорости	99
4.2.3 Сравнение с адаптивным регулятором Siemens	102
4.3 Компенсация возмущающих воздействий	105
4.4 Адаптивная система управления электроприводом на базе Sinamics DCM с использованием нейросетевого настройщика.....	109
Выводы по главе 4.....	112
Заключение.....	113
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	115
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	137
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	143

Введение

Актуальность темы исследования. Metallургия является одной из лидирующих отраслей промышленности России с точки зрения объемов выпускаемой продукции как для внутреннего рынка, так и для поставок за рубеж. Важным направлением развития данной отрасли для поддержания конкурентоспособности производимого металла в настоящее время является снижение затрат на его изготовление, то есть повышение энергоэффективности работы технологических агрегатов.

Основным потребителем энергоресурсов в металлургической отрасли, среди прочих, является прокатное производство, включающее в свой состав прокатные станы различных видов. Совершенствование процесса прокатки на обжимных станах является одной из важнейших задач, решение которой повлияет как на энергоэффективность всего производства, так и на качество выпускаемого проката. В свою очередь, главным потребителем электроэнергии в составе прокатного стана являются электропривода больших мощностей, используемые для вращения валков прокатных клетей. Во многих случаях таким приводом является электропривод постоянного тока.

Системы управления электроприводами прокатных клетей строятся с использованием линейных П- и ПИ- регуляторов. Однако, параметры самих электроприводов могут существенно изменяться в процессе работы ввиду нелинейностей характеристик двигателей, изменения свойств прокатываемого металла (размеров, плотностей, температур), износа оборудования и т.п. В таком случае параметры регуляторов, которые зачастую задаются только во время пуско-наладочных мероприятий, перестают быть оптимальными. Это ухудшает качество переходных процессов и приводит к снижению энергоэффективности агрегата. Решением данной проблемы может стать построение адаптивной системы управления электроприводом прокатной клетки.

Однако, для практического применения большинства классических методов построения адаптивных систем управления необходима точная нелинейная модель объекта, получение которой в условиях действующего производства является

достаточно трудоемким процессом, а зачастую в принципе невозможно. Также существует класс адаптивных методов, использующих тестовые сигналы. Их применение ограничивается большими инерционными массами рассматриваемого объекта управления (ОУ) и риском его повреждения при проведении процедуры тестирования.

Наиболее перспективными для внедрения с точки зрения стоимости и надежности, особенно в условиях действующего производства, являются «настройщики», изменяющие параметры уже существующих регуляторов в режиме реального времени для компенсации нелинейности ОУ. Подобные системы можно разделить на системы, использующие классические методы, и системы с интеллектуализацией. «Классические» настройщики имеют недостатки, сходные с указанными выше для адаптивных систем в целом. Перспективность использования интеллектуальных методов для решения рассматриваемой задачи определяется тем фактором, что в реальности наиболее высокое качество настройки регуляторов позволяет получать опытный инженер АСУ ТП, имеющий знания об особенностях работы ОУ. На основе своего опыта он обладает способностью настраивать регуляторы без модели ОУ. Однако готовых для внедрения решений по синтезу интеллектуальных настройщиков для электроприводов прокатных клетей обнаружено не было. Это определяет актуальность исследований.

Цели и задачи исследования. Целью диссертационной работы является повышение эффективности управления электроприводом прокатных клетей на основе разработки адаптивной системы управления, настраивающей регуляторы тока и скорости с использованием аппарата искусственных нейронных сетей. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Исследовать особенности прокатных клетей с целью выявления технологических режимов работы, для которых вопрос повышения эффективности управления стоит наиболее актуально.

2. Исследовать типовые решения автоматического управления главным электроприводом прокатных клетей с целью выявления возможности их усовершенствования.

3. Провести анализ существующих методов адаптивного управления электроприводом, в том числе и систем, настраивающих существующие регуляторы в режиме реального времени. Определить наиболее перспективные способы решения поставленной задачи.

4. Исследовать зависимость качества переходных процессов от коэффициентов настраиваемых линейных регуляторов с целью синтеза адаптивной системы управления на базе такой зависимости.

5. На базе проведенных исследований разработать метод построения адаптивной системы управления электроприводом прокатной клетки на основе применения нейросетевого настройщика для системы подчиненного регулирования, включающей контуры регулирования скорости и тока, в условиях смены уставок по скорости и действия возмущений. Организовать одновременную работу настройщиков регуляторов тока и скорости.

6. Провести численные и натурные лабораторные эксперименты с электроприводом постоянного тока с целью подтверждения эффективности предложенного подхода.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

– Разработан метод построения адаптивной системы для повышения качества управления электроприводом постоянного тока, отличающийся тем, что настройка регулятора скорости и тока в режиме реального времени ведется с помощью нейросетевого настройщика параметров линейных регуляторов, состоящего из трехслойной нейронной сети и базы продукционных правил.

– Построены базы правил, обеспечивающие обучение нейронной сети для настройки параметров регулятора тока при формировании задания по току с помощью регулятора скорости, и для настройки параметров регулятора скорости, отличающиеся тем, что в следствиях правил находятся скорости обучения конкретного нейрона искусственной нейронной сети.

– На базе разработанного метода предложен способ адаптивного управления, обеспечивающий снижение времени компенсации возмущающих воздействий и динамических моментов нагрузки при захвате заготовки прокатными валками.

– Разработан алгоритм согласования, обеспечивающий совместную работу двух нейросетевых настройщиков для контуров тока якоря и скорости.

– Разработан программный комплекс, реализующий систему адаптивного управления электроприводом постоянного тока в средах LabVIEW и Siemens Starter.

Теоретическая значимость работы. Описана зависимость качества переходных процессов в контурах регулирования тока и скорости от коэффициентов линейных регуляторов в рассматриваемых контурах. Определены допустимые границы изменения коэффициентов настраиваемых регуляторов. Разработан нейросетевой настройщик, позволяющий проводить динамическую идентификацию зависимости между качеством переходных процессов и параметров регуляторов (тока и скорости) главного электропривода прокатной клетки.

Практическая значимость работы. Предложена автоматическая система изменения параметров регулятора скорости и регулятора тока, основанная на полученных зависимостях. Разработанный способ адаптивного управления позволяет выявлять изменения параметров объекта управления и на основе этой информации изменять настройку регуляторов для обеспечения требуемого качества управления в каждый момент времени и за счет этого позволит без капитальных затрат в условиях действующего производства повысить эффективность работы электропривода постоянного тока ввиду более высокого качества управления при возможных изменениях параметров объекта. Предложенный в работе подход реализован в виде программы, разработанной в среде LabVIEW и Siemens Starter, что дает возможность его использования в промышленных электроприводах.

Методология и методы исследования. В работе использованы методы теории электропривода, современной теории автоматического управления, искусственных нейронных сетей, управления знаниями.

Научные положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся:

– Зависимость качества переходных процессов в контурах регулирования тока и скорости от коэффициентов настраиваемых линейных регуляторов. Для использования в режиме реального времени данная зависимость реализована в виде трёхслойной нейронной сети с динамически изменяемыми весовыми коэффициентами и смещениями.

– Нейросетевой настройщик, корректирующий параметры регулятора скорости и регулятора тока и возвращающий качество управления к требуемому в среднем за 2 переходных процесса.

– Исследована и доказана возможность повышения качества компенсации возмущающих воздействий, вызванных захватом прокатываемой заготовки, с помощью оперативной нейросетевой настройки параметров регулятора скорости.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на 15 международных и 11 всероссийских конференциях: «ElConRus» (Санкт-Петербург, 2017); «Неделя горняка-2017» (Москва, 2017); «Современная металлургия нового тысячелетия» (Липецк, 2015, 2016); «NIDays-2016» (Москва, 2016); «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (Самара, 2017); «Автоматизация, энерго- и ресурсосбережение в промышленном производстве» (Кумертау, 2017); «Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий» (Воронеж, 2015, 2016, 2017); «Современные сложные системы управления» (Липецк, 2017); «Dynamics» (Омск, 2016); «INTELS» (Москва, 2016); «SIBCON» (Казахстан, Астана, 2017); «ICIE» (Санкт-Петербург, 2017); «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» (Новокузнецк, 2017); Мультиконференция по проблемам управления (Санкт-Петербург, 2016; Дивноморское, 2017); «Информатика, управление и системный анализ» (Тверь, 2016); «Управление большими

системами» (Волгоград, 2015; Самара, 2016; Пермь, 2017); «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство» (Старый Оскол, 2014-2017).

Диссертационное исследование реализовано в ходе выполнения гранта РФФИ № 15-07-06092 на тему «Разработка методов и алгоритмов интеллектуального управления сложными технологическими процессами и системами в условиях стохастических возмущений и динамически меняющихся параметров», гранта Президента РФ №14.У30.15.4865-МК на тему «Разработка методов построения квазинелинейных регуляторов на основе нейросетевой оптимизации» и субсидии Министерства Образования и науки РФ в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы» проект № 14.575.21.0133 «Разработка метода повышения эффективности систем управления технологическими объектами на основе нейросетевой оптимизации работы промышленных контроллеров».

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 15 работах (семь статей – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, восемь статей – в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science). Получены три свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Глава 1. Анализ проблемы повышения эффективности работы двухвалковых реверсивных прокатных клетей

Металлургия является одной из основных отраслей промышленности в России [20] с точки зрения объемов выпускаемой продукции как для внутреннего рынка, так и для поставок за рубеж. Одним из основных направлений развития металлургической промышленности для поддержания конкурентоспособности производимого металла в настоящее время является снижение затрат на его изготовление.

Анализ основных потребителей энергоресурсов в металлургической отрасли, показал, что в их число, среди прочих, входит прокатное производство [107, 97, 96, 150], включающее в свой состав прокатные станы. Авторами [104, 103, 73] отмечено, что совершенствование процесса прокатки на обжимных станах является одной из важнейших задач, решение которой повлияет как на энергоэффективность всего производства [29, 103], так и на качества выпускаемого проката [93].

В свою очередь, главным потребителем электроэнергии в составе прокатного стана являются электропривода больших мощностей, используемые для вращения валков прокатных клетей [26, 84, 99, 48]. Главной задачей прокатной клетки является поддержание требуемого качества проката: соответствие геометрических размеров, формы, состояния поверхности прокатываемой заготовки. Снижение энергоемкости таких приводов даже на несколько процентов позволит существенно уменьшить себестоимость производимой продукции.

Постановка задач энергосбережения включает энергосбережение в технологическом механизме, энергосбережение в системе электропривода и в питающей энергосистеме. Описанная выше задача, в сущности, касается методов энергосбережения средствами электропривода [88, 34].

Ключевое значение в решении данной задачи имеют вопросы автоматизации [15]. В системах автоматизированного управления рассматриваемыми процессами, как правило, используются хорошо зарекомендовавшие себя П-, ПИ-

и ПИД алгоритмы, как и в промышленных системах управления в 90-95% случаев [2]. Популярность ПИД-регуляторов можно объяснить простотой их структуры, легкостью для понимания техническим персоналом, и тем, что они позволяют достигать определенного качества управления для большей части технологических объектов.

Однако они не способны достичь высокой эффективности управления для всех режимов работы прокатных клетей из-за присущих таким объектам нестационарности и нелинейности характеристик, транспортных и переходных запаздываний, механических люфтов и многосвязности каналов управления, что ведет к увеличению расхода энергоресурсов на производство продукции [187, 116, 119, 123].

Целью данной главы является рассмотрение основных типов прокатных станов и определение особенностей существующих систем управления работой прокатных клетей, анализ методов их усовершенствования и постановка задачи на диссертационное исследование.

1.1 Особенности организации технологии прокатного производства

Несмотря на то, что технологии прокатного производства различных металлургических заводов могут несколько отличаться друг от друга, в производственном цикле всех предприятий используются однотипные агрегаты.

В качестве примера рассмотрим технологию изготовления горячекатаного проката на примере высокоавтоматизированного Оскольского электрометаллургического комбината [57].

Слитки, поступающие из сталеплавильного цеха, загружаются в печи для подогрева перед прокаткой. Затем они извлекаются из печей нагрева и поступают на участок стана.

Выдача из печей заготовок для прокатки производится поплавно в ритме производительности стана. В исключительных случаях, при возникновении аварийной ситуации, допускается разрыв плавки. Если в случае аварии, нагретые непрерывнолитые заготовки (НЛЗ) не могут быть заданы в стан, их возвращают к печам нагрева или передают на склад литой заготовки (СЛЗ). НЛЗ перед прокаткой

подвергается обработке на окалиноломателе и установке гидросбива окалины.

Выданные из печей нагретые НЛЗ прокатывают на черновой клети. Прокатку НЛЗ на клети производят в соответствии с действующими таблицами калибровок. Оператор вводит в систему управления номер программы прокатки и параметры комплекта валков.

Прокатка производится в автоматическом режиме с помощью автоматизированной системы. В случае невозможности прокатки в автоматическом режиме оператор производит переключение управления механизмами в ручной режим.

Раскат, прокатанный на черновой клети, по транспортному рольгангу передается к ножницам горячей резки (НГР).

На НГР производят обрезку переднего конца раската. В случае обнаружения на раскате дефектов или местного охлаждения, дефектные (охлажденные) места вырезают или разрезают раскат на части на НГР.

При настройке клетей вальцовщики устанавливают расстояние между валками в соответствии с действующими таблицами калибровок. Настройку роликов привалковой арматуры производят на размер в соответствии с таблицей калибровки. Привалковую арматуру и проводковые столы устанавливают по оси прокатки.

Рассмотрим применяемые на стане прокатные клети с целью определения наиболее энергоемкой и требовательной к качеству управления.

1.2. Прокатные клети

Основным агрегатом прокатного стана являются обжимные прокатные клети. Они предназначены для обжатия нагретой литой заготовки обжимными валками. Обжатие происходит путем изменения прокатного калибра обжимных валков согласно схеме прокатки.

В дальнейшем будут рассмотрены черновые прокатные клети ввиду их высокой энергоемкости в сравнении с чистовыми клетями [42].

1.2.1. Черновые прокатные клетки

Основным энергопотребителем прокатных станов являются черновые прокатные клетки ввиду своей высокой мощности [42].

Как наиболее распространенные, рассмотрим двухвалковые реверсивные клетки. Применение реверсивной технологии проката позволяет сократить число клеток прокатного стана. А использование схемы с двумя валками, при которой рабочие валки выполняют функцию опорных, упрощает конструкцию.

К реверсивным станам горячей прокатки относятся все станы горячей прокатки, требующие реверсирования валков, необходимого для осуществления прокатки металла в несколько пропусков.

Главным недостатком подобной схемы прокатной клетки является сложность такого объекта для автоматизации. Причиной этого является сама технология реверсивной прокатки: заготовка многократно проходит сквозь прокатные валки вперед и назад, при каждом пропуске изменяется раствор валков, производится передача металла из калибра в калибр и выполняются повороты заготовки на 90 градусов. Процесс прокатки даже двух следующих друг за другом заготовок может отличаться.

Из всех реверсивных станов горячей прокатки наибольшее значение в прокатном производстве имеют обжимные станы. Они являются главными станами, на которых производится предварительное обжатие всех стальных слитков большой массы, получаемых из сталеплавильного цеха, с тем чтобы дальнейшую прокатку стали до конечного сечения можно было осуществлять на станах готовой продукции: сортовых, листовых, трубных и т.п.

Для реверсивных станов горячей прокатки применяют два основных варианта привода рабочих валков (рис. 1.1): а – однодвигательный с шестеренной клетью (групповой привод) и б – двухдвигательный без шестеренной клетки (индивидуальный привод для каждого валка).

Среди рассмотренных разновидностей черновых клеток наиболее распространенными являются ДУО-реверсивные клетки. В дальнейшем необходимо рассмотреть принципы построения системы управления главным

электроприводом таких клетей.

1.3. Электроприводы прокатных клетей

В главных электроприводах прокатных клетей используются преимущественно двигатели постоянного тока и синхронные машины с невысокой номинальной скоростью (40-70 об/мин). Более современным считается применение синхронных электроприводов ввиду высокой точности регулирования и высокой жесткости механических характеристик.

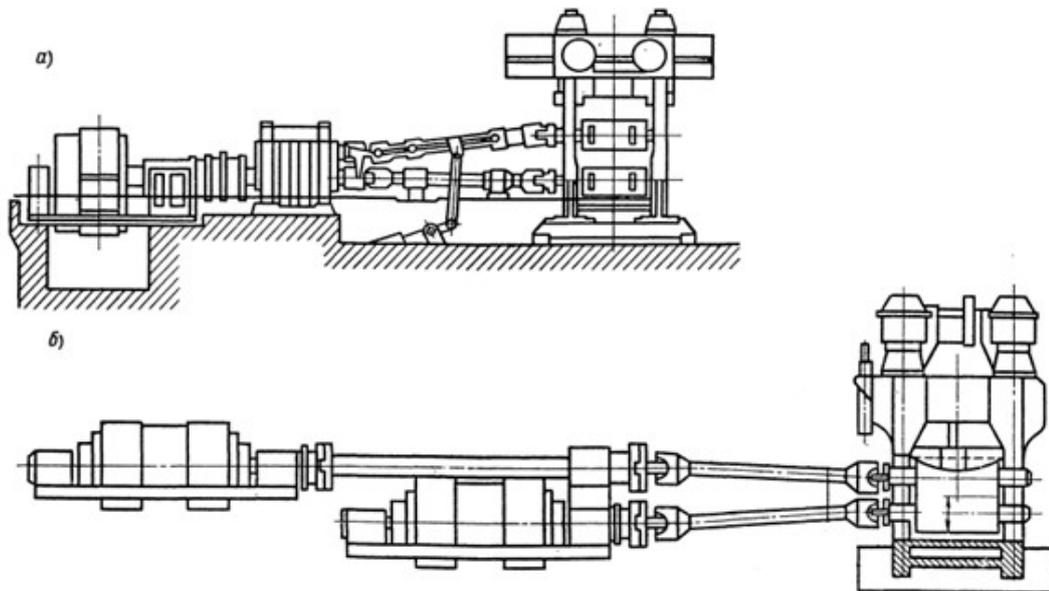


Рис. 1.1 – Варианты главного привода блюминга

а – групповой, б – индивидуальный

Значительная часть прокатных станов для Российских предприятий были спроектированы в 80-х годах. В это время применение синхронных машин в регулируемых приводах прокатных станов ограничивалось сложностью регулирования. На большинстве предприятий модернизация силовой части не проводилась ввиду необходимых для этого значительных материальных затрат. Поэтому на действующих производствах в основном применяются электроприводы постоянного тока.

Наиболее распространенным подходом к модернизации таких электроприводов является замена аналоговой системы управления на цифровую без изменения силовой части привода. Как упоминалось выше, это обусловлено

большой материальной стоимостью силовой части (электродвигателей и преобразователей питающего напряжения) относительно самой системы управления.

Исходя из вышесказанного в данной работе будет рассмотрен электропривод постоянного тока черновой ДУО-реверсивной прокатной клетки.

1.3.1. Требования к электроприводу

Все реверсивные станы горячей прокатки работают примерно в одинаковых условиях. Их работа характеризуется частым включением, ударной нагрузкой с большими токами в момент захвата металла валками, необходимостью регулирования скорости прокатки в относительно широких пределах и др. [55]. В связи с этим требования всех реверсивных станов к электроприводу примерно одинаковы. Они определяются условиями технологического процесса прокатки на реверсивных станах:

- 1) минимальное время протекания переходных процессов при заданных значениях максимума динамического тока;
- 2) большая частота включения приводного двигателя (1000 включений в час и больше);
- 3) широкий диапазон регулирования скорости (10:1);
- 4) независимость величины ускорения от скорости, до которой разгоняется двигатель;
- 5) высокая перегрузочная способность приводного двигателя по току и моменту с учетом того, что после захвата металла в течение некоторого промежутка времени двигатель должен преодолевать одновременно динамические усилия и усилия деформации металла;
- 6) высокая надежность системы автоматизированного электропривода.

К электроприводу рабочих валков слябинга и универсальных клеток других реверсивных станов предъявляется дополнительное требование, связанное с одновременной прокаткой металла в двух клетях, – обеспечить необходимое соотношение скоростей вертикальных и горизонтальных валков, разное в зависимости от направления прокатки.

Данные требования во многом определяют структуру системы управления главным электроприводом ДУО-реверсивной клетки.

1.3.2 Принцип работы электрооборудования главного привода двухвалковой реверсивной клетки

Крутящие моменты верхнего и нижнего привода обеспечивают два двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Двигатели соединяются со шпинделями через жесткие муфты (неподвижное соединение). Нижний двигатель расположен сзади и соединен с нижним шпинделем промежуточным валом. Двигатели установлены на подшипники скольжения, выполненные в виде двух опор (стоек). Промежуточный вал установлен на одной опоре и жестко соединен с валом двигателя и нижним шпинделем.

Для прокатки заготовок в ДУО-реверсивной клетки главный привод должен обеспечить достаточный крутящий момент на валках клетки и обеспечить одинаковую частоту вращения валков клетки. Для решения этих задач система регулирования строится по принципу двухзонной системы подчиненного регулирования. Такая система обеспечивает относительную простоту настройки регуляторов и ограничения основных координат электропривода [92, 86, 61, 60].

В первой зоне применяется схема двухконтурного регулирования напряжения якоря. Во второй зоне применяется схема двухконтурного регулирования тока возбуждения. Для совместной согласованной работы верхнего и нижнего привода выполнена схема регулирования высшего уровня, обеспечивающая заданный режим прокатки с учетом диаметров прокатных валков.

В первой зоне происходит разгон двигателей до 60 об/мин с максимальным крутящим моментом. Это обеспечивает надежный захват заготовки валками. Во второй зоне разгон двигателей от 60 до 150 об/мин происходит за счет ослабления магнитного поля статора. Такой режим работы обеспечивает достаточную производительность клетки. Задание на разгон двигателей формируется контроллером или сельсином-задатчиком, расположенном в контроллере.

При прокатке заготовки формируется «лыжа» на головной части, что исключает удары заготовки в ролики рольганга. Лыжеобразование выполняется за

счет разницы линейных скоростей верхнего и нижнего валков. Формирование разных скоростей выполняет схема лыжеобразования. Виртуальную разницу диаметров валков устанавливает оператор на декадных переключателях. Функциональная схема управления высшего порядка обеспечивает и синхронизацию скоростей верхнего и нижнего привода.

Далее рассмотрим двухзонную систему регулирования скорости вращения вала двигателя.

1.3.3. Система регулирования скорости

В системах управления электроприводами постоянного тока регулирование скорости в первой зоне (снижение скорости относительно номинальной частоты вращения) происходит изменением напряжения, подводимого к обмотке якоря. Регулирование во второй зоне (увеличение скорости относительно номинальной частоты вращения) – снижением тока возбуждения электродвигателя. Таким образом, система управления двухзонным электроприводом состоит из двух частей: системы регулирования напряжения якоря и системы регулирования тока возбуждения. Эти две системы могут работать как зависимо, так и независимо друг от друга. Современные электропривода постоянного тока строятся по зависимой схеме: при достижении напряжения якоря номинального значения происходит уменьшение тока возбуждения.

Работа электропривода постоянного тока с двухзонным регулированием частоты вращения в общем случае описывается системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} M - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \\ e_{np} = IR + L \frac{d}{dt} + e, \\ M = k\Phi I, \\ F = i_{\epsilon} W_{\epsilon} + i_{\epsilon m} W_{\epsilon m} = F_{\epsilon} + F_{\epsilon m}, \\ e_{\epsilon} = i_{\epsilon} r_{\epsilon} + 2p_n \sigma W_{\epsilon} \frac{d\omega}{dt}, \\ 0 = i_{\epsilon m} r_{\epsilon m} + 2p_n \sigma W_{\epsilon m} \frac{d\omega}{dt}, \end{array} \right. \quad (1.1)$$

где J_{Σ} – момент инерции механизма;

M_c – момент нагрузки электропривода;

i_B – ток возбуждения электродвигателя;

M – электромагнитный момент, развиваемый двигателем;

e – ЭДС двигателя;

W_{em} – количество витков фиктивной обмотки вихревых токов;

e_{np} – ЭДС преобразователя;

ω – скорость вращения вала электродвигателя;

i_{em} – вихревые токи;

Φ – магнитный поток;

I – ток якоря электродвигателя;

W_e – количество витков обмотки возбуждения;

σ – коэффициент неполного сцепления;

p_n – количество пар полюсов.

На рис. 1.2 представлена структурная схема электропривода постоянного тока, построенная на основе системы уравнений (1.1). В данной схеме двигатель постоянного тока независимого возбуждения является объектом управления.

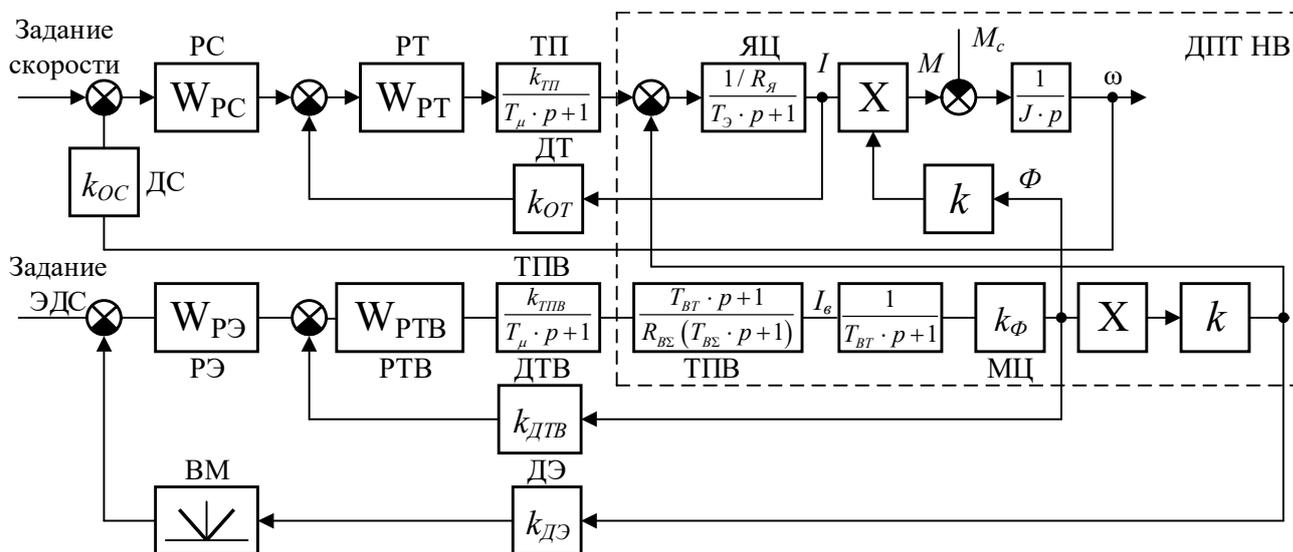


Рис. 1.2 – Структурная схема электропривода постоянного тока

На рис.1.4 PC – регулятор скорости с передаточной функцией W_{PC} ; PT – регулятор тока якоря с передаточной функцией W_{PT} ; TP – тиристорный

преобразователь якоря; $k_{ТП}$ – коэффициент усиления преобразователя якоря; T_{μ} – постоянная времени преобразователя якоря; ДТ – датчик тока якоря с коэффициентом передачи k_{OT} ; ДС – датчик скорости с коэффициентом передачи k_{OC} ; ЯЦ – якорная цепь двигателя; $R_{Я}$ – полное сопротивление якорной цепи; T_{ε} – электромагнитная постоянная времени двигателя; P_{ε} – регулятор ЭДС с передаточной функцией $W_{P\varepsilon}$; РТВ – регулятор тока возбуждения с передаточной функцией $W_{РТВ}$; ТПВ – тиристорный преобразователь возбуждения; $k_{mнв}$ – коэффициент усиления преобразователя возбуждения; $T_{ТПВ}$ – постоянная времени преобразователя возбуждения; ДЭ – датчик ЭДС с коэффициентом передачи $k_{D\varepsilon}$; ВМ – выявитель модуля (используется, т.к. электропривод (ЭП) реверсивный по якорю); ДТВ – датчик тока возбуждения с коэффициентом передачи $k_{ДТВ}$; $T_{вт}$ – постоянная времени вихревых токов; $T_{\sigma\Sigma}$ – суммарная постоянная времени обмотки возбуждения; $R_{\sigma\Sigma}$ – сопротивление цепи возбуждения электродвигателя; k_{Φ} – динамический коэффициент связывающий изменение магнитного потока и тока возбуждения (кривая намагничивания двигателя).

Как указывалось, ранее, в системах управления электроприводом используются линейные регуляторы, основанные на П- и ПИ-алгоритмах. Это связано с тем, что ПИД-регуляторы (как класс) обеспечивают надежную работу для большинства систем при условии правильной настройки. В частности, в работе [65] приводятся данные о том, что ПИД-алгоритм управления применяется в 90-95% систем управления, используемых на производстве. По другим данным [17], эта цифра составляет более 95%. Данный факт вызван надежностью подобных регуляторов, простотой их применения [192, 116]. В системах управления электроприводами не используется дифференциальная составляющая ПИД-алгоритма управления, но несмотря на это, дальнейший анализ будет проведен для всего класса ПИД-алгоритмов управления.

Далее рассмотрим метод, который применяется на практике для синтеза системы управления и регуляторов для рассматриваемой задачи.

1.3.4. Метод последовательной коррекции (подчиненного регулирования)

«Классическим» для настройки систем автоматизированного электропривода считается метод последовательной коррекции [171], который используют при проектировании САУ для достижения требуемого качества регулирования [40]. Он является наиболее простым методом синтеза регуляторов линейных систем автоматического управления. В общем случае настройка контуров и выбор параметров регуляторов координат производится по техническому или симметричному оптимуму. Регуляторы контуров настраиваются последовательно, начиная всегда с внутреннего контура – контура тока. Для синтеза регулятора тока составляется равенство произведений передаточных функций разомкнутой главной цепи и желаемой передаточной функции разомкнутого контура тока [39].

При настройке контура управления параметры регулятора рассчитываются таким образом, чтобы применение такого регулятора привело передаточную функцию контура к необходимому виду. На практике широкое распространение получили две «классические» настройки контуров управления электроприводом: модульный (технический) оптимум (МО) и симметричный оптимум (СО). Данные критерии предложены в [147, 146]. На их широкое применение указано в [178, 160, 164, 180].

В случаях, когда необходимо компенсировать более двух больших постоянных времени невозможно использовать один регулятор. Это связано с тем, что придется использовать ПИД-регулятор, что сильно ухудшит помехозащищенность системы управления. Для решения данной проблемы используют многоконтурную систему управления с вложенными в друг друга (подчиненными) контурами. В этом случае каждый регулятор компенсирует не более 2 постоянных времени. Настройку регуляторов в указанных системах производят независимо друг от друга [59].

Метод подчиненного регулирования является обобщением метода последовательной коррекции для систем, представленных последовательно соединенными интегральными и инерционными звеньями. Метод предполагает

выделение из состава ОУ цепи инерционных звеньев (например, для СЭП постоянного тока – якорная цепь и маховые массы с электромагнитной и электромеханической постоянными времени соответственно). Настройку регулятора для каждого контура выполняют так, чтобы постоянные времени объекта были скомпенсированы параметрами регулятора, что приводило бы передаточную функцию контура к требуемому виду. Из-за невозможности компенсации одним регулятором двух постоянных времени [27] вводят два регулятора (РС и РТ/ Рэ и Ртв) [147]. Настройку регуляторов в таких системах производят независимо в каждом контуре. Регуляторы контуров настраиваются последовательно, начиная с внутреннего контура тока.

Настройка контура управления на модульный (технический) оптимум происходит таким образом, чтобы интегральная часть регулятора компенсировала влияние большой постоянной времени. При этом T_μ называют некомпенсированной постоянной времени (она должна учитывать все малые постоянные времени настраиваемого контура).

Передаточная функция разомкнутого контура:

$$W_{раз}(p) = \frac{1}{2T_\mu p(1+T_\mu p)} \quad (1.2)$$

Система в замкнутом контуре:

$$W_{зам}(p) = \frac{1}{1+2T_\mu p(1+T_\mu p)} \quad (1.3)$$

При таких настройках регулятора перерегулирование переходного процесса составит 4.3%, время первого достижения задания – $t_1=4.7 \cdot T_\mu$, запас по фазе – 63° .

При настройке на СО добиваются передаточной функции разомкнутого контура (1.4). Максимальное перерегулирование при такой настройке достигает 43%, запас по фазе 37° , время первого достижения установившегося значения $t_1=3.1 \cdot T_\mu$.

Передаточная функция разомкнутого контура:

$$W_{раз}(p) = \frac{4T_\mu p + 1}{8T_\mu^2 p^2 (T_\mu p + 1)} = W_{oy}(p)W_{рег}(p) \quad (1.4)$$

Регуляторы настраиваются на симметричный оптимум для достижения максимального быстродействия системы управления электроприводом.

Также в некоторых случаях используют настройку на линейный оптимум (ЛО). При настройке на ЛО добиваются нулевой установившейся ошибки по возмущению, а время переходного процесса (1.5) и максимальное значение динамической ошибки (1.6) могут быть приближенно найдены по формулам:

$$t \approx \left(7.15 + 2.42 \frac{T_1}{T_\mu} \right) T_\mu \quad (1.5)$$

$$\Delta y_{\max} \approx 3.5 \frac{T_\mu}{T_1 \left(1 + \frac{4T_\mu}{T_1} \right)} k_3 \Delta z_3 \quad (1.6)$$

Далее рассмотрим особенности существующей системы управления.

1.4 Особенности существующей системы управления главным приводом ДУО-реверсивной клетки

В системах управления главным электроприводом ДУО-реверсивных прокатных клетей, как правило, используются П- и ПИ- регуляторы, обладающие рядом упомянутых ранее преимуществ.

Кроме перечисленных достоинств применение таких регуляторов вносит требование к линейности ОУ, что и является основным недостатком подобной схемы для управления прокатной клетью, поскольку она, как объект управления, обладает существенными нелинейностями.

В процессе работы клетки ее параметры изменяются. Это происходит по следующим причинам: характеристики приводного двигателя нелинейны, изменяются температура и геометрические размеры прокатываемой заготовки; изменяются скорости процесса прокатки; происходит износ оборудования, который вызывает неконтролируемое появление люфтов в механической части электропривода. Износ прокатного оборудования очень сложно контролировать. Из-за ударного изменения нагрузки при захвате и разгона привода при прокатке с заготовкой [30] момент нагрузки главного привода может увеличиваться в 1.5-2 раза при наличии зазоров [12].

Люфты в механической части привода увеличиваются от старения деталей. Это характерно для всех прокатных клетей, но выражено преимущественно в работе черновых клетей. Это связано с большими мощностями и ударными нагрузками [51, 53, 67, 66, 10, 35, 69].

Авторами [11, 68] указывается влияние размеров проката, коэффициента трения, марки стали на работу приводных двигателей. В работе [11] показано, что изменение параметров прокатки (толщины, ширины, температуры, скорости прокатки) влияет на момент на валках в режиме захвата заготовки и в установившемся режиме прокатки.

Для настройки регуляторов с использованием метода последовательной коррекции необходима точная идентификация объекта в каждом режиме работы прокатной клетки для точного расчета постоянных времени. Точно идентифицировать модель главного электропривода прокатной клетки достаточно сложно [6]. Это становится причиной того, что на практике при синтезе регуляторов параметры объекта «усредняют», что ведет к «усреднению» качества переходных процессов в различных режимах, т.е. к энергопотерям. Также при расчете параметров регуляторов не учитывают в полной мере нелинейности объекта управления, т.к. модель в большинстве случаев линейна.

Учитывая описанные нелинейности, можно сделать вывод о том, что для рассматриваемого объекта недостаточно простого применения ПИД-алгоритма управления, особенно если параметры регулятора подбирать один раз при пуске системы и не производить их коррекцию в дальнейшем. В таких условиях ПИД законы в большинстве случаев не позволяют обеспечить требуемого качества регулирования во всех режимах работы клетки.

В то же время, многие авторы сходятся во мнении, что повышение точности работы регуляторов в системе управления электроприводом прокатной клетки позволит улучшить качество работы всей клетки.

Распространенным решением является замена только аналоговой системы управления на цифровую, без изменения силовой части электропривода. Это позволяет применить менее затратный способ решения рассматриваемой

проблемы, при котором необходимого качества управления и, соответственно, качества работы двухвалковой реверсивной клетки добиваются улучшением качества работы регуляторов (оперативной перенастройкой параметров уже существующих линейных регуляторов, заменой на регуляторы с иной структурой). В частности, в работе [85] говорится о необходимости адаптации параметров или структуры регуляторов при изменении режимов работы электропривода. Таким образом, решением могло бы быть построение адаптивной системы управления прокатной клетью.

1.5. Анализ методов построения адаптивных систем управления электроприводом двухвалковой реверсивной клетки

Существует два подхода к построению адаптивных систем управления: первый подход подразумевает замену уже существующих регуляторов на регуляторы с иной структурой; второй подход предполагает разработку системы, оперативно настраивающей параметры линейных П- и ПИ-регуляторов в процессе работы.

Остановимся на каждом из подходов подробнее.

1.5.1 Адаптивные регуляторы

В работе [77] предложен способ реализации адаптивной системы автоматического регулирования, основанный на использовании подстраиваемого корректирующего устройства (рис. 1.3).

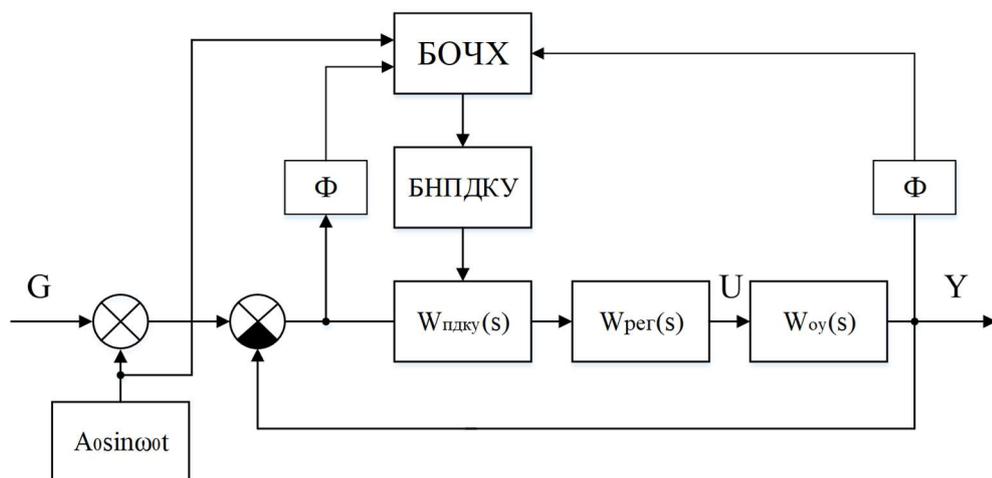


Рис. 1.3 – Структурная схема САР с адаптивным псевдолинейным двухканальным корректирующим устройством

На рис.1.6 использованы следующие обозначения: G – задающее воздействие системы управления; U – управляющее воздействие; Y – выход объекта управления; $W_{OX}(s)$ – передаточная функция объекта управления; $W_{PEI}(s)$ – передаточная функция регулятора; $W_{ПДКУ}(s)$ – передаточная функция псевдолинейного двухканального корректирующего устройства; Φ – полосовой фильтр; БНПДКУ – блок настройки псевдолинейного двухканального корректирующего устройства; БОЧХ – блок определения частотных характеристик; $A_0 \sin \omega_0 e$ – поисковый сигнал.

Данный способ характеризуется тем, что в процессе работы системы параметры регулятора не меняются и соответствуют настройке, предшествующей запуску системы в работу. В процессе работы системы регулирования в зависимости от изменения параметров объекта управления меняется коэффициент передачи корректора. Существенной особенностью данной системы является то, что значение фазового сдвига разомкнутой системы на фиксированной частоте определяется по значению коэффициента передачи по амплитуде разомкнутой и замкнутой систем после подачи в систему синусоидального поискового сигнала.

Авторы показывают эффективность данного метода следующим образом. В процессе работы системы с течением времени происходит изменение параметров объекта управления. Другими словами, происходит изменение коэффициента передачи объекта управления и вносимого им фазового сдвига. Адаптивное псевдолинейное корректирующее устройство в процессе работы осуществляет определение на частоте поискового сигнала изменения коэффициента передачи и фазового сдвига объекта управления относительно заданных. После чего вносит в систему фазовый сдвиг и меняет коэффициент передачи таким образом, чтобы компенсировать влияние изменения параметров объекта управления на качество процесса управления. Главным недостатком данного метода, применительно к системе автоматизированного электропривода прокатной клетки, является необходимость использования тестового сигнала определенной частоты, который в условиях реального производства сложно применить к прокатной клетке.

В работе [8] дается описание адаптивной системы управления электроприводом с переменной структурой. Предлагается создание системы идентификации (рис.1.4), которая позволит адаптивной системе автоматически настраивать регуляторы на нужный режим работы, менять структуру регуляторов, определяя значения параметров.

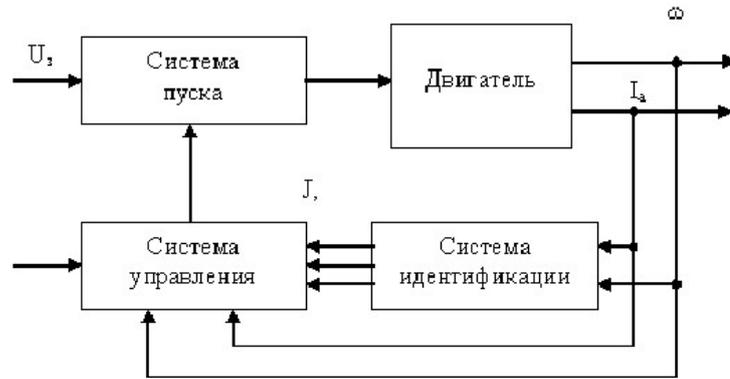


Рис. 1.4 – Обобщенная схема самонастраивающейся системы

Также приводится применение системы адаптации с сигнальной самонастройкой регулятора тока, корректирующей выход регулятора (рис.1.5) и настраивающей параметры самого регулятора (рис.1.6)

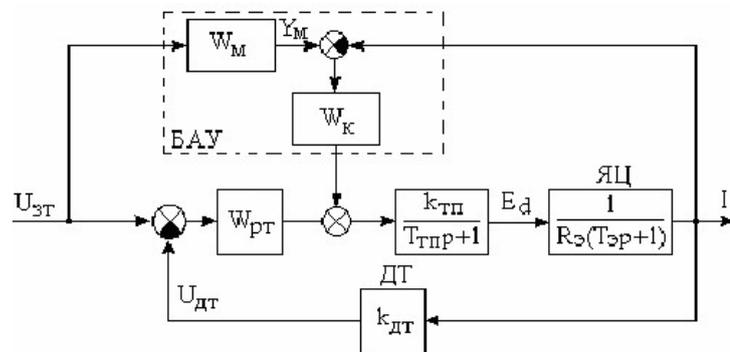


Рис. 1.5 – Адаптация с сигнальной самонастройкой регулятора тока

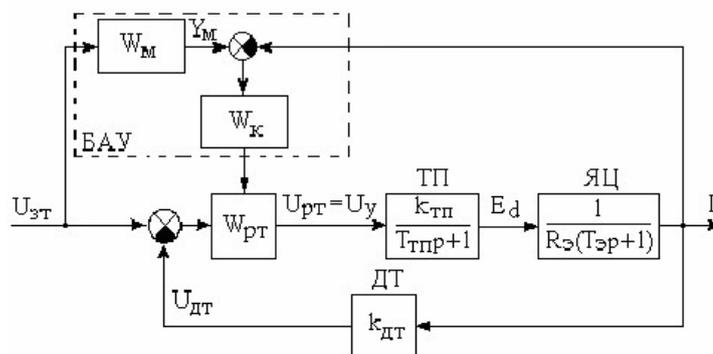


Рис. 1.6 – Адаптация настройки регулятора тока с использованием эталонной модели

Оба метода основываются на применении эталонной модели и хорошо показывают себя в системах, где известна модель привода. Для решения поставленной задачи данные методы не подходят из-за сложности построения адекватной модели и сохранения ее адекватности в процессе эксплуатации электропривода прокатной клетки.

