

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

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)»

АВТОРЕФЕРАТ

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

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Металлургия 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 пусконаладочных 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 каче-

ство 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 регулятора 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 ско-

рости, 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 заготов-

ки, 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.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, трех приложений, содержит 76 рисунков, 6 таблиц, библиографический список содержит 193 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, указана научная новизна, практическая значимость, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены особенности прокатных станов как объектов управления. В качестве основных потребителей электроэнергии для прокатных станов выделены черновые прокатные клетки ввиду их большой мощности. Сделан вывод о возможности повышения эффективности их работы путем совершенствования существующих систем автоматического управления ими.

Отмечено, что в настоящее время наиболее распространенным подходом к модернизации таких электроприводов является замена аналоговой системы управления на цифровую без изменения силовой части привода. Это обусловлено высокой стоимостью силовой части (электродвигателей и преобразователей питающего напряжения) относительно самой системы управления. Подобная тенденция создает условия для внедрения современных методов адаптивного управления в производство.

Проведен анализ электропривода прокатной клетки как объекта управления. Во многих случаях электроприводом черновых прокатных клеток выступает привод постоянного тока. Поэтому был рассмотрен типовой подход к построению системы управления подобным приводом. Такая система регулирования строится по принципу подчиненного регулирования, по которому синтезируется контур регулирования тока якоря (I) и внешний, по отношению к нему, контур регулирования скорости (n). В этих контурах в большинстве случаев используются линейные П и ПИ регуляторы с постоянными параметрами. Наличие нелинейных статических и динамических характеристик электропривода может приводить к снижению качества управления. Что делает актуальной задачу построения адаптивной системы управления им.

Основываясь на приведенных выше выводах, проведен анализ методов и подходов, которые ранее применялись для построения адаптивных систем управления (в том числе и систем управления электроприводом, а также повышения эффективности прокатных станов). Необходимо выделить вклад следующих отечественных и зарубежных ученых: Kalman R.E., Растринин Л.А., Александров А. Г., Стельмашук С.В., Черный С. П., Omatu S., Astrom, Тюкин И.Ю., Терехов В.А., Карандаев А. С., Храмшин В. Р., Мещеряков В. Н., Ланграф С. В., Ключев В.И., Сташинов Ю. П., Еременко Ю.И., Чумаков В. П., Веренев В. В., Zhang, N. Wang, S. Wang, Liping Fan.

Применение рассмотренных классических методов существенно ограничивается необходимостью построения точной математической модели объекта управления (ОУ), которую в условиях производства достаточно сложно идентифицировать, а кроме того, она не учитывает всех стохастических возмущений и нелинейностей ОУ. При этом наиболее перспективным является подход, не предполагающий замену существующих регуляторов, а лишь настройку их параметров в оперативном режиме. Это обусловлено надежностью получаемой системы и низкой стоимостью реализации и внедрения.

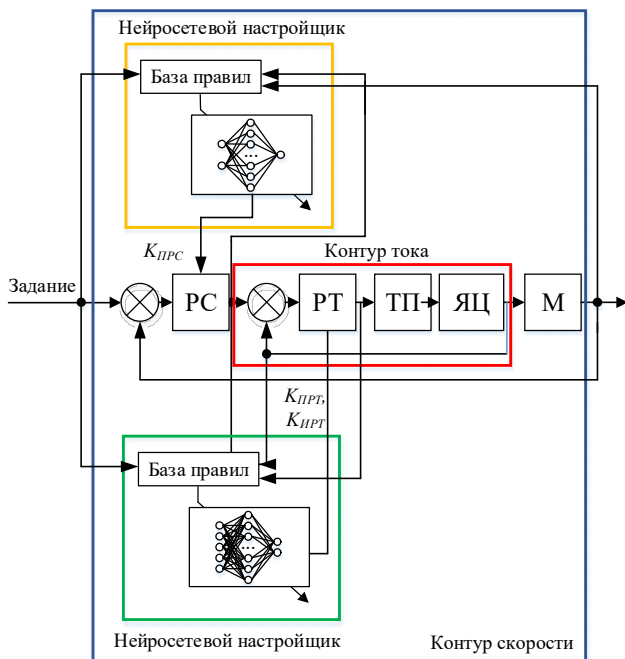


Рис 1. Функциональная схема применения нейросетевого настройщика в САУ электропривода

Инженер АСУ ТП успешно решает рассматриваемую задачу без модели объекта управления, основываясь на своих знаниях, опыте и способности к обучению. Анализ интеллектуальных методов управления, не требующих модели ОУ, показал, что ни один из этих методов не сочетает в себе возможности работы со знаниями и способности к обучению. Показана перспективность применения метода, сочетающего нейронные сети и базу правил (нейросетевого настройщика). Такое сочетание позволит использовать достоинства каждого из подходов (способность к обучению и работа со знаниями об ОУ), а также исключить их недостатки.