1.5.2 Оптимальное управление

В ряде работ для улучшения работы системы управления прокатными станами предлагается использовать оптимальное управление [43, 56]. В частности, в работе [3] делается предположение о том, что оптимальная настройка регуляторов позволит существенно улучшить качество изготавливаемого проката.

В теории оптимального управления можно выделить несколько направлений: аналитическое конструирование регуляторов, построение наблюдателя состояний и использование модальных регуляторов. Остановимся на каждом из подходов подробнее.

1.5.2.1 Аналитическое конструирование регуляторов (АКОР)

Применение АКОР относительно электротехнических объектов достаточно полно рассмотрено в [90]. Сам термин «аналитическое конструирование» был введен профессором А.М. Летовым. Он определил конечную цель АКОР как получение закона управления чисто аналитическим путем, решая оптимизационную задачу, целевым функционалом в которой выступает интегральный (чаще всего – квадратичный) критерий качества работы системы управления.

В работе [74] рассматривается сочетание задач АКОР и принципа подчиненного регулирования в электроприводе по системе «управляемый преобразователь – двигатель постоянного тока». Данное сочетание хорошо показало себя в экспериментах, проведенных авторами [74]: сравнение полученных характеристик показывает, что система подчиненного регулирования (СПР) с

классическими настройками является более чувствительной к изменению параметров привода, чем система оптимального управления (СОУ).

Однако практическое применение АКОР для сложных систем автоматизированного привода связано с рядом трудностей. Одна из них заключается в том, что до сих пор не установлено соответствие между такими показателями качества управления как перерегулирование, статическая ошибка и др., на которые ориентируются в промышленности, и весовыми коэффициентами целевой функции оптимизационной задачи АКОР [90, 144, 145]. Другая связана с тем, что с повышением порядка объекта быстро нарастают численные и тем более аналитические трудности, связанные с необходимостью решения нелинейного уравнения в частных производных – так называемого уравнения Гамильтона–Якоби–Беллмана, относительно производящей функции, к которому сводится процедура определения законов управления [78, 105].

Кроме этого в общем случае вопрос о выборе весовых коэффициентов, входящих в функционалы оптимальности, остается открытым. До сих пор единой эффективной методики их выбора не существует. Поэтому задача синтеза оптимального регулятора решается многократно с целью достижения заданных показателей качества переходных процессов, отражающих инженерные требования к проектируемой САУ.

1.5.2.2 Наблюдатели состояний

Одним из подходов к построению адаптивной системы управления является применение наблюдателей состояний. В «классической» теории управления они используются для управления методами теории пространства состояний, когда часть переменных вектора состояния оказываются неизмеряемыми.

Наблюдатель состояния объекта управления по существу является подстраиваемой моделью этого объекта. Причём эту модель можно сформировать в удобных для синтеза регулятора состояниях координатах.

Понятие «наблюдатель состояния» является общепринятым для теории управления. Тем не менее, ученые, занимающиеся электроприводом, под

«наблюдателем состояний» понимают структуру, которая необходима для восстановления неизмеряемых переменных электропривода [28, 87, 37].

В работе [28] достаточно полно даны классификация (рис. 1.7) и описание работы наблюдателей состояний в системах управления электроприводами.

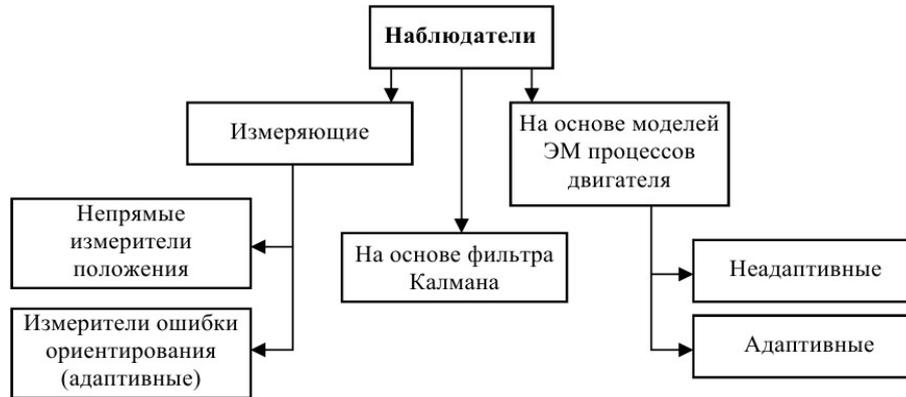


Рис. 1.7 – Упрощенная классификация наблюдателей состояний

В частности, наблюдатели могут отслеживать изменение параметров электрического привода для осуществления настройки существующих регуляторов. Зачастую используется подход, аналогичный приведенным в [158, 170]. Однако, для успешного применения подобного метода также необходимо наличие точной модели объекта управления в текущий момент времени.

1.5.2.3 Модальное управление

Модальные регуляторы строятся на основе суммирования обратных связей по вектору состояния [58, 36, 19, 76]. Применение подобных регуляторов позволяет увеличить быстродействие СУ и повысить ее точность в динамических режимах.

В работе [38] рассмотрено применение методов модального управления для электропривода прокатного стана. Авторы утверждают, что применение модальных регуляторов позволит повысить быстродействие электропривода, а также устранить колебательность при наличии люфтов в кинематических связях.

На рис. 1.8 представлена схема управления электроприводом, предлагаемая в [38].

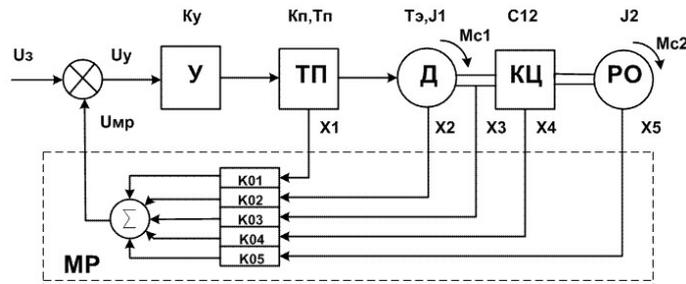


Рис. 1.8 – Схема управления электроприводом с использованием модального регулятора (MP)

Авторам удалось улучшить показатели качества переходных процессов: повысить быстродействие и устранить колебательность (табл. 1.1).

Таблица 1.1 Работа системы с использованием MP

Параметр	При управлении				При возмущении			
	t_{nn}, c	$\sigma, \%$	$\varepsilon, \%$	M	t_{nn}, c	$\sigma, \%$	$\varepsilon, \%$	M
Ток якоря	0,7	45	0	1,5	0,8	25	0	1,5
Скорость	0,7	0	0	0,5	0,8	5	5	1,5

Главным недостатком подобных методов и сложностью для их применения на практике является необходимость наличия адекватной математической модели прокатной клетки. Построение такой модели труднодостижимо, т.к. учесть целый ряд сложно контролируемых параметров, например, износ валков и появление люфтов в механической части клетки, достаточно непросто.

1.6.3 Интеллектуальные методы

В последнее время в системах управления электроприводами все большее распространение получают интеллектуальные методы управления [89, 14, 4, 50, 91, 157], позволяющие учитывать знания и опыт оператора технологического процесса.

В частности, в работе [5] авторы отмечают, что многие технологические процессы в металлургии нуждаются в адаптивном управлении, основанном на применении интеллектуальных методов, рассмотренных ниже, для разработки адаптивных регуляторов, не основанных на классическом ПИД-алгоритме.

Причиной этому служат существенные изменения параметров объекта управления и внешних возмущений, с которым опытный оператор успешно справляется.

Нечеткая логика

Примеры использования нечеткой логики в системах управления электроприводами приведены в ряде работ [27, 46, 44, 110, 176, 155, 114, 159, 100, 25]. В них предлагается заменить «классические» П- и ПИ-регуляторы регуляторами, работа которых основана на нечетком выводе Мамдани-Заде и Сугено-Такаги. В работе [27] авторы предлагают заменить оба регулятора в системе управления скоростью двигателя постоянного тока на нечеткие. Утверждается, что получаемые системы управления становятся нечувствительными к «белому шуму».

В работе [46] утверждается о необходимости адаптации в системах электропривода и проводится сравнение систем управления с «классическим» и нечетким управлением. «Классическая» система управления критикуется за необходимость построения точной модели объекта. Сравнительный анализ динамики классической и двухконтурной систем автоматического управления следящего электропривода с нечётким регулятором, проведенный авторами, установил, что показатели качества динамики электропривода при отработке больших управляющих воздействий лучше в системе с нечётким регулятором.

В работе [155] также критикуется «классическое» управление за проблемы, возникающие из-за нелинейностей электродвигателя постоянного тока. Автор предлагает использовать нечеткий регулятор, изображенный на рис. 1.9.

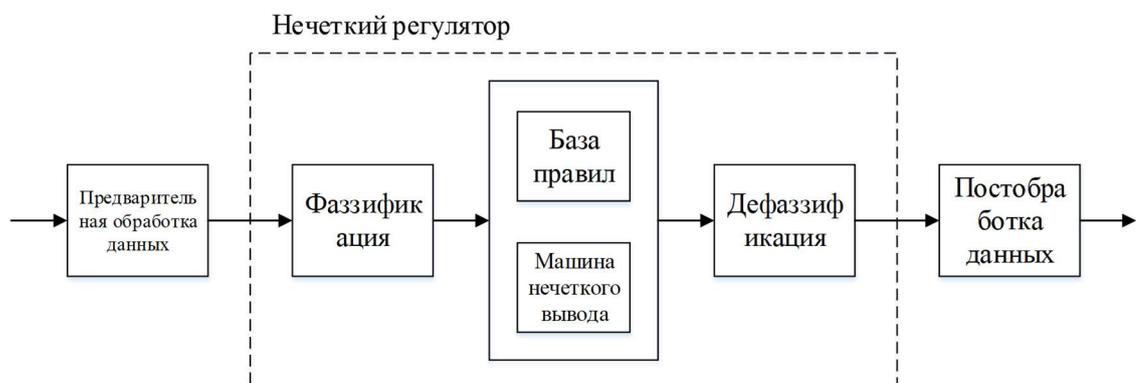


Рис.1.9 Нечеткий регулятор

Нечеткая логика, по мнению автора, является более простым и надежным решением по сравнению с обычными методами. Кроме того, нечеткая логика позволяет учитывать нелинейности электропривода постоянного тока. Опыты, проведенные в [155] с помощью MATLAB, показывают, что применение нечеткой логики может улучшить как статические, так и динамические показатели привода. Результаты моделирования демонстрируют, что разработанный регулятор обеспечивает большее быстродействие системы, по сравнению с ПИД-управлением.

Недостатком применения систем с нечеткой логикой является необходимость привлечения высококвалифицированных экспертов, и сама верификация функций принадлежности занимает значительное время. Кроме того, получаемые база правил и функции принадлежности жестко привязаны к характеристикам конкретного объекта. Для другого объекта или при изменении его характеристик потребуется разработка другой базы правил или ее коррекция.

Нейронные сети [54, 186]

Также одним из интеллектуальных методов, применяемых в электроприводе, являются нейронные сети.

В работе [32] рассматривается применение нейросетевого регулятора для управления электроприводом. В качестве достоинств такого метода авторы говорят об учете нелинейностей электродвигателя. Отмечается целесообразность замены линейных регуляторов (ПИД) нелинейными (НС) в САУ электроприводами. Рассматривается применение нейроконтроллера для электропривода с нагрузкой пара трения (которой является прокатная клеть), также рассмотрен пример с двухмассовой системой. В [185] предлагается использовать единичный нейрон для управления электроприводом постоянного тока. Для обучения используется дельта-правило. Автор предлагает изменять скорости обучения в процессе работы. Также в работе проведены эксперименты, показывающие преимущества над «классическим» управлением.

Основной сложностью использования подобных подходов является необходимость наличия полноценной обучающей выборки для проведения автономного обучения. Ввиду ряда причин, такая выборка на реальном производстве не может быть собрана, поскольку должна включать в себя работу объекта во всех возможных режимах и ситуациях. Во многих работах такую выборку предлагают получать на модели объекта управления. Но, во-первых, такую модель необходимо суметь построить, а во-вторых, если она существует, то возникает вопрос о необходимости использования нейронной сети.

Все перечисленные выше методы подразумевают замену уже существующих регуляторов вновь разработанными, что в целом ряде случаев нецелесообразно ввиду материальных и временных затрат на отладку. Кроме того, эти методы так или иначе требуют точную модель объекта управления, которую в условиях производства получить практически невозможно, кроме того она, даже гипотетически, не может учесть всех стохастических возмущений и нелинейностей ОУ, проявляющихся в процессе эксплуатации.

Исходя из вышесказанного более актуальным и целесообразным представляется альтернативное решение – разработка методов настройки уже существующих П и ПИИ-регуляторов в САУ приводом с целью построения системы их оперативной настройки в реальном масштабе времени.

Кроме этого считается [72], что для уже существующей системы под управлением регуляторов, основанных на ПИД-алгоритме, нет необходимости усложнять систему, заменяя этот алгоритм другим. А функции адаптации следует перенести на механизм, изменяющий настройку вышеуказанных регуляторов в режиме реального времени (настройщик).

Исходя из вышесказанного необходимо рассмотреть методы, позволяющие изменять настройку уже функционирующих регуляторов для повышения качества управления.

1.5.4 Анализ методов настройки регуляторов в САУ электроприводом

1.5.4.1. Методы Циглера-Никольса и Чина-Хронеса-Ресвика

Наиболее простым экспериментальным методом настройки регуляторов, не требующим фундаментальных знаний теории управления, является метод Циглера-Никольса [193]. Суть метода состоит в следующем. Время интегрирования и дифференцирования регулятора задаются равными нулю. Затем коэффициент передачи увеличивается до момента возникновения незатухающих колебаний на выходе контура управления. Значение коэффициента передачи фиксируют и по графику переходного процесса определяют период автоколебания. Далее параметры настройки регулятора находят по эмпирическим формулам.

Главным недостатком данного метода является то, что он не учитывает требований к запасу устойчивости системы. Преимуществом является простота этого способа настройки регуляторов, но, как правило, полученные настройки далеки от оптимальных, а переходные процессы имеют небольшую степень затухания. Метод показал свою эффективность при первоначальной настройке регуляторов, но трудно применим к дальнейшей подстройке коэффициентов регулятора.

Развитием метода Циглера-Никольса является метод Чина-Хронеса-Ресвика [126]. Он позволяет получить больший запас устойчивости, т.е. сократить время настройки, но коэффициент передачи будет меньше, чем у Циглера-Никольса. Главным отличием от метода Циглера-Никольса являются расчетные формулы для определения коэффициентов, приведенные в таблице 1.2., где K_P – пропорциональная часть, T_I – постоянная интегрирования, T_D – постоянная дифференцирования, L – условное запаздывание.

Таблица 1.2. Расчетные формулы. Отклик на ступенчатое воздействие

Формулы	$a \cdot K_P$	T_I	T_D
Циглер – Никольс (ZN)	1.2	$2L$	$L/2$
Чин, Хронс, Ресвик 0% (CHR0%)	0.6	L	$L/2$
Чин, Хронс, Ресвик 20% (CHR20%)	0.95	$1.4L$	$0.47L$

Преимуществами являются простота определения настроек и меньшее время настройки. Недостатками, как и в методе Циглера-Никольса, являются неполнота информации о запасе устойчивости системы, который определяет надёжность работы регулятора, и приближенная настройка. Также кривая разгона необходима для получения параметров модели электропривода по методу Симою [79, 75].

Методы Циглера-Никольса и Чина–Хронеса–Ресвика и др. хорошо описаны как в отечественной [18, 49], так и в иностранной литературе [117, 174, 163, 169]. Основной проблемой формульных методов является соотношение адекватности модели и применимости к методам синтеза по прямым показателям качества [82, 81, 83, 80].

1.5.4.2. Поисковые и беспойсковые системы адаптивного управления

Системы оптимального адаптивного управления можно разделить на две группы: беспойсковые и поисковые системы. Беспойсковые системы отличаются [7, 62, 71, 106, 152] наличием модели, связывающей оптимизируемую величину с вектором входных параметров. В подобных системах адаптация происходит за счёт непрерывного уточнения параметров модели, которая используется для оптимизации выходной величины.

Другим классом оптимальных адаптивных методов управления являются поисковые системы [45, 70, 98], в которых модель объекта управления не используется, а оптимизация происходит благодаря проведению поиска на реальном объекте.

Беспойсковые алгоритмы требуют идентификации модели ОУ с помощью тестовых сигналов, использование которых затруднительно для систем управления электроприводом высокой мощности. Для устранения этого недостатка используют поисковые алгоритмы, использующие процедуру непрерывного поиска на реальном объекте управления. Основным недостатком поисковых алгоритмов служит низкое быстродействие такой системы.

В работе [41] для построения адаптивной системы электропривода прокатной клетки (рис. 1.10) предлагается использование метода случайного поиска с возвратом на неудачном шаге.

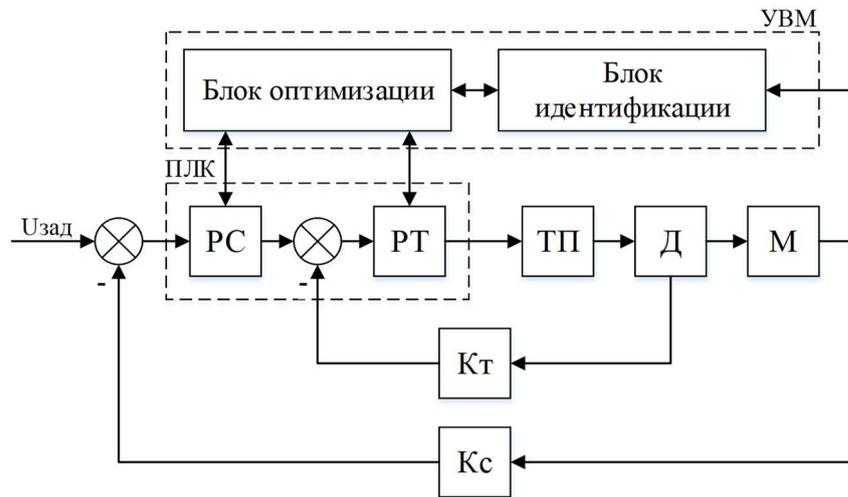


Рис. 1.10 – Функциональная схема регулируемого электропривода черновой клетки

Показывается эффективность этого метода, по сравнению с градиентным поиском при оптимизации объектов большой размерности. Адаптацию (самообучение) случайного поиска автор предлагает в виде перенастройки основных параметров поискового алгоритма при изменении ситуации поиска: вероятностных свойств распределения направления случайных проб и величины рабочего шага.

Случайность выбора следующей точки в пространстве поиска определяет ряд недостатков рассматриваемого метода, в частности, метод может не сойтись к решению.

1.5.4.3. Метод Iterative Feedback Tuning (IFT)

Iterative Feedback Tuning (IFT) – метод, оптимизации параметров регулятора, основанный на обработке информации о сигнале обратной связи. Главным достоинством этого метода является отсутствие необходимости использования модели объекта управления. Этот метод был первоначально предложен в [140], а затем получил развитие в системах ММО (англ. Multiple Input Multiple Output) [168, 138].

Этот метод настройки регуляторов используется в различных системах управления [137, 128, 135], в частности в системах управления прокатными станами [139].

В [108] рассматривается применение метода IFT для настройки параметров ПИД-регулятора в системе управления двигателем постоянного тока. Результаты, приведенные авторами (рис. 1.11) показывают эффективность этого метода.

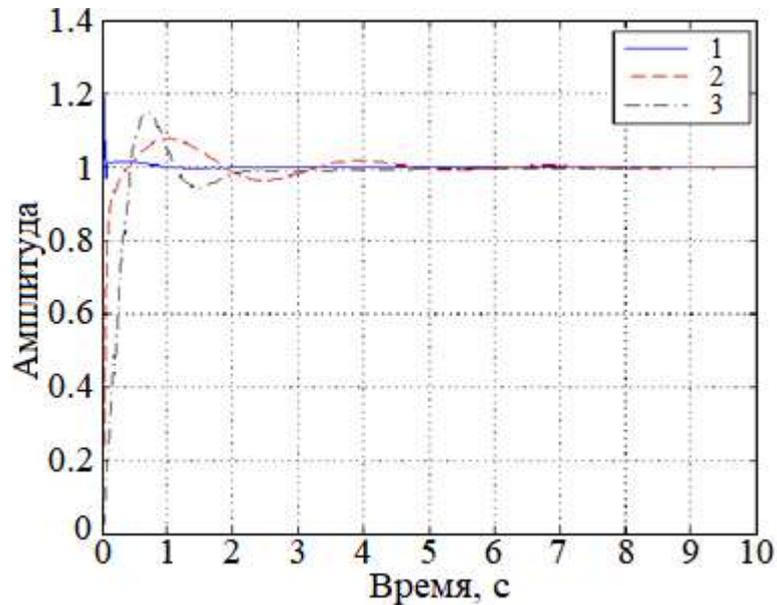


Рис. 1.11 – Работа системы с использованием метода IFT

(1, 2 – работа системы с использованием метода IFT, 3 – работа системы, настроенной по методу Циглера-Никольса)

Главным недостатком метода IFT для применения в системе электропривода прокатной клетки является необходимость разгона двигателя по определенной разгонной кривой, что в условиях действующего производства нереализуемо.

Также существуют методы настройки линейных регуляторов, основанные на оценке реакции системы на ступенчатое или полигармоническое [109] воздействие, однако данные об их применении к управлению электроприводом обнаружить не удалось. В целом, основным недостатком данных методов является требования по построению модели ОУ для настройки параметров регулятора.

Таким образом, классические методы построения адаптивных систем так или иначе требуют наличия точной, нелинейной модели объекта управления, получить которую в реалиях производства крайне сложно. В тоже время, инженер КИПиА на производстве настраивает параметры регулятора без модели, основываясь на своем опыте, знаниях и особенностях поведения объекта. Проблема заключается в

том, что делать это он должен постоянно при всех изменениях характеристик объекта управления.

Исходя из вышесказанного возможно сделать вывод о том, что необходимо рассмотреть интеллектуальные методы настройки ПИД-регуляторов, основанные на опыте и знаниях человека об объекте управления. Кроме того, в обзор включены оптимизационные методы, основанные на роевом интеллекте и теории эволюции.

1.5.5. Интеллектуальные методы настройки ПИД-регуляторов

1.5.5.1. Метод роя частиц (МРЧ)

Также одним из методов настройки параметров ПИД-регулятора в системах автоматизированного электропривода является метод роя частиц [115, 112].

В работе [113] используются метод роя частиц для настройки параметров линейного ПИД-регулятора в контуре управления двигателем постоянного тока. (рис. 1.12).

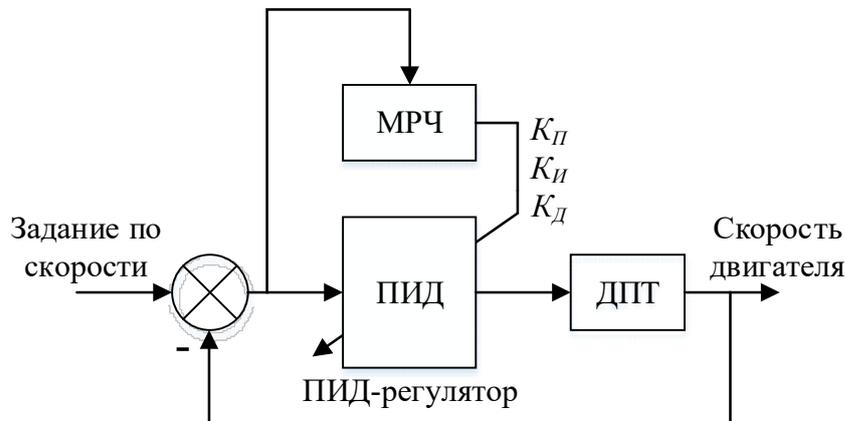


Рис. 1.12 – Контур управления скоростью двигателя постоянного тока с настройкой ПИД-регулятора с использованием МРЧ

Оптимизация с использованием роя частиц – это метод поиска, который базируется на понятии популяции, и моделирует поведение птиц в стае и косяков рыб. В методе PSO особи, которые называются частицами, перемещаются в многомерном пространстве решений. Изменение координат частиц внутри пространства поиска обуславливаются естественной социально-психологической

тенденцией частиц конкурировать между собой. Изменение в состоянии частиц зависит от опыта и знаний ее соседей. Таким образом, метод PSO руководит роем частиц, где каждая частица представляет собой потенциальное решение. Недостатком данного метода является необходимость построения модели объекта управления, поскольку он является итерационным. Проведение подобной поисковой процедуры на реальном работающем объекте практически невозможно, так как требуется достаточно точная и нелинейная модель. Кроме того, не существует обоснованной теории выбора параметров данного алгоритма, таких как размерность роя, константы значимости социальной и когнитивной составляющих вектора скорости частиц.

1.5.5.2. Нечеткая логика

Еще одним методом настройки параметров ПИД-регулятора в системах управления электроприводом является применение нечеткой логики [156].

В работе [148] строится система (рис. 1.13), настраивающая параметры ПИД-регулятора, управляющего двигателем постоянного тока. Приведены результаты, показывающие улучшение статических и динамических свойств системы управления.

В отличие от «классического» управления системы, использующие нечеткую логику не требуют точной математической модели объекта. [175, 182].

Нечеткая система настраивает коэффициенты « K_P », « K_I », « K_D » обычного ПИД-регулятора в режиме реального времени. Это позволяет учитывать нелинейности объекта управления без внесения существенных изменений в систему управления. Изменение коэффициентов регулятора зависит от ошибки скорости двигателя и от скорости изменения этой ошибки.

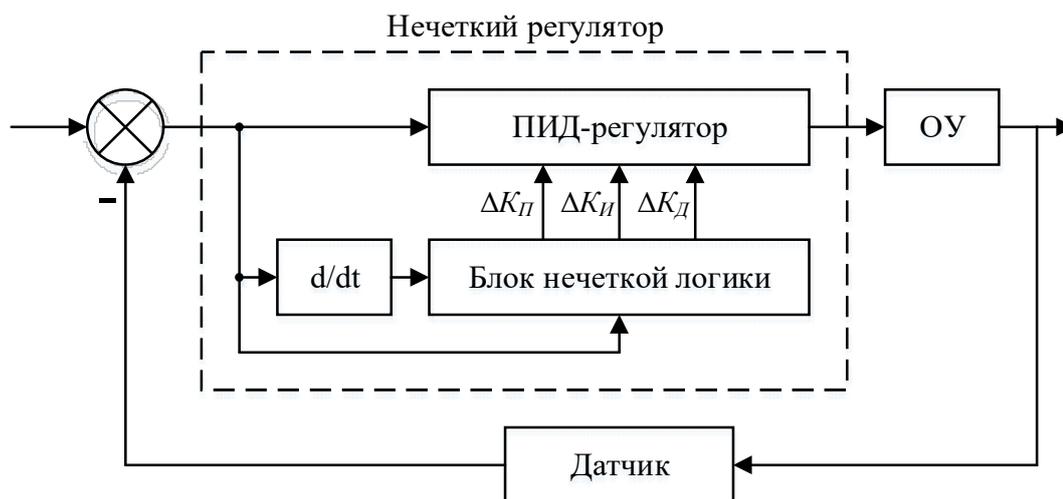


Рис.1.13 – Контур управления с нечеткой системой
настройки ПИД-регулятора

В работах [133, 132] применен аппарат нечеткой логики для настройки параметров регулятора в системе управления приводом прокатной клетки. Автор приводит результаты моделирования, показывающие работу его системы. (рис.1.14).

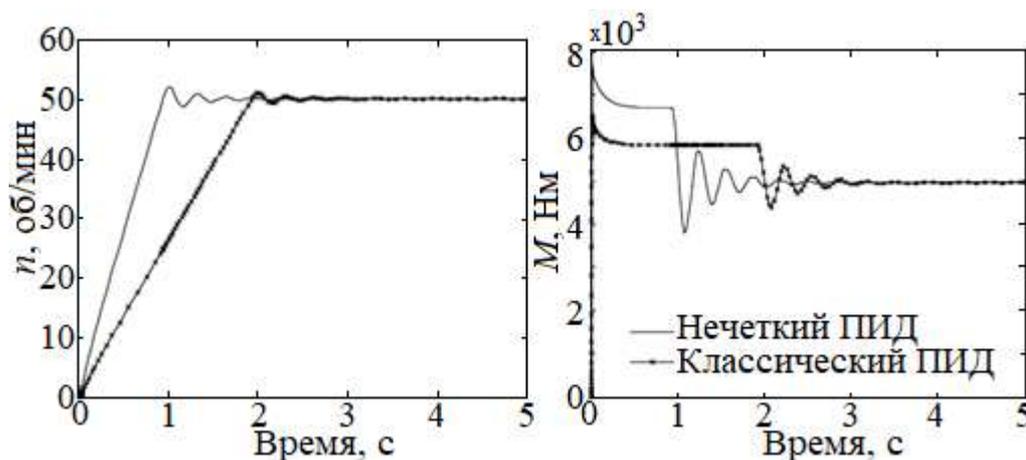


Рис. 1.14 – Работа электропривода прокатной клетки с использованием аппарата нечеткой логики для настройки параметров регуляторов

В данных работах указано, что система способна справиться даже с сильным изменением параметров прокатной клетки.

Недостатком применения нечеткой логики в чистом виде является отсутствие механизмов оперативного обучения получаемого настройщика. Данную проблему

решают путем создания настройщика, у которого входные и выходные переменные должны находиться в диапазоне $[-1;1]$ или $[0;1]$. Реальные измеряемые значения и получаемые коэффициенты регулятора затем приводятся в требуемый ОУ диапазон с помощью коэффициентов нормировки, значения которых требуют подстройки в процессе функционирования, что предполагает применение методов обучения, сходных с нейронными сетями. Что вызывает необходимость решения проблемы выбора скорости обучения, проблемы локальных минимумов и пр.

1.5.5.3. Генетические алгоритмы

В ряде работ [172, 184, 121] для настройки линейных регуляторов в системах управления электроприводом постоянного тока предлагается использование генетических алгоритмов (рис.1.15).

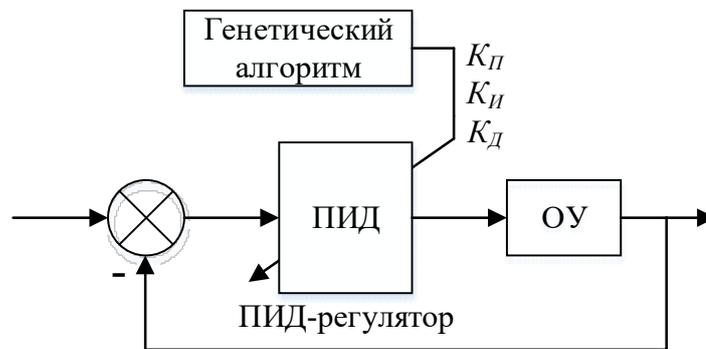


Рис. 1.15 – Контур управления с генетической настройкой параметров ПИД-регулятора

Основным недостатком использования генетических алгоритмов является необходимость построения модели объекта управления (ГА является итерационными, как и метод роя частиц) и сложность выбора целевой функции. Также сложности может вызвать выбор параметров алгоритма: размерности начальной популяции, вероятности скрещиваний и мутаций.

Для использования генетического алгоритма в режиме реального времени в [183] предлагается после первоначальной настройки регулятора с использованием модели ОУ задать окрестность возможной подстройки значений коэффициентов регулятора. Затем значения K_P , K_I , K_D могут быть изменены только в пределах этих окрестностей. Таким образом точность настройки регулятора с применением

подобного подхода очень сильно зависит от точности первоначальной настройки, а, соответственно, и от модели ОУ.

Для устранения указанных недостатков использования генетических алгоритмов в [143] предлагается создание системы управления, сочетающей генетические алгоритмы и нечеткие нейронные сети. Авторы предлагают первоначальную настройку регулятора производить с помощью генетического алгоритма, а уточняющую методом обратного распространения ошибки.

Однако вновь определяющей является начальная настройка методом ГА, требующих точной модели ОУ.

1.5.5.4. Нейронные сети

Также одним из интеллектуальных методов онлайн настройки регуляторов, работающих по ПИД-закону, является применение искусственных нейронных сетей (рис. 1.16).

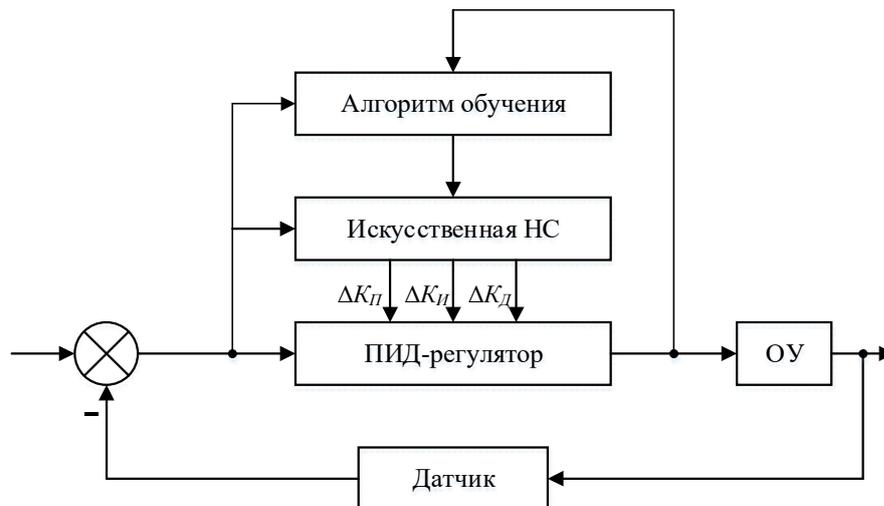


Рис. 1.16 – Контур управления с нейросетевой настройкой параметров ПИД-регулятора

Использование искусственных нейронных сетей для настройки параметров ПИД-регуляторов в системах управления электроприводом постоянного тока рассмотрено в работе [190], а для САУ прокатной клетки – в [191]. Достоинствами такого метода являются способность учитывать нелинейности ОУ и возможность оперативного дообучения сети.

Недостатком применения нейронных сетей в чистом виде является отсутствие априорных «знаний» сети об объекте. Например, пределы уставок по току или скорости.

В работе [124] предлагается использовать искусственную нейронную сеть для выбора одного из классических методов настройки параметров регулятора в системе управления прокатной клетью. Главным недостатком подобной настройки является необходимость использования реакции системы на ступенчатое воздействие.

В работе [136] разрабатывается метод обучения нейронной сети, настраивающей ПИД-регулятор для электропривода. Делается сравнение разработанного метода с методом обратного распространения ошибки, а также сравнивается работа классического ПИД-регулятора с регуляторами, использующими искусственную нейронную сеть (рис. 1.17).

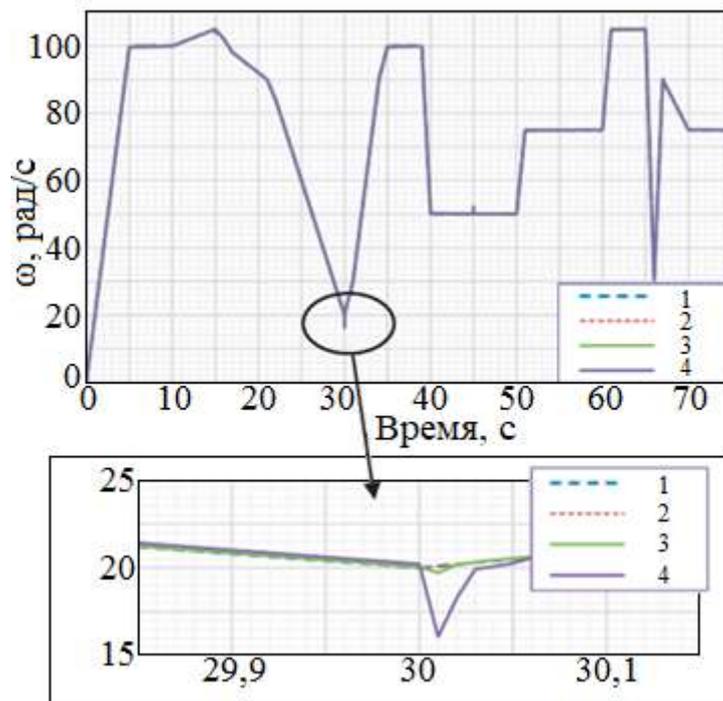


Рис. 1.17 – Отработка задания по скорости при различных методах управления: 1 – задание, 2 – работа системы с предлагаемым методом обучения, 3 – работа системы, использующей метод обратного распространения ошибки, 4 – работа системы с «классическим» ПИД-регулятором

По результатам, приведенным в работе, сложно выявить достоинства предлагаемого метода относительно «классического» управления с использованием ПИД-регулятора, однако, работа показывает перспективность данного метода, использующего способность нейронной сети обучаться.

Авторы рассмотренных работ [136, 124, 190, 191] не изменяют параметры модели в ходе экспериментов, что не соответствует работе реальных ОУ. Если параметры модели ОУ будут изменяться в процессе работы системы, появится необходимость заново определять скорость обучения нейронной сети и моменты время, когда необходимо производить обучение. Это позволяет сделать вывод о том, что для адекватной работы нейросетевой системы, настраивающей параметры регуляторов в режиме реального времени, необходим механизм выбора скоростей обучения и моментов обучения НС.

Выводы по главе 1

1. Одними из наиболее энергоемких металлургических агрегатов являются черновые прокатные клетки.

2. Повышение энергоэффективности прокатной клетки возможно с помощью построения адаптивной системы управления.

3. Существующие адаптивные системы в большинстве случаев труднореализуемы в условиях производства.

4. Целесообразной является разработка системы, настраивающей параметры уже существующих на производстве линейных регуляторов в масштабе реального времени.

5. Все существующие методы оперативной подстройки ПИД-регуляторов имеют ряд существенных недостатков, затрудняющих их применение на производстве.

С учетом выполненного анализа поставлена цель и сформулированы задачи исследования.

Целью работы является повышение эффективности прокатки за счет повышения эффективности управления путем построения интеллектуальной адаптивной системы, подстраивающей параметры линейных регуляторов главного электропривода прокатной клетки в реальном масштабе времени.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих задач:

1. Построение системы, реализующей задачу настройки параметров П- и ПИ-регуляторов в главном электроприводе прокатной клетки в реальном масштабе времени.

2. Решение задачи интеграции разработанной надстройки в систему управления главными электроприводами двухвалковой реверсивной прокатной клетки.

3. Проведение модельных и натурных экспериментов для проверки эффективности предложенного подхода.

Глава 2. Построение нейросетевого настройщика для системы управления главным электроприводом двухвалковой реверсивной прокатной клетки в режиме отработки графика заданий

Предметом исследований в данном разделе является система управления главным электроприводом двухвалковой прокатной клетки (рис. 1.4, рис. 1.5). Задачей исследования является построение нейросетевого настройщика для контуров управления током якоря и скоростью вращения вала электродвигателя, отвечающих за управление им при отработке графика заданий в первой зоне регулирования ($n < n_{ном}$). Далее приведено описание настройщика.

2.1 Структура настройщика

Предлагаемый нейросетевой настройщик комбинирует метод применения НС для коррекции коэффициентов регулятора с базой правил ситуаций, когда необходимо проводить такую настройку. В качестве следствий в правилах выступают скорости обучения нейронов НС. С функциональной точки зрения (рис. 2.1) нейросетевой настройщик является совокупностью двух взаимосвязанных элементов: нейронная сеть и база правил.

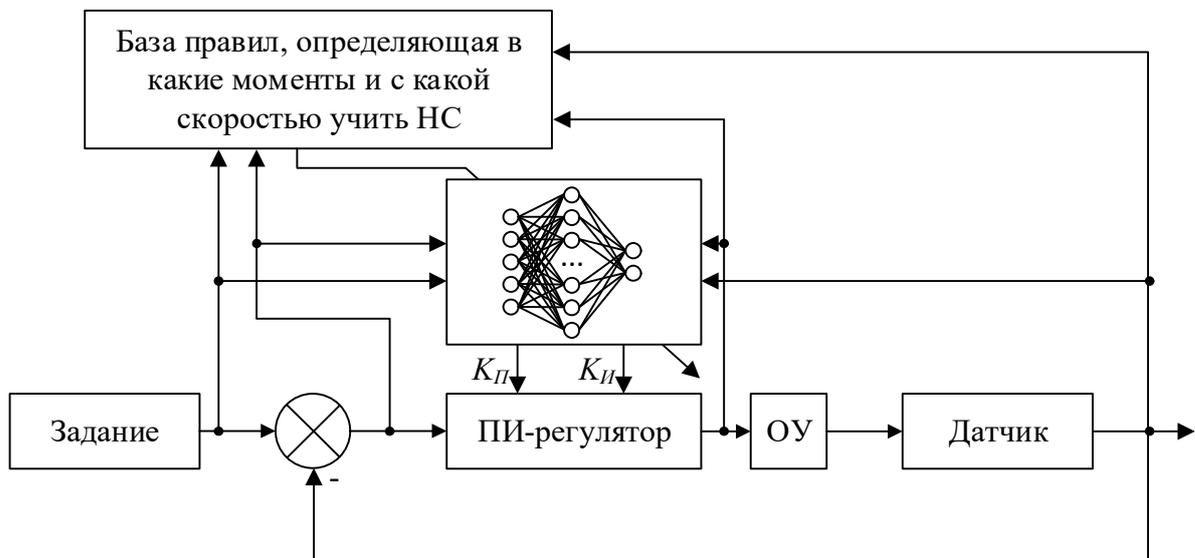


Рис. 2.1 – Функциональная схема нейросетевого настройщика

В данной работе предлагается следующая схема применения нейросетевого настройщика в контурах управления скоростью и тока якоря главного электропривода прокатной клетки (рис. 2.2).

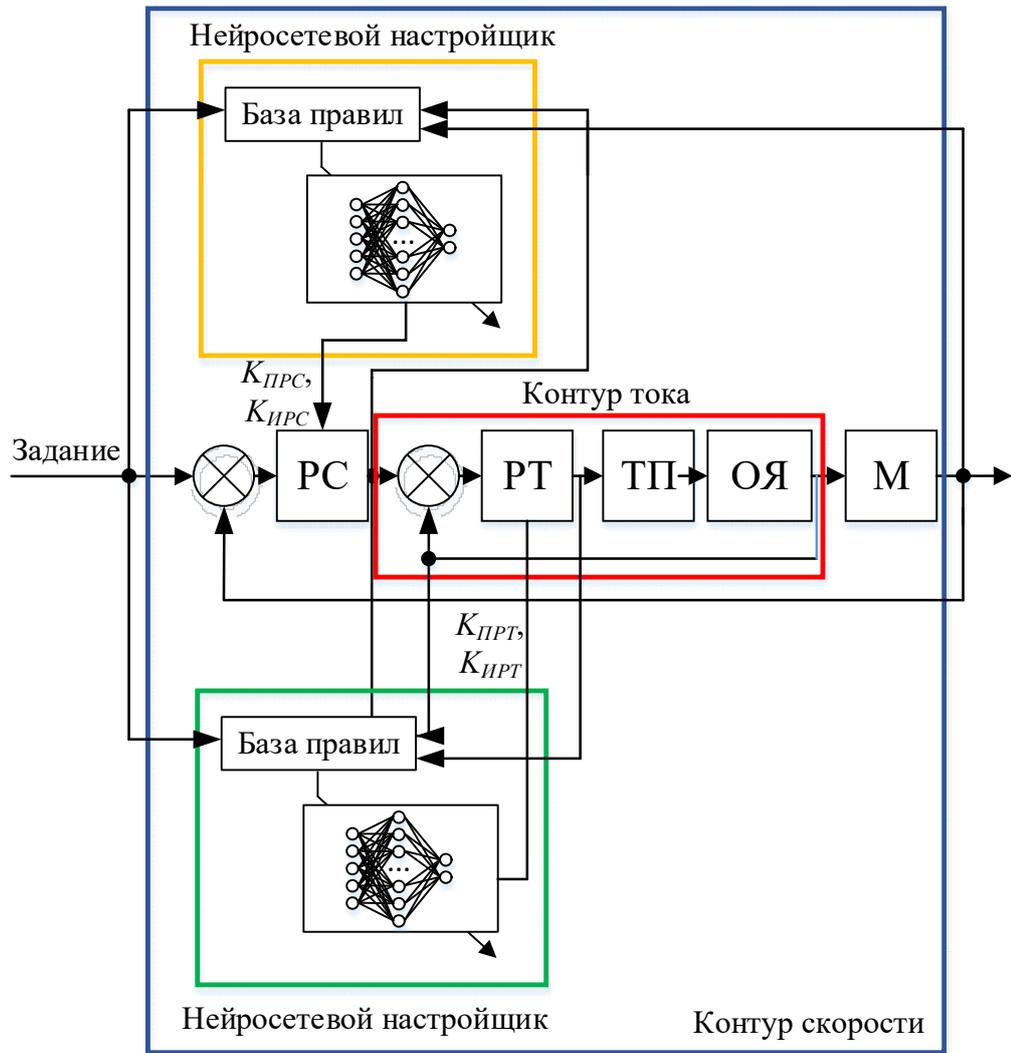


Рис. 2.2 – Функциональная схема электропривода постоянного тока с применением нейросетевого настройщика

Методика построения подобных настройщиков для различных объектов предложена в [21]. Рассмотрим построение нейросетевого настройщика для поставленной задачи.

2.1.1. Определение структуры нейронной сети

Основным требованием к нейронной сети является возможность «обрабатывать» ту же информацию, что и настраиваемый регулятор.

Согласно [134] функция многих переменных может быть аппроксимирована НС с одним скрытым слоем, содержащем нелинейную функцию активации. В данном случае такой функцией является зависимость коэффициентов регулятора от задания, сигнала управления и выхода ОУ, что и определяет выбор указанной

общей структуры сети.

В электроприводах постоянного тока используются П- и ПИ- регуляторы. Для универсализации нейросетевого настройщика в САУ электроприводами при определении количества нейронов во *входном* слое НС рассмотрим ПИ-регулятор. Передаточная функция ПИ-регулятора в дискретной форме может быть описана в виде (2.1).

$$W_c(z) = K_p + \frac{K_I \Delta t}{1 - z^{-1}} = \frac{1}{1 - z^{-1}} (K_p (1 - z^{-1}) + K_I \Delta t) = \frac{1}{1 - z^{-1}} (-K_p z^{-1} + (K_p + K_I \Delta t)) \quad (2.1)$$

Пусть $a_1 = (K_p + K_I \Delta t)$, $a_2 = -K_p$. Разностное уравнение для k -го шага управления имеет вид (2.2).

$$\begin{aligned} u(t_k) &= a_1 e(t_k) + a_2 e(t_k - \Delta t) + u(t_k - \Delta t) = \\ &= a_1 (r(t_k) - y(t_k)) + a_2 (r(t_k - \Delta t) - y(t_k - \Delta t)) + u(t_k - \Delta t) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Таким образом, входной слой нейронной сети для настройщика ПИ-регулятора должен включать пять нейронов: задание $r(t_k)$ и его задержанное значение $r(t_k - \Delta t)$, выход ОУ $y(t_k)$ и его задержанное значение $y(t_k - \Delta t)$, и задержанное значение управляющего воздействия $u(t_k - \Delta t)$. Δt вычисляется в соответствии с методом, предложенным в работе [22]. В данном случае значение Δt составляет 1.5 мс.

На *выходном* слове находится два нейрона, поскольку в ПИ-регуляторе осуществляется настройка двух параметров: K_p , K_I .

В работе [151] утверждается, что количество нейронов *скрытого* слоя определяется неравенством: $N_{hid} \geq 2N + 1$, где N – это число входов НС. В соответствии с [21] количество нейронов в скрытом слое и точек переходного процесса, анализируемых нейронной сетью должны совпадать. При этом необходимо учитывать, что для борьбы с шумом выход объекта управления усредняют, а во входном слое нейронной сети присутствует нейрон, анализирующий выход ОУ такт назад. В данном случае рассмотрим ситуацию с тремя точками усреднения. Тогда в соответствии с [21], количество нейронов в

скрытом слое также должно быть равно 14.

Полученная в соответствии с вышеуказанными рассуждениями структура НС приведена на рис. 2.3.

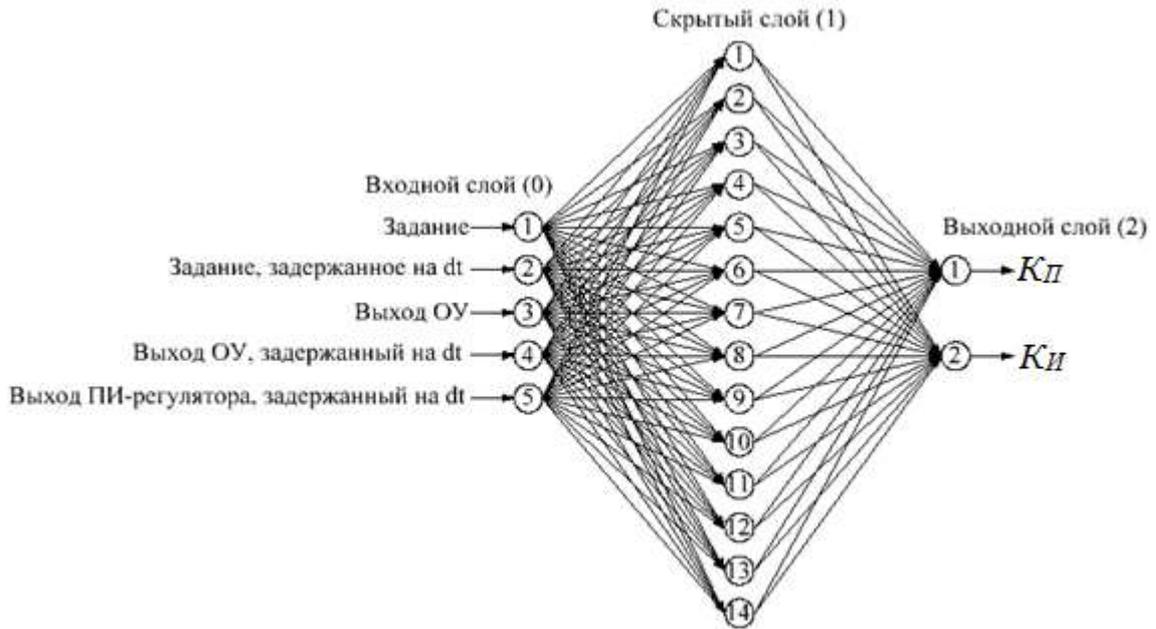


Рис. 2.3 – Структура НС для ПИ-регулятора

Математическая модель рассматриваемой сети имеет вид:

$$\begin{aligned}
 s_j^{(1)} &= \sum_{i=1}^5 \omega_{ji}^{(1)} \cdot x_i + b_j^{(1)} \\
 O_j^{(1)} &= f^{(1)}(s_j^{(1)}) \quad (j = \overline{1, 14}) \\
 s_k^{(2)} &= \sum_{j=1}^{14} \omega_{kj}^{(2)} \cdot O_j^{(1)} + b_k^{(2)} \\
 O_k^{(2)} &= f^{(2)}(s_k^{(2)}) \quad (k = \overline{1, 2})
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

где $\omega_{ji}^{(1)}$ и $b_j^{(1)}$ – весовые коэффициенты и смещения для скрытого слоя; $\omega_{kj}^{(2)}$ и $b_k^{(2)}$ – весовые коэффициенты и смещения для выходного слоя; x_i – входные сигналы; $O_j^{(1)}$ – выходы скрытого слоя; $O_k^{(2)}$ – выходы НС; $s_j^{(1)}$ и $s_k^{(2)}$ – взвешенные суммы нейронов скрытого и выходного слоев соответственно; $f^{(1)}$ – сигмоидальная функция; $f^{(2)}$ – линейная функция; $K_{П} = O_1^{(2)}$, $K_{И} = O_2^{(2)}$.

Именно такая структура будет использоваться для разработки настройщиков в контурах скорости и тока якоря электродвигателя.

Оперативное обучение нейронной сети для отслеживания изменений, происходящих в рассматриваемых контурах, осуществляется с помощью метода обратного распространения ошибки [161]. Настройщик вызывается дискретно раз в Δt секунд, и, соответственно, производится одна итерация данного метода. В соответствии с его математической моделью (2.4), ошибка обучения для каждого из нейронов выходного слоя имеет свое значение. Для нейрона, отвечающего за K_i , $e_2(t)$ – это текущее значение рассогласования между заданием и выходом объекта управления. Для нейрона, отвечающего за K_{II} , $e_1(t)$ – это значение скорости изменения данного рассогласования. При этом, прочие требования к качеству переходного процесса (кроме минимизации рассогласования) заданы технологической инструкцией и помещены в условия правил.

$$\begin{aligned}\Delta\omega_{kj}^{(2)}(t) &= \eta_k^{(2)} \delta_k^{(2)} O_j^{(1)}, \\ \Delta b_k^{(2)}(t) &= \eta_k^{(2)} \delta_k^{(2)}, \\ \delta_k^{(2)} &= e_k \frac{dO_k^{(2)}}{ds_k^{(2)}}, \quad k = \overline{1, 2}, \\ e_2(t) &= r(t) - y(t), \\ e_1(t) &= e_2(t) - e_2(t-1),\end{aligned}\tag{2.4}$$

где $r(t)$ – это задание по току, $y(t)$ – это фактическое значение тока якоря, $\eta_k^{(2)}$ – скорость обучения k -го выходного нейрона, $\delta_k^{(2)}$ и e_k – это совокупная ошибка и ошибка k -го выходного нейрона, $dO_k^{(2)}/ds_k^{(2)}$ – это производная $f^{(2)}$.

Важной проблемой является выбор значения $\eta_k^{(2)}$ ($k = 1, 2$). Если она равна нулю, то на данном такте работы настройщика обучение вообще не производится. $\eta_1^{(2)}$ и $\eta_2^{(2)}$ должны иметь различные значения, поскольку амплитуда K_{II} и K_I обычно имеют различный порядок. И именно значения этих переменных вычисляются с помощью база правил, разработанной для нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора тока якоря и нейросетевого настройщика параметров П-регулятора скорости.

Далее приведен алгоритм работы настройщика. Если начальное состояние нейронной сети не задано, то необходимо это сделать. Это достигается методом экстремального обучения нейронной сети [142, 24]. Целью такого обучения

является формирование на выходе нейронной сети коэффициентов регулятора, использовавшихся в контуре управления током до внедрения настройщика. Для проведения подобного обучения автономная обучающая выборка не требуется, данные оперативно собираются первые N_{hid} тактов работы настройщика в оперативном режиме (N_{hid} – количество нейронов в скрытом слое).

Далее устанавливаются значения $\eta_1^{(2)} = 0$ и $\eta_2^{(2)} = 0$ и производится вызов базы правил. Если какое-либо из правил сработало и $\eta_1^{(2)} \neq 0$ или $\eta_2^{(2)} \neq 0$, то проводится одна итерация метода обратного распространения ошибки.

Таким образом, зависимость коэффициентов настраиваемых линейных регуляторов от качества переходных процессов будет выглядеть следующим образом:

$$y_j = \sum_{i=1}^N \left(\omega_{ji}^{(2)}(t) \sigma \left(\sum_{k=1}^L \left(\omega_{ik}^{(1)}(t) \cdot x_i \right) + b_j^{(1)}(t) \right) \right) + b_j^{(2)}(t)$$

где $j = 1, \dots, M$

M – число выходов

N – число нейронов в скрытом слое

$W^{(1)}$ [$M \times N$] – матрица весов скрытый-входной слою

L – число входов нейронной сети

$B^{(1)}$ – смещения скрытых нейронов

$W^{(2)}$ – матрица весов скрытый-выходной слой

σ – сигмоидальная функция активации

Весовые коэффициенты и смещения изменяют свои значения с течением времени ввиду оперативного обучения нейронной сети (2.4), которое производится в соответствии с базой правил, отслеживающей качество переходных процессов. Далее рассмотрим базу правил.

2.1.2 Исследование зависимости качества переходных процессов от коэффициентов настраиваемых линейных регуляторов

Скорости обучения и моменты, когда необходимо производить обучение, определяются базой правил, производящей качественные оценки реакции контуров управления на изменения задания. Задание для регулятора скорости представляет

собой линейно изменяющийся сигнал, который перестает изменяться при достижении предельного значения. А для контура тока заданием является выход регулятора скорости, поэтому потребуется две разные базы правил для настройщиков тока якоря и скорости электродвигателя.

2.1.2.1 База правил для настройщика ПИ-регулятора контура тока

В работах [63, 130, 129, 23] выявлены основные ситуации при неоптимальных параметрах ПИ-регулятора контура тока (рис. 2.4).

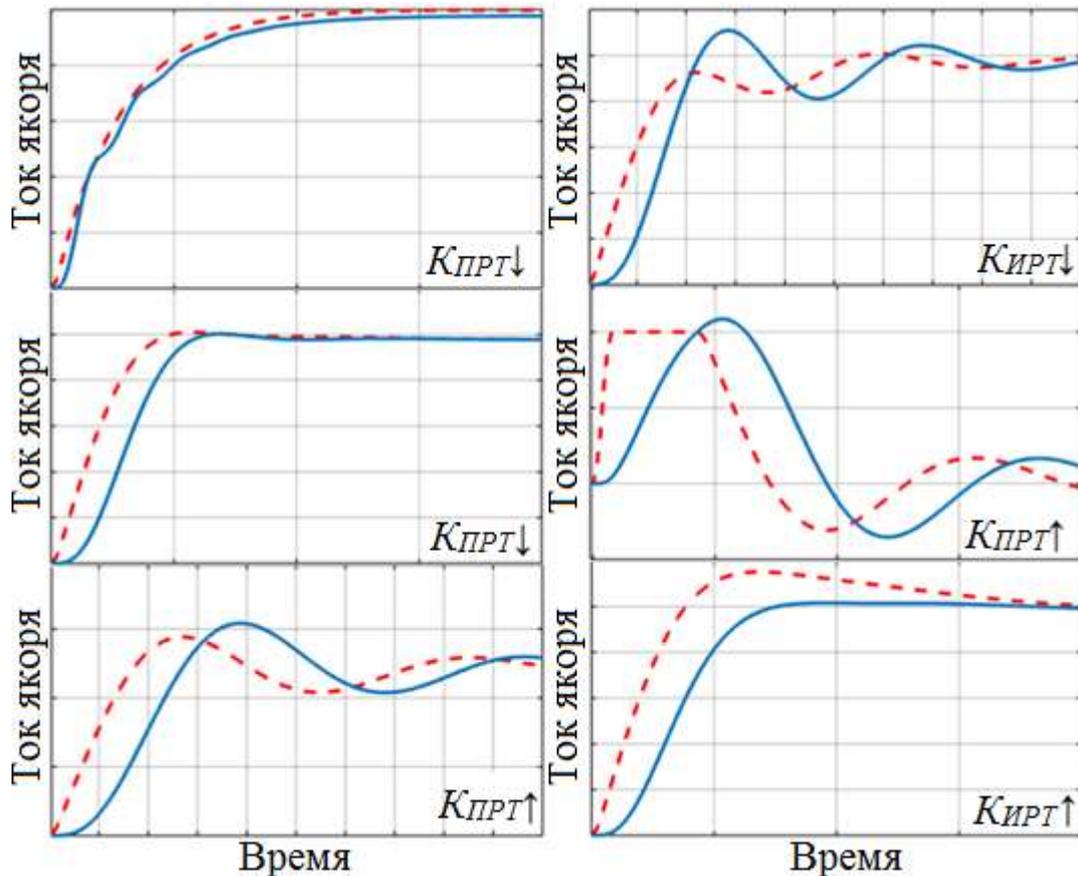


Рис. 2.4 – Основные ситуации при неоптимальных параметрах ПИ-регулятора контура тока

На их основе построена база правил:

ЕСЛИ не производилась настройка $K_{ИРТ}$, И после достижения первого экстремума кривой тока якоря, и до достижения второго экстремума этой кривой не было выявлено факта пересечения кривых тока и задания, ТО необходимо уменьшить $K_{ПРТ}$ ($\eta_1^{(2)}$ вычисляется как произведение текущего значения $K_{ПРТ}$ и модуля рассогласования между заданием по току и током).

ЕСЛИ был выявлен факт пересечения кривых тока и задания до достижения первого экстремума кривой задания, ТО необходимо уменьшить $K_{ПРТ} (\eta_1^{(2)})$ на один порядок меньше текущего значения $K_{ПРТ}$.

ЕСЛИ на данном переходном процессе не производилась настройка $K_{ПРТ}$, И пик задания по току меньше максимально допустимого, И первый пик тока более чем на 3% превышает первый экстремум задания по току, И второй экстремум тока превышает второй пик задания ИЛИ второй пик задания выше первого пика задания, ТО, необходимо уменьшить $K_{ИРТ} (\eta_2^{(2)})$ на два порядка меньше текущего значения $K_{ИРТ}$.

ЕСЛИ определены первый и второй пики кривых тока и задания, И количество пересечений этих кривых между первым и вторым пиками задания более одного, ТО необходимо уменьшить $K_{ПРТ} (\eta_1^{(2)})$ на один порядок меньше текущего значения $K_{ПРТ}$.

ЕСЛИ модуль амплитудного значения пика тока составляет менее 80% от модуля амплитудного значения пика задания, ТО необходимо увеличить $K_{ПРТ} (\eta_1^{(2)})$ равно произведению текущего $K_{ПРТ}$ и отношения экстремума задания к экстремуму тока).

ЕСЛИ экстремум задания и текущее значение задания равны максимально допустимому току, И не производилось уменьшение $K_{ПРТ}$ на данном шаге, И экстремум тока превышает экстремум задания (но не более, чем на 10%), И вторые экстремумы тока и задания еще не достигнуты, И модуль текущего значения тока меньше модуля текущего значения задания, ТО необходимо увеличивать $K_{ИРТ} (\eta_2^{(2)})$ на два порядка меньше текущего значения $K_{ИРТ}$.

ЕСЛИ достигнуты первые пики для кривых тока и задания и модуль экстремума задания равен максимально допустимому току, И модуль экстремума тока больше модуля экстремума задания (более, чем на 3%), И кривая тока достигла экстремума в момент, когда кривая задания отклонилась от своего пикового значения более чем на 20% по амплитуде, то необходимо увеличивать $K_{ПРТ} (\eta_1^{(2)})$ равно произведению текущего $K_{ПРТ}$ и отношения экстремума тока к экстремуму задания).

ЕСЛИ не производилось уменьшение $K_{ПРТ}$ на данном переходном процессе, И достигнуты первые и вторые экстремумы кривых тока и задания, И модуль экстремума задания меньше максимально допустимого тока, И модуль экстремума тока больше модуля экстремума задания не более, чем на 3%, И модуль второго экстремума тока меньше модуля второго экстремума задания, ТО необходимо увеличить $K_{ПРТ}$ ($\eta_1^{(2)}$ равно произведению текущего $K_{ПРТ}$ и отношения экстремума тока к экстремуму задания).

ЕСЛИ на текущем шаге не изменялось значение $K_{ПРТ}$, И достигнуты первые и вторые пики кривых тока и задания, И модуль экстремума тока больше модуля экстремума задания не более, чем на 3%, И модуль второго экстремума тока больше модуля второго экстремума задания, И количество пересечений кривых тока и задания между первым и вторым экстремумами задания меньше либо равно двум, ТО уменьшаем $K_{ПРТ}$ ($\eta_2^{(2)}$ на три порядка меньше текущего значения $K_{ПРТ}$).

2.1.2.2 База правил для П-регулятора контура скорости

В работе [16] выявлены основные ситуации при неоптимальных параметрах П-регулятора контура скорости (рис. 2.5).

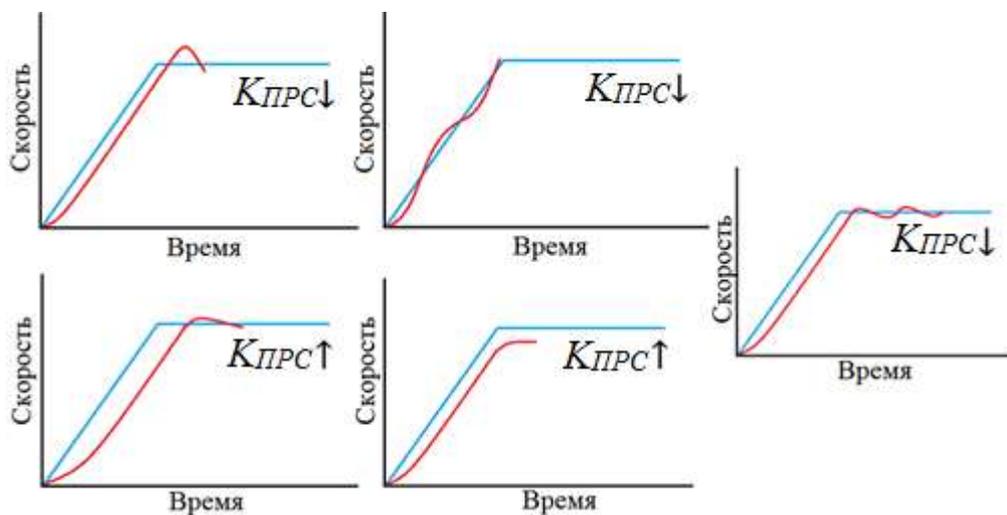


Рис. 2.5 – Основные ситуации при неоптимальных параметрах П-регулятора контура скорости

На их основе построена база правил:

ЕСЛИ перерегулирование превышает значение, выбранное оператором, ТО необходимо уменьшить $K_{ПРТ} (\eta_1^{(2)})$ на пять порядков меньше текущего значения $K_{ПРТ}$.

ЕСЛИ перерегулирование не достигает необходимого значения, выбранного оператором, ТО необходимо уменьшить $K_{ПРТ} (\eta_1^{(2)})$ на пять порядков меньше текущего значения $K_{ПРТ}$.

ЕСЛИ кривые задания и скорости пересекаются более двух раз, ТО необходимо уменьшить $K_{ПРТ} (\eta_1^{(2)})$ на пять порядков меньше текущего значения $K_{ПРТ}$.

ЕСЛИ кривая скорости приближается к кривой задания, ТО необходимо уменьшить $K_{ПРТ} (\eta_1^{(2)})$ на два порядка меньше текущего значения $K_{ПРТ}$.

ЕСЛИ переходный процесс завершился, И кривая скорости не достигла кривой задания, ТО необходимо увеличить $K_{ПРТ} (\eta_1^{(2)})$ на три порядка меньше текущего значения $K_{ПРТ}$.

Далее необходимо проверить работоспособность разработанной базы правил. Ниже приведено описание экспериментов на математической модели главного электропривода прокатной клетки.

2.2. Экспериментальная часть

Для проведения экспериментов по применению нейросетевого настройщика в контурах управления скорость и ток необходимо построить модель главного электропривода прокатной клетки. Для этого воспользуемся параметрами реальной ДУО-реверсивной прокатной клетки 1000 АО «ОЭМК».

2.2.1 Построение модели главного электропривода прокатной клетки

В качестве основного оборудования системы управления главным электроприводом прокатной клетки приняты:

1. Электродвигатель постоянного тока с независимым возбуждением типа 1JW5539-5DK07-Z-001 (Номинальная мощность электродвигателя 3500 кВт; пределы регулирования скорости вращения $0 \div 60/150$ об/мин; номинальный ток якоря 3865А; максимальный ток якоря 10630 А; номинальное напряжение якоря

997 В; номинальный ток возбуждения 270 А; номинальное напряжение возбуждения 95 В).

Номинальная угловая частота двигателя:

$$\omega_H = \frac{\pi \times n_H}{30};$$

$$\omega_H = \frac{3,14 \times 60}{30} = 6,28 \text{ рад/с.}$$

Суммарная индуктивность якорной цепи:

$$L_{я} = k_k \times \frac{U_H}{p \times \pi \times \omega_H \times I_H};$$

$$L_{я} = \frac{0,25 \times 997}{7 \times 3,14 \times 6,3 \times 3865} = 0,0004667 \text{ Гн.}$$

Конструктивная постоянная двигателя по ЭДС:

$$c = \frac{U_H - I_{я.н} \times R_{я.д}}{\omega_H}$$

$$c = \frac{911,84}{6,28} = 145,124 \text{ (В} \times \text{с)/рад.}$$

2. Трансформатор цепи якоря Geafol типа TGEJ 6841 К (номинальная мощность 5900 кВА; номинальное напряжение первичной обмотки 10 кВ; номинальный ток первичной обмотки 341 А; номинальное напряжение вторичной обмотки 975 В; номинальный ток вторичной обмотки 3494 А).

3. Трансформатор цепи возбуждения Geafol типа TGEJ 5329 К (номинальная мощность 180 кВА; номинальное напряжение первичной обмотки 380 В; номинальный ток первичной обмотки 273 А; номинальное напряжение вторичной обмотки 415 В; номинальный ток вторичной обмотки 250 А).

4. Тиристорный преобразователь в цепи якоря – Sitor типа D997G1347/9655 MREQ-352Z/G4TGF (номинальное входное напряжение 997 В; номинальный выходной ток 9655 А).

5. Тиристорный преобразователь в цепи возбуждения – Sitor типа M-B6C 380/512-420F-947 (номинальное входное напряжение 380 В; номинальное выходное напряжение 512 В; номинальный выходной ток 420 А).

В данном приводе применяется система двухзонного регулирования. Управление скоростью вращения производится как изменением напряжения на якоре, так и изменением потока возбуждения. Структурная схема системы управления представлена на рис. 1.5.

Сопротивление якорной цепи:

$$R_{я\Sigma} = \beta_T (R_{я20^\circ} + R_{к020^\circ} + R_{дп20^\circ}),$$

где β_T – температурный коэффициент.

$$R_{я\Sigma} = 1,34(0,0074 + 0,009) = 0,022 \text{ Ом}$$

Активное сопротивление цепи возбуждения:

$$R_B = \beta_T \times R_{B20},$$

где $R_{B20} = 0,257 \text{ Ом}$ – сопротивление “холодной” обмотки возбуждения. $R_B = 1,34 \times 0,257 = 0,345 \text{ Ом}$.

Индуктивность главной цепи:

$$L_{\Sigma} = L_{я} + L_{тр.ф.} + L_{др},$$

где $L_{я} = 0,467 \text{ мГн}$ – индуктивность обмотки якоря; $L_{др} = 0,4 \text{ мГн}$ – индуктивность дросселя; $L_{тр.ф.} = 0,00003 \text{ мГн}$ – индуктивность трансформатора; $L_{\Sigma} = 0,0004 \text{ Гн}$.

Постоянная времени якоря:

$$T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я\Sigma}};$$

$$T_{я} = \frac{0,467 \times 10^{-3}}{0,022} = 0,021 \text{ с.}$$

Электромагнитная постоянная времени главной цепи:

$$T_{\Sigma} = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} \text{ с.}$$

Постоянная времени цепи возбуждения:

$$T_B = \frac{L_B}{R_B};$$

$$T_B = \frac{1,4}{0,345} = 4,064 \text{ с.}$$

Электрохимическая постоянная времени:

$$T_M = \frac{J_{np} \times R_{\Sigma}}{k\Phi^2};$$

$$T_M = \frac{4,789 \times 10^3 \times 0,024}{145,124^2} = 5,516 \times 10^{-3} \text{ с.}$$

Построенная модель основывается на использовании измеренных параметров электропривода и не учитывает изменения ОУ в процессе его работы.

2.2.2 Эксперименты с настройщиком в контуре тока

Модель для проведения экспериментов по применению нейросетевого настройщика в контуре тока, реализованная в программном пакете Matlab Simulink, представлена на рис. 2.6.

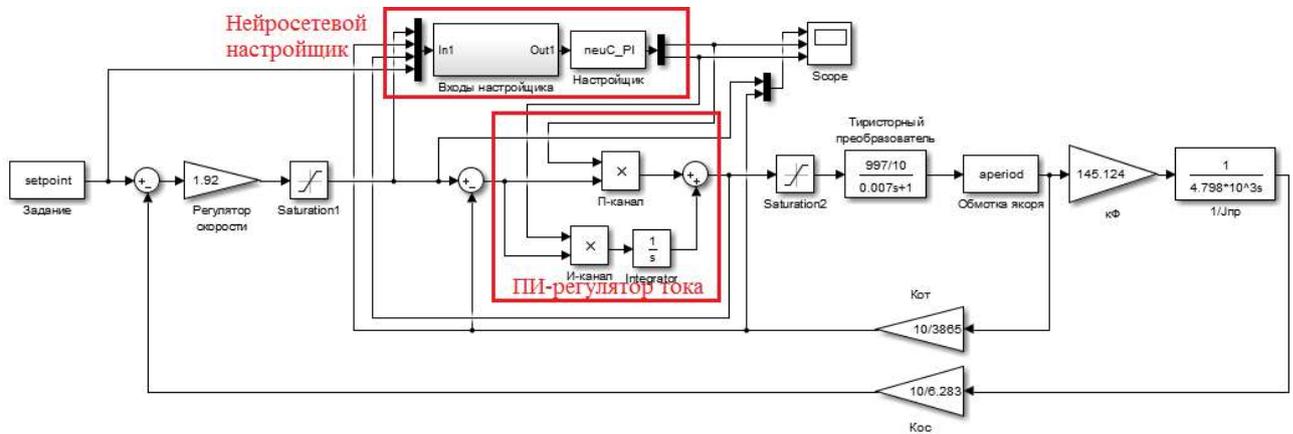


Рис. 2.6 – Модель главного электропривода двухвалковой реверсивной прокатной клети с нейросетевым настройщиком в контуре тока

В первой серии экспериментов проверялась способность настройщика возвращать коэффициенты ПИ-регулятора тока к указанным выше (рассчитанным на технический оптимум). Проведено девять экспериментов с различными комбинациями коэффициентов. Результаты приведены в табл. 2.1. Система управления начинала работу с коэффициентов $K_{ПРТ.нач}$ и $K_{ИРТ.нач}$, в процессе работы системы настройщик в соответствии с базой правил изменял коэффициенты. Конечные коэффициенты ($K_{ПРТ.кон}$ и $K_{ИРТ.кон}$) указаны в таблице. Также в таблице указаны относительные разности $\Delta K_{ПРТ}$, $\Delta K_{ИРТ}$ конечных коэффициентов и рассчитанных.

Количество смен задания по скорости (n) считалось до момента времени, когда переставали срабатывать правила.

Таблица 2.1 – Результаты первой серии экспериментов

№	$K_{ПРТ.нач}$	$K_{ИРТ.нач}$	$K_{ПРТ.кон}$	$K_{ИРТ.кон}$	$\Delta K_{ПРТ}, \%$	$\Delta K_{ИРТ}, \%$	n
1	0.489	13.65	0.489	13.65	0	0	—
2	0.733	13.65	0.483	13.65	1.23	0	1
3	0.244	13.65	0.482	14.17	1.43	3.82	18
4	0.489	20.47	0.501	14.34	2.45	5.06	1
5	0.489	6.824	0.482	14.15	1.43	3.67	9
6	0.733	20.47	0.521	14.48	6.54	6.08	20
7	0.244	20.47	0.474	13.83	3.15	1.33	9
8	0.733	6.824	0.499	13.76	2.13	0.81	6
9	0.244	6.824	0.477	13.95	2.52	2.21	14

На рис. 2.7 представлены графики для седьмого эксперимента первой серии.

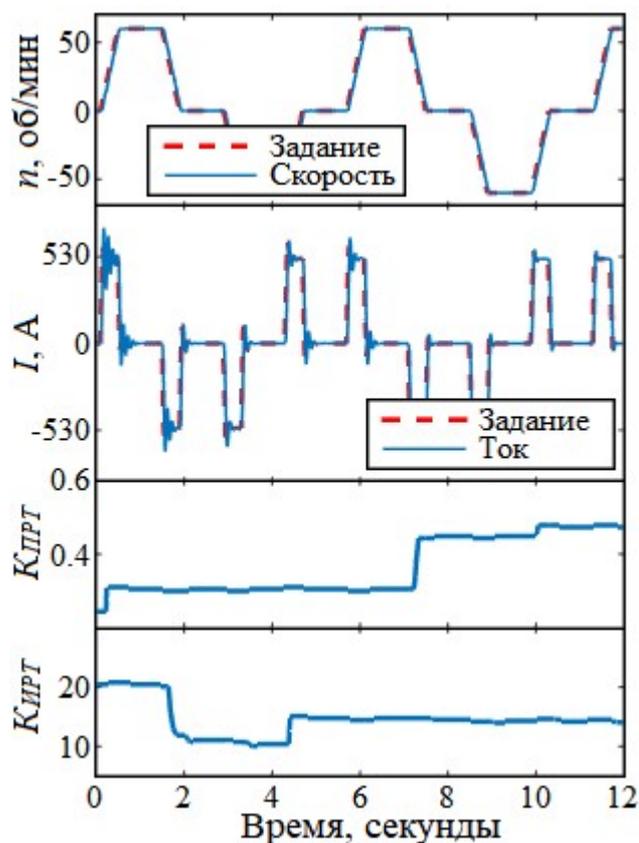


Рис. 2.7 – Графики настройки параметров регулятора тока

На рис. 2.8 изображены переходный процесс по току до настройки (первый переходный процесс на рис. 2.7) (а) и после (б) (последний переходный процесс на рис. 2.7). Перерегулирование было снижено на 19%, а также уменьшена колебательность. В результате работы настройщика отклонение параметров $K_{ПРТ}$ и $K_{ИРТ}$ контура тока от расчетных составили в среднем менее 3%.

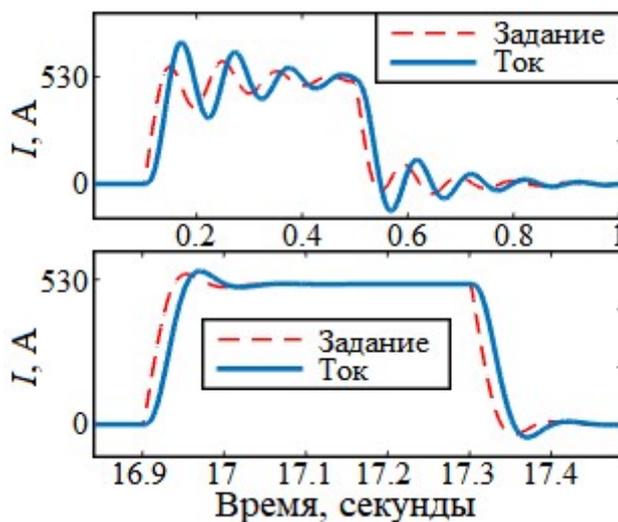


Рис. 2.8 – Вид начальных и полученных в результате настройки параметров регулятора переходных процессов для контура тока

Во второй серии экспериментов с помощью блока *aperiod* моделировалось изменение коэффициента усиления ($k_{OЯ}$) аperiодического звена, моделирующего обмотку якоря двигателя постоянного тока в пределах 80% ÷ 120% от номинального значения. Подобное изменение коэффициента усиления звена, описывающего обмотку якоря, можно объяснить изменением сопротивления обмотки при изменении температуры двигателя. Подобные эксперименты проводились для систем управления с использованием нейросетевого настройщика и без него.

На рис. 2.9 показано изменение параметров обмотки якоря, графики для настраиваемых параметров регулятора $K_{ПРТ}$, $K_{ИРТ}$, переходные процессы в контуре тока и контуре скорости для системы управления с нейросетевым настройщиком ПИ-регулятора контура тока. Качество протекания переходных процессов (определенное правилами) по току и скорости сохранялось на протяжении всего

эксперимента вне зависимости от изменения параметров объекта управления (рис. 2.9).

Рассмотрим подробнее момент времени в районе 135 секунд от начала моделирования, поскольку настройщик максимально изменил значения параметров регулятора.

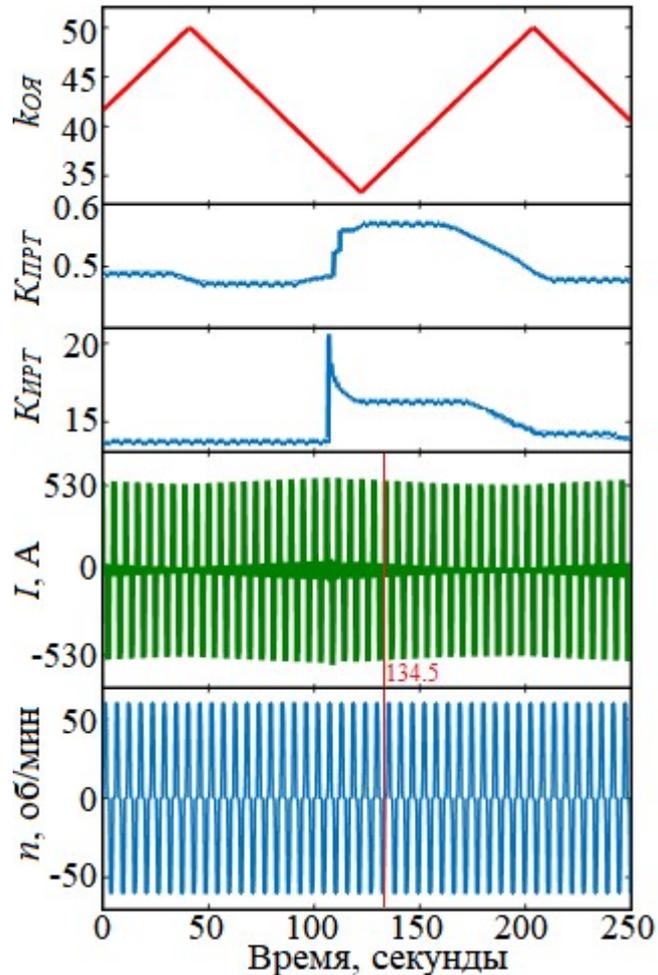


Рис. 2.9 – Результаты экспериментов для системы управления с нейросетевым настройщиком для случая с дрейфом параметров модели ЯЦ.

На рис. 2.10 приведены переходные процессы по току якоря для систем с настройщиком параметров ПИ-регулятора (PI+NT) и без него (PI) для выбранного момента времени. Нейросетевая настройка параметров регулятора тока позволяет снизить влияние дрейфа параметров ОЯ на качество переходных процессов, сохранив перерегулирование по току в 3% (в соответствии с базой правил) относительно системы без настройки, где пик кривой тока оказался ниже кривой

задания. Также амплитудное значение пика тока для системы с настройкой оказалось на 3% ниже по сравнению с системой с обычным ПИ-регулятором.

Суммарный сигнал управления за время эксперимента для системы с нейросетевым настройщиком и без него составил 37510 и 38260 единиц соответственно. Тем самым энергоэффективность составила 2%.

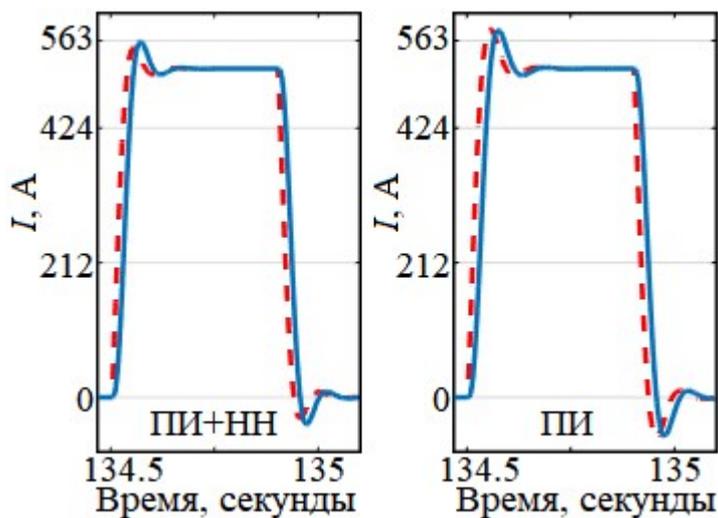


Рис. 2.10 – Сравнение переходного процесса по току для систем с нейросетевым (ПИ+НН) настройщиком и без него (ПИ)

В третьей серии экспериментов с помощью блока *aperiod* моделировалось изменение электромагнитной постоянной главного электропривода прокатной клетки в процессе работы.

Результаты моделирования показаны на рис. 2.11.

В ходе эксперимента изменялась электромагнитная постоянная времени в пределах $0.8 \cdot T_{\text{э}} \div 1.2 \cdot T_{\text{э}}$. В соответствии с изменением объекта управления нейросетевой настройщик изменял коэффициенты ПИ-регулятора тока в режиме реального времени. Это позволило сохранить требуемое качество регулирования на протяжении всего эксперимента. Также, по сравнению с аналогичной системой управления, но без адаптации параметров ПИ-регулятора тока, система управления с настройщиком позволила снизить энергопотребление на 2% за время эксперимента.

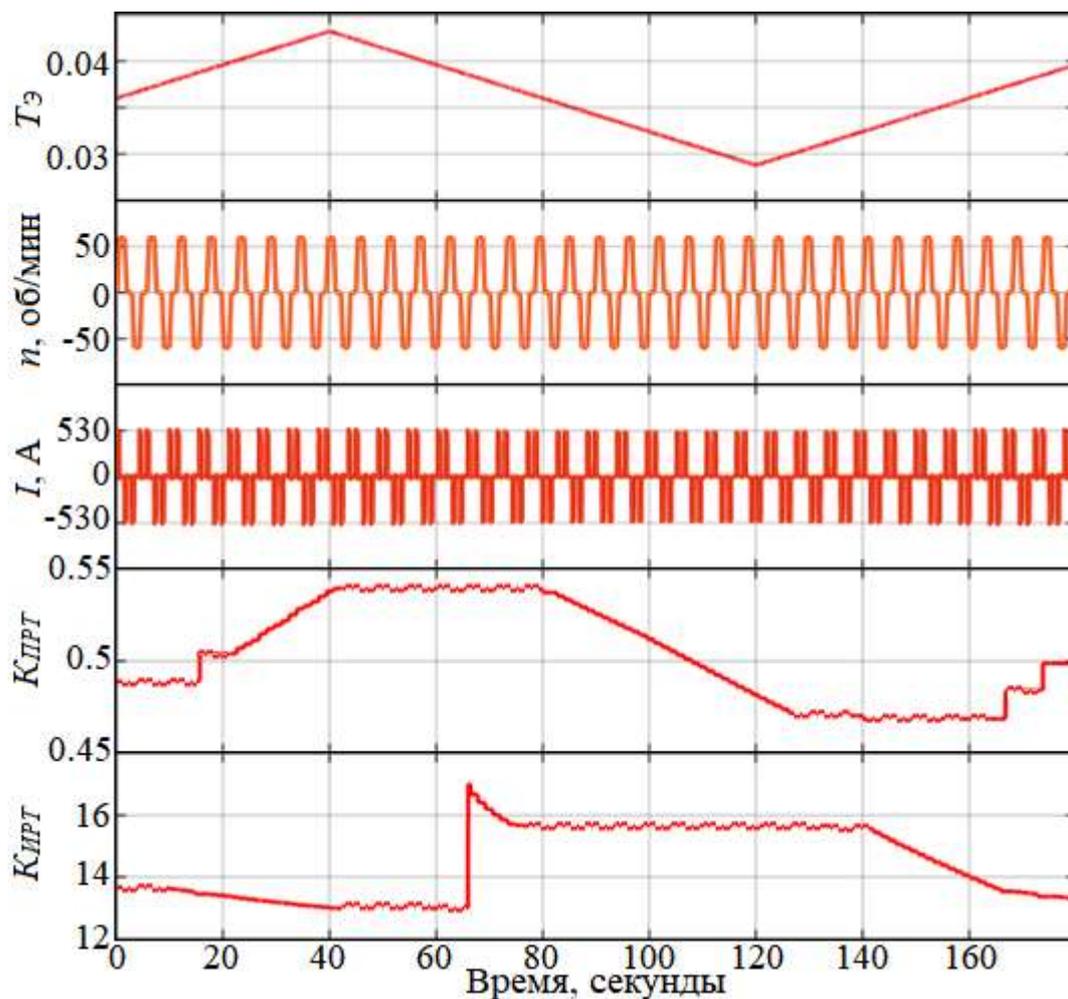


Рис. 2.11 – Результаты экспериментов при дрейфе электромагнитной постоянной

2.2.3 Эксперименты с настройщиком в контуре скорости

Модель для проведения экспериментов по применению нейросетевого настройщика в контуре скорости, реализованная в программном пакете Matlab Simulink, представлена на рис. 2.12.