На основании выводов, сделанных из проведенного анализа, сформированы цели и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе предложен метод построения адаптивной системы управления электроприводом постоянного тока. Предлагается настраивать регуляторы скорости и тока в режиме реального времени с помощью нейросетевого настройщика параметров линейных регуляторов. 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 нейросетевой настройщик представляет собой совокупность двух взаимосвязанных элементов: нейронной сети и базы правил. В диссертационной работе предлагается следующая схема применения настройщика в контурах управления скоростью и тока якоря главного электропривода прокатной клетки (рис. 1: РТ – регулятор тока якоря, ТП – тиристорный преобразователь, ЯЦ – якорная цепь, М – механическая часть привода, РС – регулятор скорости). Предполагается, что система управления электроприводом уже функционирует и текущие значения его регуляторов известны, но они остаются неизменными для всех режимов работы ОУ.

В настройщике используется НС с одним скрытым слоем. Ее структура для настройки ПИ-регулятора имеет вид: 5-14-2 и выбрана в соответствии с методом, предложенным Глуценко А.И. Сеть содержит пять входов: задание в текущий момент $r(t_k)$; задание такт назад $r(t_k - \Delta t)$, выход ОУ в текущий момент $y(t_k)$; выход ОУ шаг назад $y(t_k - \Delta t)$ такт назад, и значение управляющего воздействия в предыдущий момент времени $u(t_k - \Delta t)$. В выходном слое находится два нейрона, каждый из которых отвечает за вычисление

соответствующего параметра регулятора K_P ($\eta_1^{(2)}$), K_I ($\eta_2^{(2)}$) (для регулятора скорости $K_{ПРС}$, $K_{ИРС}$; для регулятора тока $K_{ПРТ}$, $K_{ИРТ}$). Для П-регулятора НС имеет вид: 2-7-1. Ее входы: $r(t_k)$ и $y(t_k)$, а выход – значение $K_{ПРС}$.

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 слой;

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, которое производится в соответствии с базой правил, отслеживающей качество переходных процессов.

В следствиях правил указана скорость обучения конкретного нейрона выходного слоя нейронной сети. Графическое представление фрагментов баз правил настройщиков в контуре тока и скорости приведено на рис. 2 и 3 соответственно. Полностью база правил описана в тексте главы 2 диссертации.

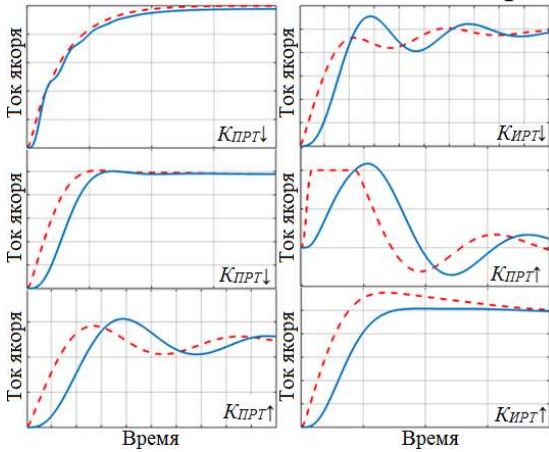


Рис. 2. Графическое представление фрагмента базы правил для контура тока

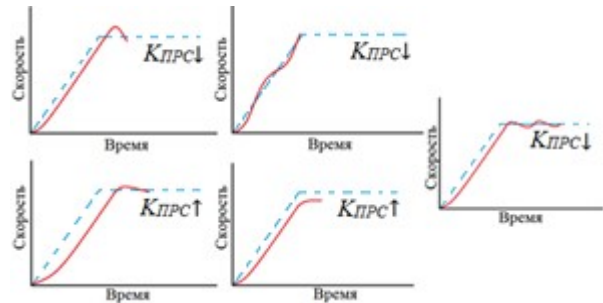


Рис. 3. Графическое представление фрагмента базы правил для контура скорости

Для иллюстрации структуры правил рассмотрим одно из правил нейросетевого настройщика параметров регулятора тока:

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).

Алгоритм работы настройщика представляет собой следующую последовательность действий. Если начальное состояние НС не задано, то оно задается методом экстремального обучения НС. Целью такого обучения является формирование на выходе НС коэффициентов регулятора, использовавшихся в контуре управления 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} – число нейронов в скрытом слое сети). В начале каждой итерации все скорости обучения всех нейронов приравниваются к нулю, затем происходит вызов базы правил. Если по его итогам какая-либо из скоростей обучения оказалась не нулевой, то проводится одна итерация метода обратного распространения ошибки.

Для проведения экспериментов по применению нейросетевого настройщика в контурах управления скоростью и током построена модель главного электропривода прокатной клетки (рис. 4).

Для этого использованы параметры реальной двухвалковой реверсивной прокатной клетки 1000 АО «Оскольский электрометаллургический комбинат». Модель основывается на использовании измеренных параметров привода. Модель обмотки якоря представляет собой апериодическое звено первого порядка с номинальными значениями параметров $K_{\text{я}} = 41.67$ ($K_{\text{я}} = 1/R_{\text{яц}}$) и $T_{\text{э}} = 0.036$ с. Модель механической части электропривода выполнена в виде интегратора с номинальным значением постоянной времени интегрирования $J_{\text{ном}} = 4798$ кг·м².

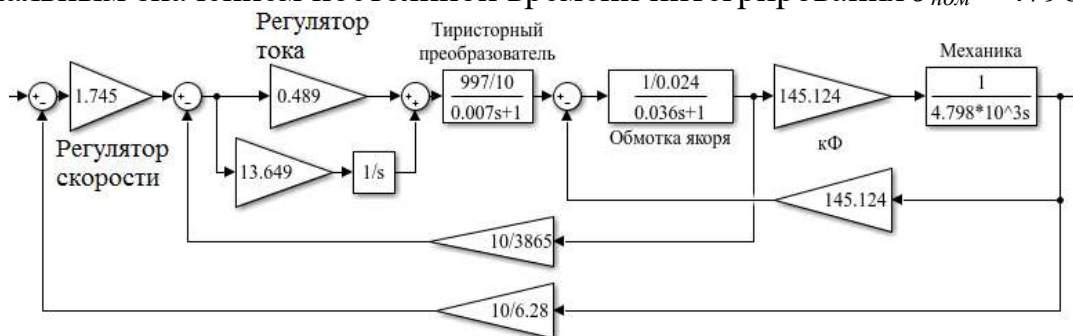


Рис. 4. Модель главного электропривода прокатной клетки

Для управления скоростью в режиме отработки задания используется П-регулятор, для тока якоря – ПИ-регулятор. Оба регулятора настроены на технический оптимум. Необходимое качество управления определяется критериями выбранного оптимума.

Проведено девять экспериментов с различными комбинациями коэффициентов ПИ-регулятора тока. Система управления начинала работу с коэффициентов $K_{\text{ПРТ.нач}}$ и $K_{\text{ИРТ.нач}}$, в процессе работы системы настройщик в соответствии с базой правил изменял коэффициенты. Конечные коэффициенты ($K_{\text{ПРТ.кон}}$ и $K_{\text{ИРТ.кон}}$) указаны в таблице 1. Также в таблице указаны относительные разности $\Delta K_{\text{ПРТ}}$, $\Delta K_{\text{ИРТ}}$ конечных коэффициентов и рассчитанных (см. рис.4). Количество смен задания по скорости (N) считалось до момента времени, когда переставали срабатывать правила.

Таблица 1. Результаты настройки регулятора
тока

№	$K_{ПРТ.нач}$	$K_{ИРТ.нач}$	$K_{ПРТ.кон}$	$K_{ИРТ.кон}$	$\Delta K_{ПРТ},$ %	$\Delta K_{ИРТ},$ %	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

Аналогичный эксперимент проводился для настройщика П-регулятора контура скорости. В среднем за 2 переходных процесса нейросетевой настройщик в контуре скорости устанавливал требуемую настройку регулятора скорости. Таким образом, нейросетевой настройщик позволяет в случае не оптимально настроен-

ных регуляторов приблизить их настройку к оптимальной.