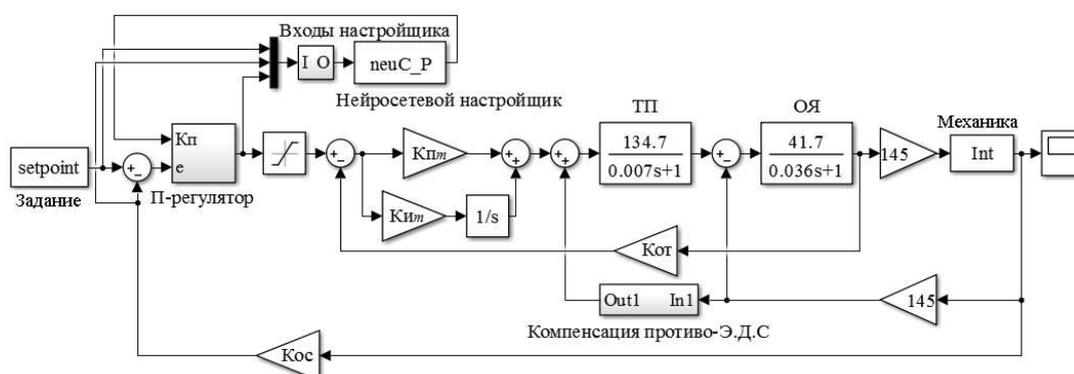


Рис. 2.12 – Модель системы управления электроприводом с нейросетевым настройщиком в контуре скорости

Задание по скорости выполнено в виде S-функции *setpoint*, и реализует следующую последовательность уставок: 0 об/мин (0 В) → 60 об/мин (4 В) → 0 об/мин (0 В) → -60 об/мин (-4 В). Исходя из максимального ускорения рассматриваемого электропривода сигнал задания изменялся линейно со скоростью 8 В/с. Время работы на установившейся скорости равно 1 секунде.

В первой серии экспериментов проводилось моделирование с неоптимальным $K_{ПРС}$ регулятора скорости. На рис. 2.13 приведены результаты моделирования с $K_{ПРС}$, увеличенным на 50%. Нейросетевой настройщик вернул $K_{ПРС}$ к оптимальному значению, что позволило снизить перерегулирование в контуре скорости (рис. 2.14).

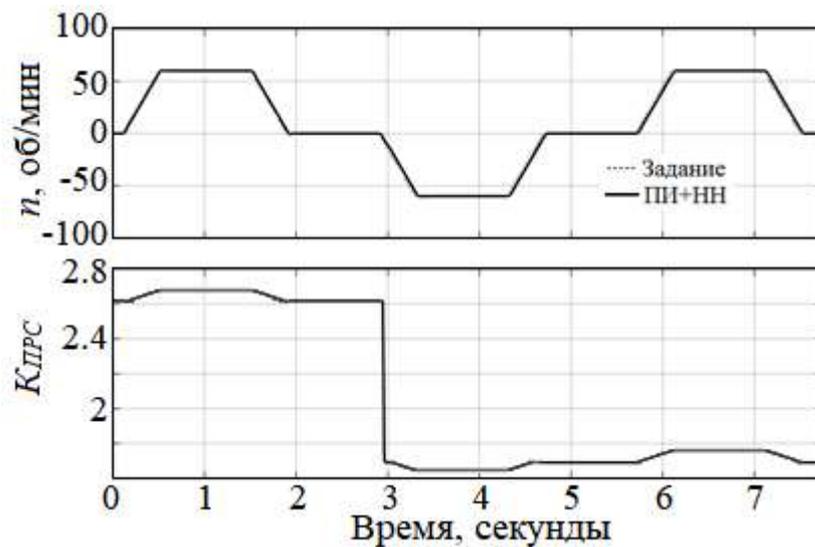


Рис. 2.13 – Результаты эксперимента с $K_{ПРС}$, увеличенным на 50%.

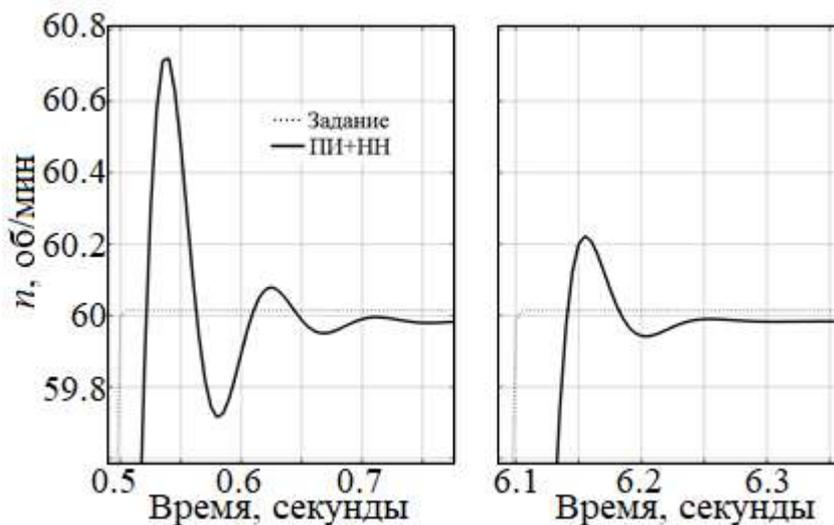


Рис. 2.14 – Результаты эксперимента с $K_{ПРС}$, увеличенным на 50%.

На рис. 2.15 приведены результаты моделирования с $K_{ДРС}$, сниженным на 50%. Нейросетевой настройщик вернул $K_{ДРС}$ к оптимальному значению, что позволило повысить динамику контура скорости (рис. 2.16).

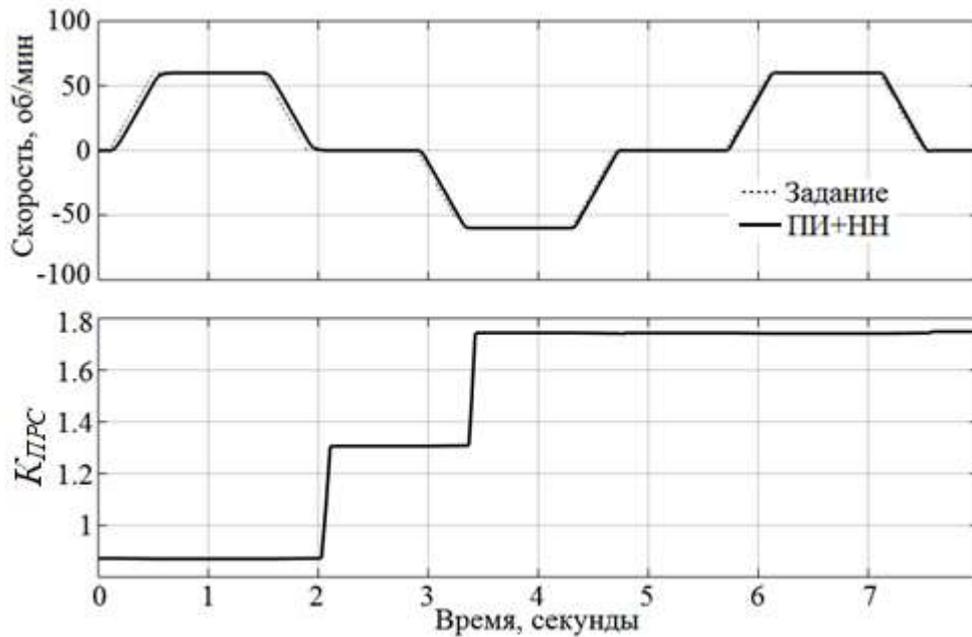


Рис. 2.15 – Результаты эксперимента с $K_{ДРС}$, сниженным на 50%.

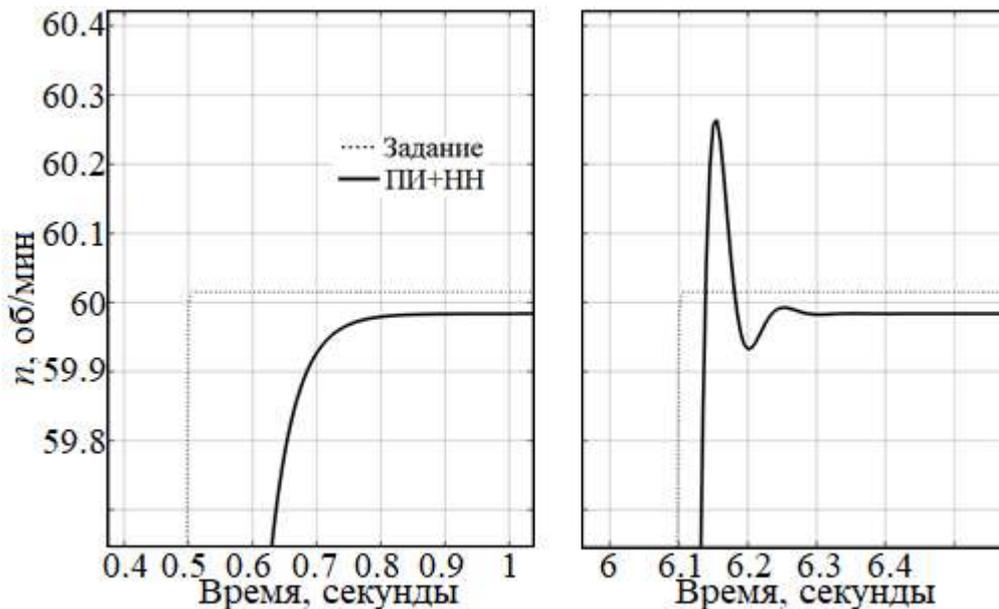


Рис. 2.16 – Результаты эксперимента с $K_{ДРС}$, сниженным на 50%.

Во второй серии экспериментов с помощью блока *Int* моделировалось изменение момента инерции механической части электропривода прокатной клетки (J) в пределах 50% ÷ 150% от номинального значения. Подобные эксперименты

проводились для систем управления с использованием нейросетевого настройщика и без него.

На рис. 2.17 показано изменение параметров J , график для настраиваемого параметра регулятора $K_{ПРС}$, а также переходные процессы для скорости вращения валков для системы управления с нейросетевым настройщиком П-регулятора.

Качество переходных процессов по скорости (определенное правилами), в частности требуемое перерегулирование в районе 0.5% от значения уставки, сохранялось на протяжении всего эксперимента вне зависимости от изменения параметров объекта управления (рис. 2.17). Кроме того, кривая изменения $K_{ПРС}$ по форме, в целом, повторяет кривую изменения J .

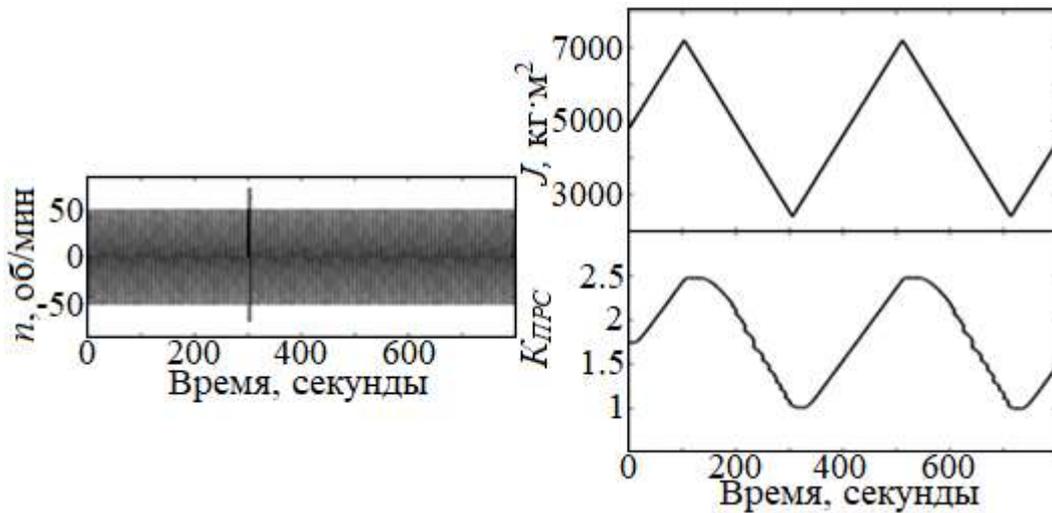


Рис. 2.17 – Результаты эксперимента с дрейфом J

Рассмотрим подробнее момент времени в районе 303 секунд от начала моделирования (рис. 2.18), поскольку эта ситуация максимально неблагоприятна для настройщика – динамика механической части возросла в 2 раза.

На указанных рисунках приведены переходные процессы по току якоря для систем с настройщиком параметров П-регулятора (П+НН) и без него (П) соответственно для выбранного момента времени. Перерегулирование для системы П+НН составило 0,8% от уставки, для системы П – 1,7% (при требуемом значении 0,5%). Тем самым, нейросетевая настройка параметров регулятора тока позволяет снизить влияние дрейфа параметров механической части привода на качество переходных процессов.

Суммарный сигнал управления за время эксперимента для системы с нейросетевым настройщиком и без него составил 118080 и 120494 единиц соответственно. Тем самым экономия потребления электроэнергии составила 2%.

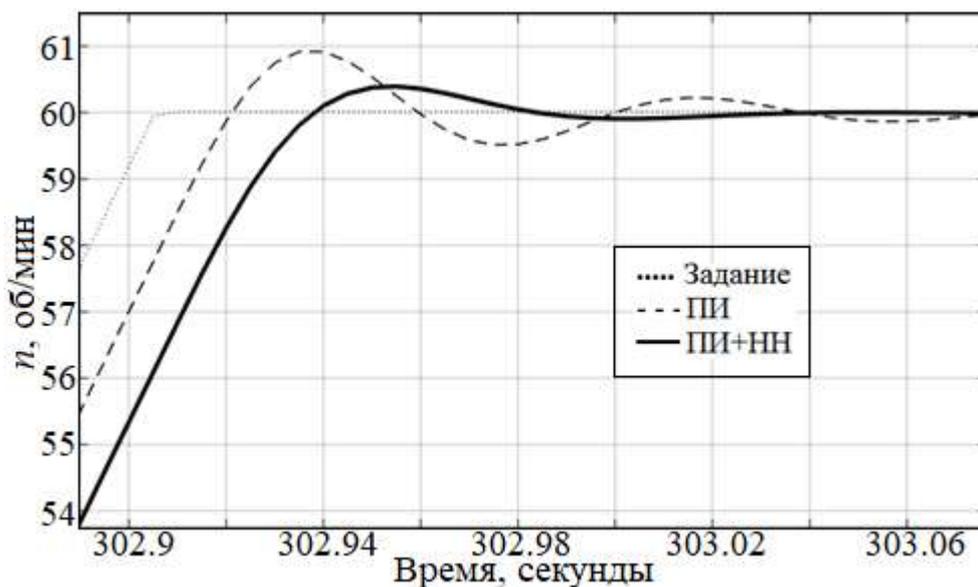


Рис. 2.18 – Результаты эксперимента с дрейфом J

Для демонстрации работоспособности настройщика в различных условиях работы электропривода был проведен ряд сходных экспериментов с измененной интенсивностью изменения задания по скорости: она находилась в пределах от 0.001 до 4 (0.001, 0.005, 0.01, 0.1, 1, 4).

Проводилось две серии экспериментов. В первой серии эксперимент начинался с неоптимальной настройкой регулятора ($K_{ПРС.нач}$) для текущих параметров привода. Нейросетевой настройщик за n переходных процессов (учитывалось количество разгонов электропривода со скорости 0 об/мин до 60(-60) об/мин) возвращал настройку П-регулятора скорости ($K_{ПРС.кон}$). Рассчитана относительная разница конечного и номинального коэффициента П-регулятора скорости ($\Delta K_{ПРС}$). Результаты первой серии экспериментов отражены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты первой серии экспериментов

Интенсивность	$K_{ПРС.нач}$	$K_{ПРС.кон}$	$\Delta K_{ПРС}, \%$	n
4	2.6175	1.735	0.6	9
4	0.8725	1.744	0.1	10
1	2.6175	1.74	0.3	10
1	0.8725	1.74	0.3	8
0.1	2.6175	1.735	0.6	11
0.1	0.8725	1.73	0.8	12
0.01	2.6175	1.73	0.8	8
0.01	0.8725	1.75	0.3	7
0.005	2.6175	1.71	2	16
0.005	0.8725	1.7	2.6	13
0.001	2.6175	1.745	0	7
0.001	0.8725	1.71	2	6

На рис. 2.19 изображены результаты эксперимента с начальным $K_{ПРС.нач} = 2.6175$ и интенсивность 4. За 9 переходных процессов в контуре скорости нейросетевому настройщику удалось вернуть $K_{ПРС}$ к оптимальному значению с ошибкой $\Delta K_{ПРС} = 0.6\%$. Что позволило улучшить качество последнего переходного процесса в контуре скорости по сравнению с первым.

Во второй серии экспериментов моделировалось изменение механической постоянной времени электропривода. Нейросетевой настройщик должен был компенсировать дрейф механической постоянной времени электропривода изменяя настройку регулятора скорости. На графиках (рис. 2.20) приведены результаты эксперимента с интенсивностью. На графике (Е) приведены рассчитанные относительные разности фактических перерегулирований от заданных оператором ($\Delta\sigma$) для экспериментов с различными интенсивностями картины задания. Система с использованием нейросетевого настройщика (красные графики), по сравнению с системой без настройки (зеленые графики), во всех экспериментах позволила сохранить требуемое перерегулирование во время дрейфа механической части электропривода.

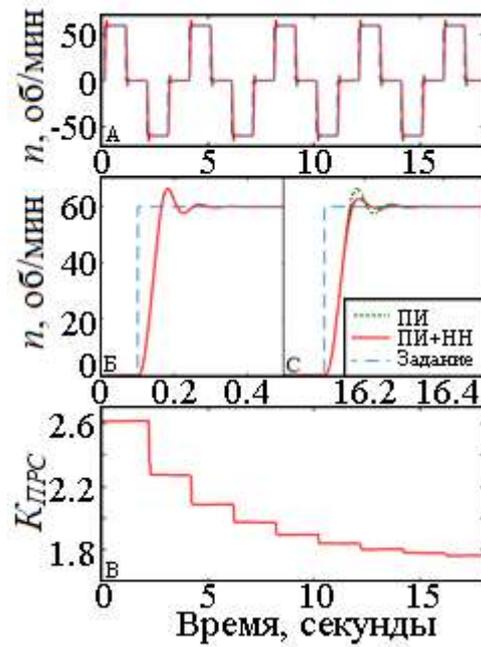


Рис. 2.19 - Результаты первой серии экспериментов ($K_{DPS.нач} = 2.6175$)

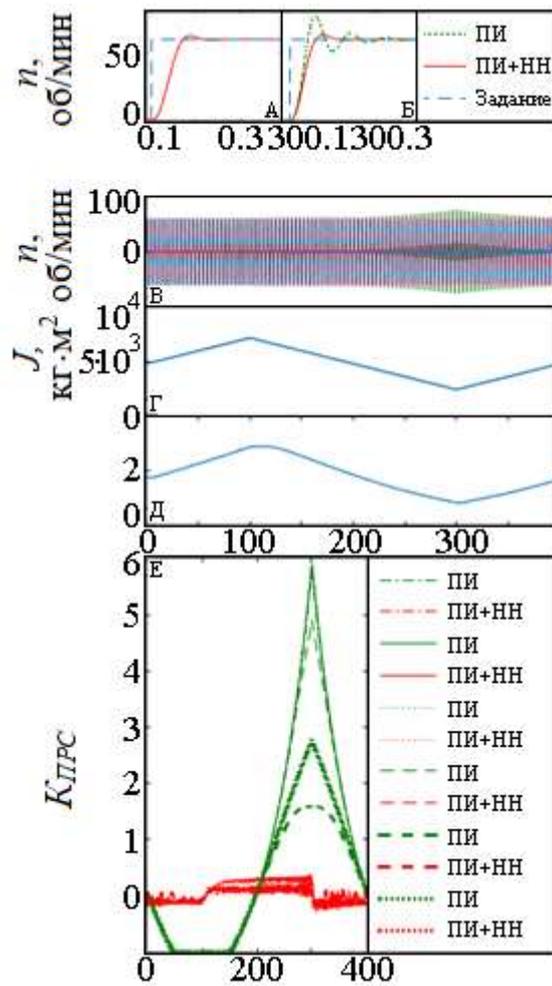


Рис. 2.20 – Результаты второй серии экспериментов

2.2.4. Разработка алгоритма совместной работы настройщиков

На реальном объекте невозможно выделить дрейф параметров конкретной части электропривода, поэтому наиболее эффективным будет использование настройщиков в контуре тока и скорости одновременно. Однако, в процессе совместной работы баз правил рассматриваемых настройщиков возникают противоречия. Рассмотрим правила, вызывающие «конфликтные» ситуации.

1. Правила настройщика тока:

– ЕСЛИ достигнуты первые пики для кривых тока и задания, И модуль экстремума задания равен максимально допустимому току, И экстремум тока больше экстремума задания (более чем на 3 %), И кривая тока достигла экстремума в момент, когда задание отклонилась от своего пика более чем на 20 % по амплитуде, то необходимо увеличить $K_{ПРТ}$.

– ЕСЛИ не производилось уменьшение $K_{ПРТ}$ на данном переходном процессе, И достигнуты первые и вторые экстремумы тока и задания, И экстремум задания меньше максимального тока, И экстремум тока больше экстремума задания не более, чем на 3 %, И второй экстремум тока меньше второго экстремума задания, ТО необходимо увеличить $K_{ПРТ}$.

2. Правила настройщика скорости:

– ЕСЛИ перерегулирование по скорости не достигает необходимого значения, выбранного оператором, И перерегулирование больше нуля, ТО необходимо увеличить $K_{ПРС}$.

– ЕСЛИ переходный процесс завершился, И кривая скорости не достигла кривой задания, ТО необходимо увеличить $K_{ПРС}$.

Для разграничения случаев срабатывания правил был разработан алгоритм, приведенный на рис. 2.21. Вызов нейросетевого настройщика регулятора скорости происходит, только если два и более переходных процессов в контуре скорости произошло без настройки регулятора тока. Настройщик регулятора тока может увеличивать значение $K_{ПРТ}$, используя упомянутые правила, только в случае если перерегулирование в контуре скорости попадает в допустимый диапазон.

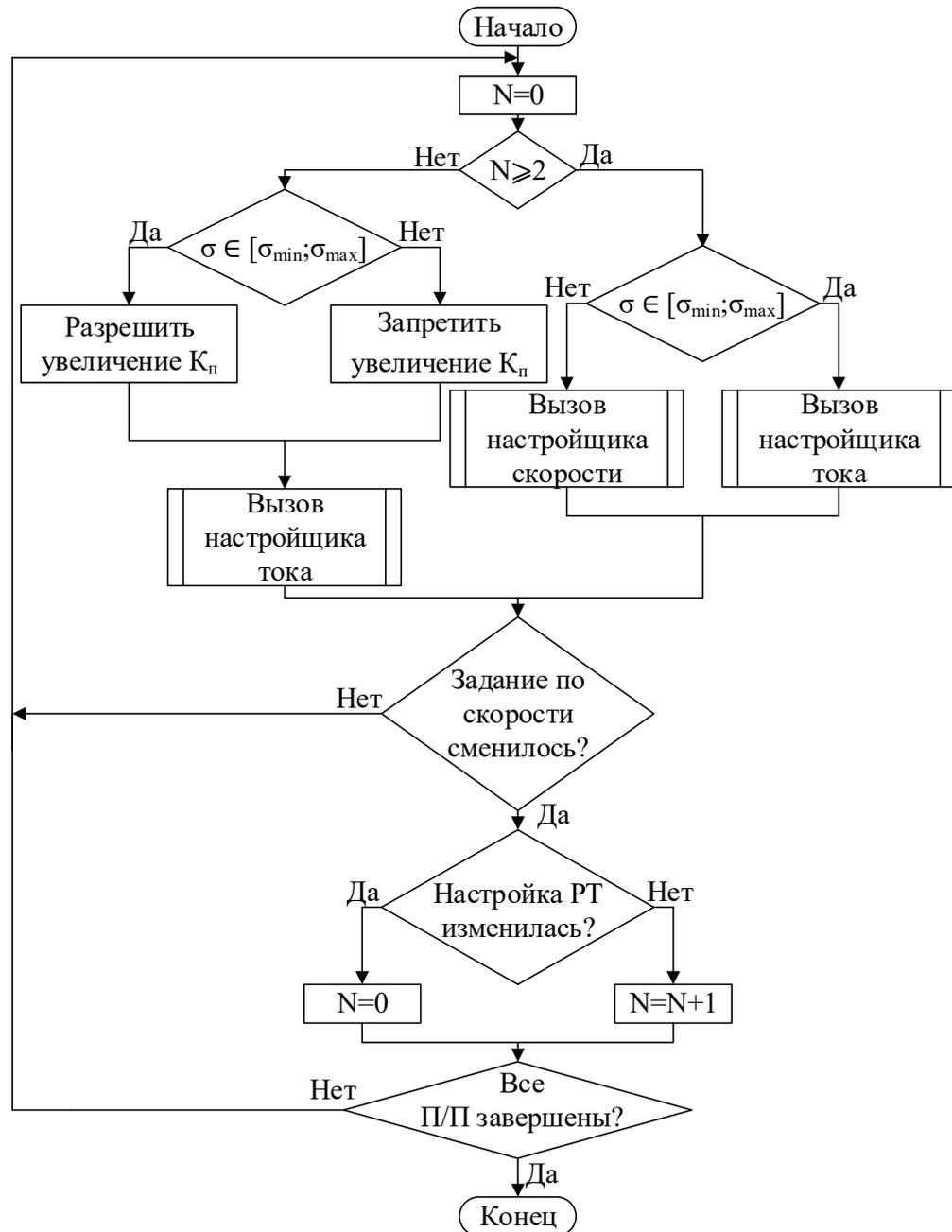


Рис. 2.21. Алгоритм совместной работы двух нейросетевых настройщиков: N – количество переходных процессов (П/П) в контуре скорости, на которых не производилась настройка РТ; σ – перерегулирование в контуре скорости; $[\sigma_{\min}; \sigma_{\max}]$ – допустимый диапазон значений перерегулирования в контуре скорости

Для проверки разработанного алгоритма проведено три эксперимента:

В первом опыте (рис. 2.22) моделировалось изменение параметров обмотки якоря электродвигателя. K_d и T_s изменялись в пределах 80÷120 % от номинальных значений (рис. 2.22, *е*, *ж*). В соответствии с разработанным алгоритмом

производилась настройка только регулятора тока (рис. 2.22 *з, д*), а база правил настройщика скорости не вызывалась.

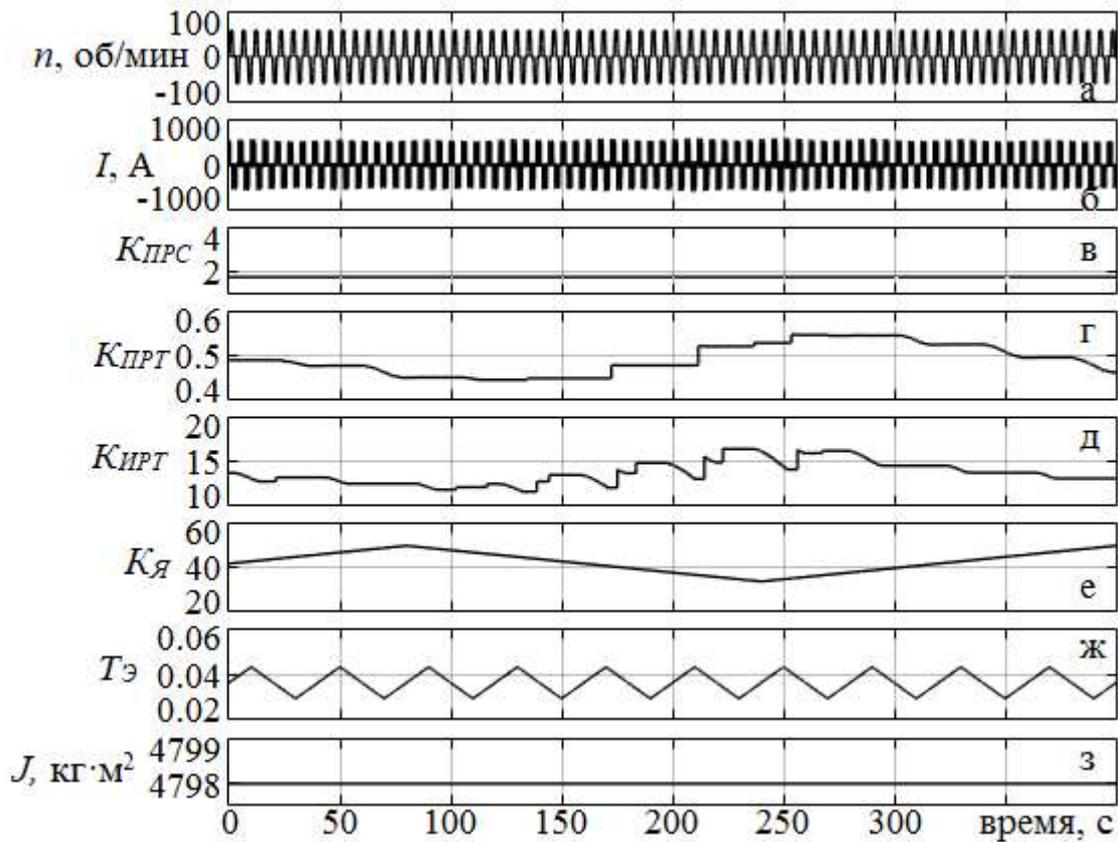


Рис. 2.22 – Эксперимент с дрейфом параметров обмотки якоря (а – скорость вращения, б – ток якоря, в – коэффициент пропорциональной части регулятора скорости, г – коэффициент пропорциональной части регулятора тока, д – коэффициент интегральной части регулятора тока, е – коэффициент усиления обмотки якоря, ж – постоянная времени обмотки якоря, з – момент инерции электропривода)

Во втором опыте (рис. 2.23) моделировалась обратная ситуация: изменялся момент инерции механической части электропривода J в пределах 50÷150 % от номинального значения (рис. 2.23, *з*). В данном эксперименте производилась только настройка контура скорости (рис. 2.23, *в*), а база правил настройщика контура тока не вызывалась. По результатам экспериментов можно сделать вывод

о том, что разработанный алгоритм позволил исключить «конфликтные» ситуации настройщиков тока и скорости.

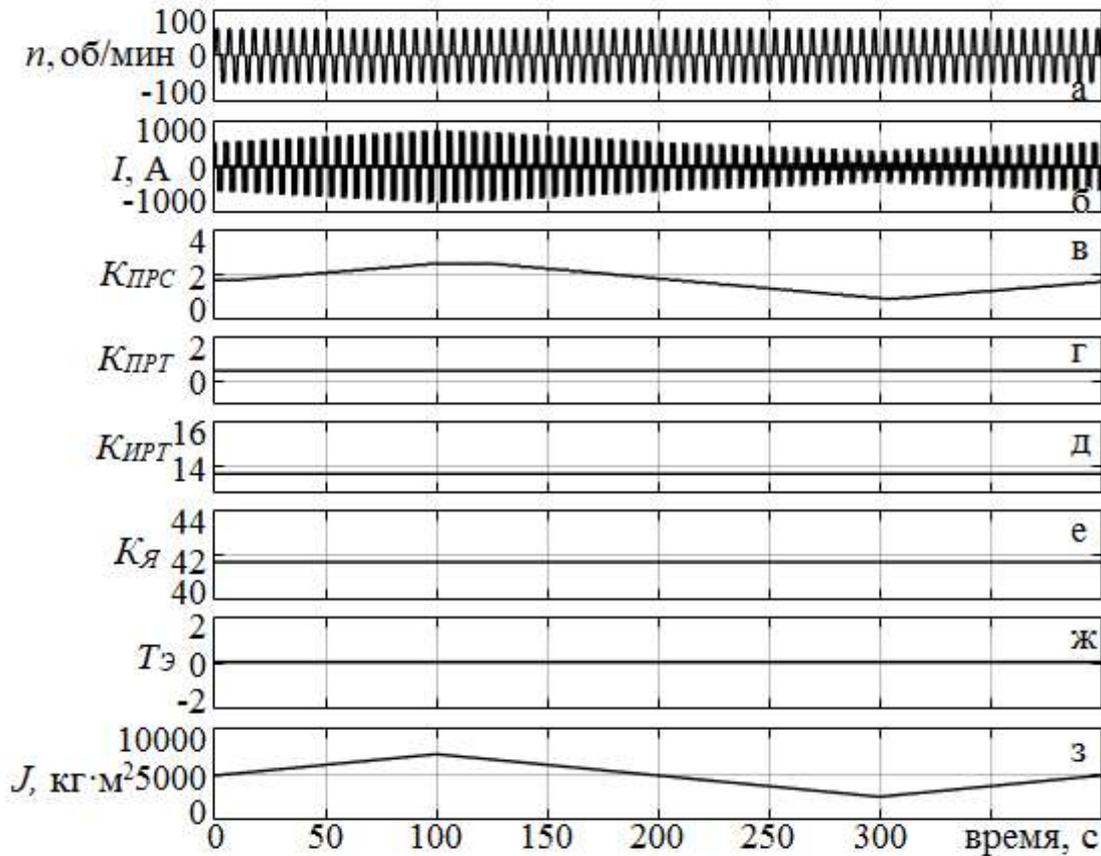


Рис. 2.23 – Эксперимент с дрейфом момента инерции электропривода (а – скорость вращения, б – ток якоря, в – коэффициент пропорциональной части регулятора скорости, г – коэффициент пропорциональной части регулятора тока, д – коэффициент интегральной части регулятора тока, е – коэффициент усиления обмотки якоря, ж – постоянная времени обмотки якоря, з – момент инерции электропривода)

На рис. 2.24 приведены результаты эксперимента, в котором одновременно изменялись параметры обмотки якоря двигателя (рис. 2.24, е, ж) и момент инерции механической части электропривода (рис. 2.24, з).

Совместное применение позволило снизить энергопотребление электропривода, по сравнению с системой без настройки, на 1.9 % за время эксперимента.

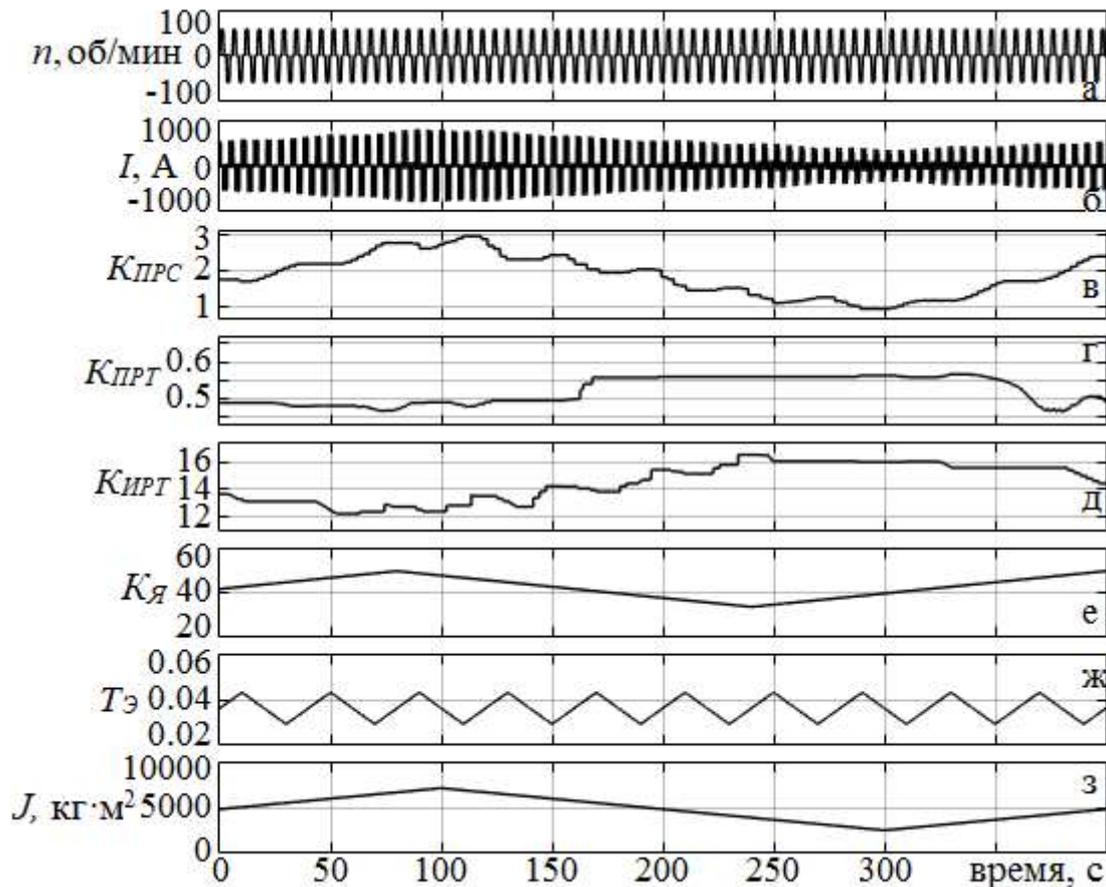


Рис. 2.24 - Эксперимент с дрейфом момента инерции электропривода и параметров обмотки якоря (а – скорость вращения, б – ток якоря, в – коэффициент пропорциональной части регулятора скорости, г – коэффициент пропорциональной части регулятора тока, д – коэффициент интегральной части регулятора тока, е – коэффициент усиления обмотки якоря, ж – постоянная времени обмотки якоря, з – момент инерции электропривода)

2.2.4 Сравнение эффективности нейросетевого настройщика и системы управления, основанной на эталонной модели

Для оценки эффективности применения нейросетевого настройщика проведен эксперимент по сравнению его работы с системой на базе эталонной модели.

Эксперимент проводился для системы без адаптации регулятора, системы с нейросетевым настройщиком и системы с эталонной моделью (ЭМ). Сигнал задания подавался скачкообразно для выполнения следующей последовательности (рис. 2.25А): 0 (об/мин) – 60 (об/мин) – 0 (об/мин) – -60 (об/мин) – 0 (об/мин). Частота вызова настройщика составляет 1.5 мс.

В момент времени равный 1.5 секундам инерционная постоянная времени электропривода изменялась на 50% ($T_J = 1.5 \cdot T_{Jном}$). Нейросетевой настройщик при выявлении «неоптимального» качества переходного процесса изменил настройку П-регулятора скорости (рис. 2.25Б). На рис. 2.26, являющимся детализацией рис.2.25А для момента времени 4.2 с, приведено сравнение работы системы без адаптации, а также систем с адаптацией на основе нейросетевого настройщика и системы с ЭМ.

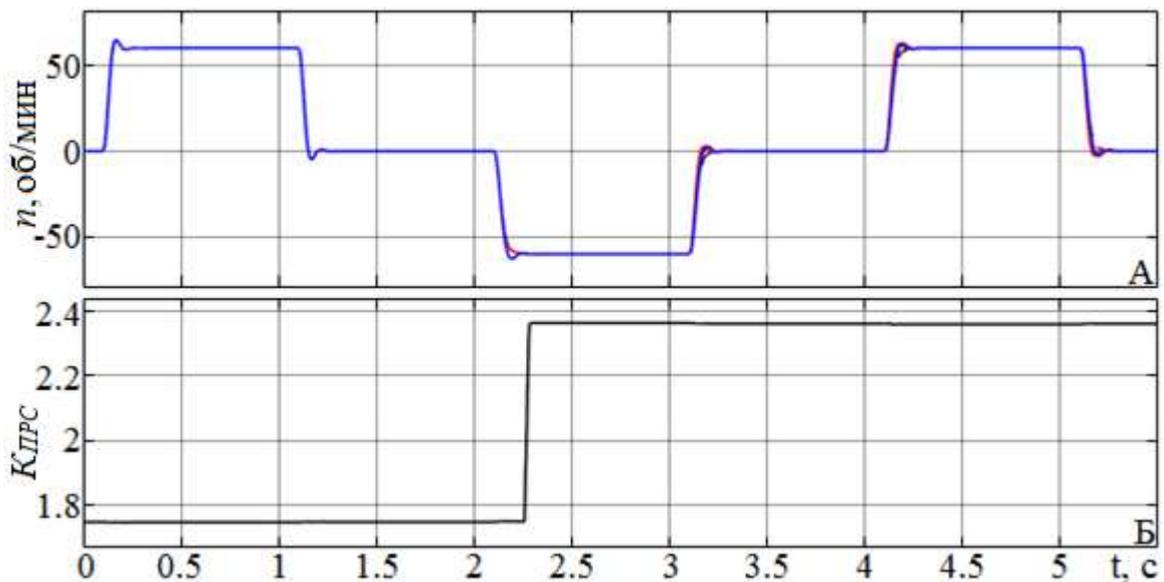


Рис. 2.25 – Результаты эксперимента

Из графика видно, что изменение инерционной постоянной времени достаточно сильно повлияло на работу системы без адаптации (перерегулирование стало равно нулю, время переходного процесса увеличилось на 34%).

Эталонная модель позволила сохранить перерегулирование в контуре скорости на требуемом уровне, однако, по сравнению с нейросетевым настройщиком, она несколько проигрывает по времени выхода на задание (на 25%). Полученные результаты позволяют говорить об эффективности нейросетевого настройщика.

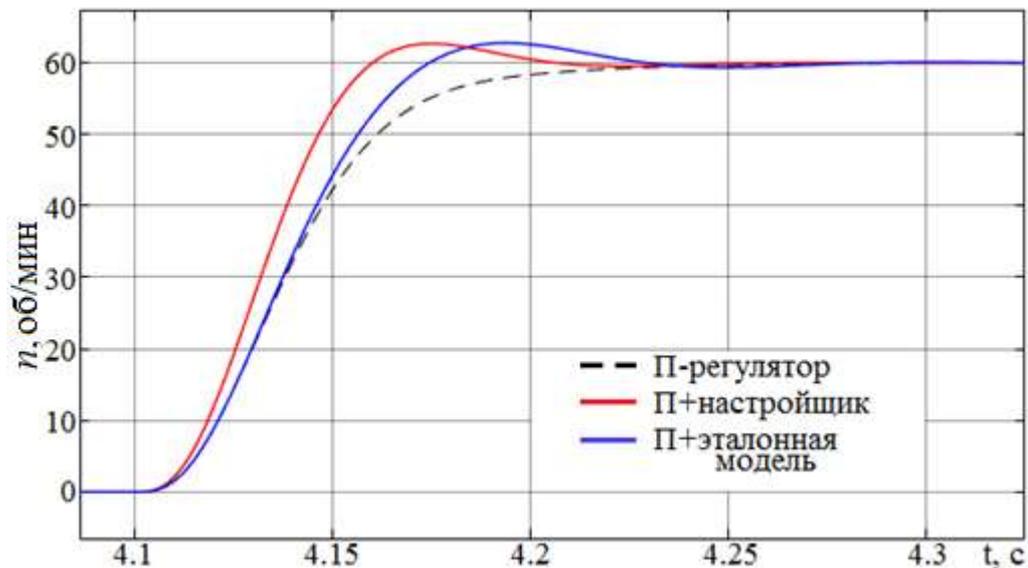


Рис. 2.26 – Сравнение эффективности системы без настройки, нейросетевого настройщика и системы с эталонной моделью

Выводы по главе 2

1. Разработана функциональная схема применения нейросетевого настройщика в системе электропривода постоянного тока прокатной клетки.
2. Выбрана структура искусственной нейронной сети.
3. Разработана база правил для нейросетевого настройщика ПИ-регулятора тока якоря.
4. Разработана база правил для нейросетевого настройщика П-регулятора скорости.
5. Создан алгоритм, обеспечивающий совместную работу настройщиков в контуре скорости и тока.
6. Проведено сравнительное моделирование системы управления электропривода с нейросетевым настройщиком и без него для контуров регулирования тока якоря и скорости вращения вала электродвигателя.
7. Показана эффективность предлагаемого метода.

Глава 3. Построение нейросетевого настройщика линейных регуляторов электропривода постоянного тока в условиях компенсации возмущающих воздействий

3.1. Постановка задачи

Компенсация возмущающих воздействий является неотъемлемой частью технологических процессов многих промышленных агрегатов. В том числе, возмущениям подвергаются главные электроприводы прокатных клетей [94, 95]. Для данного класса объектов наиболее актуальной является проблема повышения эффективности компенсации возмущений, возникающих в момент захвата заготовки прокатными валками [33].

Как правило, в условиях реального производства системы управления электроприводов постоянного тока работают в режимах отработки возмущающих воздействий с тем же набором параметров линейных регуляторов в контурах тока и скорости, который используется для отработки графика изменения задания.

Но регулятор, оптимально настроенный на переходные процессы, в большинстве случаев неэффективно обрабатывает возникающие в установившемся режиме возмущения [118]. Более того, компенсация таких возмущений системой управления электроприводом осложняется изменением амплитуды нагрузки. Это, если принять во внимание высокую энергоемкость процессов, характерных для прокатного производства, позволяет говорить о существенных энергопотерях. Кроме снижения времени компенсации возмущающего воздействия и амплитуды максимального отклонения скорости от задания существует проблема снижения динамических моментов и колебаний скорости вращения валков клетки. Это связано с большим количеством передач в механической части некоторых прокатных клетей, упругими связями, большими массами, а также ударным характером нагрузок при захвате прокатываемой заготовки [47]. Высокие динамические моменты приводят к сокращению времени службы механизма прокатной клетки [13, 149, 64, 1, 31].

Решением данных проблем в определенной мере может стать построение адаптивной системы управления электроприводом для режима компенсации возмущающих воздействий.

Предлагается выделить следующие основные подходы к решению данной задачи. Их можно условно разделить на «механические» [13, 149, 64, 1, 31] (они предполагают модификацию механической части прокатной клетки) и «электрические» [94, 95, 52] (для снижения динамических нагрузок предлагается модифицировать систему электропривода движения прокатных валков или алгоритм управления им). В данной работе рассматривается второй подход.

Для задачи минимизации отклонения скорости вращения валков от задания возможны следующие решения:

- изменение структуры регулятора (системы управления) с последующей идентификацией ОУ в режиме возмущений [177];
- идентификация ОУ в режиме возмущений с построением адаптивного наблюдателя координат состояния [111, 122, 165, 166];
- построение адаптивной системы на базе эталонной и внутренней моделей [167, 179];
- применение методов модального управления для настройки регулятора на подавление возмущений [120, 154].

Все эти методы требуют наличия адекватной модели процесса или эталонной модели, что в условиях производства является трудно выполнимой задачей.

Для снижения колебаний в электроприводах с упругостями в передачах выделяют следующие подходы:

1) Классические:

- различные наблюдатели динамических моментов и колебаний [127, 141, 173, 188, 189, 125].
- ПИ-регуляторы дробного порядка [131]
- управление на основе прогнозирующих моделей [181].

Однако, для применения всех этих методов необходимо наличие точной модели объекта управления, получение которой в условиях производства труднодостижимо.

2) Интеллектуальные:

- нечеткая логика [153],
- нейро-нечеткие сети [162].

Такие методы позволяют использовать опыт человека, знающего особенности работы механизма. Кроме этого подобные методы не требуют наличия модели объекта управления. Однако для систем с нечеткой логикой остается открытым вопрос о выборе коэффициентов нормировки входных и выходных сигналов адаптивного настройщика, а для применения нейро-нечетких сетей необходима обучающая выборка, характеризующая все режимы работы объекта управления. Также отсутствие единого метода переноса нечетких правил на различные системы управления существенно ограничивает применимость систем, основанных на нечеткой логике.

Таким образом, целесообразно использовать метод построения адаптивной системы управления, который не потребует модели объекта управления, автономной обучающей выборки и будет способен обучаться оперативно. Таким методом может быть нейросетевой настройщик параметров линейных регуляторов, доработанный для решения поставленной задачи.

Предполагается оперативно изменять настройку ПИ-регулятора скорости двигателя постоянного тока во время отработки ступенчатого возмущения в случаях:

- повышения скорости его компенсации и уменьшения максимального отклонения частоты вращения от величины задания для приводов с незначительным влиянием упругих связей;
- снижения динамических моментов и колебаний скорости для приводов с упругими связями. Для этого предлагается проводить оперативную адаптацию

параметров регулятора скорости с помощью нейросетевого настройщика при выявлении возмущающих воздействий.

Необходимо осуществить выбор структуры нейронной сети настройщика, а также разработать базу правил для режима компенсации возмущений.

Из-за разнообразия механических частей прокатных клетей в качестве объектов управления необходимо рассмотреть систему электропривода с упругими связями и без них.

3.2 Нейросетевой настройщик для режима компенсации возмущающих воздействий

В соответствии со структурной схемой электропривода возмущающее воздействие возникает в контуре скорости. Исходя из этого, для режима компенсации возмущений будем использовать настройщик аналогичный по структуре нейросетевому настройщику контура скорости. Однако необходимо доработать предложенную базу правил.

3.2.1 База правил для компенсации возмущений

В результате приведенного анализа были выявлены типовые подходы к компенсации возмущающих воздействий в системе управления электрическим приводом прокатной клетки и разработана приведенная ниже база правил.

Данная база правил используется для работы настройщика в режиме компенсации возмущающего воздействия. При выявлении момента захвата заготовки параметры сети для переходных процессов сохраняются, и происходит вызов указанных ниже правил. После того, как изменяется задание, текущие смещения и веса (для данного возмущения) удаляются, а из памяти контроллера вызываются сохраненные, для переходных процессов, параметры.

Рассмотрим правила вычисления скорости обучения, ответственного за вычисление $K_{ГРС}$

1) Если экстремум переходного процесса в контуре скорости $y_d \min$, вызванного возмущением, еще не был достигнут, И значение модуля скорости изменения выхода $y(t)$ ОУ выше, чем амплитуда шума N_n , измеренная в течение $2 \cdot \Delta t$ секунд в установившемся режиме, И значение модуля рассогласования ($|r(t) -$

$y(t)$) больше $S\%$ модуля разницы между текущей уставкой $r(t)$ и предыдущей r_{old} ($|r(t) - r_{old}|$), ТО необходимо увеличить K_P , причем скорость обучения нейрона выходного слоя $\eta_1^{(2)}$, ответственного за вычисление K_P , должна быть пропорциональна модулю рассогласования и обратно пропорциональна модулю разницы между текущей уставкой и предыдущей.

2) Если $y_{d\ min}$ уже был достигнут, И текущее значение выхода ОУ выше, чем измеренное Δt секунд назад, И значение модуля скорости нарастания выхода ОУ $|y(t) - y(t - \Delta t)|$ больше, чем отношение разницы уставки и пика переходного процесса к количеству нейронов в скрытом слое N_{hidden} : $|r(t) - y_{d\ min}| / N_{hidden}$, ТО значение $K_{ИРС}$ должно быть уменьшено, причем $\eta_1^{(2)}$ должна быть пропорциональна модулю рассогласования и обратно пропорциональна модулю разницы между текущей уставкой и предыдущей.

Если $|y(t) - y(t - \Delta t)|$ превышает $|r(t) - y_{d\ min}| / N_{hidden}$ более, чем в два раза, ТО нейросетевой настройщик выдает на своих выходах $K_{ИРС} = 0$ и $K_{ИРС} = 0$, не обращаясь к нейронной сети. Так продолжается до тех пор, пока наблюдается подобное более чем двукратное превышение.

Правило для определения скорости обучения нейрона выходного слоя, ответственного за вычисление $K_{ИРС}$

3) Если $y_{d\ min}$ достигнут, И значение модуля скорости изменения выхода ОУ ниже, чем амплитуда шума, измеренная в течение $2 \cdot \Delta t$ секунд в установившемся режиме, И значение модуля рассогласования больше $S\%$ модуля разницы между текущей уставкой и предыдущей, ТО скорость обучения нейрона выходного слоя $\eta_2^{(2)}$, ответственного за вычисление $K_{ИРС}$, должна быть вычислена прямо пропорционально частоте вращения и обратно пропорционально амплитуде пика переходного процесса, вызванного возмущением.

3.3 Экспериментальная проверка работоспособности настройщика

Для проверки эффективности предлагаемого метода проведено два эксперимента. Первый эксперимент проводился на математической модели прокатной клетки без упругих связей в механической части, второй – на математической модели прокатной клетки с упругой связью в механической части.

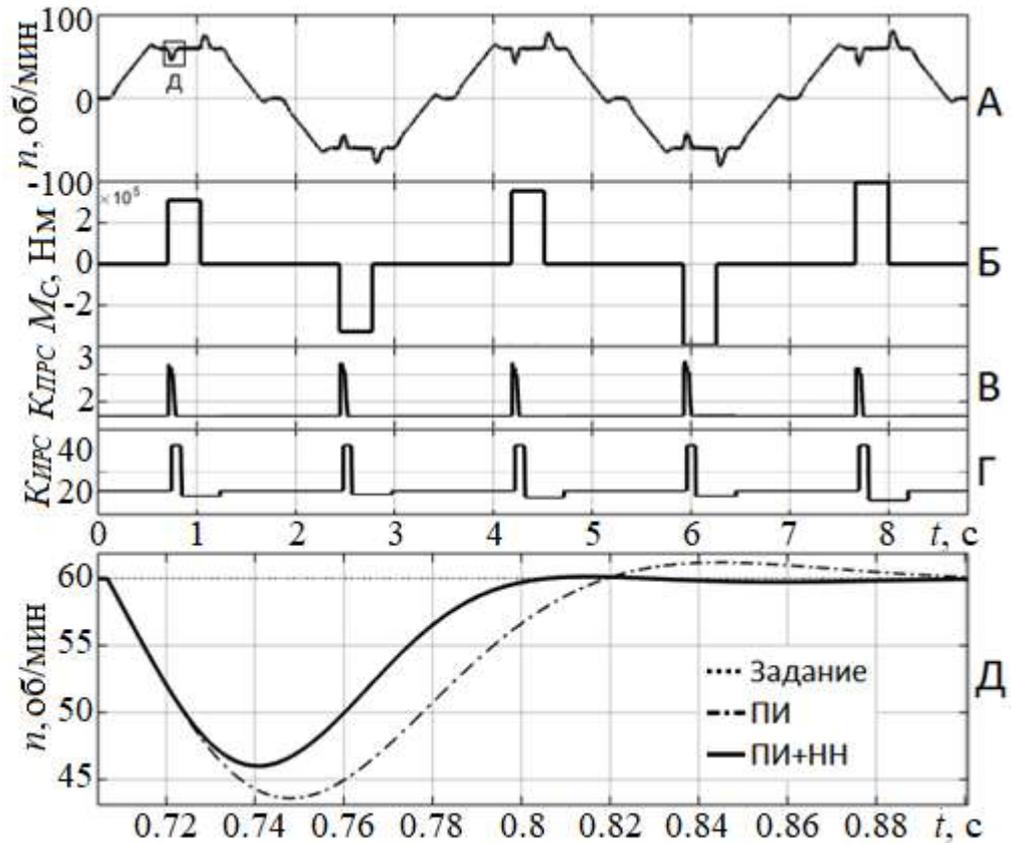


Рис 3.2 – Результаты эксперимента при захвате заготовки прокатной клетью

3.3.2. Эксперимент на математической модели прокатной клетки с учетом влияния упругих связей

Для проведения экспериментов по применению нейросетевого настройщика в случае необходимости снижения динамических моментов рассмотрим главный электропривод второй клетки прокатного стана 350 Оскольского электрометаллургического комбината ввиду наличия в его механике упругих связей.

Данная вертикальная прокатная клеть предназначена для горячего деформирования металла с целью придания ему заданного профиля. Привод осуществляется от двигателя постоянного тока через муфту, редуктор и муфту на передачу шестереночных валков, через универсальные шпиндели на рабочие валки. Клеть оснащена двигателем постоянного тока GMMWO 0914-800 номинальной мощностью $P_n = 1250$ кВт и номинальной скоростью $n_n = 800$ об/мин.

Механическая часть прокатной клетки является многомассовой системой с распределенными параметрами, в которой происходит вращательное движение. Классическим приемом анализа подобных систем, является преобразование данной системы в систему, которая характеризуется моментами инерции J_i и жесткостями связей c_i .

Рассмотренное представление линий привода прокатной клетки позволяет анализировать их как многомассовые системы, в которых положение каждой массы определяется одной угловой координатой и число степеней свободы равно числу масс.

Прокатная клетка с приводом состоит, в основном, из следующих элементов:

- двигатель;
- приводной вал;
- конический редуктор;
- муфта;
- цилиндрический редуктор;
- шлицевое соединение;
- шпиндель;
- валковая система.

Привод клеток осуществляется от двигателя постоянного тока по приводному валу на конический редуктор, от него через муфту и цилиндрический редуктор на универсальный шпиндель, а оттуда – на рабочие валки.

Количество степеней свободы, которым должна обладать расчетная эквивалентная схема привода, определяется рядом собственных частот упрощаемой системы и спектром частот возможных возмущений. Обычно достаточно сохранить первые три низшие собственные частоты, то есть расчетные схемы следует упрощать до одно-, двух- или трехмассовых.

К одномассовой модели с заделкой сводятся линии безредукторного привода в которых момент инерции вала двигателя значительно превосходит моменты инерции остальных вращающихся масс. Двухмассовая модель может представлять безредукторный привод, в котором момент инерции вала двигателя и валковой

системы имеет один порядок. Трехмассовая модель применяется при описании редукторного привода, в которой средняя масса представляет зубчатые колеса редуктора [102].

В таблице 3.1 приведены значения моментов инерции выделенных масс для рассматриваемой клетки, определенные по чертежам заводов изготовителей.

Таблица 3.1 Значения моментов инерции выделенных масс

№	Наименование	Длина
1	Диаметр приводного вала $d_{ПВ}$, м	0,2
2	Длина приводного вала $l_{ПВ}$, м	0,45
3	Диаметр тихоходного вала конического редуктора $d_{КР.Т}$, м	0,3
4	Длина тихоходного вала конического редуктора $l_{КР.Т}$, м	0,4
5	Диаметр быстроходного вала конического редуктора $d_{КР.Б}$, м	0,2
6	Длина быстроходного вала конического редуктора $l_{КР.Б}$, м	0,25
7	Диаметр тихоходного вала цилиндрического редуктора $d_{ЦР.Т}$, м	0,35
8	Длина тихоходного вала цилиндрического редуктора $l_{ЦР.Т}$, м	0,4
9	Диаметр быстроходного вала цилиндрического редуктора $d_{ЦР.Б}$, м	0,35
10	Длина быстроходного вала цилиндрического редуктора $l_{ЦР.Б}$, м	0,3
11	Диаметр шпинделя $d_{Ш}$, м	0,5
12	Длина шпинделя $l_{Ш}$, м	3,5
13	Модуль сдвига (сталь) σ , М·Нм	8×10^4
14	Момент инерции двигателя $J_{ДВ}$, кг·м ²	390
15	Момент инерции конического редуктора (приведенный) $J_{КР}$, кг·м ²	24,3
16	Момент инерции муфты J_M , кг·м ²	9
17	Момент инерции цилиндрического редуктора (приведенный) $J_{ЦР}$, кг × м ²	260
18	Момент инерции шлицевого соединения $J_{ШС}$, кг·м ²	15
19	Момент инерции нагрузки с валками (приведенный) J_H , кг·м ²	300
20	Передаточное число конического редуктора $i_{КР}$	7,2
21	Передаточное число цилиндрического редуктора $i_{ЦР}$	5,6

Жесткость упругих элементов механизмов привода приведена в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Жесткость упругих элементов механизмов привода

Упругий элемент	Расчетная формула
Цилиндрический участок вала	$C = \frac{\sigma \pi d^4}{32l}$ <p>σ – модуль сдвига d – диаметр l – длина</p>

Общий вид системы с сосредоточенными параметрами приведен на рис.3.3.

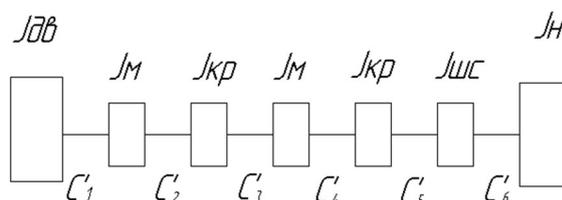


Рис. 3.3 – Система с сосредоточенными параметрами.

Приведение системы с сосредоточенными параметрами приведено в приложении Б.

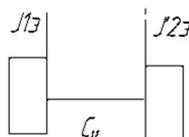


Рис. 3.3 – Двухмассовая механическая система

Значения моментов инерции и жесткостей связи двухмассовой системы приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 Значения моментов инерции и жесткостей связи двухмассовой системы

$J_{1Э}$ кг×м ²	c_{12} Н×м	$J'_{2Э}$ кг×м ²
390.46	0.6256×10^6	562.64

Модель для полученной системы построена в MatLab & Simulink на основе структурной схемы, изображенной на рис.3.5.

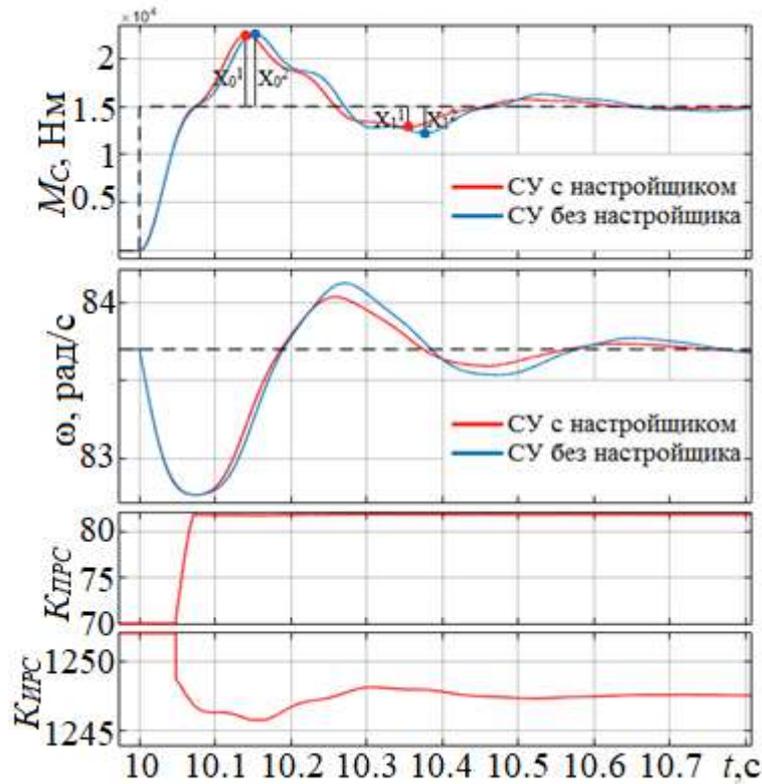


Рис. 3.6 – Результаты эксперимента по компенсации возмущающего воздействия

Это позволило снизить амплитуды колебаний динамического момента электропривода (амплитуда первого колебания для системы с настройщиком $X_0^{(1)} = 74.2$ кН·м, амплитуда второго колебания для системы с настройщиком $X_1^{(1)} = 21.6$ кН·м, амплитуда первого колебания для системы без настройщика $X_0^{(2)} = 76$ кН·м, амплитуда второго колебания для системы без настройщика $X_1^{(2)} = 27.7$ кН·м).

По формуле (3.1) были вычислены логарифмические декременты затухания динамического момента для системы с нейросетевым настройщиком ($\lambda_1 = 1.009$) и без него ($\lambda_2 = 1.234$). Таким образом, использование нейросетевого настройщика позволило ускорить затухание динамического момента на 18%.

$$\lambda = \ln \left(\frac{X_0}{X_1} \right) \quad (3.1)$$

Снижение колебаний динамического момента в главном электроприводе прокатной клетки позволит повысить надежность механических передач и снизить энергопотребление привода в режиме отработки возмущающих воздействий.

Выводы по главе 3

1. Разработана база правил для компенсации возмущающих воздействий в системе управления главным электроприводом прокатной клетки для случая с влиянием упругих связей и масс трансмиссии и без него.
2. Проведено сравнительное моделирование системы управления электропривода с нейросетевым настройщиком и без него для режима компенсации возмущающих воздействий.
3. Применение настройщика позволило снизить отклонение от задания на 15% и повысить скорость отработки возмущения на 45% по сравнению с системой без адаптации.

Глава 4. Аппаратно-экспериментальная проверка эффективности нейросетевого настройщика для управления электроприводом постоянного тока

В данной главе рассмотрено применение нейросетевого настройщика линейных регуляторов на физической модели электропривода постоянного тока. Рассмотрены результаты экспериментов по применению настройщика ПИ – регулятора контура тока, П – регулятора контура скорости в условиях изменения параметров объекта управления при отработке графика задания, а также работа настройщика при компенсации возмущающих воздействий, действующих на электропривод.

4.1 Описание экспериментального стенда

Эксперименты по применению нейросетевого настройщика для системы подчиненного регулирования скорости электродвигателя постоянного тока производились на экспериментальном стенде (рис. 4.1), состоящем из персонального компьютера (ПК) – 1 и учебной лаборатории NI ELVIS II – 2 с установленной платой Quanser DCMCT – 3. NI ELVIS II подключается к ПК с помощью USB кабеля.

Плата Quanser DCMCT (рис. 4.2) оснащена электродвигателем постоянного тока с энкодером и маховиком на валу электродвигателя. Управление двигателем реализуется изменением питающего напряжения.

На рис. 4.2: 1 – электродвигатель постоянного тока; 2 – энкодер; 3 – корпус электродвигателя; 4 – маховик; 5 – разъем PCI к NI ELVIS II; 6 – интерфейсная плата с усилителем; 7 – разъем питания платы; 8 – предохранитель; 9 – индикаторы платы.

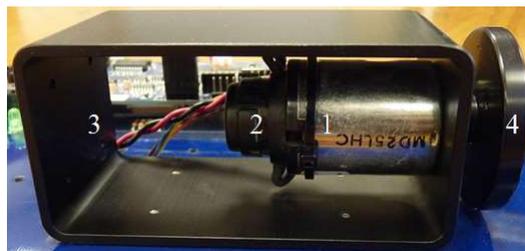
Плата Quanser DCMCT реализует измерение тока, передачу сигнала с датчика поворота (энкодера), расчет скорости на основании данных датчика поворота и усиление аналогового сигнала в 2.4 раза: преобразование диапазона ± 10 В \rightarrow ± 24 В. Схема сигналов данной платы приведена на рисунке 4.3.



Рис. 4.1 – Фотография экспериментального стенда



(а)



(б)

Рис. 4.2 – Фотография платы Quanser DCMCT (а) и электродвигателя постоянного тока на плате (б)

В программном пакете – среде разработки приложений LabVIEW 2013 была построена система управления (рис. 4.4-4.5). Она состоит из регулятора тока РС и регулятора тока РТ, а также блока компенсации ПротивоЭДС двигателя.

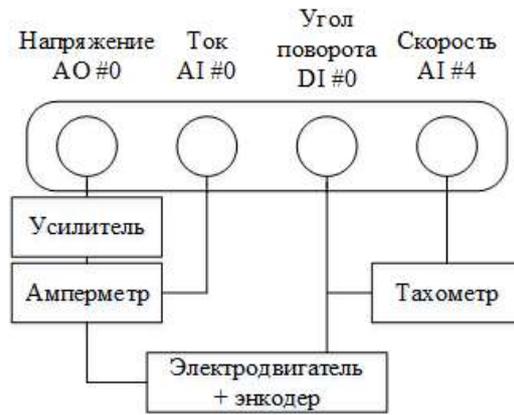


Рис. 4.3 – Схема сигналов платы Quanser DCMST

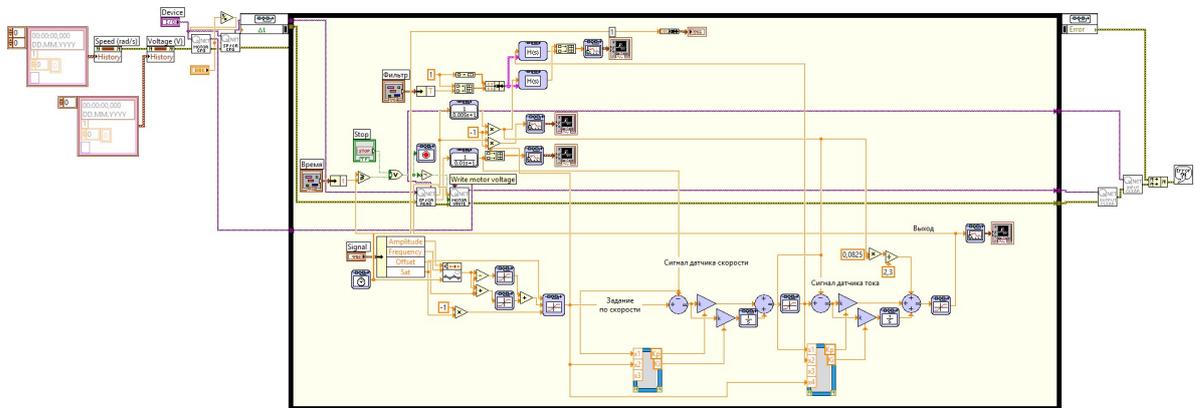


Рис. 4.4 – Система управления электроприводом постоянного тока (вид в целом)

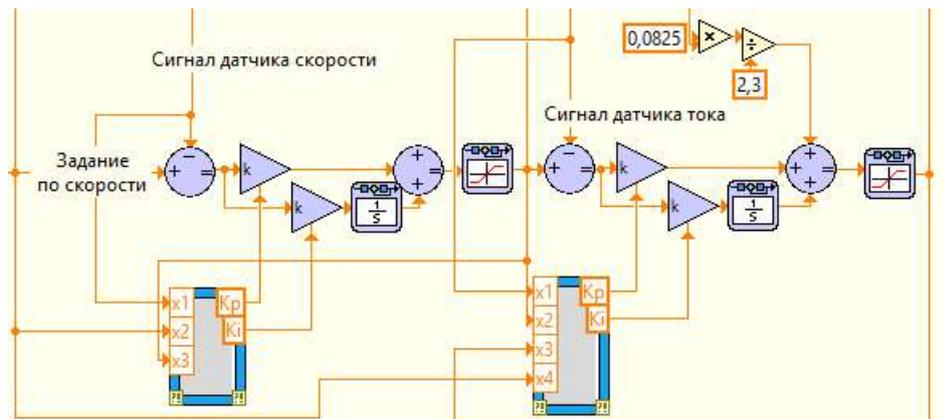


Рис. 4.5 – Система управления электроприводом постоянного тока (Регуляторы скорости и тока с нейросетевыми настройщиками)

Выходом системы управления является сигнал задания, подаваемый на преобразователь напряжения.

График исходных уставок представляет собой следующую последовательность смен заданий по скорости: 0 об/мин \rightarrow 100 об/мин \rightarrow 0 об/мин \rightarrow -100 об/мин. Причем на скорости 100 об/мин электропривод работает 1.25 секунды, а на скорости 0 об/мин – 1 секунду. Смена задания происходит в виде линейно-нарастающего сигнала, причем значение задания по скорости 100 об/мин достигается за 1/8 секунды.

Нейросетевой настройщик, реализованный в виде программного кода MATLAB, импортирован в LabVIEW при помощи узла Математики (MathScript Node). Узел MathScript исполняет функции и записи, написанные на языке LabVIEW MathScript, синтаксис которого аналогичен языку MATLAB.

Параметры регулятора тока ($K_{ПРТ} = 8.33$ $K_{ИРТ} = 1670$) рассчитаны в соответствии с настройкой на модульный оптимум, параметры регулятора скорости ($K_{ПРС} = 0.01$ $K_{ИРС} = 0.2$) – на симметричный оптимум. При этом перерегулирование составляет 40%, а статическая ошибка равна нулю. На рис. 4.6 показана работа системы с оптимальными настройками регуляторов.

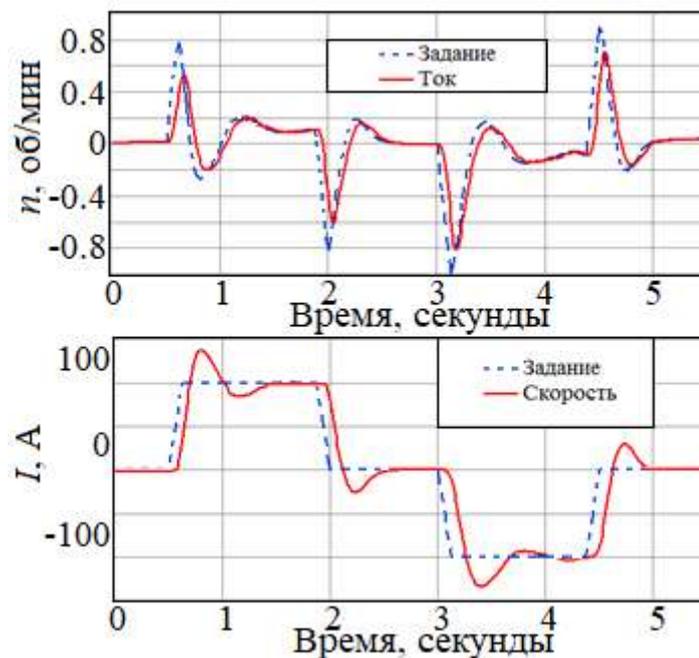


Рис. 4.6 – Результаты эксперимента с оптимальными параметрами ПИ-регуляторов тока и скорости

4.2 Компенсация дрейфа параметров электропривода в условиях изменения задания

4.2.1 Эксперименты с использованием настройщика параметров ПИ-регулятора тока

По применению нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора тока проведено две серии экспериментов.

1. В первой серии проверялась способность настройщика возвращать неоптимальную настройку регулятора тока к оптимальной. На рис. 4.7 приведены результаты эксперимента с неоптимальными коэффициентами (начальные значения $K_{ПРТ} = 5$, $K_{ИРТ} = 1000$). Нейросетевой настройщик вернул значения коэффициентов ПИ-регулятора тока к расчетным. По итогам нейросетевой настройки разница между пиками тока и задания сократилась на 30%.

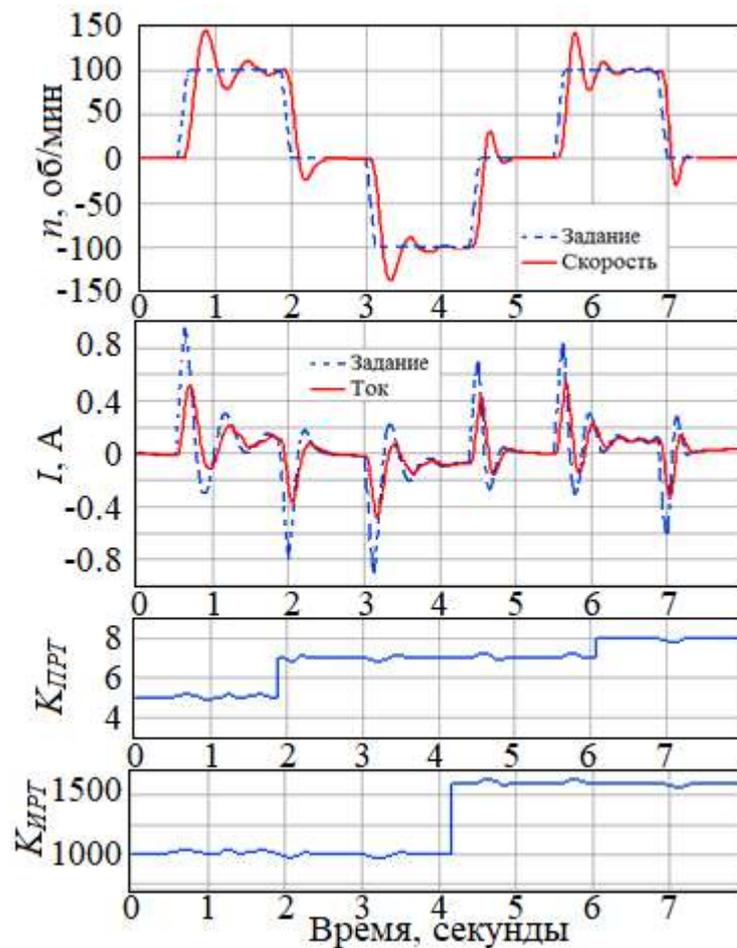


Рис. 4.7 – Результаты эксперимента с оптимальными параметрами ПИ-регулятора скорости и неоптимальными параметрами ПИ-регулятора тока

Подобных экспериментов проведено 9 для различных начальных коэффициентов (табл. 4.1).

Система управления начинала работу с коэффициентов $K_{P.нач}$ и $K_{I.нач}$, в процессе работы системы настройщик в соответствии с базой правил изменял коэффициенты. Конечные коэффициенты ($K_{P.кон}$ и $K_{I.кон}$) указаны в таблице. Также в таблице указаны относительные разности ΔK_P , ΔK_I конечных коэффициентов и рассчитанных.

Количество смен задания по скорости (n_c) считалось до момента времени, когда переставали срабатывать правила.

Таблица 4.1. Результаты первой серии экспериментов

№	$K_{P.нач}$	$K_{I.нач}$	$K_{P.кон}$	$K_{I.кон}$	$\Delta K_P, \%$	$\Delta K_I, \%$	n_c
1	8.33	1670	8.33	1670	0	0	—
2	12	1670	8.25	1670	0.96	0	2
3	5	1670	8.4	1700	0.84	1.79	7
4	8.33	2300	8.1	1650	2.76	1.19	9
5	8.33	1000	8.15	1640	2.16	1.79	4
6	12	2300	8.55	1700	2.64	1.79	2
7	5	2300	8.1	1650	2.76	1.19	3
8	12	1000	8.6	1740	3.24	4.19	6
9	5	1000	8	1650	3.96	1.19	6

Результаты данного эксперимента совпадают с результатами, полученными на модели электрического привода, что позволяет говорить об эффективности предлагаемого метода.

2. Во второй серии экспериментов нейросетевой настройщик изменял настройку регулятора тока в условиях изменения параметров объекта управления. Это изменение достигалось путем введения дополнительного сопротивления в якорную цепь электродвигателя. На рис. 4.8 приведены результаты эксперимента с дополнительным сопротивлением $R_{доб} = 7$ Ом. В соответствии с базой правил настройщик изменял значения K_p и K_i . Это позволило по итогам предъявления 6 раз

указанной выше последовательности смен задания по скорости добиться требуемого качества переходных процессов в контуре тока (рис. 4.9Б) по сравнению с переходными процессами в начале эксперимента (рис. 4.9А).

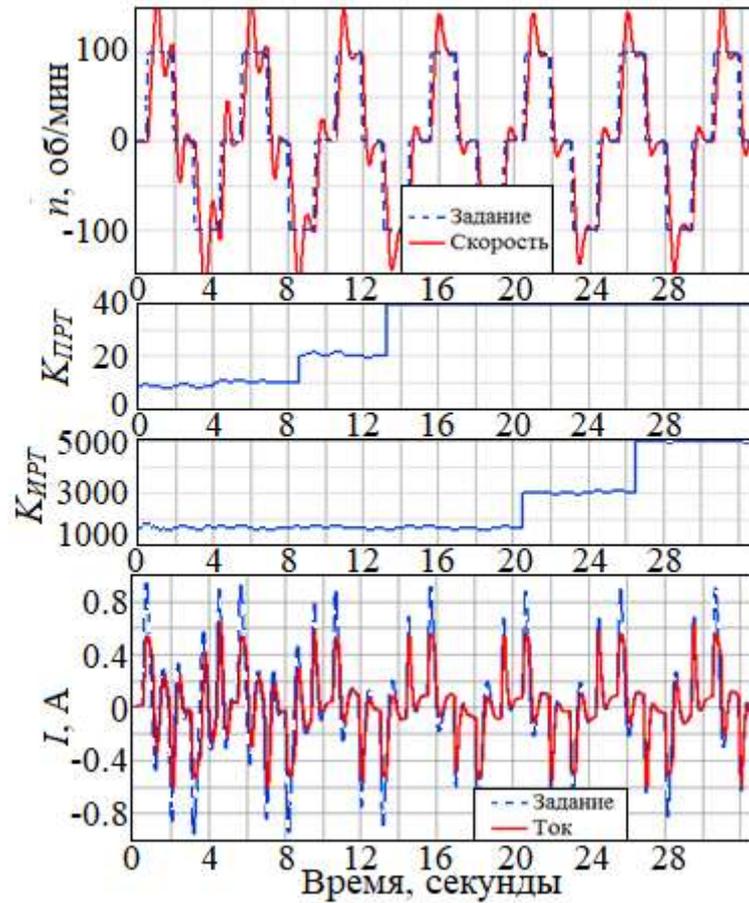


Рис. 4.8 – Результаты эксперимента с дополнительным сопротивлением ($R_{доб} = 7 \text{ Ом}$) в якорной цепи электродвигателя

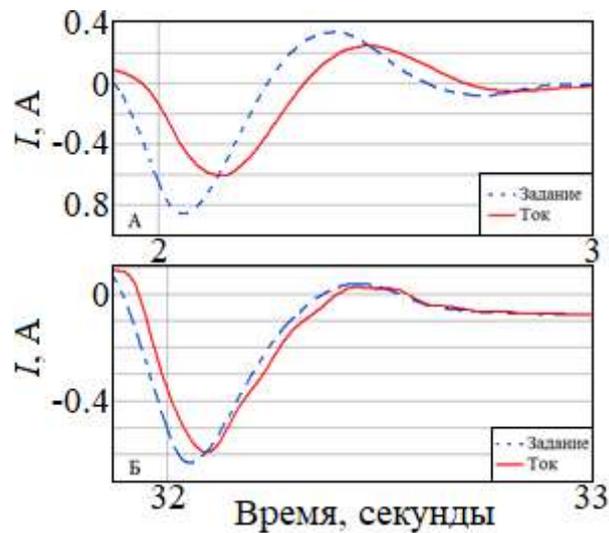


Рис. 4.9 – Результаты эксперимента с дополнительным сопротивлением ($R=7 \text{ Ом}$) в якорной цепи электродвигателя

Результаты эксперимента позволяют говорить об эффективности использования нейросетевого настройщика линейных регуляторов для компенсации изменения параметров якорной цепи электропривода постоянного тока.

4.2.2 Эксперименты с использованием настройщика параметров П-регулятора скорости

Для случая с использованием П-регулятора скорости оптимальным значением $K_{ПРС}$ для регулятора скорости является $K_{ПРС} = 0.006$. На рис. 4.10 представлены переходные процессы в контурах скорости и тока при оптимальных параметрах регуляторов. Перерегулирование равно 0, а статическая ошибка — 15%.

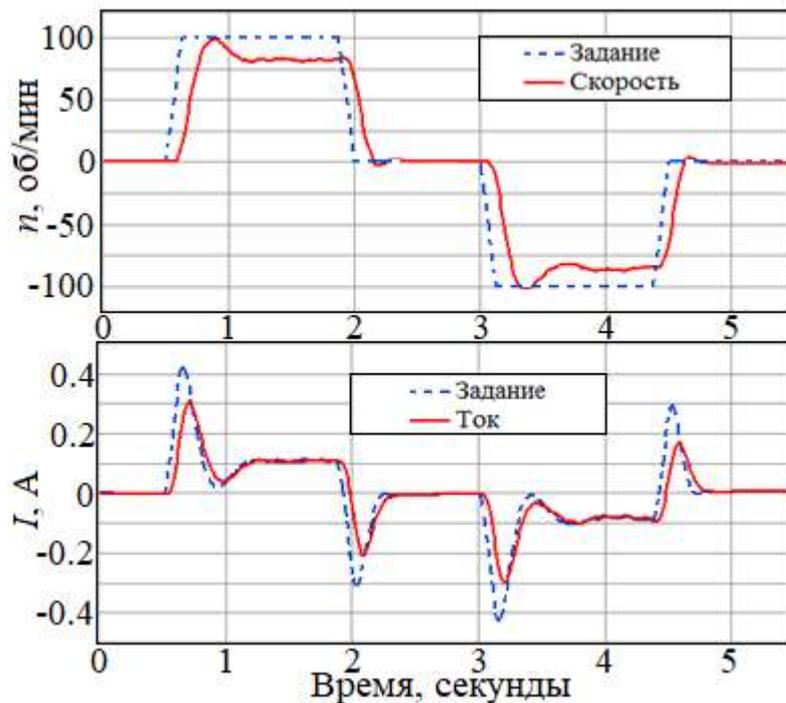


Рис. 4.10 – Результаты эксперимента с оптимальными параметрами ПИ-регулятора тока и П-регулятора скорости

На рис. 4.11 приведены результаты эксперимента, в котором начальное значение $K_{ПРС}$ было увеличено вдвое ($K_{ПРС} = 0.012$) относительно оптимального значения. Нейросетевой настройщик вернул значение $K_{ПРС}$ регулятора скорости к

оптимальному за 4 смены задания по скорости. Это позволило снизить перерегулирование в контуре скорости на 25%.

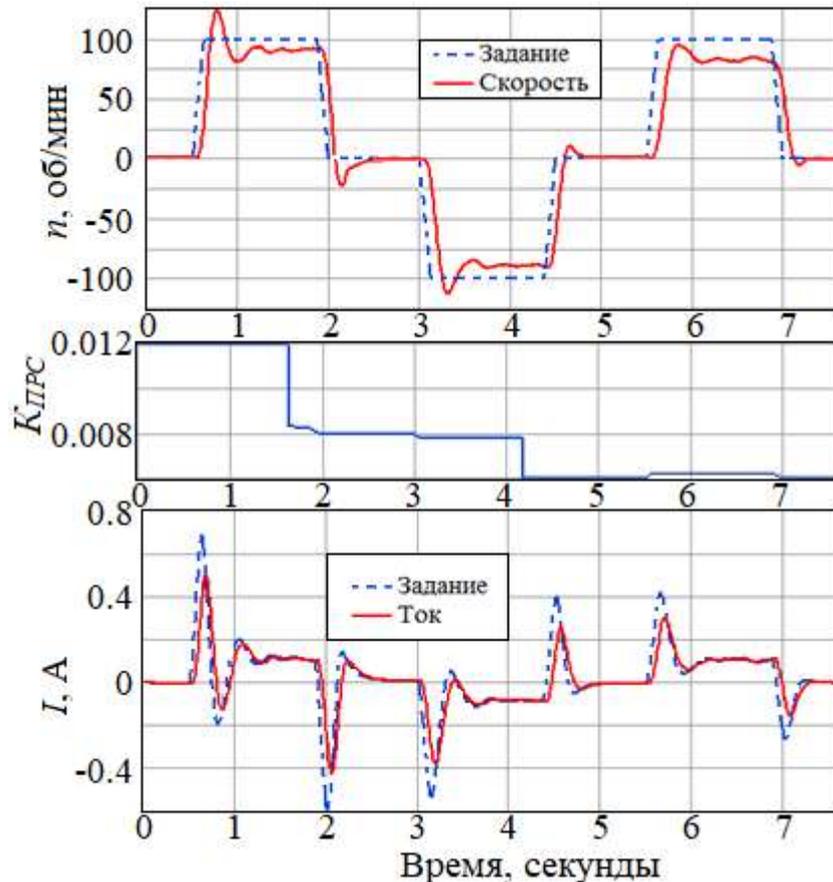


Рис. 4.11 – Результаты эксперимента с оптимальными параметрами ПИ-регулятора тока и вдвое увеличенным параметром П-регулятора скорости

На рис. 4.12 приведены результаты эксперимента, в котором начальное значение $K_{ПРС}$ было уменьшено вдвое ($K_{ПРС} = 0.003$) относительно оптимального значения. Нейросетевой настройщик вернул значение $K_{ПРС}$ регулятора скорости к оптимальному за 3 смены задания по скорости. Это позволило вернуть необходимую динамику контура скорости.