Во второй серии экспериментов проверялась возможность настройщика отслеживать изменение параметров объекта управления в режиме реального времени для поддержания требуемого качества переходных процессов. Для этого было произведено два опыта: 1) изменялись параметры механической части электропривода, и был активен настройщик регулятора скорости; 2) изменялись параметры обмотки якоря, и был активен настройщик регулятора тока. В каждом из этих опытов нейросетевой настройщик отслеживал изменение качества переходных процессов и компенсировал его изменением настройки соответствующего регулятора.

Результаты данных экспериментов приведены в тексте главы 2 диссертации. Однако в условиях реального производства достаточно сложно определить факт изменения обмотки якоря и механической части по отдельности. Это приводит к необходимости одновременного использования двух настройщиков. Однако, непосредственное применение двух настройщиков может вызывать «конфликт» в логике работы баз правил каждого из них. Это происходит по следующей причине: изменение параметров обмотки якоря (компенсировать которое должен настройщик тока) может, в определенных условиях, ухудшать переходные процессы в контуре скорости, что вызывает срабатывание базы правил настройщика контура скорости и, следовательно, настройку регулятора скорости. Также возможна обратная ситуация: изменение механической части электропривода может привести к изменению качества работы контура тока и последующей настройке соответствующего регулятора. Для решения данной проблемы разработан алгоритм, разграничивающий срабатывание настройщиков регуляторов скорости и тока – рис. 5.

На рис. 6 приведены результаты эксперимента, в котором одновременно изменялись параметры обмотки якоря двигателя $K_{я}$, $T_{я}$ (рис. 6 е, ж) и момент инерции механической части электропривода J (рис. 6 з). Его целью являлось поддержание перерегулирования σ на заданном уровне ($[\sigma_{min}, \sigma_{max}]$), что позволяет удерживать необходимый темп работы прокатной клетки. Совместное применение настройщиков позволило компенсировать изменение параметров ОУ и снизить

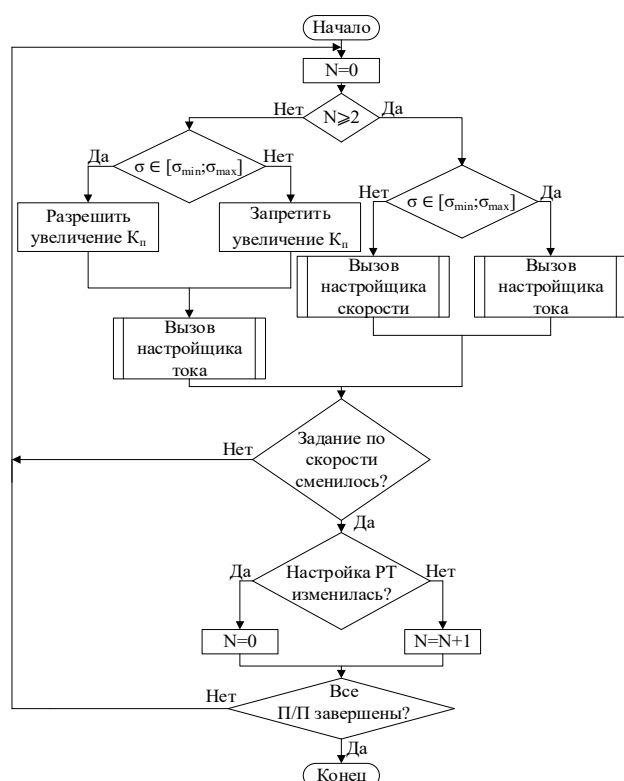


Рис. 5 Алгоритм, разграничивающий работу настройщиков

Как правило, 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.

Однако регулятор, параметры которого настроены для отработки смены уставок, зачастую не способен эффективно обрабатывать возмущающие воздействия. 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.

В соответствии со структурной схемой электропривода возмущающее воздействие прикладывается в контуре скорости. Исходя из этого, для режима компенсации возмущений принято решение использовать настройщик, аналогичный по структуре нейросетевому настройщику контура скорости.

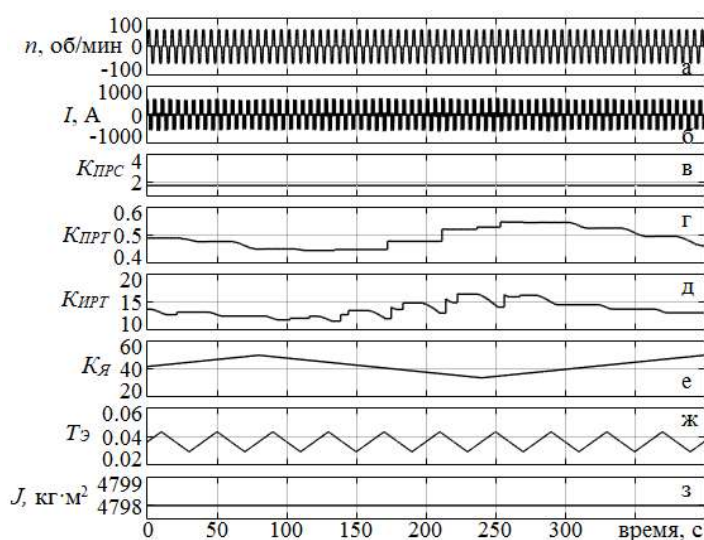


Рис. 6 Совместная работа настройщиков

На рис. 7 в виде алгоритма приведена разработанная база правил нейросетевого настройщика параметров регулятора скорости, работающего в режиме компенсации возмущающих воздействий.

После выявления возмущения нейросетевой настройщик увеличивает $K_{ПРС}$ регулятора скорости.

Далее в момент максимального отклонения частоты вращения от заданной величины (x_M) $K_{ПРС}$ уменьшается ($\eta_1^{(2)}$ – скорость обучения нейрона, ответственного за $K_{ПРС}$), $K_{И}$ увеличивается ($\eta_2^{(2)}$ – скорость обучения нейрона, ответственного за $K_{ИРС}$), также происходит расчет допустимой скорости возврата к уставке (Δy).

Если скорость возврата частоты вращения к заданному значению превышает Δy , то нейросетевой настройщик приравнивает $K_{ПРС}$ и $K_{ИРС}$ регулятора скорости к нулю. После завершения процесса компенсации возмущения коэффициенты регулятора возвращаются к начальным. r_{old} – последнее зафиксированное стационарное значение уставки по скорости.

На рис. 8 приведены результаты эксперимента по отработке возмущающего

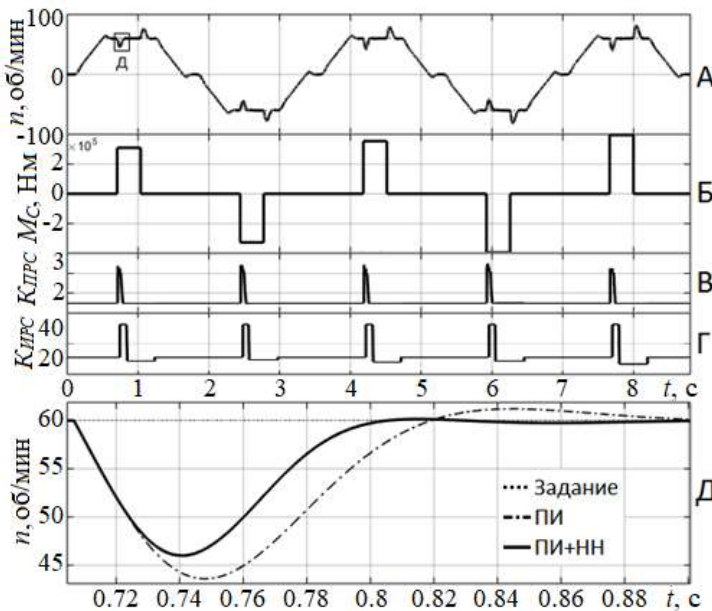


Рис. 8 Компенсация возмущающего воздействия

настройщик (НН) увеличивал $K_{ПРС}$ (рис. 8В) и $K_{ИРС}$ (рис. 8Г) регулятора скорости. Это позволило снизить максимальное отклонение от задания на 15% и повысить скорость отработки возмущения на 45% по сравнению с системой без