На рис.4.13 приведены результаты эксперимента со сниженным вдвое моментом инерции электропривода (это достигалось снятием маховика). Нейросетевой настройщик, в соответствии с базой правил, нашел новое оптимальное значение $K_{ПРС}$, что позволило снизить перерегулирование на 8%.

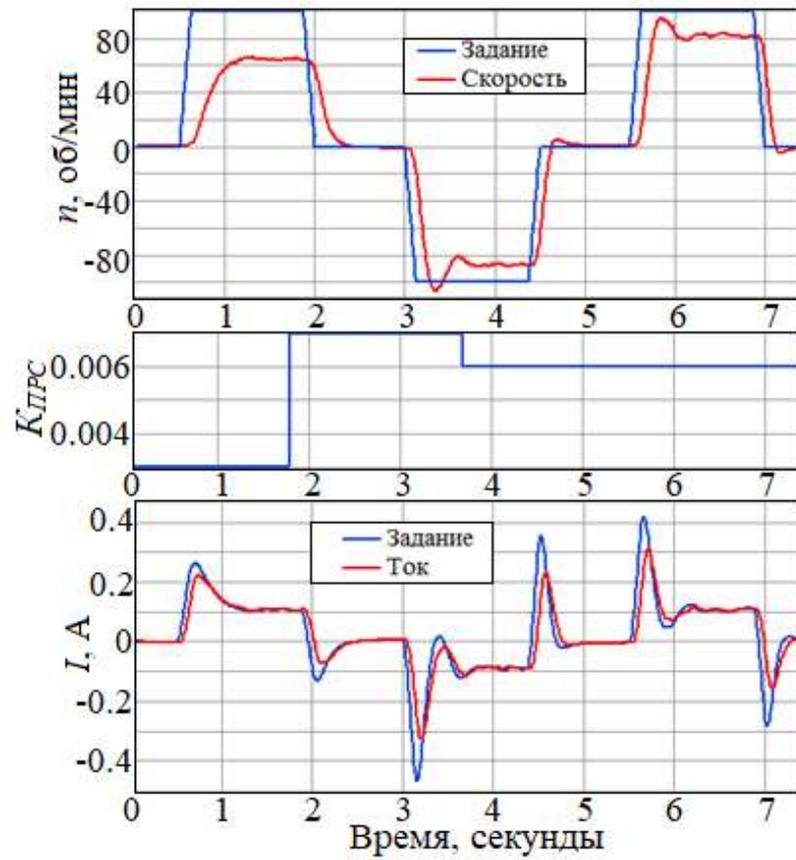
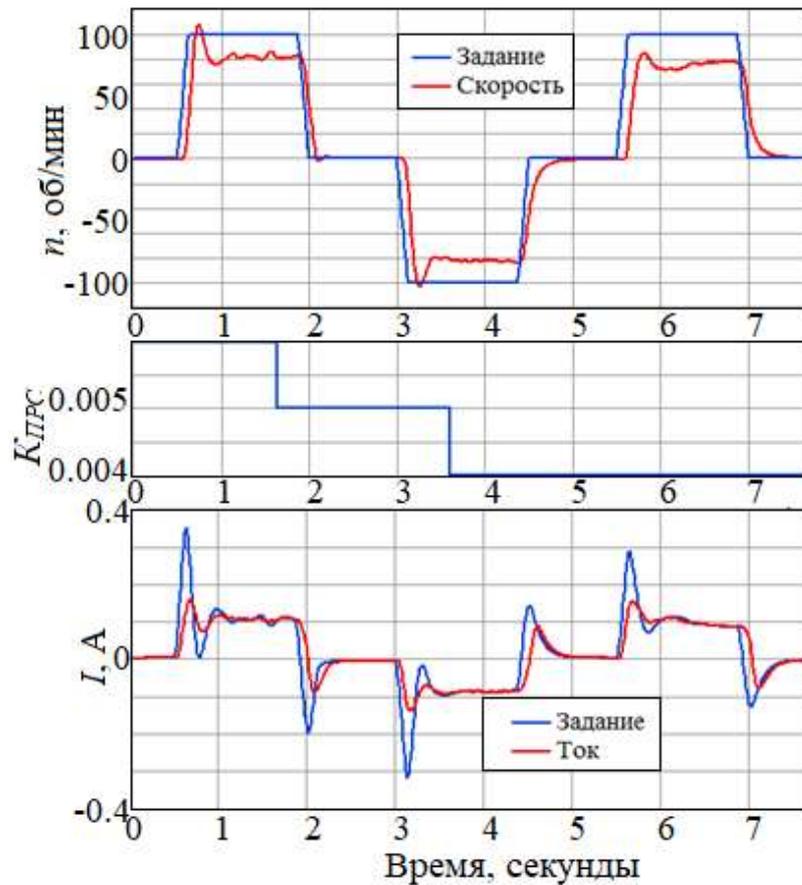
Рис. 4.12 – Эксперимент с вдвое уменьшенным $K_{ДРС}$ 

Рис. 4.13 – Результаты эксперимента с уменьшенным моментом инерции электропривода

На рис. 4.14 приведены результаты эксперимента с увеличенным вдвое моментом инерции электропривода (это достигалось установкой маховика вдвое большей массы). Нейросетевой настройщик, в соответствии с базой правил, нашел новое значение $K_{ЛРС}$, что позволило вернуть необходимую динамику электропривода.

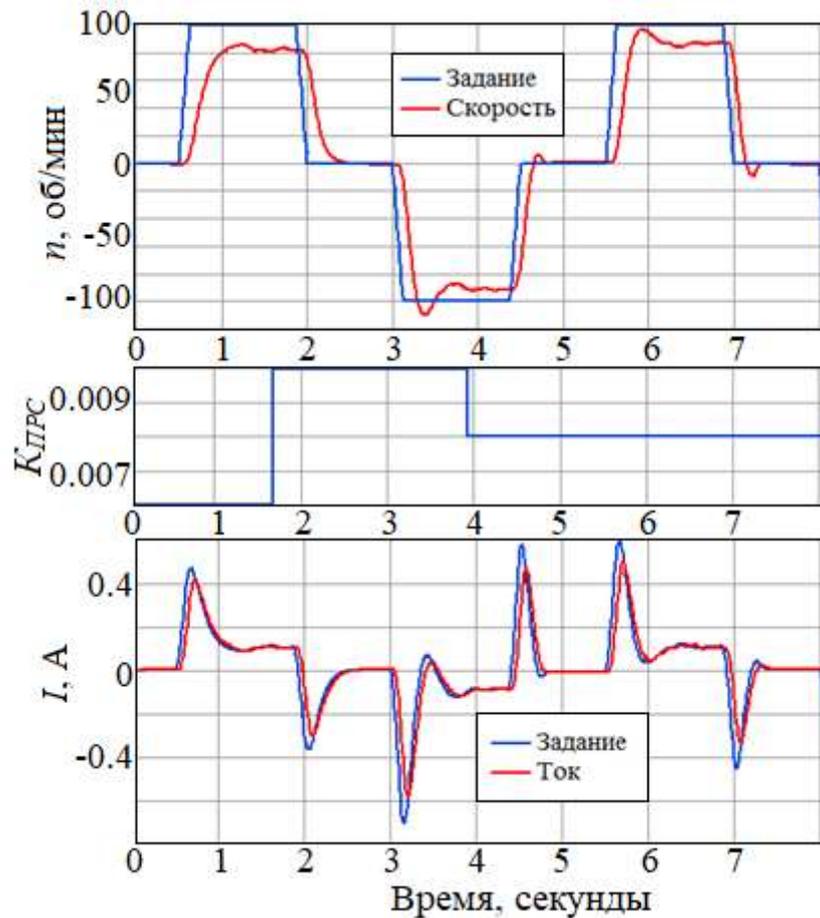


Рис. 4.14 – Результаты эксперимента с увеличенным моментом инерции электропривода

Результаты данного эксперимента позволяют сделать вывод об эффективности нейросетевого настройщика линейных регуляторов в условиях изменения параметров механической части электрического привода.

4.2.3 Сравнение с адаптивным регулятором Siemens

В данном пункте рассматривается сравнение эффективности работы нейросетевого настройщика с существующей промышленной системой адаптации.

Одними из наиболее современных электроприводов постоянного тока является электропривод постоянного тока Siemens SINAMICS DCM. В частности,

последовательность заданий в контуре скорости не изменяются, а, следовательно, использовать сигнал задания в данном случае не целесообразно.

Опыт с уменьшенным моментом инерции электропривода показан на рис. 4.16. На рис. 4.17 приведены результаты эксперимента с повышенным моментом инерции.

Результаты данного эксперимента показывают эффективность нейросетевого настройщика параметров линейных регуляторов в условиях изменения параметров электрического привода по сравнению с системой, предлагаемой фирмой Siemens.

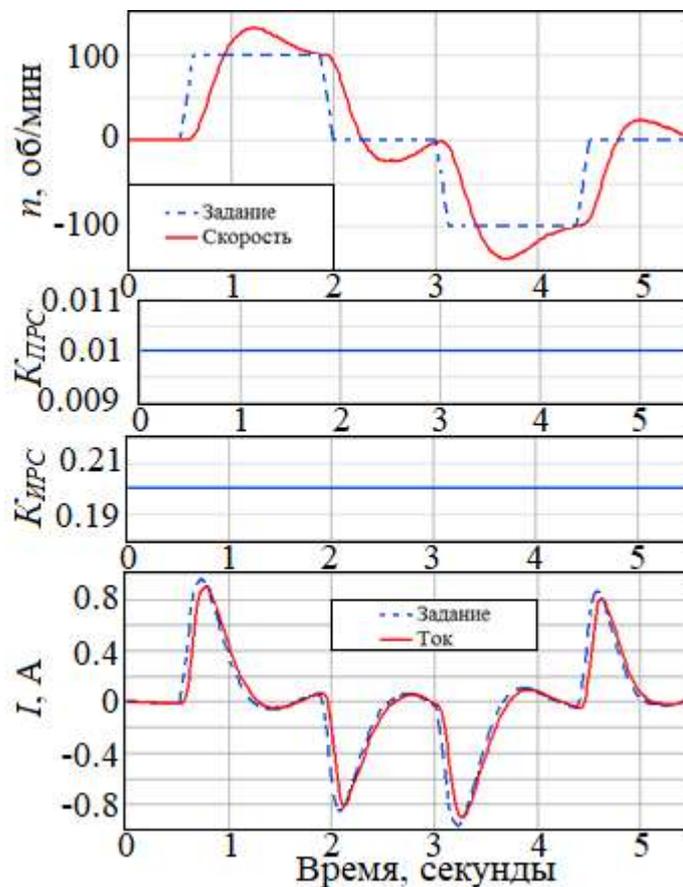


Рис. 4.16 – Результаты эксперимента с увеличенным моментом инерции

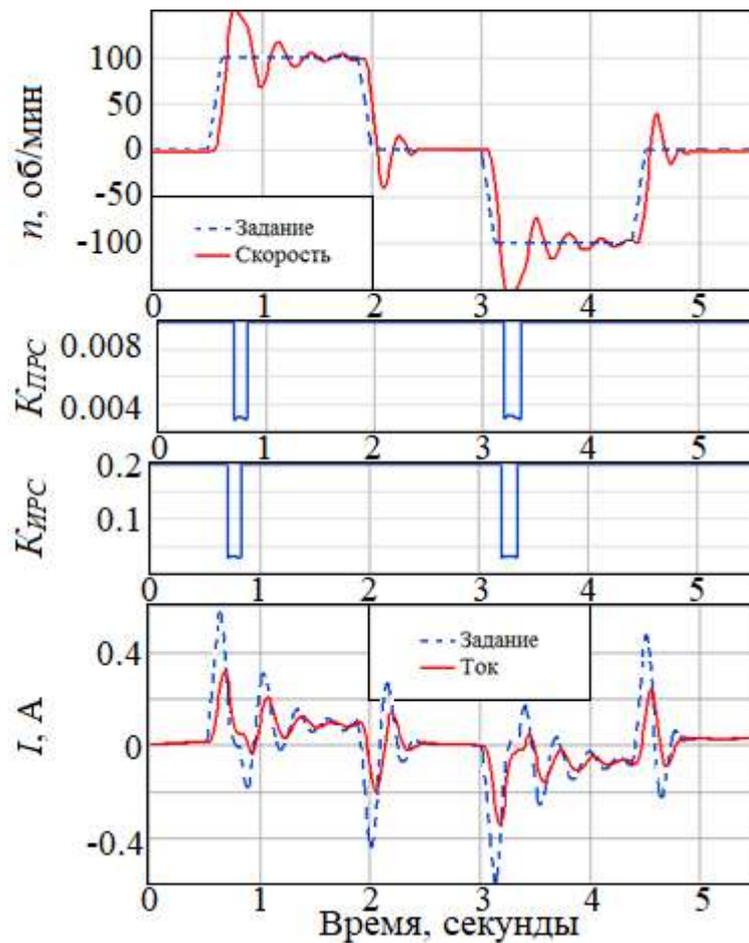


Рис. 4.17 – Результаты эксперимента с уменьшенным моментом инерции

4.3 Компенсация возмущающих воздействий

Целью данного эксперимента является проверка эффективности нейросетевого настройщика в условиях компенсации возмущающих воздействий.

Возмущающее воздействие реализовано вычитанием 5В из сигнала управления, выработанного ПИ-регулятором тока (рис. 4.18).

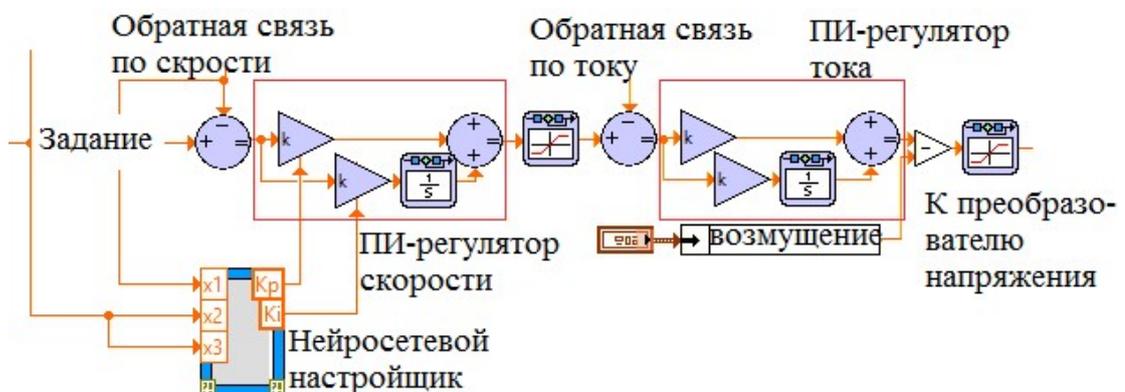


Рис. 4.18 – Система управления электроприводом постоянного тока с учетом возмущений (регулятор скорости с нейросетевым оптимизатором)

Эксперимент проводился следующим образом. При номинальных значениях параметров ПИ-регулятора скорости и ПИ-регулятора тока двигатель постоянного тока разгонялся до скорости 100 об/мин. Далее при тех же настройках подавалось возмущающее воздействие в канал управления. Нейросетевой оптимизатор выявлял момент возмущения и, в соответствии с базой правил, изменял параметры ПИ-регулятора скорости.

На рис. 4.19 приведено сравнение работы системы с нейросетевым оптимизатором и без него, для аналогичных условий эксперимента. Также показано изменение $K_{ПРС}$ и $K_{ИРС}$ регулятора скорости для случая с использованием нейросетевого оптимизатора. Применение оптимизатора позволило снизить максимальное отклонение по скорости от задания на 8% и время отработки возмущения на 30%.

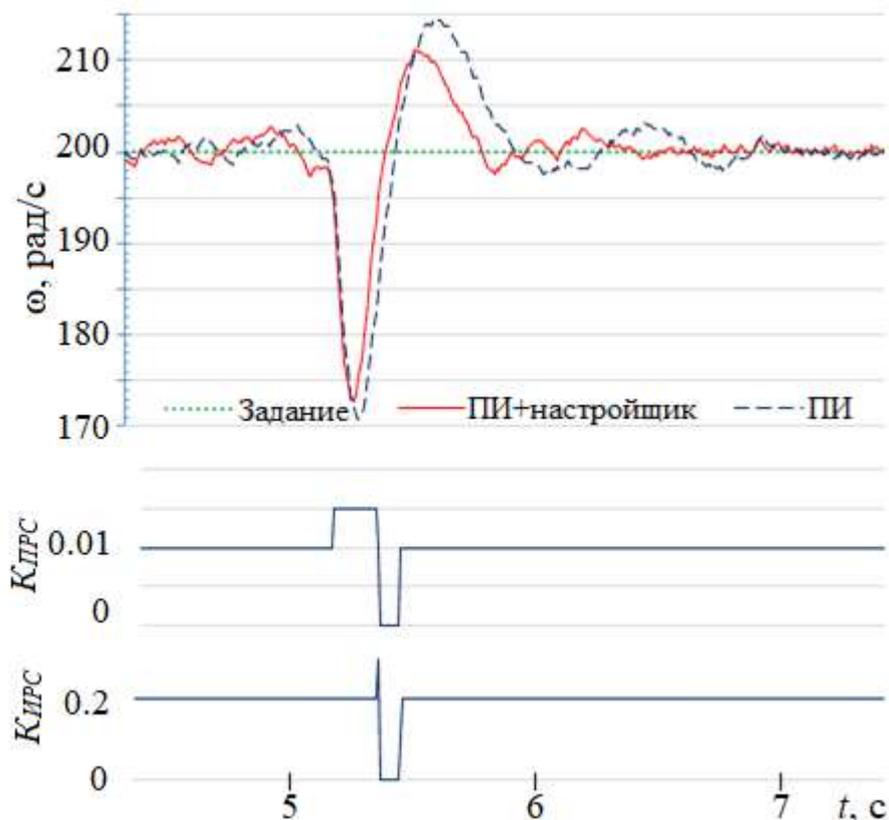


Рис. 4.19 – Результаты эксперимента по компенсации возмущения

В главе 3 кроме систем электрического привода со слабым влиянием упругих связей в механической передаче рассматривается электропривод редукторной

клетки, для которой необходимо учитывать упругости. Поэтому далее перейдем к экспериментам по применению нейросетевого настройщика в системе с упругими колебаниями.

Эксперимент проводился на модифицированном экспериментальном стенде NI Elvis II (рис. 4.20). На плату QUANCER DCMCT с одним электродвигателем постоянного тока в качестве дополнительной инерционной массы установлен еще один такой же двигатель и маховик. Подключение ведущего двигателя к ведомому с маховиком осуществляется с помощью упругого каучукового вала.



Рис. 4.20 – Фотография доработанного экспериментального стенда

Эксперимент производился следующим образом. В систему управления ведущего двигателя подавалось задание по скорости 100 об/мин. После разгона электропривода в установившемся режиме в канал управления этим двигателем вносилось возмущающее воздействие величиной 5В. Нейросетевой настройщик, выявив момент возникновения возмущения, изменил значение параметров ПИ-регулятора скорости в соответствии с базой правил. Результаты данного эксперимента приведен на рис. 4.21.

Аналогичный эксперимент производился для системы без настройки регулятора скорости (рис. 4.22). Применение нейросетевого настройщика позволило снизить колебания первой массы (ведущий двигатель), относительно системы без настройки.

На рис. 4.23 приведено сравнение графиков тока для указанных экспериментов для ведущего двигателя для системы с нейросетевым настройщиком (ПИ+НН) и без него (ПИ). Система с настройщиком позволила снизить суммарный ток, затраченный на отработку возмущающего воздействия на 3.8%.

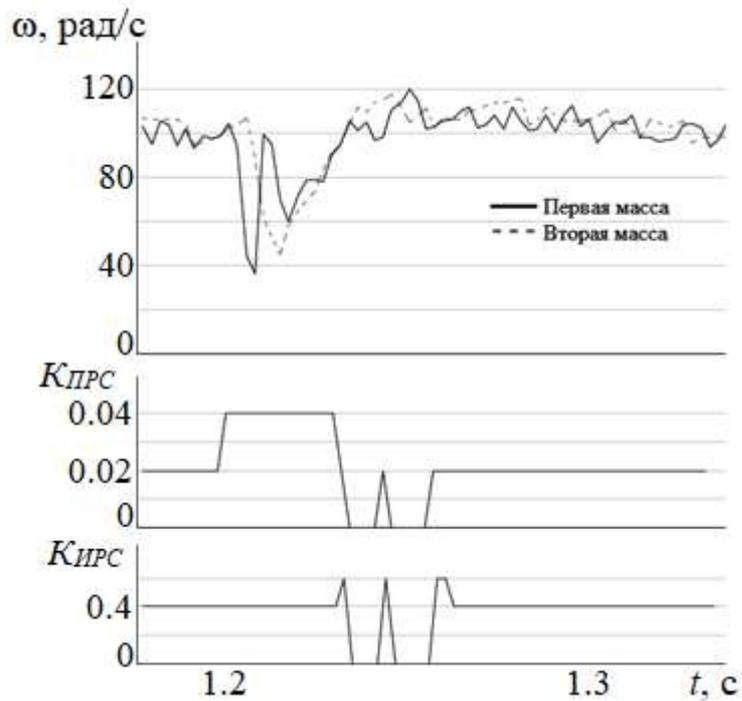


Рис.4.21 – Результаты эксперимента с нейросетевым настройщиком

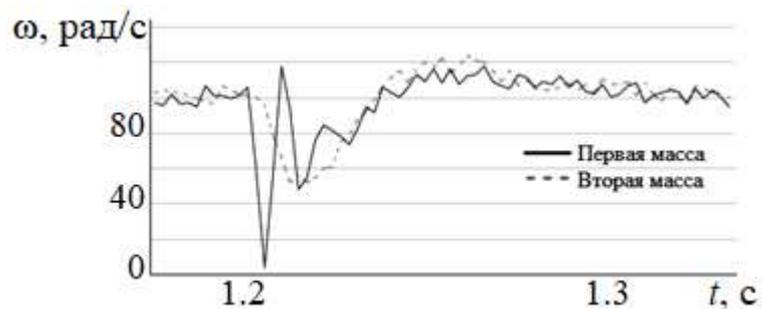


Рис.4.22 – Результаты эксперимента без нейросетевого настройщика

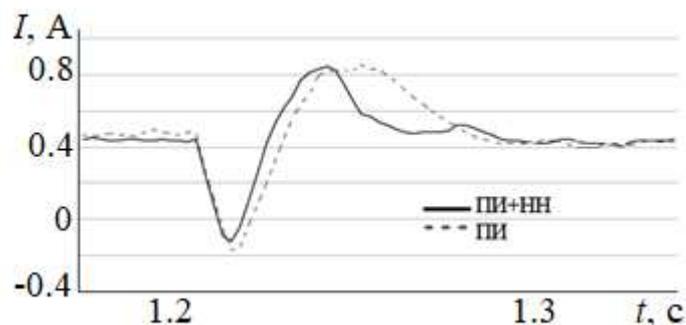


Рис.4.23 – Сравнение токов двигателя для системы с настройщиком и без него

4.4 Адаптивная система управления электроприводом на базе Sinamics DCM с использованием нейросетевого настройщика

Далее рассмотрим применение нейросетевого настройщика на промышленном электроприводе, аналогичном приводу, установленному на прокатной клети. В качестве исследуемого электропривода в составе экспериментального стенда (рис. 4.24) используется Sinamics DCM 6RA8013. На верхнем уровне автоматизации находится контроллер Simatic S7-314 2DP. Связь между контроллером, электроприводом и персональным компьютером построена с помощью сети Profibus DP. Для передачи данных управления используются SIEMENS Telegram.

Нейросетевой настройщик реализован в виде программы на языке Structured Text в блоке OB1 контроллера S7-314 2DP. Объем реализации – 30 Кб. Для записи данных в режиме реального времени для дальнейшего построения сравнительных характеристик используется программное обеспечение Siemens Starter.

В качестве двигателя используется электродвигатель постоянного тока 2ПН90ЛУХЛ4 мощностью 0.55 кВт.

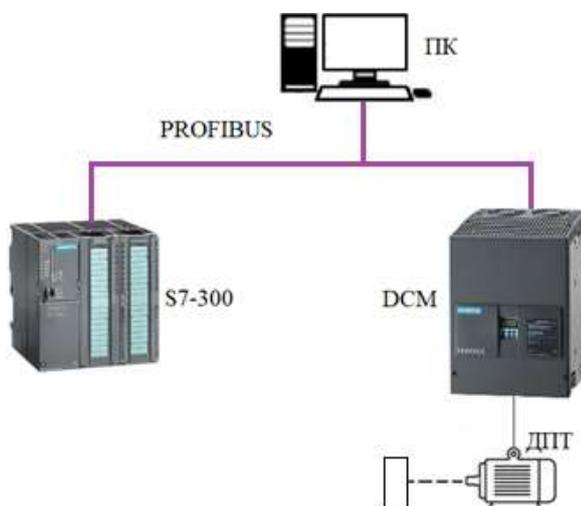


Рис. 4.24 – Схема экспериментального стенда

Для осуществления проверки эффективности предлагаемого нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора скорости на реальном объекте управления используется следующая схема: коэффициенты регулятора, определяемые настройщиком, вычисляются в контроллере, а затем с помощью Profibus соединения, они передаются электроприводу DCM посредством телеграмм.

Перед проведением экспериментов по применению нейросетевого настройщика (НН) на экспериментальном стенде производилась процедура ввода электропривода в эксплуатацию и автоматическая настройка регуляторов контуров тока и скорости по описанной выше процедуре. Автоматически электропривод вычислил следующие коэффициенты: для регулятора контура тока - $K_{ПРС} = 0.43$; $T_{ИРС} (K_{ПРС} / K_{ИРС}) = 0.019$ с; для регулятора контура скорости $K_{ПРТ} = 2.51$; $T_{ИРТ} (K_{ПРТ} / K_{ИРТ}) = 0.166$ с (в начальный момент времени нейронная сеть настройщика формирует на своих выходах значения $K_{ПРС} = 2.51$; $T_{ИРС} = 2.51 / 0.166$ с). Процедура автоматической настройки производилась с маховиком, установленным на валу электродвигателя. Перерегулирование в контуре скорости при такой настройке составило 13.5%. Это же значение было внесено в базу правил нейросетевого настройщика в качестве оптимального. Статическая ошибка при этом составила не более 1%.

Эксперимент, результаты которого приведены на рис. 4.25, производился следующим образом. В начальный момент времени подавалось задание по скорости, которое составляло 500 об/мин. Далее, после останова электропривода ($t = 1.7$ с) маховик снимался с вала электродвигателя, тем самым достигалось изменение момента инерции примерно на 50%. Далее электропривод вновь запускался (отсчет продолжается с момента 1.7 с, время на снятие маховика вырезано) со сменой сигнала задания 0 об/мин – 500 об/мин – 0 об/мин. Нейросетевой настройщик выявил изменение качества переходного процесса (для системы управления без адаптации параметров перерегулирование составило 24.5%) и произвел перенастройку регулятора скорости. Это позволило вернуть перерегулирование к первоначальному значению к моменту времени 5.5 с.

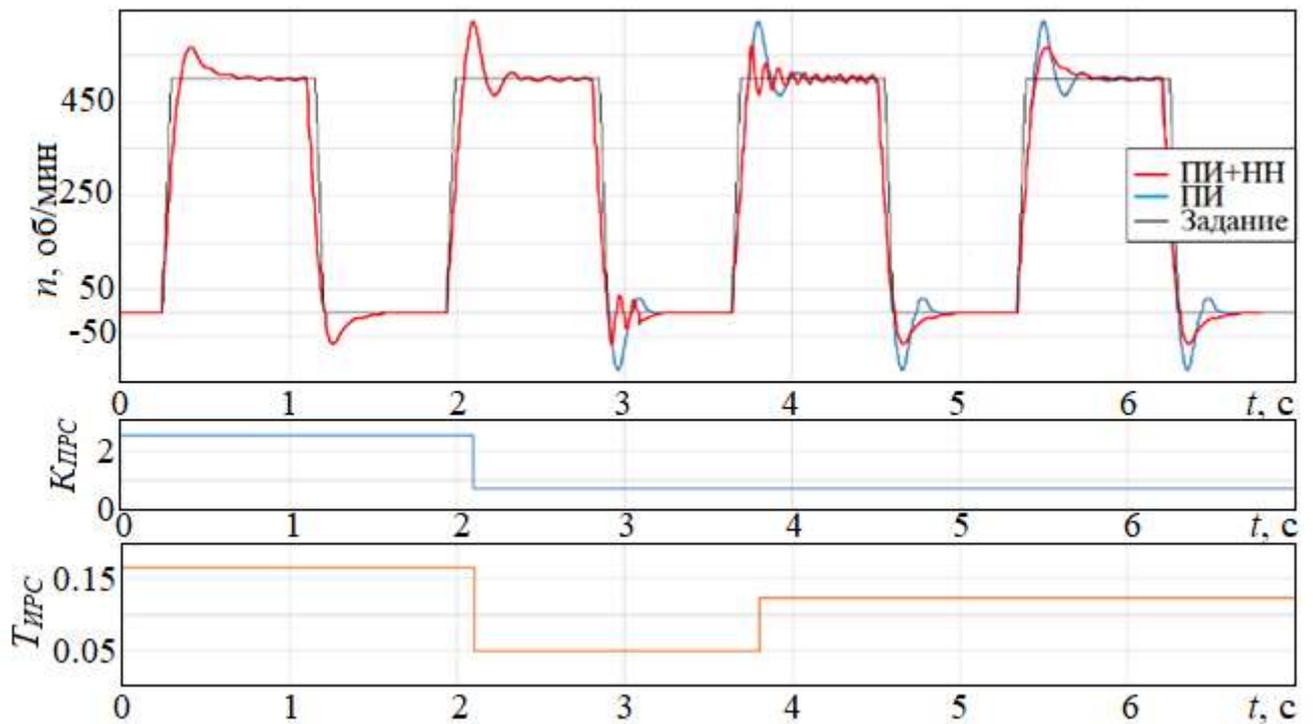


Рис.4.25 – Результаты эксперимента с нейросетевым настройщиком

Результаты экспериментов показывают эффективность нейросетевого настройщика в режиме компенсации возмущающих воздействий для приводов с упругими связями и без них.

В целом, результаты экспериментов, как на математической модели системы управления электропривода, так и на экспериментальном стенде показывают эффективность предлагаемого метода.

Выводы по главе 4

1. В главе рассмотрена задача управления реальной электромеханической системой. Предложена двухконтурная система подчиненного регулирования скоростью вращения электродвигателя. В данную систему интегрированы нейросетевые настройщики регулятора скорости и регулятора тока.
2. Проведены эксперименты на физической модели электропривода постоянного тока в условиях сходных с экспериментами в среде Simulink. Результаты экспериментов показывают эффективность предложенного метода при использовании его на реальном объекте управления.

Заключение

Основные результаты диссертационной работы сформулированы в виде следующих положений:

1. Проведен анализ прокатного производства, по результатам которого установлено, что для электропривода реверсивных прокатных клетей, как объекта управления, вопрос повышения качества регулирования стоит наиболее остро. К причинам, по которым необходима адаптация, можно отнести нелинейности электродвигателей, нестационарность параметров прокатываемого металла, разнообразный сортамент заготовок.

2. Анализ существующих методов построения адаптивных систем управления электроприводом показал, что целесообразным является построение адаптивной системы, реализующей настройку используемых регуляторов в режиме реального времени. Однако применение существующих методов настройки ограничивается необходимостью использования модели ОУ, получить которую в условиях производства достаточно сложно. Анализ безмодельных методов адаптации, в том числе интеллектуальных, показал перспективность комбинирования искусственных нейронных сетей и экспертных систем.

3. Разработана адаптивная система для повышения качества управления электропривода постоянного тока прокатной клетки на базе нейросетевого настройщика. Выбрана структура искусственной нейронной сети. Разработана база правил для нейросетевого настройщика ПИ-регулятора тока якоря. Разработана база правил для нейросетевого настройщика П-регулятора скорости. Проведено сравнительное моделирование системы управления электропривода с нейросетевым настройщиком и без него для контуров регулирования тока якоря и скорости вращения вала электродвигателя. Результаты моделирования показали, что применение нейросетевых настройщиков позволило в рамках эксперимента

снизить энергопотребление электропривода, по сравнению с системой без настройки, на 3.9%.

4. Предложен способ компенсации возмущающих воздействий в системе управления главным электроприводом прокатной клетки, основанный на применении нейросетевого настройщика, для случая с влиянием упругих связей и масс трансмиссии и без него. Проведено сравнительное моделирование системы управления электропривода с нейросетевым настройщиком и без него для режима компенсации возмущающих воздействий. Применение настройщика позволило снизить отклонение от задания на 15% и повысить скорость отработки возмущения на 45% по сравнению с системой без адаптации. Подобное повышение эффективности компенсации возмущающих воздействий позволит повысить темп работы прокатной клетки.

5. Разработан программный комплекс, реализующий систему адаптивного управления электроприводом постоянного тока с применением нейросетевого настройщика в среде LabVIEW, который позволяет использование нейросетевого настройщика в реальных системах управления электроприводами. Результаты экспериментов на реальном электроприводе постоянного тока показывают сходную с модельными экспериментами эффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамия Р.Ш., Кашакашвили Г.В., Лобода В.М. и др. Оценка предельных нагрузок в трансмиссии металлургических машин // Сталь. – 2003. – №3. – С.49–51.
2. Александров А. Г., Паленов М. В. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов в технических системах // Автоматика и телемеханика. – 2014. – №. 2. – С. 16-30.
3. Балюта С. Н., Балюта С. М., Valuta S. N. Идентификация механических параметров главного привода прокатной клетки широкополосного стана горячей прокатки с использованием генетических алгоритмов // Промелектро. – 2019. – №. 4. – С. 37-44.
4. Блинцов В.С., Блинцов С.В., Волянская Я.Б., Волянский С.М., Костенко Д.В. Стенд для экспериментальных исследований эффективности нейронечетких регуляторов электроприводов постоянного тока // Электроприводы переменного тока: Труды международной четырнадцатой научно-технической конференции. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. – 295-298 с.
5. Богачев Д. В., Варфоломеев И. А., Ершов Е. В. Проектирование нейро-нечеткого модуля управления технологическим процессом в металлургическом производстве // Международная научно-техническая интернет-конференция «Информационные системы и технологии 2013». Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами – 2013. – С. 1-7.
6. Большаков В.И., Веренев В.В. Особенности идентификации динамической модели главного привода листопрокатного стана // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь – 1998. – №3. – С. 30-34.
7. Буков В.Н. Синтез управляющих сигналов с помощью прогнозирующей модели в адаптивной системе управления // Пробл. управления и теории информ. 1980. Т.9 (5). С. 329-337
8. Булатов И.А., Романов А.В., Фролов Ю.М., Адаптивное управление электроприводом. - Электротехнические комплексы. - 2008.

9. Буянкин В. М., Пантюхин Д. В. Синтез последовательного интегрального пропорционального нейрорегулятора для управления электроприводом // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2006. - №3. - С115-121

10. Бычков В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства. – М.: Высшая школа, 1977. – 392 с.

11. Веренев В. В. Влияние технологических параметров на момент, действующий на валки прокатной клетки в период захвата полосы // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2004. – №8– С. 375-379

12. Веренев В. В. и др. Зависимость ударных нагрузок от технического состояния клеток непрерывного прокатного стана // Металл и литье Украины. – 2009.

13. Веренев В.В., Большаков В.И., Белобров Ю.И., Бобух И.А. Динамические перегрузки в приводах клеток широкополосных станов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – № 1. – 1999. – С. 72-75.

14. Волянский С.М., Волянская Я.Б Сравнительный анализ регуляторов, применяемых в системах управления энергосберегающим электроприводом постоянного тока // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2008. – №. 51. – С. 106-108.

15. 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. -85с.

16. Глуценко А. И., Петров В. А. О применении нейросетевого настройщика для адаптации П-регулятора скорости при управлении реверсивной прокатной клетью Материалы XIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» - М.: ИПУ РАН, 2016.

17. Денисенко В. В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации //Современные технологии автоматизации. – 2006. – №. 4. – С. 66-74.

18. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Ч. 2 //Современные технологии автоматизации. – 2008. – № 1. –С. 86–99

19. Дылевский А. В., Лозгачев Г. И. Конечномерный модальный регулятор для объектов с запаздыванием // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. – 2005. – №. 1. – С. 158-162.

20. Егорова А.О., Кузнецов В.П. Metallургический комплекс РФ: состояние, тенденции, перспективы // Фундаментальные и прикладные исследования кооперативного сектора экономики. - №2. – 2015. - С. 56-61.

21. Еременко Ю. И., Глущенко А. И. О разработке метода выбора структуры нейронной сети для решения задачи адаптации параметров линейных регуляторов / Управление большими системами. - Выпуск 62. - М.: ИПУ РАН, 2016. - С.75-123.

22. Еременко Ю. И., Полещенко Д. А., Глущенко А. И. О разработке метода определения значений задержек входных сигналов нейронной сети при реализации нейросетевого оптимизатора параметров ПИ-регулятора // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2015. – №. 10 (171).

23. Еременко Ю.И., Глущенко А.И., Петров В.А. О нейросетевой адаптации параметров ПИ-регулятора контура тока системы управления прокатной клетью в реальном времени // Системы управления и информационные технологии. – 2016. – Т.65. – № 3. – С.62-68.

24. Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Глущенко А.И. Об особенностях практической реализации схемы ПИД-нейрорегулятора с самонастройкой для управления печами нагрева // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2012. – №1. – С. 25–30.

25. Зайцев А. И., Ладанов А. С. Универсальный адаптивный регулятор для систем управления электроприводами постоянного тока на базе нечеткой логики // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2006. – №. 2. – С. 17-20.

26. Зеленов А.Б., Треиичников В.Н., Гулякин В.Г. Электрооборудование механизмов прокатных станов. - М.: Metallургиздат, 1963. - 313 с.

27. Изосимов С. Д., Черный С. П. Использование нечёткого регулятора для управления электродвигателем постоянного тока при случайном характере нагрузки // Материалы международной научно-практической конференции

«Современные направления теоретических и прикладных исследований 2012». – Выпуск 1. Том 1. – Одесса: Куприенко – 2012. – Т. 2013. – №. 2011. 59-66

28. Калачев Ю. Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. – 2015. — М.: Самиздат, 2015. — 58 с

29. Канифольский Д.С., Посмитная Л. А., Глушко С. П. Проектирование системы управления скоростью главных электроприводов клетей чистовой группы прокатного стана // Теоретические и практические вопросы развития научной мысли в современном мире. Сборник статей Международной научно-практической конференции. Уфа., – 2013. – С. 190-193.

30. Карандаев А. С., Храмшин В. Р., Лукин Ал , Шурыгина Г. В., Головин В. В. Экспериментальные исследования тиристорных электроприводов с двухзонным регулированием скорости с улучшенными энергетическими характеристиками // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. - 2010. - №14 – С.67-72.

31. Карпухин И.И. Снижение динамических нагрузок и повышение долговечности машин широкополосных станов горячей прокатки // Бюллетень «Черная металлургия», ОАО Черметинформация. – 2004. – №07. – С.31–35.

32. Клепиков В. Б. и др. Применение методов нейронных сетей и генетических алгоритмов в решении задач управления электроприводами //Электротехника. – 1999. – №. 5. – С. 2-6.

33. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. – М.: Энергия, 1971. – 380 с

34. Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии. -М.: Энергия, 1973. - 400 с

35. Коротков А.В., Кузьмин А.В., Толочко О.И. Согласование скоростных режимов слябинга 1150 при совместной прокатке // Электротехнические и электромеханические системы: материалы студ. науч.-техн. конф., 28-30 апр. 2003г., г. Севастополь. - Севастополь, 2003. - С. 23-30.

36. Коротков М. Ф., Пахомов А. Н., Федоренко А. А. Модальное управление асинхронным электроприводом // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – №. 4.

37. Коцегуб П. Х. и др. Особенности построения и исследование цифровых систем регулирования скорости электроприводов с наблюдателями состояния // Проблемы автоматизированного электропривода. теория и практика: Вестник ХГПУ. - Харьков: ХГПУ, 2000. - Вып.113. - С. 74-77.

38. Кочнев Н.В., Кочнева Т.Н. Модальное управление нежесткими электромеханическими системами в металлургии // Современная техника и технологии. 2015. № 4 [Электронный ресурс]. URL: <http://technology.snauka.ru/2015/04/6296> (дата обращения: 02.02.2016).

39. Кояин Н. В., Мальцева О. П., Удут Л. С. Оптимизация контуров регулирования систем электропривода по симметричному оптимуму // Известия Томского политехнического университета, Томь. – 2005. – №. 7. – С. 120-125.

40. Кояин Н. В., Мальцева О. П., Удут Л. С. Оптимизация контуров регулирования систем электропривода по типовым методикам // Известия ТПУ. 2005. №7. – С. 120-125.

41. Кравченко Андрей Юрьевич. Оптимальная адаптивная система автоматического управления электромеханическими системами главных приводов прокатных станов : диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.03.- Липецк, 2002.- 155 с.: ил. РГБ ОД, 61 02-5/2713-1

42. Куваев В. Н. и др. Энерго- и ресурсосбережение на непрерывных сортопрокатных станах на основе технологической автоматизации // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2008. – №. 18 (2). – С. 55-59.

43. Куваев Н. В. Оптимизация управления взаимосвязанным электроприводом клетей непрерывных сортопрокатных станов // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2010. – №. 84. – С. 167-174.

44. Куленко М. С., Буренин С. В. Исследование применения нечетких регуляторов в системах управления технологическими процессами // Вестник ИГЭУ. – 2010. – №. 2. – С. 72-76.

45. Куропаткин П.В. Оптимальные и адаптивные системы. – М.: Высшая школа, 1980. -287 с.