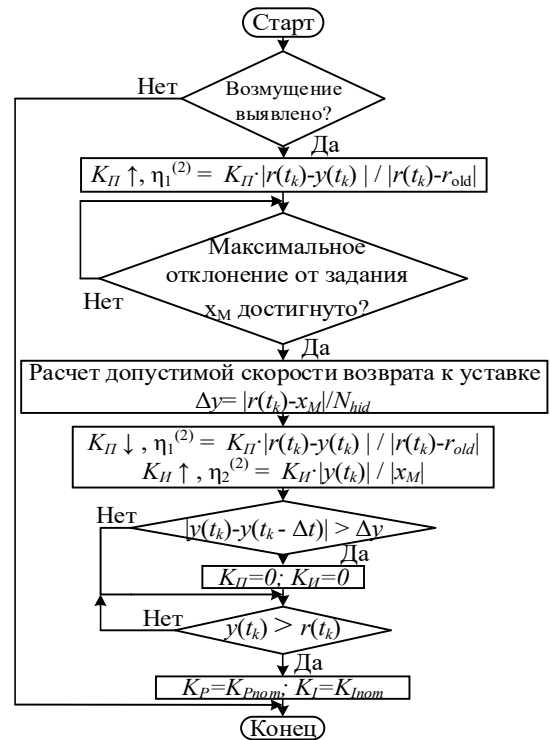


Рис. 7 Алгоритм базы правил для компенсации возмущающих воздействий

воздействия максимальное значение которого составляет $M_C = 3 \cdot 10^5$ Н·м, что соответствует реальному моменту, возникающему при захвате валками прокатываемой заготовки.

В ходе эксперимента моделировался цикл работы прокатной клетки (рис. 8А): разгон прокатных валков до номинальной скорости (60 об/мин), захват заготовки, прокат заготовки, «выброс» заготовки, останов, реверс. При выявлении возмущений (рис. 8Б) нейросетевой

настройщика (рис. 8Д). Подобное повышение эффективности компенсации возмущающих воздействий позволит повысить темп работы прокатной клетки.

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 клеток, упругими связями, большими массами, а также ударным характером нагрузок при захвате прокатываемой заготовки. Высокие динамические моменты приводят к сокращению времени службы механизма прокатной клетки. Для снижения колебаний динамического момента также предлагается использовать нейросетевой настройщик в контуре скорости.

Для проведения экспериментов по применению нейросетевого настройщика для снижения динамических моментов рассмотрим главный электропривод второй клетки прокатного стана 350 Оскольского электрометаллургического комбината ввиду наличия в его механике упругих связей. Структура модели электропривода данной клетки в целом совпадает с моделью, приведенной на рис. 4, однако механическая часть привода, в данном случае, представлена двумя массами с моментами инерции J_1 и J_2 . Момент нагрузки ($M_C = 15 \text{ кН}\cdot\text{м}$), моделирующий захват заготовки прокатными валками, прикладывался при номинальной скорости вращения электродвигателя 800 об/мин, что соответствует технологическому режиму работы прокатной клетки. Настройщик выявил момент возмущения (рис. 9) и, в соответствии с базой правил, изменил коэффициенты регулятора скорости. Это

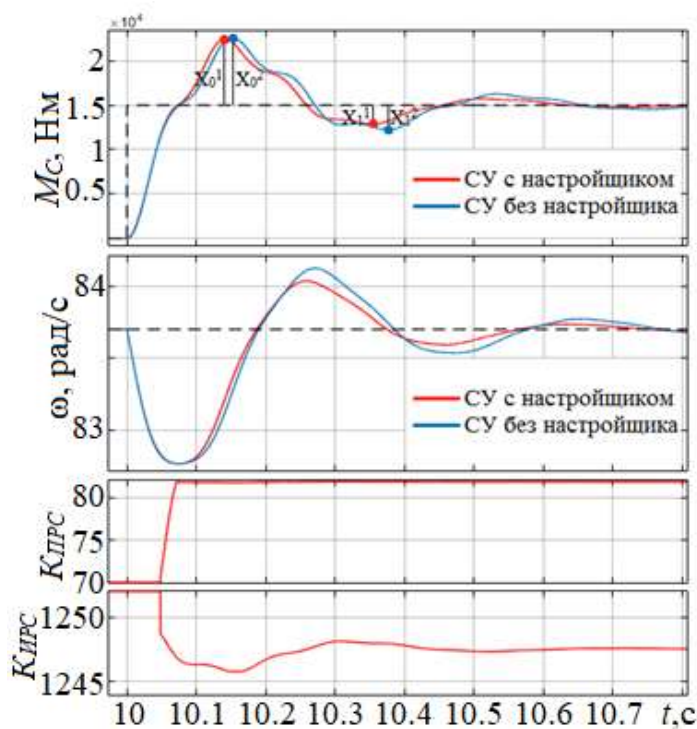


Рис. 9 Результаты эксперимента по снижению динамического момента

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

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



Рис. 10 Экспериментальный стенд

Эксперименты с использованием программной реализации нейросетевого настройщика производились на экспериментальном стенде (рис. 10), 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 оснащена электродвигателем постоянного тока с энкодером и маховиком на валу электродвигателя. Управление двигателем реализуется изменением питающего напряжения. Картина 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.