46. Ланграф С. В. и др. Динамика электропривода с нечётким регулятором // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – №. 4. – С. 168-173.
47. Лехов О.С. Динамические нагрузки в линии привода обжимных станов. – М.: Машиностроение, 1975. – 184 с.
48. Лсвитанский Б. А. Электрооборудование предприятий черной металлургии. - М.: Металлургиздат, 1955. - 620 с.
49. Мазуров В.М. Автоматические регуляторы в системах управления и их настройка. Ч. 2. Автоматические регуляторы и их настройка. Общие сведения о промышленных системах регулирования // Компоненты и технологии. – 2003. – № 5. –С. 59–62.
50. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: Учебник / Под ред. Н.Д. Егупова, 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. – 744 с.
51. Мещеряков В. Н., Мигунов Д. В. Математическое моделирование способа снижения динамических нагрузок электропривода черновой клетки прокатного стана // Электротехнические комплексы и системы управления. 2011. № 3. - С. 21–26.
52. Мещеряков В. Н., Толчеев В. М. Разработка способа снижения динамических нагрузок электропривода прокатной клетки стана холодной прокатки // Электротехнические системы и комплексы. – 2015. – №. 3 (28). – С. 14-19.
53. Мещеряков В.Н., Мигунов Д.В. Снижение динамических нагрузок электропривода черновой клетки прокатного стана // Сборник научных трудов XVII международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии». Томск: ТПУ, 2011. Т. 1. С. 493-495.
54. Мишенин А. А. Применение нейронных сетей для решения задач в машиностроении // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. — 2003. — №11(57). — С. 17-24.
55. Морозов Д.П. Теория электропривода и автоматики реверсивных станов. - М., Л.: Госэнергоиздат, 1949. - 315 с.

56. Назарова Е. С., Бондаренко В. И., Пирожок А. В. Оптимальное управление взаимосвязанными электроприводами стана холодной прокатки // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2011. – №. 3. – С. 216-217.

57. Патент РФ № 2004131391/02, 27.10.2004. Угаров А.А., Бобылев М.В., Шляхов Н.А., Гонтарук Е.И., Лехтман А.А., Фомин В.И., Сидоров В.П., Коршиков С.П., Гончаров В.В. Способ производства круглого сортового проката из среднелегированной стали // Патент России № 2276192. 2006. Бюл. № 13.

58. Пахомов А. Н. и др. Модальные регуляторы асинхронных электроприводов. – 2013. – С.943-950.

59. Певзнер, Л. Д. Теория систем управления / Л. Д. Певзнер. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2002. – 472с.

60. Перельмутер В.М., Брауде Ю.Н., Перчик Д.Я., Книгин В.М. Тиристорные электроприводы прокатных станов. – М.: Металлургия, 1978. – 152с.

61. Перельмутер В.М., Сидоренко В.А. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 304с.

62. Петров Б.Н. Рутковский В.Ю., Крутова И.Н. Принципы построения и проектирования самонастраивающихся систем управления.- М.: Машиностроение, 1972.- 358 с.

63. Петров В.А., Глуценко А.И., Еременко Ю.И. О разработке нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора контура тока при управлении электроприводом прокатной клетки. Информатика, управление и системный анализ: Труды IV Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2016. – Т. I. – С 61-71.

64. Плахтин В.Д. Подбор рабочих валков широкополосных станов в зависимости от угловых зазоров в линии привода // *Сталь*. – 1999. – №3. – С.29–32.

65. Полищук А.В. Настройка ПИД-регулятора систем автоматического регулирования объектов теплоэнергетического оборудования — Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет. — С. 19.

66. Пушкин А. А., Тимошенко А. В. Оптимизация параметров электроприводов прокатных станов с целью улучшения качества динамических процессов // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.–Випуск. – 2008. – Т. 3. – №. 56. – С. 33-38.

67. Пушкин А.А., А.В. Тимошенко Моделирование динамических режимов электромеханического оборудования автоматизированных металлургических машин // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2008. – Т.8. – № 5. – С.165-170.

68. Радионов А. А., Пермякова О. В., Шохин В. В. Повышение точности прокатки при стабилизации момента прокатного двигателя // Электротехнические системы и комплексы. – 2010. – №. 1. – С.116-123.

69. Радионов А.А. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клеток прокатного стана. Часть 2. Исследование динамических нагрузок в универсальных клетях // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т.15. – №. 2. – С.67-76.

70. Растринин Л.А. Адаптация сложных систем. – Рига: Зинатие, 1981. -375с.

71. Растринин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами. –М.: Советское радио, 1980. - 232с.

72. Ротач В. Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов. – М.: издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с.

73. Гуренко С., Максаев П., Шиманский Г. Автоматизированная система контроля технологических параметров работы главных электроприводов непрерывнозаготовочного стана // Современные технологии автоматизации. – 2005.– №. 4. – С.56-64.

74. Сергиенко С. А. Анализ чувствительности оптимальной системы стабилизации скорости электропривода к параметрическим возмущением // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2002. – № 467. – С. 31–39.

75. Симою М.П. Определение коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев систем регулирования // Автоматика и телемеханика. – 1957. – № 6. – С. 514–527

76. Синтез систем автоматического управления методом модального управления. В.В. Григорьев, Н.В. Журавлёва, Г.В. Лукьянова и др. – С-Пб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 108 с.

77. Скороспешкин в. н. Адаптивная система автоматического регулирования //Интернет-журнал Науковедение. – 2014. – №. 2.

78. Современная прикладная теория управления: в 3 ч. / Под ред. А.А.Колесникова. – Москва – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 400с.

79. Стельмащук С. В. Определение момента инерции электропривода по кривой разгона методом Симою //Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – №. 6.

80. Стельмащук С.В. Настройка ПИДДрегулятора по кривой разгона объекта с самовыравниванием для максимального быстродействия с заданным перерегулированием при идентификации объекта моделью первого порядка с запаздыванием // Вестник ТОГУ. – 2013. – № 2. – С. 81–90

81. Стельмащук С.В. Об аналитическом синтезе по прямым показателям качества на основе упрощённой модели // Учёные записки КнАГТУ. – 2011. – № 4. – С. 12–17.

82. Стельмащук С.В. Оценка качества системы автоматического регулирования на основе упрощённой модели // Учёные записки КнАГТУ. – 2010. – № 1. – С. 36–39

83. Стельмащук С.В., Чернов А.Ю. Синтез ПИДДрегулятора системы автоматического регулирования с максимальным быстродействием и ограничением на перерегулирование // Электротехнические системы и комплексы: Междунар. сборник научных трудов. – Магнитогорск: Изддво МГТУ им. Г.И. Носова, 2012. – С. 256–265

84. Стефанович В.Л. Автоматизация непрерывных и полунепрерывных широкополосных станов горячей прокатки. - М.: Металлургия, 1975. - 208 с.

85. Таратута А. С., Новиков Е. Н. Адаптивные системы управления электроприводами. – 2012. – С. 1-4.

86. Тимошенко А.В., Пушкин А.А. Влияние параметров оптимизации системы подчиненного регулирования на демпфирующую способность электропривода // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика». - Випуск №7(128), - 2007. – С107-112.

87. Толочко О.И., Коцегуб П.Х., Писковатская О.В. Синтез наблюдателей состояния для двухзонных систем косвенного регулирования скорости // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ. – 2005. – №4 (33). – С. 12-14.

88. Тонкаль В.Е. и др. Баланс энергии в электрических цепях. - Киев: Паукова думка, 1992. - 245 с.

89. Тутаев Г. М., Биленкис Ю. К. Исследование методов «Soft-computing» для использования в системе управления электроприводом

90. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. – М.: Наука, 1971. – 744 с.

91. Филаретов В. Ф., Алексеев Ю. К., Лебедев А. В. Системы управления подводными роботами // М.: Круглый год. – 2001. – Т. 288. – С. 2.

92. Фишбейн В.Г. Расчет систем подчиненного регулирования вентильного электропривода постоянного тока. – М.: Энергия, 1972. – 136с.

93. Холодюк А. В., Коцюбинский В. С. Синтез главного электропривода черновой клетки с учетом упругости кинематической передачи // Донбасский государственный технический университет. Теорія автоматизованого електропривода. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – №3(19). – С. 72-74.

94. Храмшин В. Р. И ДР. Снижение динамических нагрузок в универсальных клетях прокатного стана // Металлург. – 2015. – №. 4. – С. 41-47

95. Храмшин В. Р. И ДР. Снижение динамических нагрузок механического и электрического оборудования черновой подгруппы клетей стана горячей прокатки // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – №. 2. – С. 69-77.

96. Храмшин В. Р. и др. Совершенствование систем управления электро-и гидроприводами широкополосного стана горячей прокатки //Электротехника. – 2015. – Т. 2. – №. 1. – С. 51.

97. Храмшин В. Р. Разработка и внедрение автоматизированных электроприводов и систем регулирования технологических параметров широкополосного стана горячей прокатки // Вестник ИГЭУ. – 2012. – №. 6. – С. 100-104.

98. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. –М.: Наука, 1968. -326с.

99. Челюсткин А.Б. Автоматизация процессов прокатного производства. - М.: Металлургия, 1971. - 294 с.

100. Черный С. П., Гусаров А. А. Нечеткая многокаскадная система управления электроприводом постоянного тока // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012. – №. 4. – С. 56-60.

101. Чернышев Д. В. Разработка моделей систем управления главным приводом реверсивных прокатных станов на основе технологии искусственных нейронных сетей : диссертация кандидата технических наук : 05.13.18. - Комсомольск-на-Амуре, 2001. - 149 с.

102. Ченцов К. Ю. Исследование динамических нагрузок электромеханических систем главных приводов черновых клетей стана горячей прокатки : диссертация кандидата технических наук : 05.09.03. - Липецк, 2000. - 158 с. : ил.

103. Чумаков В. П. Совершенствование процесса прокатки в дуо реверсивной клетки //Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. –Харків: НТУ «ХПІ. – 2010. – №. 42. – С. 152.

104. Чумаков В. П., Трунова А. Э., Гринь Д. В. Интенсификация режима обжатий при прокатке на блюминге //Вісник Криворізького національного університету. – 2014. – №. 34. – С. 23-28.

105. Чураков Е.П. Оптимальные и адаптивные системы. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 256 с.
106. Шендрик В.С. Синтез оптимальных управлений методом прогнозирующей модели // ДАН СССР. 1975. Т.224. №3. С. 561-562.
107. Энергосбережение на металлургических предприятиях. Б.И.Никифоров, Г.В. Заславец: Монография. – Магнитогорск: МГТУ. 2000 г.
108. Abedini S., Zarabadipour H. Tuning of an optimal PID controller with iterative feedback tuning method for DC motor //Control, Instrumentation and Automation (ICCIA), 2011 2nd International Conference on. – IEEE, 2011. – С. 611-615.
109. Alexandrov A.G., Palenov M.V. Self-tuning PID-I controller // Proceedings of the 18th IFAC World Congress. Milano, Italy, 2011. - P.3635-3640
110. Ali F. H., Algreer M. M. F. Fuzzy PID control for positioning plants with uncertain parameters variation //Information and Communication Technologies, 2006. ICTTA'06. 2nd. – IEEE, 2006. – Vol. 1. – P. 1428-1433.
111. AL-KALBANI F., ET AL., Active disturbance rejection control of a heat integrated distillation column. Proc. of 21st int. Conference on methods and models in automation and ro-botics. – IEEE, 2016. – pp. 278-283.
112. Allaoua B. et al. Neuro-fuzzy DC motor speed control using particle swarm optimization //Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies. – 2009. – Vol. 15. – P. 1-18.
113. Allaoua B., Gasbaoui B., Mebarki B. Setting up PID DC motor speed control alteration parameters using particle swarm optimization strategy //Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies. – 2009. – Vol. 14. – P. 19-32.
114. Al-Ubaidi S. M. Z., Algreer M. M. F. Real Time Implementation of PID and Fuzzy PD Controllers for DC-Servo Motor Based on Lab View Environment //Tikrit Journal of Engineering Sciences. – 2012. – Vol. 19. – №. 2.
115. Ang K., Chong G., Li Y., PID control system analysis, design, and technology, IEEE Trans. Control System Technology, vol. 13, p. 559 – 576, Jul. 2005.

116. Ang K.H., G. Chong and Y. Li, "PID control system analysis, design and technology," IEEE transaction on Control System Technology, Vol.13, No.4, 2005, pp. 559-576.
117. Astrom K.J., Hagglund T. Revisiting the Ziegler–Nichols step response method for PID control // Journal of Process Control. –2004. – V. 14. – Iss. 6. – P. 635–650.
118. ASTROM K.J., T. HAGGLUND, Advanced PID control. –Research triangle park: ISA, – 2006. –460 p.
119. B.J. Chalmers, "Influence of saturation in brushless permanent magnet drives." IEE proc. B, Electr.Power Appl, vol.139, no.1, 1992.
120. BEZRYADIN M.M., AND LOZGACHEV G.I., Synthesis of modal controller with compensation of external disturbance for object with parametric uncertainty on the criterion of maximum robustness // Trudy SPIIRAN. – 2012. – vol. 21. – pp. 157-169.
121. Bindu R., Namboothiripad M. K. Tuning of PID controller for DC servo motor using genetic algorithm //International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2012. – Vol. 2. – №. 3. – P. 310-314.
122. Bobtsov A.A., Pyrkin A.A., Cancellation of un-known multiharmonic disturbance for nonlinear plant with input delay // International journal of adaptive control and signal processing. – 2012. –vol. 26, no. 4. –pp. 302–315.
123. C.T. Johnson and R.D. Lorenz, "Experimental identification of friction and its compensation in precise, position controlled mechanism." IEEE Trans. Ind ,Applicat, vol.28, no.6, 1992.
124. Calvo-Rolle J. L. et al. A hybrid intelligent system for PID controller using in a steel rolling process //Expert Systems with Applications. – 2013. – Vol. 40. – №. 13. – P. 5188-5196.
125. Chen Y. Q., Vinagre B. M., Podlubny I. Fractional order disturbance observer for robust vibration suppression // Nonlinear Dynamics. – 2004. – Vol. 38. – №. 1-4. – P. 355-367.

126. Chien K.L., Hrones J.A., Reswick J.B. On the Automatic Control of Generalized Passive Systems // Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. – 1952. – Vol.74. - P.175-185.

127. Dhaouadi R., Kubo K., Tobise M. Two-degree-of-freedom robust speed controller for high-performance rolling mill drives // IEEE transactions on industry applications. – 1993. – Vol.29.5. – P. 919-926.

128. El-Awady K, Hansson A & Wahlberg B. (1999). Application of iterative feedback tuning to a thermal cycling module. 14th world congress of IFAC, Beijing, (pp. 438–444).

129. Eremenko Yuri, Anton Glushchenko, Vladislav Petrov On PI-Controller Parameters Adjustment for Rolling Mill Drive Current Loop using Neural Tuner XII International Symposium «Intelligent Systems» 2016, Moscow, October 5-7, 2016

130. Eremenko Y.I., Glushchenko A.I., and Petrov V.A. On Neural Network Based Online Tuning of Rolling Mill Drive Armature Current PI-controller Parameters X International IEEE scientific and technical conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines" (Dynamics) Omsk, IEEE, 15–17 November, 2016

131. Erenturk K. Fractional-Order λD^μ and Active Disturbance Rejection Control of Nonlinear Two-Mass Drive System // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – Vol. 60. – №. 9. – P. 3806-3813.

132. Fan L. P., Liu Y. Fuzzy Tuning PID Control of the Rolling Mill Main Drive System // Applied Mechanics and Materials. – Trans Tech Publications, 2015. – Vol. 713. – P. 739-742.

133. Fan L., Liu Y. Fuzzy self-tuning PID control of the main drive system for four-high hot rolling mill // Journal of Advanced Manufacturing Systems. – 2015. – Vol. 14. – №. 01. – P. 11-22.

134. Gorban A.N., Wunsch D. The general approximation theorem // Proceedings of the IJCNN. – Anchorage: IEEE, 1998. – P. 1271-1274.

135. Graham A.E, Young A.J & Xie S.Q. (2007). Rapid tuning of controllers by IFT for profile cutting machines. Mechatronics 17. (pp. 121–128).

136. Gundogdu T., Komurgoz G. Self-tuning PID control of a brushless DC motor by adaptive interaction //IEEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering. – 2014. – T. 9. – №. 4. – C. 384-390.
137. Gunnarsson S, Rousseaux O & Collignon V. (1999). Iterative feedback tuning applied to robot joint controllers. 14th world congress of IFAC (pp. 451–456).
138. Hamamoto K & Sugie T. (1999). Construction of suboptimal controllers via iterative feedback tuning. CD-ROM of the fifth European control conference, Karlsruhe
139. Hjalmarsson H & Cameron M. T.. Iterative feedback tuning of controllers in cold rolling mills. 14th world congress of IFAC (pp. 445–450). (1999)
140. Hjalmarsson H, Gunnarsson S & Gevers M. (1994). A convergent iterative restricted complexity control design scheme. Proceedings of the 33rd IEEE conference on decision and control, Orlando, FL (pp. 1735–1740).
141. Hori Y., Iseki H., Sugiura K. Basic consideration of vibration suppression and disturbance rejection control of multi-inertia system using SFLAC (state feedback and load acceleration control) // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1994. – Vol.30.4. – P.889-896.
142. Huang G.-B., Wang D.H., Lan Y. Extreme learning machines: a survey // International Journal of Machine Learning and Cybernetics. – 2011. – Vol. 2, No. 2. – P. 107–122.
143. Hui Y. et al. Adaptive double-loop pid control method of dc motor based on the ga-fnc algorithm //Instrumentation and Control Technology (ISICT), 2012 8th IEEE International Symposium on. – IEEE, 2012. – C. 324-329.
144. Kalman R.E. Contributions to the theory of optimal control // Boletin de la Sociedad Matematica Mexicana. – 1960. – V.5, pp. 102–119.
145. Kalman R.E. Theory of Optimal Control // Bullet Soc. Mat. Mech. 1960. V. 5. №1. – P. 106–115.
146. Kessler C. Das symmetrische Optimum. Teil I und III // Regelungstechnik. – 1958. – B. 6. – H. 11. – S. 395–400; H. 12. –S. 432–436.

147. Kessler C. Uber Vorausberechnung optimal abgestimmter Regelkreise. Teil III. Die optimale Einstellung des Reglers nach dem Betragsoptimum // Regelungstechnik. – 1955. – B. 3. – H. 2. – S. 40–49.

148. Krishna K. B. M., Goud B. V. S. Fuzzy PID Control for Networked Control System of DC Motor with Random Design // International Journal of Computer Applications. – 2012. – Vol. 52. – №. 7.

149. Krot P.V. Transient torsional vibrations control in the geared drive trains of the hot rolling mills. 3rd IEEE Multi-Conf. on Systems and Control (MSC 2009). July 8-10. – St. Petersburg: IEEE, 2009. – P. 1368-1373.

150. Kun E., Veisz T.S. Energy efficiency enhancement in the Hot Rolling Mill // Materials Science and Engineering. – 2014. – № 3.2. – pp. 43-50

151. KŮRKOVÁ V. Kolmogorov's theorem is relevant // Neural Computation. – 1991. – Vol. 3. – № 4. – P.617–622.

152. Landan J.D. Adaptive Control – The Model Reference Adaptive Control. New York: Dekker, 1980, p. 386

153. Li W., Hori Y. Vibration suppression using single neuron-based PI fuzzy controller and fractional-order disturbance observer // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2007. – Vol. 54. – №. 1. – P. 117-126.

154. LOZGACHEV G.I., Synthesis of modal controllers based on a transfer system of a closed-loop system // Avtom. telemekh. –1995. – vol. 5. – pp. 49-55.

155. M.M.R. Ahmed, «fuzzy logic speed control of DC motors fed by single-ended primary inductance converters (sepic)», IEEE conference, pp.343-347, 2008

156. Maher M.F. Algreer, «Design fuzzy self tuning of PID controller for chopper-fed dc motor drive», Al-Rafidain engineering Vol.16, PP.54-66, 2008.

157. Mann G.K.I., Bao-Gang Hu, Gosine R.G. Analysis of direct action fuzzy PID controller structures // ICEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B. June 1999 Vol. 29. Issue 3. P. 371-378. 7.

158. Mapelli, F., et al. A state observer for speed regulation in rolling mill drives // Structural Dynamics. – 2011. – Vol.3. – Pp.1193-1205.

159. Mohiuddin M. S. Comparative study of PID and Fuzzy tuned PID controller for speed control of DC motor // *Int. J. Innov. Eng. Technol.* – 2013.
160. O'Dwyer A. PI and PID controller tuning rules for time delay processes: a summary // *Proc. of the Irish signals and systems conference.* – N.U.I., Galway, 1999. – P. 331–346.
161. Omatu S., Khalid M., Yusof R. *Neuro-Control and its Applications.* – London: Springer, 1995. – 255 p.
162. Orłowska-Kowalska T., Szabat K. Damping of torsional vibrations in two-mass system using adaptive sliding neuro-fuzzy approach // *IEEE Transactions on Industrial Informatics.* – 2008. – Vol. 4. – №. 1. – P. 47-57.
163. Oviedo J.J.E., Boelen T., van Overschee P. Robust advanced PID control (RaPID): PID tuning based on engineering specifications // *IEEE Control Systems Magazine.* – 2006. – V. 26. – P. 15–19.
164. Preitl S. Precup, R.E. An extension of tuning relations after symmetrical optimum method for PI and PID controllers // *Automatica.* –1999. – V. 35. – № 10. – P. 1731–1736.
165. Pyrkin A., et al., Adaptive controller for linear plant with parametric uncertainties, input delay and unknown disturbance // *IFAC Proceedings.* –2014. – vol. 47.3. – pp. 11294-11298.
166. Pyrkin A., Smyshlyaev A., Bekiaris-Liberis N., Krstic M., Output control algorithm for unstable plant with input delay and cancellation of unknown biased harmonic disturbance. 9th IFAC Workshop on time delay system. –IFAC,2010.– pp.1-6.
167. Shpilevaya O. Ya., Control systems with additive adjustment based on the velocity vector method // *Optoelectronics, instrumentation and data processing.* – 2011. – vol. 47. – pp. 281-286.
168. Sjöberg J & De Bruyne F. D. (1999). On a nonlinear controller tuning strategy. 14th world congress of IFAC (pp. 343–348).
169. Skogestad S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning // *Journal of Process Control.* – 2003. –V. 13. – Iss. 4. – P. 291–309

170. Son, Y.I., et al. Robust cascade control of electric motor drives using dual reduced-order PI observer // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2015. – Vol. 62. – No. 6. – Pp. 3672-3682.

171. Stashinov. Y. P. On the issue of control system adjustment of a direct current drive on the modular optimum. Part 1 // Russian Electrical Engineering. – 2016. – №87.1. – pp. 1-5.

172. Sundareswaran K., Vasu M. Genetic tuning of PI controller for speed control of DC motor drive // Industrial Technology 2000. Proceedings of IEEE International Conference on. – IEEE, 2000. – Vol. 1. – P. 521-525.

173. Szabat K., Orłowska-Kowalska T. Vibration suppression in a two-mass drive system using PI speed controller and additional feedbacks—Comparative study // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2007. – Vol. 54. – №. 2. – P. 1193-1206.

174. Tan K.K., Lee T.H., Jiang X. Robust online relay automatic tuning of PID control systems // ISA Transactions. – 2000. – V. 39. – Iss. 2. – P. 219–232.

175. Thana Pattaradej, Guanrong Chen and PitikhateSooraksa, "Design and Implementation of Fuzzy PID Control of a bicycle robot", Integrated computer-aided engineering, Vol.9, No.4, 2002

176. Tipsuwan Y., Chow M. Y. Fuzzy logic microcontroller implementation for DC motor speed control // Industrial Electronics Society, 1999. IECON'99 Proceedings. The 25th Annual Conference of the IEEE. – IEEE, 1999. – Vol. 3. – P. 1271-1276.

177. Visioli A., Improving the load disturbance rejection per-formances of IMC-tuned PID controllers // IFAC Proceed-ings volumes (15th ifac world congress). –2002. –vol. 35, no.1. –pp. 295-300.

178. Voda A.A., Landau I.D. A method for the auto-calibration of PID controllers // Automatica. – 1995. – V. 31. – № 1. – P. 41–53.

179. Vostrikov A.S., Shpilevaya O. YA, Nonlinear con-trol systems with fast adaptive algorithm. Proceeding of the IASTED international conference on modelling, identifica-tion and control (MIC 2004), Switzerland, Grindelwald, 23–25 Febr. 2004. – 2004. – pp. 444–449.

180. Vrancic D., Strmenic S., Hanus R. Improving disturbance rejection of PI controllers by means of the magnitude optimum method // ISA Transactions. – 2004. – V. 43. – № 1. – P. 73–74.

181. Wang J. et al. Torsional vibration suppression of rolling mill with constrained model predictive control. The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. – IEEE, 2006. – Vol. 2. – P. 6401-6405.

182. Weiming Tang, Guanrong Chen and Rongde Lu, “A Modified Fuzzy PI Controller for a Flexible-joint Robot Arm with Uncertainties”, Fuzzy Set and System, 118 (2001) 109-119

183. Wu C. J. Genetic tuning of PID controllers using a neural network model: a seesaw example //Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 1999. – Vol. 25. – №. 1. – P. 43-59.

184. Xia C. et al. Speed control of brushless DC motor using genetic algorithm based fuzzy controller //Proceeding of the 2004 International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation, Chengdu, China, 3rd edn. A Treatise on Electricity and Magnetism. – 2004. – Vol. 2. – P. 68-73.

185. Yanagawa S., Miki I. PID Auto-tuning controller using a single neuron for DC servomotor //Industrial Electronics, 1992., Proceedings of the IEEE International Symposium on. – IEEE, 1992. – C. 277-280.

186. Zhang J. et al. PID neural network control of hydraulic roll gap control system //Measurement, Information and Control (MIC), 2012 International Conference on. – IEEE, 2012. – T. 2. – C. 791-795.

187. Zhang J., Wang N. and Wang S., “A developed method of tuning PID controllers with fuzzy rules for integrating process,” Proceedings of the American Control Conference, Boston, 2004, pp. 1109-1114.

188. Zhang R. et al. Torsional vibration suppression control in the main drive system of rolling mill by state feedback speed controller based on extended state observer. In proceedings of IEEE 2007 International Conference on Control and Automation (ICCA). – IEEE, 2007. – P. 2172-2177

189. Zhang R., Tong C. Torsional vibration control of the main drive system of a rolling mill based on an extended state observer and linear quadratic control // *Journal of Vibration and Control*. – 2006. – Vol. 12. – №. 3. – P. 313-327.
190. Zhang S., X. Zhou and L. Yang, “Adaptive PID regulator based on neural network for DC motor speed control,” *Proc IEEE Conf. Electrical and Control Engineering (ICECE)*, pp. 1950-1953, 2011.],
191. Zhang, J., Fan, Y., Zhong, W., Gao, J., Guan, T., & Liu, Y. (2012, May). PID neural network control of hydraulic roll gap control system. In *Measurement, Information and Control (MIC), 2012 International Conference on* (Vol. 2, pp. 791-795). IEEE.
192. Zhang, N. Wang and S. Wang, “A developed method of tuning PID controllers with fuzzy rules for integrating process,” *Proceedings of the American Control Conference, Boston, 2004*, pp. 1109-1114
193. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers // *Transactions of the ASME*. – 1942. – Vol.64. – pp. 759-768.

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

(справочное)

Справка о возможности использования на АО «ОЭМК»

Утверждаю

Главный инженер

АО «Оскольский

электromеталлургический комбинат»

А.Д. Тищенко

«29» 05 2018г.

**СПРАВКА**

о возможности использования результатов исследований Петрова В.А., направленных на решение актуальной научно-технической задачи повышения качества управления сложными технологическими процессами путем более точного поддержания регламентных режимов, выносимых на защиту кандидатской диссертации

Настоящий акт подтверждает, что следующие результаты, полученные лично Петровым В.А. в рамках выполнения исследований, являются актуальными и представляют практический интерес:

- адаптивная система управления главным электроприводом прокатной клетки, основанная на применении нейросетевого настройщика;
- разработанные базы правил, позволяющие в реальном времени изменять настройку параметров линейных регуляторов скорости и тока в режиме изменения скорости электропривода и режиме захвата заготовки;

Перечисленные результаты, на наш взгляд, являются весомым вкладом в развитие систем управления электроприводами, что может позволить за счет улучшения качества управления повысить эффективность работы существующего электропривода прокатной клетки на 3-5% (экономия составит 32 МВт·ч в месяц).

АО «Оскольский электromеталлургический комбинат» планирует использование представленных к защите результатов исследования Петрова В.А.

Технический директор-
начальник ТУ

Евсеев С.Л.

Справка о возможности использования на ООО «Технологии АЭК»

Утверждаю

Директор, главный конструктор

ООО "Технологии АЭК"

К.т.н. Старокожев Александр Иванович

«25» мая 2018г.



СПРАВКА

о возможности использования результатов диссертационного исследования Петрова Владислава Анатольевича по теме: «Повышение эффективности управления электроприводом прокатных клетей на основе оперативной нейросетевой настройки»

Комиссия ООО "Технологии АЭК" в составе директора Старокожева А.И. и главного инженера Рогова А.В. рассмотрела вопрос об использовании результатов диссертационной работы Петрова Владислава Анатольевича и установила следующее:

Разработанная в рамках диссертационной работы адаптивная система управления электроприводом постоянного тока на основе применения нейросетевого настройщика является эффективным способом компенсации изменения параметров электропривода промышленного агрегата. Результаты исследования позволяют снизить потребляемую мощность проектируемых электроприводов на 3-5% за счет снижения интенсивности переходных процессов и времени выхода на рабочий режим. Результаты исследования планируются к поэтапному внедрению.

Состав комиссии:

1.  / Старокожев А.И. /2.  / Рогов А.В. /

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.

(справочное)

Определим жесткость приводного вала:

$$C'_1 = \frac{\sigma \cdot \pi \cdot d_{ПВ}^4}{32 \cdot l_{ПВ}}; \quad (\text{Б.1})$$

$$C'_1 = \frac{8 \times 10^{10} \times 3,14 \times (0,2)^4}{32 \times 0,45} = 27,9 \times 10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Определим жесткость тихоходного вала конического редуктора:

$$C'_2 = \frac{\sigma \pi d_{КР.Т}^4}{32 l_{КР.Т} (i_P)^2}; \quad (\text{Б.1})$$

$$C'_2 = \frac{8 \times 10^{10} \times 3,14 \times (0,3)^4}{32 \times 0,4 \times (7,2)^2} = 4,9 \times 10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Определим жесткость быстроходного вала конического редуктора:

$$C'_3 = \frac{\sigma \pi d_{КР.Б}^4}{32 l_{КР.Б} (i_P)^2}; \quad (\text{Б.3})$$

$$C'_3 = \frac{8 \times 10^{10} \times 3,14 \times (0,2)^4}{32 \times 0,25 \times (7,2)^2} = 0,96 \times 10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Определим жесткость тихоходного вала цилиндрического редуктора:

$$C'_4 = \frac{\sigma \pi d_{ЦР.Т}^4}{32 l_{ЦР.Т} (i_P)^2}; \quad (\text{Б.4})$$

$$C'_4 = \frac{8 \times 10^{10} \times 3,14 \times (0,35)^4}{32 \times 0,4 \times (5,6)^2} = 9,4 \times 10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Определим жесткость быстроходного вала цилиндрического редуктора:

$$C'_5 = \frac{\sigma \pi d_{\text{ЦР.Б}}^4}{32 l_{\text{ЦР.Б}} (i_P)^2}; \quad (\text{Б.5})$$

$$C'_5 = \frac{8 \times 10^{10} \times 3,14 \times (0,3)^4}{32 \times 0,35 \times (5,6)^2} = 5,3 \times 10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Определим жесткость шпинделя:

$$C'_6 = \frac{\sigma \pi d_{\text{Ш}}^4}{32 l_{\text{Ш}}}; \quad (\text{Б.6})$$

$$C'_6 = \frac{8 \times 10^{10} \times 3,14 \times (0,5)^4}{32 \times 3,5} = 140 \times 10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Преобразование многомассовой системы в трехмассовую начинается от нагрузки к двигателю.

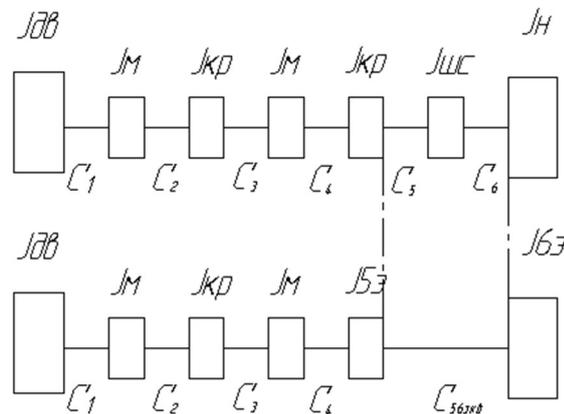


Рис. Б.1 – Преобразование семимассовой системы в шестимассовую

$$J'_5 = J_{\text{ШС}} \cdot \frac{c'_6}{c'_5 + c'_6}; \quad (\text{Б.7})$$

$$J'_5 = 15 \cdot \frac{140 \cdot 10^6}{(5,3 + 140) \cdot 10^6} = 14,4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

$$J'_6 = J_{\text{ШС}} \cdot \frac{c'_5}{c'_5 + c'_6}; \quad (\text{Б.8})$$

$$J'_6 = 15 \cdot \frac{5,3 \cdot 10^6}{(140 + 5,3) \cdot 10^6} = 0,54 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (\text{Б.9})$$

$$J_{5Э} = J_{Ц.П} + J'_5;$$

$$J_{5Э} = 206 + 14,4 = 220,4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (\text{Б.10})$$

$$J_{6Э} = J_H + J'_6;$$

$$J_{6Э} = 300 + 0,54 = 300,54 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (\text{Б.11})$$

$$c'_{56 \text{ ЭКВ}} = \frac{c'_5 \cdot c'_6}{c'_5 + c'_6};$$

$$c'_{56 \text{ ЭКВ}} = \frac{5,3 \cdot 140 \cdot 10^6 \cdot 10^6}{(5,3 + 140) \cdot 10^6} = 5,1 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

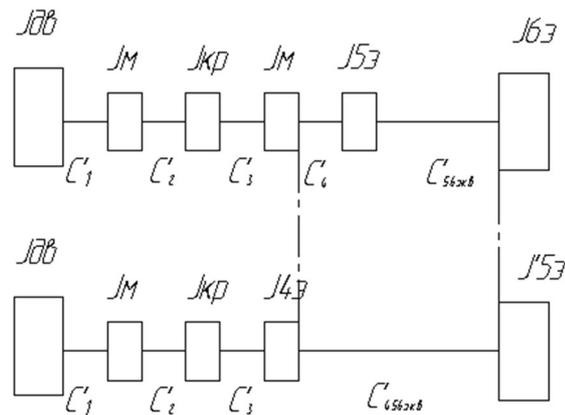


Рис. Б.2 – Преобразование шестимассовой системы в пятимассовую

$$J'_4 = J_{5Э} \cdot \frac{c'_{56 \text{ ЭКВ}}}{c'_4 + c'_{56 \text{ ЭКВ}}}; \quad (\text{А.12})$$

$$J'_4 = 220,4 \cdot \frac{5,1 \cdot 10^6}{(9,4 + 5,1) \cdot 10^6} = 77,52 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J''_5 = J_{5Э} \cdot \frac{c'_4}{c'_4 + c'_{56 \text{ ЭКВ}}}; \quad (\text{Б.13})$$

$$J''_5 = 38,7 \cdot \frac{9,4 \cdot 10^6}{(5,1 + 9,4) \cdot 10^6} = 142,88 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_{4\text{Э}} = J_M + J'_4; \quad (\text{Б.14})$$

$$J_{4\text{Э}} = 9 + 77,52 = 86,52 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

$$J'_{5\text{Э}} = J_{6\text{Э}} + J''_5; \quad (\text{Б.15})$$

$$J'_{5\text{Э}} = 300,54 + 142,88 = 443,42 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

$$c'_{456\text{ЭKB}} = \frac{c'_4 \cdot c'_{56\text{ЭKB}}}{c'_4 + c'_{56\text{ЭKB}}}; \quad (\text{Б.16})$$

$$c'_{456\text{ЭKB}} = \frac{9,4 \cdot 5,1 \cdot 10^6 \cdot 10^6}{(9,4 + 5,1) \cdot 10^6} = 3,3 \cdot 10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

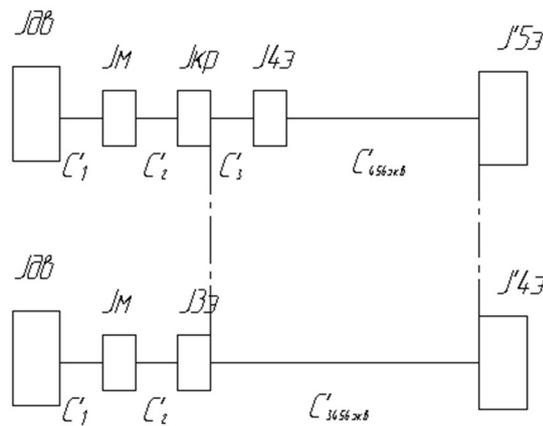


Рис. Б.3 – Преобразование пятимассовой системы в четырехмассовую

$$J'_3 = J_{4\text{Э}} \cdot \frac{c'_{456\text{ЭKB}}}{c'_3 + c'_{456\text{ЭKB}}}; \quad (\text{Б.17})$$

$$J'_3 = 86,52 \cdot \frac{3,3 \cdot 10^6}{(0,96 + 3,3) \cdot 10^6} = 67 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

$$J''_4 = J_{4\text{Э}} \cdot \frac{c'_3}{c'_3 + c'_{456\text{ЭKB}}}; \quad (\text{Б.18})$$

$$J''_4 = 86,52 \cdot \frac{0,96 \cdot 10^6}{(0,96 + 3,3) \cdot 10^6} = 19,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

$$J_{3\text{Э}} = J_{\text{KP}} + J'_3; \quad (\text{Б.19})$$

$$J_{3\text{Э}} = 24,3 + 67 = 91,3 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

$$J'_{4\text{Э}} = J_{5\text{Э}} + J''_4 \quad (\text{Б.20})$$

$$J'_{4\text{Э}} = 443,42 + 19,5 = 462,92 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

$$c'_{3456 \text{ ЭКВ}} = \frac{c'_3 \cdot c'_{456 \text{ ЭКВ}}}{c'_3 + c'_{456 \text{ ЭКВ}}}; \quad (\text{Б.21})$$

$$c'_{3456 \text{ ЭКВ}} = \frac{0,96 \cdot 3,3 \cdot 10^6 \cdot 10^6}{(0,96 + 3,3) \cdot 10^6} = 0,74 \cdot 10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

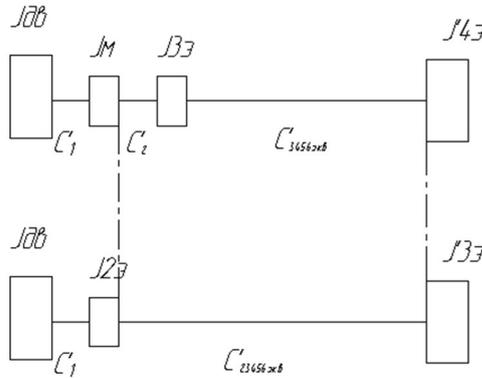


Рис. Б.4 – Преобразование четырехмассовой системы в трехмассовую

$$J'_2 = J_{3\text{Э}} \cdot \frac{c'_{3456 \text{ ЭКВ}}}{c'_2 + c'_{3456 \text{ ЭКВ}}}; \quad (\text{Б.22})$$

$$J'_2 = 91,3 \cdot \frac{0,74 \cdot 10^6}{(4,9 + 0,74) \cdot 10^6} = 11,9 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

$$J''_3 = J_{3\text{Э}} \cdot \frac{c'_2}{c'_2 + c'_{3456 \text{ ЭКВ}}}; \quad (\text{Б.23})$$

$$J''_3 = 91,3 \cdot \frac{4,9 \cdot 10^6}{(4,9 + 0,74) \cdot 10^6} = 79,3 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

$$J_{2\text{Э}} = J_M + J'_2; \quad (\text{Б.23})$$

$$J_{2\text{Э}} = 9 + 11,9 = 20,9 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

$$J'_{3\text{Э}} = J_{4\text{Э}} + J''_3; \quad (\text{Б.25})$$

$$J'_{3\text{Э}} = 462,92 + 79,3 = 542,22 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

$$c'_{23456 \text{ ЭКВ}} = \frac{c'_2 \cdot c'_{3456 \text{ ЭКВ}}}{c'_2 + c'_{3456 \text{ ЭКВ}}}; \quad (\text{Б.26})$$

$$c'_{23456 \text{ ЭКВ}} = \frac{4,9 \cdot 0,74 \cdot 10^6 \cdot 10^6}{(4,9 + 0,74) \cdot 10^6} = 0,64 \cdot 10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Представим трехмассовую систему в виде двухмассовой.

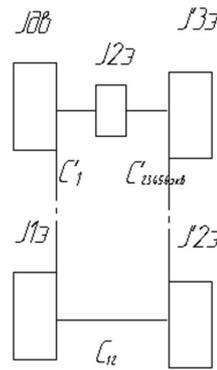


Рис. Б.5 – Преобразование трехмассовой системы в двухмассовую

$$J'_1 = J_{2B} \cdot \frac{c'_{23456KB}}{c'_1 + c'_{23456KB}} ; \quad (\text{Б.27})$$

$$J'_1 = 20.9 \cdot \frac{0.64 \cdot 10^6}{(27.9 + 0.64) \cdot 10^6} = 0.46 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J''_2 = J_{2B} \cdot \frac{c'_1}{c'_1 + c'_{23456KB}} ; \quad (\text{Б.28})$$

$$J''_2 = 20.9 \cdot \frac{27.9 \cdot 10^6}{(27.9 + 0.64) \cdot 10^6} = 20.4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_{1B} = J_{1B} + J'_1 ; \quad (\text{Б.29})$$

$$J_{1B} = 390 + 0.46 = 390.46 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J'_{2B} = J_{3B} + J''_2 ; \quad (\text{Б.30})$$

$$J'_{2B} = 542.22 + 20.4 = 562.64 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$c_{12} = \frac{c'_1 \cdot c'_{23456KB}}{c'_1 + c'_{23456KB}} ; \quad (\text{Б.31})$$

$$c_{12} = \frac{27.9 \cdot 0.64 \cdot 10^6 \cdot 10^6}{(27.9 + 0.64) \cdot 10^6} = 0.6256 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В.