Смена задания происходит в виде линейно-нарастающего сигнала, причем значение задания по скорости 100 об/мин достигается за 1/8 секунды.

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

Проведено девять подобных экспериментов для различных начальных коэффициентов (Таблица 2). 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 2. Также в таблице указаны относительные разности ΔK_P , ΔK_I конечных коэффициентов и рассчитанных.

Таблица 2. Результаты экспериментов с неоптимальной настройкой регулятора

№	$K_{П.нач}$	$K_{И.нач}$	$K_{П.кон}$	$K_{И.кон}$	$\Delta K_P, \%$	$\Delta K_I, \%$	N
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

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

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. 11 приведены результаты эксперимента с дополнительным сопротивлением $R = 7$ Ом. В соответствии с базой правил настройщик изменял значения $K_{ПРТ}$ и $K_{ИРТ}$. Это позволило по итогам 6 смен задания по скорости добиться требуемого качества переходных процессов в контуре тока (рис. 12Б) по сравнению с переходными процессами в начале эксперимента (рис. 12А).

Результаты экспериментов по использованию нейросетевого настройщика регулятора тока аналогичны экспериментам на модели. Также схожие результаты были получены с нейросетевым настройщиком регулятора скорости. Подробно результаты описаны в главе 4.

Эксперимент по компенсации возмущающих воздействий 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 настройщик выявлял момент возмущения и, в соответствии с базой правил, приведенной в главе 3, изменял параметры ПИ-регулятора скорости. На рис. 13 приведено сравнение работы системы с нейросетевым настройщиком и без него, для аналогичных условий эксперимента.

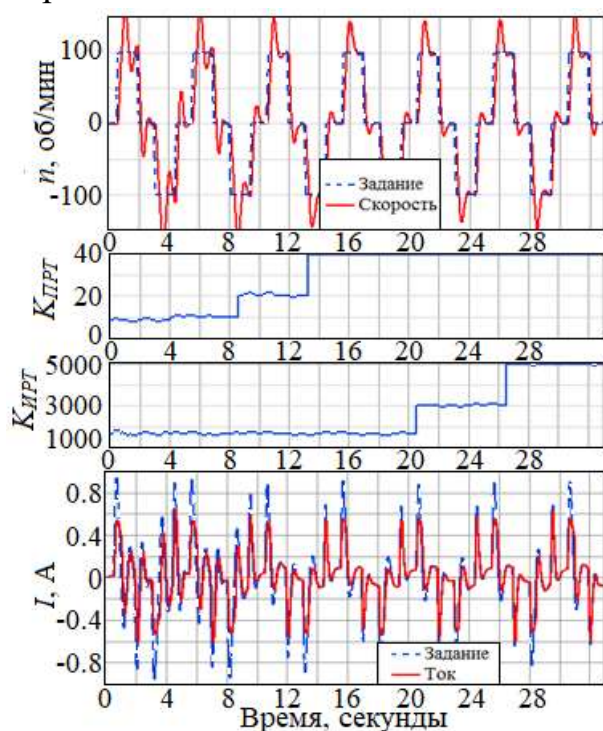


Рис. 11 Результаты эксперимента с дополнительным сопротивлением ($R=7$ Ом) в якорной цепи электродвигателя

щения на 30%.

Кроме этого, проводился эксперимент по применению нейросетевого настройщика в системе с упругими связями. Он был выполнен на модифицированном экспериментальном стенде NI Elvis II.

На плату QUANCER DCMCT с одним электродвигателем постоянного тока в качестве дополнительной инерционной массы был установлен еще один такой же двигатель и маховик. Подключение ведущего двигателя к ведомому с маховиком осуществлялось с помощью упругого вала.