(справочное)

Программный код реализации нейросетевого настройщика ПИ-регулятора контура тока

```
function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance] = neuC_PI(t,x,u,flag)
switch flag,
    case 0,
        [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes;
    case 1,
        sys=mdlDerivatives(t,x,u);
    case 2,
        sys=mdlUpdate(t,x,u);
    case 3,
        sys=mdlOutputs(t,x,u);
    case 4,
        sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u);
    case 9,
        sys=mdlTerminate(t,x,u);
    otherwise
        DAStudio.error('Simulink:blocks:unhandledFlag', num2str(flag));
end
function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 2;
sizes.NumOutputs = 4;
sizes.NumInputs = 14;
sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
x0 = [0 0];
str = [];
ts = [0 0];

simStateCompliance = 'UnknownSimState';

function sys=mdlDerivatives(t,x,u)

sys = [];

function sys=mdlUpdate(t,x,u)
global LO;
sys = [LO(1) LO(2)];

function sys=mdlOutputs(t,x,u)
global IW LW B1 B2 dt;
global HO LO dHO dLO;
global dLW dIW dB1 dB2 matr eta etaHL DELAY extremum_zadanie extremum_tok;
global u0 u_old N napravlenie counter_extremum_tok;
global Kp Ki counter flag_peresech kol_vo_peresech LO_stab counter_extremum_zadanie;
global flag_stop_zadanie flag_stop_tok proverka t_smena t_peresech extremum_zadanie2 extremum_tok2;
global flag_stop_zadanie2 flag_stop_tok2 flag_stop_kp flag_keep_kp kol_vo_peresech_mezdy_pikami_zadaniya;
global t_peresech_mezdy_pikami_zadaniya flag_rise_kp flag_stop_ki flag_rise_ki kol_vo_peresech_mezdy_pikami_toka
t_peresech_mezdy_pikami_toka kol_vo_peresech_tok2 step_setpoint flag_okrestnost;
global flag_okrestnost_piki_zadaniya flag_okrestnost_piki_toka KP KI t_pik_tok2 flag_medlenno
kol_vo_peresech_saturation flag_nasishenie flag_p flag_post_yskorenie flag_fact_nasishenie flag_stop_kp_shag_nazad;
```

```

global flag_ext_tok_pozge_ext_zad flag_pp kol_vo_peresechmezdy_pikami_toka_extremum_kol_vo_peresech_real
peresech_real peresechmezdy_pikami_zadanija_real kol_vo_peresechmezdy_pikami_zadanija_real flag_plato
extremum_zadanie_shag_nazad;
global flag_stop_zadanie3 extremum_zadanie3 max_tok flag_smena_napravlenija flag_doing_nothing flag_nastroika
kol_vo_peresech_tok2_real t_okrestnost flag_force_stop_kp flag_force_stop_ki extremum_max;
global flag_rise_ki_shag_nazad flag_rise_kp_shag_nazad flag_stop_ki_shag_nazad Nhid;
LO=[x(1) x(2)];
srednee_zadanie=(u(1)+u(2)+u(3))/3;
srednee_zadanie_shag_nazad=(u(2)+u(3)+u(4))/3;
srednee_zadanie_dva_shaga_nazad=(u(3)+u(4)+u(14))/3;
srednee=(u(5)+u(6)+u(7))/3;
srednee_shag_nazad=(u(6)+u(7)+u(8))/3;
srednee_dva_shaga_nazad=(u(7)+u(8)+u(9))/3;

P=[(1-(10-srednee_zadanie))/(10-(-10)) (1-(10-srednee_zadanie_shag_nazad))/(10-(-10)) (1-(10-srednee))/(10-(-10)) (1-
(10-srednee_shag_nazad))/(10-(-10)) (1-(10-u(10)))/(10-(-10))];
if t==dt
    HO=logsig(P*IW'+B1');
    LO=purelin(HO*LW'+B2');
end

if (t<=(Nhid-2)*dt)
    LO=[Kp Ki];
end

if 1
    if t>=0 && t<=(Nhid-2)*dt
        HO=logsig(P*IW'+B1');
        matr=[matr; HO];
        LO=[Kp Ki];
        dLO(1)=srednee_shag_nazad-srednee;
        dLO(2)=srednee_zadanie-srednee;
    end

    if t==(Nhid-2)*dt
        KP(1:(Nhid-1),1)=Kp;
        LW(1,:)=matr\KP;
        KI(1:(Nhid-1),1)=Ki;
        LW(2,:)=matr\KI;
        B2=[0; 0];
    end
end

if t>=(Nhid-1)*dt
    if t==(Nhid-1)*dt
        HO=logsig(P*IW'+B1');
        LO=purelin(HO*LW'+B2');
    end

    if abs(u(11)-u(12))>step_setpoint && u(12)==u(13) && t-t_smena>(round(225/Nhid))*dt
        if abs(abs(LO_stab(2))-abs(LO(2)))<0.05*abs(LO_stab(2)) && abs(abs(LO_stab(1))-
abs(LO(1)))<0.05*abs(LO_stab(1)) && flag_nastroika==0
            flag_doing_nothing=1;
        else
            flag_doing_nothing=0;
        end
        extremum_zadanie_shag_nazad=extremum_zadanie;
        if u(11)>u(12)
            napravlenie=1;
        end
        if u(11)<u(12)
            napravlenie=-1;
        end
    end
end

```

```

HO=logsig(P*IW'+B1');
LO=purelin(HO*LW'+B2');

if LO(1)<0
    LO(1)=LO(1)*(-1);
end
if LO(2)<0
    LO(2)=LO(2)*(-1);
end

LO_stab=LO;
if abs(extremum_zadanie)>0.1
    extremum_max=abs(extremum_zadanie);
end
extremum_zadanie=srednee_zadanie;
extremum_tok=srednee;
flag_stop_zadanie2=0;
flag_stop_tok2=0;
flag_peresech=0;
kol_vo_peresech=0;
counter_extremum_zadanie=0;
flag_stop_zadanie=0;
if flag_post_yskorenie==0
    flag_stop_kp_shag_nazad=flag_stop_kp;
end
flag_stop_kp=0;
flag_stop_tok=0;
flag_keep_kp=0;
kol_vo_peresech_mezdy_pikami_zadaniya=0;
flag_rise_kp=0;
flag_stop_ki=0;
flag_rise_ki=0;
kol_vo_peresech_tok2=0;
t_smena=t;
kol_vo_peresech_mezdy_pikami_toka=0;
kol_vo_peresech_mezdy_pikami_toka_extremum=0;
flag_okrestnost=0;
flag_okrestnost_piki_toka=0;
flag_okrestnost_piki_zadaniya=0;
flag_medlenno=0;
KP=LO(1);
KI=LO(2);
kol_vo_peresech_saturation=0;
flag_nasishenie=0;
flag_p=0;
flag_post_yskorenie=0;
flag_fact_nasishenie=0;
flag_ext_tok_pozge_ext_zad=0;
flag_pp=0;
kol_vo_peresech_real=0;
peresech_real=0;
peresech_mezdy_pikami_zadaniya_real=0;
kol_vo_peresech_mezdy_pikami_zadaniya_real=0;
flag_plato=0;
flag_stop_zadanie3=0;
flag_smena_napravleniya=0;
flag_nastroika=0;
kol_vo_peresech_tok2_real=0;
flag_force_stop_kp=0;
flag_force_stop_ki=0;
end

```

```

if flag_okrestnost==1 && abs(srednee-srednee_dva_shaga_nazad)<0.001 && abs(srednee_zadanie-
srednee_zadanie_dva_shaga_nazad)<0.001 && (flag_post_yskorenie==0 && flag_stop_tok2==1 &&
flag_stop_zadanie2==1 || flag_plato==1 || flag_okrestnost==1 && flag_stop_zadanie==1 && flag_stop_tok==1 && t-
t_okrestnost>10*DELAY)

```

```

if (flag_stop_tok2==0 || flag_stop_zadanie2==0) && kol_vo_peresech_real==0 && flag_plato==0 &&
abs(abs(LO_stab(2))-abs(LO(2)))<0.05*abs(LO_stab(2)) && abs(abs(LO_stab(1))-abs(LO(1)))<0.05*abs(LO_stab(1))
    flag_force_stop_kp=1;
end
if (flag_stop_zadanie==1 && flag_stop_tok==1 && abs(extremum_zadanie)<max_tok &&
1.03*abs(extremum_zadanie)<abs(extremum_tok)) && abs(abs(LO_stab(2))-abs(LO(2)))<0.05*abs(LO_stab(2)) &&
abs(abs(LO_stab(1))-abs(LO(1)))<0.05*abs(LO_stab(1)) && flag_stop_zadanie3==1
    flag_force_stop_ki=1;
end
if abs(abs(KI)-abs(LO(2)))>0.05*abs(KI) || abs(abs(KP)-abs(LO(1)))>0.05*abs(KP)
    flag_nastroika=1;
end
if abs(abs(LO_stab(2))-abs(LO(2)))>0.05*abs(LO_stab(2)) && flag_rise_ki==1
    flag_rise_ki_shag_nazad=1;
else
    flag_rise_ki_shag_nazad=0;
end
if abs(abs(LO_stab(1))-abs(LO(1)))>0.05*abs(LO_stab(1)) && flag_rise_kp==1
    flag_rise_kp_shag_nazad=1;
else
    flag_rise_kp_shag_nazad=0;
end
if abs(extremum_zadanie)>0.1
    extremum_max=abs(extremum_zadanie);
end
LO_stab=LO;
extremum_zadanie_shag_nazad=extremum_zadanie;
extremum_zadanie=srednee_zadanie;
extremum_tok=srednee;
flag_stop_zadanie2=0;
flag_stop_tok2=0;
flag_peresech=0;
kol_vo_peresech=0;
counter_extremum_zadanie=0;
flag_stop_zadanie=0;
flag_stop_kp_shag_nazad=flag_stop_kp;
flag_stop_kp=0;
flag_stop_tok=0;
flag_keep_kp=0;
kol_vo_peresechmezdy_pikami_zadanija=0;
flag_rise_kp=0;
flag_stop_ki=0;
flag_rise_ki=0;
kol_vo_peresech_tok2=0;
t_smena=t;
kol_vo_peresechmezdy_pikami_toka=0;
flag_okrestnost=0;
flag_okrestnost_piki_toka=0;
flag_okrestnost_piki_zadanija=0;
kol_vo_peresechmezdy_pikami_toka_extremum=0;
flag_medlenno=0;
KP=LO(1);
KI=LO(2);
kol_vo_peresech_saturation=0;
flag_nasishenie=0;
flag_p=0;

```

```

    flag_post_yskorenie=1;
    flag_fact_nasishenie=0;
    flag_ext_tok_pozge_ext_zad=0;
    flag_pp=0;
    kol_vo_peresech_real=0;
    peresech_real=0;
    peresech_mezdy_pikami_zadaniya_real=0;
    kol_vo_peresech_mezdy_pikami_zadaniya_real=0;
    if (flag_plato==0)
        if napravlenie==1
            napravlenie=-1;
        else
            napravlenie=1;
        end
    end
    flag_plato=1;
    flag_stop_zadanie3=0;
    flag_smena_napravlenija=0;
    kol_vo_peresech_tok2_real=0;
end
if flag_plato==1 && abs(srednee-srednee_dva_shaga_nazad)>0.005 && abs(srednee_zadanie-
srednee_zadanie_dva_shaga_nazad)>0.005
    flag_plato=0;
end
if flag_plato==0
if napravlenie==1 && srednee_zadanie>extremum_zadanie && flag_stop_zadanie==0
    extremum_zadanie=srednee_zadanie;
end
if napravlenie==1 && srednee>extremum_tok && flag_stop_tok==0
    extremum_tok=srednee;
end

if napravlenie==-1 && srednee_zadanie<extremum_zadanie && flag_stop_zadanie==0
    extremum_zadanie=srednee_zadanie;
end
if napravlenie==-1 && srednee<extremum_tok && flag_stop_tok==0
    extremum_tok=srednee;
end
if abs(srednee_zadanie-extremum_zadanie_shag_nazad)>0.1*abs(extremum_zadanie_shag_nazad)&& (napravlenie==1
&& srednee_zadanie_shag_nazad>srednee_zadanie || napravlenie==-1 && srednee_zadanie_shag_nazad<srednee_zadanie
|| srednee_zadanie==max_tok || srednee_zadanie==-1*max_tok)
    flag_stop_zadanie=1;
end

if (napravlenie==1 && srednee_dva_shaga_nazad<srednee_shag_nazad && srednee_shag_nazad>srednee ||
napravlenie==-1 && srednee_shag_nazad<srednee && srednee_shag_nazad<srednee_dva_shaga_nazad) &&
abs(srednee)>0.01*extremum_max
    if abs(srednee_zadanie)>=0.8*max_tok;
        flag_p=1;
    end
    if abs(srednee_zadanie)<0.8*max_tok && flag_stop_tok==0
        flag_pp=1;
    end
    if abs(extremum_tok)>1.05*abs(extremum_zadanie) && abs(extremum_tok)<=1.1*abs(extremum_zadanie) &&
flag_stop_tok==0 && abs(srednee_zadanie)<0.9*max_tok)
        flag_ext_tok_pozge_ext_zad=1;
    end
    flag_stop_tok=1;
    if kol_vo_peresech==0
        flag_medlenno=1;
    end
end
end

```

```

if flag_stop_zadanie==1 && flag_stop_zadanie2==0 && (napravlenie==1 &&
((srednee_zadanie_shag_nazad<srednee_zadanie || (abs(srednee_zadanie-srednee_zadanie_shag_nazad)<0.005 &&
abs(extremum_zadanie)>1)) && (srednee_zadanie_dva_shaga_nazad<srednee_zadanie_shag_nazad ||
abs(srednee_zadanie_shag_nazad-srednee_zadanie_dva_shaga_nazad)<0.0055 && abs(extremum_zadanie)>1)) ||
napravlenie==-1 && ((srednee_zadanie_shag_nazad>srednee_zadanie || abs(srednee_zadanie-
srednee_zadanie_shag_nazad)<0.01 && abs(extremum_zadanie)>1) &&
(srednee_zadanie_dva_shaga_nazad>srednee_zadanie_shag_nazad || abs(srednee_zadanie_shag_nazad-
srednee_zadanie_dva_shaga_nazad)<0.01 && abs(extremum_zadanie)>1))) && (abs(extremum_zadanie-
srednee_zadanie_shag_nazad)>0.05*abs(extremum_zadanie) || abs(abs(extremum_zadanie-srednee_zadanie_shag_nazad)-
0.05*abs(extremum_zadanie))<0.01) && srednee_zadanie~=-max_tok && srednee_zadanie~-1*max_tok
    extremum_zadanie2=srednee_zadanie_shag_nazad;
    flag_stop_zadanie2=1;
end
if flag_stop_zadanie==1 && flag_stop_zadanie2==0 && (napravlenie==1 && srednee_zadanie<extremum_zadanie &&
abs(srednee_zadanie-extremum_zadanie)>0.01 || napravlenie==-1 && srednee_zadanie>extremum_zadanie &&
abs(srednee_zadanie-extremum_zadanie)>0.01)
    flag_smena_napravlenija=1;
end
if flag_stop_zadanie==1 && (flag_stop_zadanie2==1 || flag_smena_napravlenija==1) && (napravlenie==1 &&
srednee_zadanie>extremum_zadanie || napravlenie==-1 && srednee_zadanie<extremum_zadanie)
    flag_stop_zadanie3=1;
end
if abs(srednee_zadanie)<max_tok && flag_stop_tok==1 && flag_stop_tok2==0 && (abs(extremum_tok-
srednee_shag_nazad)>0.1*abs(extremum_tok)) && (napravlenie==1 && ((srednee_shag_nazad<srednee || abs(srednee-
srednee_shag_nazad)<=0.005 && abs(extremum_tok)>1) && (srednee_dva_shaga_nazad<srednee_shag_nazad ||
abs(srednee_shag_nazad-srednee_dva_shaga_nazad)<=0.005 && abs(extremum_tok)>1)) || napravlenie==-1 &&
((srednee_shag_nazad>srednee || abs(srednee-srednee_shag_nazad)<=0.005 && abs(extremum_tok)>1) &&
(srednee_dva_shaga_nazad>srednee_shag_nazad || abs(srednee_shag_nazad-srednee_dva_shaga_nazad)<=0.0055)))
    extremum_tok2=srednee_shag_nazad;
    flag_stop_tok2=1;
    t_pik_tok2=t;
    kol_vo_peresech_tok2=kol_vo_peresech;
    kol_vo_peresech_tok2_real=kol_vo_peresech_real;
    if flag_stop_zadanie2==0
        flag_keep_kp=1;
    end
    if kol_vo_peresechmezdy_pikami_toka==0 && abs(srednee-srednee_zadanie)<0.1 &&
abs(extremum_zadanie)<max_tok
        kol_vo_peresechmezdy_pikami_toka=1;
    end
end
end

if abs(srednee_zadanie-srednee)>0.01
    flag_okrestnost=0;
end
if abs(srednee_zadanie-srednee)>0.01
    flag_okrestnost_piki_zadaniya=0;
end
if abs(srednee_zadanie-srednee)>0.01
    flag_okrestnost_piki_toka=0;
end
if (srednee-srednee_zadanie>0 && srednee_shag_nazad-srednee_zadanie_shag_nazad<0 && peresech_real~=1) ||
(srednee-srednee_zadanie<0 && srednee_shag_nazad-srednee_zadanie_shag_nazad>0 && peresech_real~-1)
    kol_vo_peresech_real=kol_vo_peresech_real+1;
    if srednee-srednee_zadanie>0 && srednee_shag_nazad-srednee_zadanie_shag_nazad<0
        peresech_real=1;
    end
    if srednee-srednee_zadanie<0 && srednee_shag_nazad-srednee_zadanie_shag_nazad>0
        peresech_real=-1;
    end
end
end

```

```

if t-t_peresech>(round(225/Nhid))*dt && t~t_smena && (abs(srednee_zadanie-srednee)<0.01 || ((srednee-
srednee_zadanie>0 && srednee_shag_nazad-srednee_zadanie_shag_nazad<0 || srednee-srednee_zadanie<0 &&
srednee_shag_nazad-srednee_zadanie_shag_nazad>0) && abs(srednee_shag_nazad-srednee_zadanie_shag_nazad)>0.1))

    if flag_peresech==0
        flag_peresech=1;
    end

    if flag_okrestnost==0
        kol_vo_peresech=kol_vo_peresech+1;

        if srednee_zadanie==max_tok || srednee_zadanie==-1*max_tok
            kol_vo_peresech_saturation=kol_vo_peresech_saturation+1;
        end
        t_peresech=t;
    end
    if abs(srednee_zadanie-srednee)<0.01
        if (flag_okrestnost==0)
            t_okrestnost=t;
        end
        flag_okrestnost=1;
    end

end

if flag_stop_zadanie==1 && flag_stop_zadanie2==0 && t-t_peresech_mezdy_pikami_zadaniya>(round(225/Nhid))*dt &&
(abs(srednee_zadanie-srednee)<0.01 || ((srednee-srednee_zadanie>0 && srednee_shag_nazad-
srednee_zadanie_shag_nazad<0 || srednee-srednee_zadanie<0 && srednee_shag_nazad-srednee_zadanie_shag_nazad>0)
&& abs(srednee_shag_nazad-srednee_zadanie_shag_nazad)>0.1))
    if (srednee-srednee_zadanie>0 && srednee_shag_nazad-srednee_zadanie_shag_nazad<0 &&
peresech_mezdy_pikami_zadaniya_real~=1) || (srednee-srednee_zadanie<0 && srednee_shag_nazad-
srednee_zadanie_shag_nazad>0 && peresech_mezdy_pikami_zadaniya_real~-1)
        kol_vo_peresech_mezdy_pikami_zadaniya_real=kol_vo_peresech_mezdy_pikami_zadaniya_real+1;
        if srednee-srednee_zadanie>0 && srednee_shag_nazad-srednee_zadanie_shag_nazad<0
            peresech_mezdy_pikami_zadaniya_real=1;
        end
        if srednee-srednee_zadanie<0 && srednee_shag_nazad-srednee_zadanie_shag_nazad>0
            peresech_mezdy_pikami_zadaniya_real=-1;
        end
    end

end

if flag_okrestnost_piki_zadaniya==0
    kol_vo_peresech_mezdy_pikami_zadaniya=kol_vo_peresech_mezdy_pikami_zadaniya+1;
    t_peresech_mezdy_pikami_zadaniya=t;
end
if abs(srednee_zadanie-srednee)<0.01
    flag_okrestnost_piki_zadaniya=1;
end

end

if flag_stop_tok==1 && flag_stop_tok2==0 && t-t_peresech_mezdy_pikami_toka>(round(225/Nhid))*dt &&
(abs(srednee_zadanie-srednee)<0.01 || ((srednee-srednee_zadanie>0 && srednee_shag_nazad-
srednee_zadanie_shag_nazad<0 || srednee-srednee_zadanie<0 && srednee_shag_nazad-srednee_zadanie_shag_nazad>0)
&& abs(srednee_shag_nazad-srednee_zadanie_shag_nazad)>0.1))
    if flag_okrestnost_piki_toka==0
        kol_vo_peresech_mezdy_pikami_toka=kol_vo_peresech_mezdy_pikami_toka+1;
        if abs(srednee_zadanie)>=max_tok
            kol_vo_peresech_mezdy_pikami_toka_extremum=kol_vo_peresech_mezdy_pikami_toka_extremum+1;
        end
        t_peresech_mezdy_pikami_toka=t;
    end
    if abs(srednee_zadanie-srednee)<0.01
        flag_okrestnost_piki_toka=1;
    end
end

```

```

end
if mod(counter,round(225/Nhid))==0

dLO(1)=srednee_shag_nazad-srednee;
dLO(2)=srednee_zadanie-srednee;

if (u(10)>=-10 && u(10)<=10)

HO=logsig(P*IW'+B1');
LO=purelin(HO*LW'+B2');

eta(1,1:Nhid)=0.00000;
eta(2,1:Nhid)=0.0000000000;
etaHL=0.000001;
a(1:2)=0.001;
b(1:2)=-0.15
a(2)=0;
b(2)=0;

if (flag_rise_ki==0 || flag_rise_ki==1 && abs(abs(KI)-abs(LO(2)))<0.05*abs(KI)) &&
flag_force_stop_kp==0 && abs(extremum_zadanie)>=max_tok && flag_rise_kp==0
&&(kol_vo_peresechmezdy_pikami_toka_extremum==0 && (kol_vo_peresechmezdy_pikami_toka)==0 ||
kol_vo_peresechmezdy_pikami_toka_extremum==1 && (kol_vo_peresechmezdy_pikami_toka-
kol_vo_peresechmezdy_pikami_toka_extremum-1)==0) && flag_stop_tok==1 && flag_stop_tok2==1 && abs(srednee-
srednee_shag_nazad)<0.005 && (napravlenie==1 && srednee>srednee_zadanie || napravlenie==-1 &&
srednee<srednee_zadanie)
if srednee_shag_nazad>srednee
eta(1,1:Nhid)=-abs(LO(1))*abs(abs(srednee_zadanie)-abs(srednee))*10;
end
if srednee_shag_nazad<srednee
eta(1,1:Nhid)=abs(LO(1))*abs(abs(srednee_zadanie)-abs(srednee))*10;
end
flag_stop_kp=1;
end
if flag_force_stop_kp==0 && abs(extremum_tok)>0.85*abs(extremum_zadanie) && (flag_rise_ki==0 ||
flag_rise_ki==1 && abs(abs(KI)-abs(LO(2)))<0.05*abs(KI)) && (flag_stop_ki==0 || flag_stop_ki==1 && abs(abs(KI)-
abs(LO(2)))<0.05*abs(KI)) && abs(extremum_zadanie)<max_tok && abs(extremum_tok2-extremum_zadanie2)>0.01
&& (napravlenie==1 && extremum_tok2>extremum_zadanie2 || napravlenie==-1 &&
extremum_tok2<extremum_zadanie2) && (kol_vo_peresechmezdy_pikami_toka==0 || kol_vo_peresech_tok2_real==0
&& kol_vo_peresechmezdy_pikami_toka==1 || kol_vo_peresech_tok2_real==1 &&
kol_vo_peresechmezdy_pikami_toka==1 && abs(extremum_tok)<abs(extremum_zadanie) && (napravlenie==1 &&
srednee>srednee_zadanie || napravlenie==-1 && srednee<srednee_zadanie)) && flag_rise_kp==0 && flag_stop_tok==1
&& flag_stop_tok2==1 && abs(srednee-srednee_shag_nazad)<0.005 && (napravlenie==1 && srednee>srednee_zadanie
&& srednee<srednee_shag_nazad || napravlenie==-1 && srednee<srednee_zadanie && srednee>srednee_shag_nazad)
if srednee_shag_nazad>srednee
eta(1,1:Nhid)=-abs(LO(1))*abs(extremum_tok2-extremum_zadanie2)*10;
end
if srednee_shag_nazad<srednee
eta(1,1:Nhid)=abs(LO(1))*abs(extremum_tok2-extremum_zadanie2)*10;
end
flag_stop_kp=1;
end

if abs(srednee_zadanie)>0.1 && ((flag_stop_zadanie==0 && abs(srednee-
srednee_zadanie)<0.17*extremum_max && abs(srednee_zadanie_shag_nazad-
srednee_zadanie)>0.01*abs(extremum_max) && abs(srednee_shag_nazad-srednee)>0.01*abs(extremum_max)) ||
((flag_peresech==1) && flag_stop_zadanie==0 && (napravlenie==1 && srednee_zadanie>srednee_zadanie_shag_nazad
&& srednee>srednee_shag_nazad && srednee>srednee_zadanie || napravlenie==-1 &&
srednee_zadanie<srednee_zadanie_shag_nazad && srednee<srednee_shag_nazad && srednee<srednee_zadanie) &&

```

```
abs(srednee_zadanie_shag_nazad-srednee_zadanie)>0.01*abs(extremum_zadanie_shag_nazad) &&
abs(srednee_shag_nazad-srednee)>0.01*abs(extremum_max)))
```

```

    if napravlenie==1
      eta(1,1:Nhid)=abs(LO(1))/25;
      if kol_vo_peresech>1
        eta(1,1:Nhid)=abs(LO(1))/10;
      end
      if kol_vo_peresech>=10
        eta(1,1:Nhid)=abs(LO(1))/1;
      end
    end
    if napravlenie==-1
      eta(1,1:Nhid)=-abs(LO(1))/25;
      if kol_vo_peresech>1
        eta(1,1:Nhid)=-abs(LO(1))/10;
      end
      if kol_vo_peresech>=10
        eta(1,1:Nhid)=-abs(LO(1))/1;
      end
    end
    flag_stop_kp=1;
  else
    if (flag_peresech==1) && flag_stop_zadanie==0 && flag_okrestnost==1 &&
abs(srednee_zadanie_shag_nazad-srednee_zadanie)>0.01 && abs(srednee_shag_nazad-srednee)>0.01
      if napravlenie==1
        eta(1,1:Nhid)=abs(LO(1))/10;
      end
      if napravlenie==-1
        eta(1,1:Nhid)=-abs(LO(1))/10;
      end
      flag_stop_kp=1;
    end
  end

  if (flag_rise_kp==0 || flag_rise_kp==1 && abs(abs(KP)-abs(LO(1)))<0.05*abs(KP)) && (flag_stop_kp==0 ||
flag_stop_kp==1 && abs(abs(KP)-abs(LO(1)))<0.05*abs(KP)) && flag_stop_zadanie==1 && flag_stop_tok==1 &&
abs(extremum_zadanie)<max_tok && 1.03*abs(extremum_zadanie)<abs(extremum_tok) && (flag_stop_tok2==1 &&
flag_stop_zadanie2==1 || (flag_stop_zadanie2==0 && flag_smena_napravlenija==1 && flag_stop_zadanie3==1)) &&
((napravlenie==1 && extremum_tok2>extremum_zadanie2 && abs(extremum_tok2-
extremum_zadanie2)>0.005*abs(extremum_zadanie) || napravlenie==-1 && extremum_tok2<extremum_zadanie2) &&
abs(extremum_tok2-extremum_zadanie2)>0.005*abs(extremum_zadanie) || flag_stop_zadanie3==1)
    if srednee_zadanie>srednee
      eta(2,1:Nhid)=-abs(LO(2))*abs(extremum_tok)/abs(extremum_zadanie)/100;
    end
    if srednee_zadanie<srednee
      eta(2,1:Nhid)=abs(LO(2))*abs(extremum_tok)/abs(extremum_zadanie)/100;
    end
    if flag_stop_zadanie3==1
      if srednee_zadanie>srednee
        eta(2,1:Nhid)=-abs(LO(2))*abs(extremum_tok)/abs(extremum_zadanie)/50;
      end
      if srednee_zadanie<srednee
        eta(2,1:Nhid)=abs(LO(2))*abs(extremum_tok)/abs(extremum_zadanie)/50;
      end
    end

    end
    flag_stop_ki=1;
  end

  if flag_force_stop_kp==0 && abs(extremum_tok)>0.85*abs(extremum_zadanie) && (flag_stop_ki==0 ||
flag_stop_ki==1 && abs(abs(KI)-abs(LO(2)))<0.05*abs(KI)) && flag_stop_zadanie==1 && flag_stop_zadanie2==0 &&
((kol_vo_peresech_mezdy_pikami_zadaniya-kol_vo_peresech_saturation)>2 ||
```

```

kol_vo_peresechmezdy_pikami_zadanija_real>1 || kol_vo_peresech_saturation>1 && (flag_fact_nasishenie==1 ||
abs(extremum_tok)>=1.1*abs(extremum_zadanie) && (mod(kol_vo_peresech_saturation,2)~=0 ||
mod(kol_vo_peresech_saturation,2)==0 && (kol_vo_peresechmezdy_pikami_zadanija-kol_vo_peresech_saturation-1)>1
)))
    if srednee_shag_nazad>srednee
        eta(1,1:Nhid)=-abs(LO(1))/10;
    end
    if srednee_shag_nazad<srednee
        eta(1,1:Nhid)=abs(LO(1))/10;
    end
    flag_stop_kp=1;
end

    if flag_stop_tok==1 && abs(extremum_tok)<1.03*abs(extremum_zadanie) && abs(extremum_tok-
1.03*extremum_zadanie)>0.1 && abs(extremum_zadanie)==max_tok
    if flag_p==0
        if srednee_shag_nazad>srednee
            eta(1,1:Nhid)=abs(LO(1))/200*abs(extremum_tok-extremum_zadanie);
        end
        if srednee_shag_nazad<srednee
            eta(1,1:Nhid)=-abs(LO(1))/200*abs(extremum_tok-extremum_zadanie);
        end
        flag_rise_kp=1;
    end
    if flag_p==1
        if srednee_zadanie>srednee
            eta(2,1:Nhid)=abs(LO(2))*abs(extremum_tok-extremum_zadanie)/500;
        end
        if srednee_zadanie<srednee
            eta(2,1:Nhid)=-abs(LO(2))*abs(extremum_tok-extremum_zadanie)/500;
        end
        flag_rise_ki=1;
    end
end

    end

    if (flag_stop_kp==0) && flag_stop_tok==1 && (napravlennie==1 && extremum_tok<extremum_zadanie ||
napravlennie==-1 && extremum_tok>extremum_zadanie) && abs(extremum_zadanie)<max_tok &&
(abs(extremum_zadanie)/abs(extremum_tok)<2) && abs(extremum_zadanie)>0.5*extremum_max

        if abs(extremum_tok)<=0.75*abs(extremum_zadanie)
            if srednee_shag_nazad>srednee
                eta(1,1:Nhid)=abs(LO(1))*abs(extremum_zadanie/extremum_tok)/10;
            end
            if srednee_shag_nazad<srednee
                eta(1,1:Nhid)=-abs(LO(1))*abs(extremum_zadanie/extremum_tok)/10;
            end
            flag_rise_kp=1;
        end

        if abs(extremum_tok)>0.75*abs(extremum_zadanie) && abs(extremum_zadanie-
srednee_zadanie)<0.15*abs(extremum_zadanie)
            if flag_rise_ki==0 && abs(srednee-
srednee_shag_nazad)>0.01 && abs(srednee_dva_shaga_nazad-srednee_shag_nazad)>0.01
                if srednee_shag_nazad>srednee
                    eta(1,1:Nhid)=abs(LO(1))*abs(extremum_tok/extremum_zadanie)/10;
                end
                if srednee_shag_nazad<srednee
                    eta(1,1:Nhid)=-abs(LO(1))*abs(extremum_tok/extremum_zadanie)/10;
                end
                flag_rise_kp=1;
            end
            if flag_rise_kp==0 && abs(srednee-srednee_shag_nazad)<0.01 && abs(srednee_dva_shaga_nazad-
srednee_shag_nazad)<0.01 && kol_vo_peresech_real<=1
                if srednee_zadanie>srednee
                    eta(2,1:Nhid)=abs(LO(2))*abs(extremum_zadanie/extremum_tok)/5;
                end
            end
        end
    end

```

```

    if srednee_zadanie<srednee
        eta(2,1:Nhid)=-abs(LO(2))*abs(extremum_zadanie/extremum_tok)/5;
    end
    flag_rise_ki=1;
end
end
end

if flag_stop_zadanie==1 && flag_stop_tok==1 && abs(extremum_zadanie)>=max_tok &&
1.03*abs(extremum_zadanie)>abs(extremum_tok) && abs(extremum_zadanie)<abs(extremum_tok) && flag_pp==1
    if srednee_shag_nazad>srednee
        eta(1,1:Nhid)=abs(LO(1))*abs(extremum_tok-extremum_zadanie)/10;
    end
    if srednee_shag_nazad<srednee
        eta(1,1:Nhid)=-abs(LO(1))*abs(extremum_tok-extremum_zadanie)/10;
    end
    flag_rise_kp=1;
end

if flag_stop_kp==0 && flag_stop_zadanie3==0 && flag_stop_zadanie==1 && flag_stop_tok==1 &&
abs(extremum_zadanie)<max_tok && 1.03*abs(extremum_zadanie)<abs(extremum_tok) && flag_stop_tok2==1 &&
flag_stop_zadanie2==1 && (flag_doing_nothing==1 && flag_stop_ki==0 && flag_stop_kp==0 && flag_rise_ki==0 ||
(napravlenie==1 && extremum_tok2<extremum_zadanie2 && abs(extremum_tok2-
extremum_zadanie2)>0.05*abs(extremum_zadanie) || napravlenie==-1 && extremum_tok2>extremum_zadanie2 &&
abs(extremum_tok2-extremum_zadanie2)>0.05*abs(extremum_zadanie)))
    if srednee_shag_nazad>srednee
        eta(1,1:Nhid)=abs(LO(1))*abs(extremum_tok/extremum_zadanie)/10;
    end
    if srednee_shag_nazad<srednee
        eta(1,1:Nhid)=-abs(LO(1))*abs(extremum_tok/extremum_zadanie)/10;
    end
    flag_rise_kp=1;
    if flag_rise_ki_shag_nazad==1
        flag_rise_kp=0;
        eta(1,1:Nhid)=0;
        if srednee_zadanie>srednee
            eta(2,1:Nhid)=-abs(LO(2))*abs(extremum_tok/extremum_zadanie)/100;
        end
        if srednee_zadanie<srednee
            eta(2,1:Nhid)=abs(LO(2))*abs(extremum_tok/extremum_zadanie)/100;
        end
        flag_stop_ki=1;
    end
end

if flag_stop_zadanie3==0 && flag_stop_zadanie==1 && flag_stop_tok==1 &&
abs(extremum_zadanie)<max_tok && flag_stop_tok2==1 && flag_stop_zadanie2==1 && (flag_doing_nothing==1 &&
flag_stop_ki==0 && flag_stop_kp==0 && flag_rise_ki==0 && abs(extremum_zadanie2-
extremum_zadanie)<0.5*abs(extremum_zadanie) && abs(abs(extremum_zadanie2-
extremum_zadanie))>0.1*abs(extremum_zadanie))
    if srednee_shag_nazad>srednee
        eta(1,1:Nhid)=abs(LO(1))*abs(extremum_zadanie-abs(extremum_zadanie2))/10;
    end
    if srednee_shag_nazad<srednee
        eta(1,1:Nhid)=-abs(LO(1))*abs(extremum_zadanie-abs(extremum_zadanie2))/10;
    end
    flag_rise_kp=1;
end

if flag_stop_zadanie3==0 && flag_stop_zadanie==1 && flag_stop_tok==0 && flag_stop_zadanie2==0 &&
abs(extremum_zadanie)<max_tok && (flag_doing_nothing==1 && flag_stop_ki==0 && flag_rise_kp==0 &&
flag_rise_ki==0) && flag_force_stop_kp==1

```

```

if srednee_shag_nazad>srednee
    eta(1,1:Nhid)=-abs(LO(1))*10;
end
if srednee_shag_nazad<srednee
    eta(1,1:Nhid)=abs(LO(1))*10;
end
flag_stop_kp=1;
end

if flag_stop_zadanie3==1 && flag_stop_zadanie==1 && flag_stop_tok==1 &&
abs(extremum_zadanie)<max_tok && (flag_doing_nothing==1 && flag_rise_ki==0 && flag_rise_kp==0 &&
flag_stop_kp==0) && flag_force_stop_ki==1 && 0.03*abs(extremum_zadanie)<abs(extremum_tok-extremum_zadanie)
    if srednee_zadanie<srednee
        eta(2,1:Nhid)=-abs(LO(2))*abs(extremum_tok)/abs(extremum_zadanie)/5;
    end
    if srednee_zadanie<srednee
        eta(2,1:Nhid)=abs(LO(2))*abs(extremum_tok)/abs(extremum_zadanie)/5;
    end
    flag_stop_ki=1;
end

if (flag_stop_ki==0 || flag_stop_ki==1 && abs(abs(KI)-abs(LO(2)))<0.05*abs(KI)) && flag_keep_kp==0 &&
flag_stop_zadanie2==1 && flag_stop_tok2==1 && (abs(extremum_tok2)>abs(extremum_zadanie2) &&
(abs(abs(extremum_tok2)-abs(extremum_zadanie2)))>0.1 && kol_vo_peresech_mezdy_pikami_toka==1 &&
abs(extremum_tok2)>1.145*abs(extremum_zadanie2)) && abs(extremum_zadanie)~max_tok &&
abs(extremum_zadanie)>abs(extremum_tok)
    if abs(extremum_zadanie)>abs(extremum_tok)
        if srednee_shag_nazad>srednee
            eta(1,1:Nhid)=abs(LO(1))*abs(extremum_tok2/extremum_zadanie2)/200;
        end
        if srednee_shag_nazad<srednee
            eta(1,1:Nhid)=-abs(LO(1))*abs(extremum_tok2/extremum_zadanie2)/200;
        end
    end
    if abs(extremum_zadanie)<abs(extremum_tok)
        if srednee_shag_nazad>srednee
            eta(1,1:Nhid)=abs(LO(1))*abs(extremum_tok2/extremum_zadanie2)/10;
        end
        if srednee_shag_nazad<srednee
            eta(1,1:Nhid)=-abs(LO(1))*abs(extremum_tok2/extremum_zadanie2)/10;
        end
    end
    flag_rise_kp=1;
else
    if (flag_stop_ki==0 || flag_stop_ki==1 && abs(abs(KI)-abs(LO(2)))<0.05*abs(KI)) && flag_keep_kp==0 &&
(flag_stop_kp==0 || flag_stop_kp==1 && abs(abs(KP)-abs(LO(1)))<0.05*abs(KP)) && flag_stop_zadanie==1 &&
flag_stop_tok==1 && flag_stop_tok2==0 && (abs(extremum_zadanie)/abs(extremum_tok)>2) && srednee_zadanie>0.1
        if srednee_shag_nazad>srednee
            eta(1,1:Nhid)=abs(LO(1))/10;
        end
        if srednee_shag_nazad<srednee
            eta(1,1:Nhid)=-abs(LO(1))/10;
        end
        flag_rise_kp=1;
    end
end

if (flag_rise_kp==0 || flag_rise_kp==1 && abs(abs(KP)-abs(LO(1)))<0.05*abs(KP)) && (flag_stop_kp==0 ||
flag_stop_kp==1 && abs(abs(KP)-abs(LO(1)))<0.05*abs(KP)) && flag_stop_zadanie==1 && flag_stop_tok==1 &&
(abs(extremum_tok)>1.03*abs(extremum_zadanie) && abs(extremum_zadanie)<max_tok ||
(abs(extremum_tok)>1.1*abs(extremum_zadanie) && abs(extremum_zadanie)>=max_tok ||
(abs(extremum_tok)>abs(extremum_zadanie) && abs(extremum_tok)<=1.1*abs(extremum_zadanie) &&
abs(extremum_zadanie)>=max_tok && abs(srednee)>abs(extremum_zadanie) && flag_ext_tok_pozge_ext_zad==1 )))

```

```

&& (flag_stop_zadanie2==1 && flag_stop_tok2==1 && abs(extremum_tok2)>abs(extremum_zadanie2)) ||
flag_stop_zadanie2==0 && (abs(extremum_tok)>abs(extremum_zadanie) &&
abs(extremum_tok)<=1.1*abs(extremum_zadanie) && abs(extremum_zadanie)>=max_tok &&
abs(srednee)>abs(extremum_zadanie) && flag_ext_tok_pozge_ext_zad==1 )) &&
kol_vo_peresechmezdy_pikami_zadanija<=2 && abs(srednee_zadanie)>0.5

    if srednee_zadanie>srednee
        eta(2,1:Nhid)=-abs(LO(2))/1000;
    end
    if srednee_zadanie<srednee
        eta(2,1:Nhid)=abs(LO(2))/1000;
    end
    flag_stop_ki=1;
end
if (flag_stop_kp==0 || flag_stop_kp==1 && abs(abs(KP)-abs(LO(1)))<0.05*abs(KP)) &&
abs(extremum_zadanie)>=max_tok && abs(extremum_tok)>abs(extremum_zadanie) &&
abs(extremum_tok)>1.1*abs(extremum_zadanie) && flag_stop_tok==1 && abs(srednee_zadanie)<max_tok &&
flag_stop_tok2==0
    if srednee_zadanie>srednee
        eta(2,1:Nhid)=-abs(LO(2))/1000;
    end
    if srednee_zadanie<srednee
        eta(2,1:Nhid)=abs(LO(2))/1000;
    end
    flag_stop_ki=1;
end

    if (flag_rise_kp==0 || flag_rise_kp==1 && abs(abs(KP)-abs(LO(1)))<0.05*abs(KP)) && (flag_stop_kp==0 ||
flag_stop_kp==1 && abs(abs(KP)-abs(LO(1)))<0.05*abs(KP)) && flag_stop_tok==1 && flag_stop_tok2==1 &&
abs(srednee-srednee_shag_nazad)<0.005 && abs(srednee_shag_nazad-srednee_dva_shaga_nazad)<0.005 &&
abs(srednee_zadanie-srednee)>0.1*abs(srednee_zadanie) && abs(srednee_zadanie-srednee_zadanie_shag_nazad)<0.005
&& abs(srednee_zadanie_shag_nazad-srednee_zadanie_dva_shaga_nazad)<0.005 &&
kol_vo_peresech_tok2==kol_vo_peresech && abs(srednee_zadanie)>0.1 && (t-t_pik_tok2)>(round(225/Nhid))*dt &&
abs(srednee_zadanie-srednee)>0.1 && (napravlennie==1 && srednee<srednee_zadanie || napravlenie==-1 &&
srednee>srednee_zadanie)
    if srednee_zadanie>srednee
        eta(2,1:Nhid)=abs(LO(2))/100;
    end
    if srednee_zadanie<srednee
        eta(2,1:Nhid)=-abs(LO(2))/100;
    end
    flag_rise_ki=1;
end

end

if abs(abs(LO(1))-abs(LO_stab(1)))>0.5*abs(LO_stab(1))
    eta(1,1:Nhid)=0.0000000;
end
if abs(abs(LO(2))-abs(LO_stab(2)))>0.5*abs(LO_stab(2))
    eta(2,1:Nhid)=0.0000000;
end

dLW(:,2:3) = dLW(:,1:2);
xx=[a(1) * dLW(1,2);a(2) * dLW(2,2)];
yy=[b(1) * dLW(1,3);b(2) * dLW(2,3)];
dLW(:,1) = eta.* (HO' * dLO)' + xx + yy;
LW = LW + dLW(:,1);
dHO = dlogsig(P*IW'+B1',HO).*(dLO * LW) ;
dB2(2:3,:) = dB2(1:2,:);
dB2(1,:) = [eta(1) eta(2)].* dLO + a.*dB2(2,:) + b.*dB2(3,:);
B2 = B2 + dB2(1,:);
dIW(:,2:3) = dIW(:,1:2);

```

```

dIW(:,:,1) = etaHL * (dHO' * P)' + a(2).*dIW(:,:,2) + b(2).*dIW(:,:,3);
IW = IW + dIW(:,:,1)';
dB1(2:3,:) = dB1(1:2,:);
dB1(1,:) = etaHL * dHO + a(2).*dB1(2,:) + b(2).*dB1(3,:);
B1 = B1 + dB1(1);

HO=logsig(P*IW'+B1');
LO=purelin(HO*LW'+B2');

end
end
end
if (u(10)<-10 || u(10)>10)
    LO(2)=0;
    flag_nasishenie=1;
    flag_fact_nasishenie=1;
end
if flag_nasishenie==1 && (u(10)>=-10 && u(10)<=10)
    HO=logsig(P*IW'+B1');
    LO=purelin(HO*LW'+B2');
    flag_nasishenie=0;
end

    if LO(1)<0
        LO(1)=LO(1)*(-1);
    end
    if LO(2)<0
        LO(2)=LO(2)*(-1);
    end

end
counter=counter+1;

sys = [LO(1) LO(2) srednee_zadanie srednee];
function sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u)

sampleTime = 1;
sys = t + sampleTime;

function sys=mdlTerminate(t,x,u)

sys = [];

```