На рис. 14-16 приведено сравнение графиков тока для указанных экспериментов для ведущего двигателя для системы с нейросетевым настройщиком

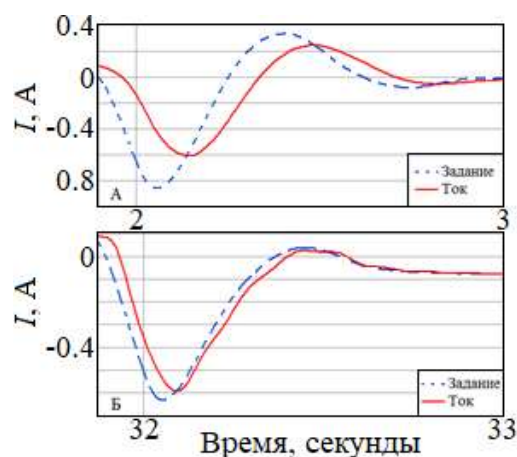


Рис. 12 Результаты эксперимента с дополнительным сопротивлением ($R=7$ Ом) в якорной цепи электродвигателя

Также показано изменение K_{II} и $K_{И}$ регулятора скорости для случая с использованием нейросетевого настройщика. Применение настройщика позволило снизить максимальное отклонение по скорости от задания на 8% и время отработки возмущения на 30%.

(ПИ+НН) и без него (ПИ). Система с настройщиком позволила снизить суммарный ток, затраченный на обработку возмущающего воздействия, на 3.8%.

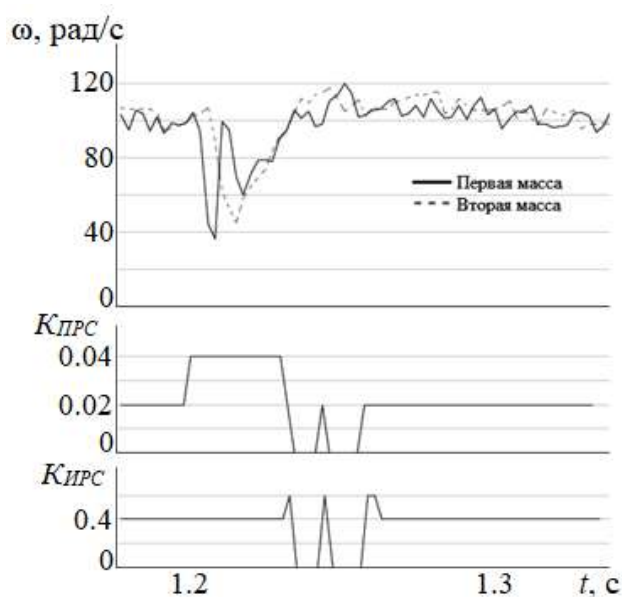


Рис.14 Результаты эксперимента с нейросетевым настройщиком

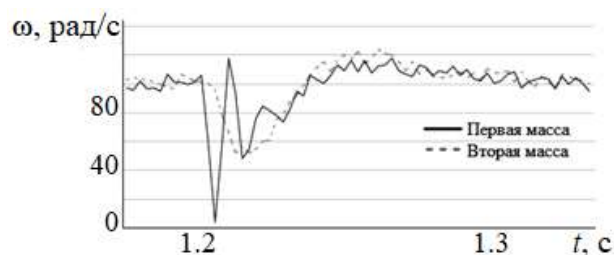


Рис.15 Результаты эксперимента без нейросетевого настройщика

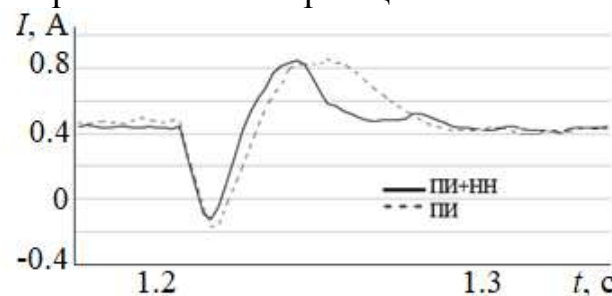


Рис.16 Сравнение токов двигателя для системы с настройщиком и без него

Также в четвертой главе диссертации проведены эксперименты на промышленном электроприводе постоянного тока Sinamics DCM фирмы Siemens, аналог которого используется на реальной реверсивной прокатной клети. 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. Для записи данных в режиме реального времени для дальнейшего построения сравнительных характеристик используется программное обеспечение Siemens Starter.

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. 17, производился следующим образом. В начальный момент времени подавалось задание по ско-

рости, 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.

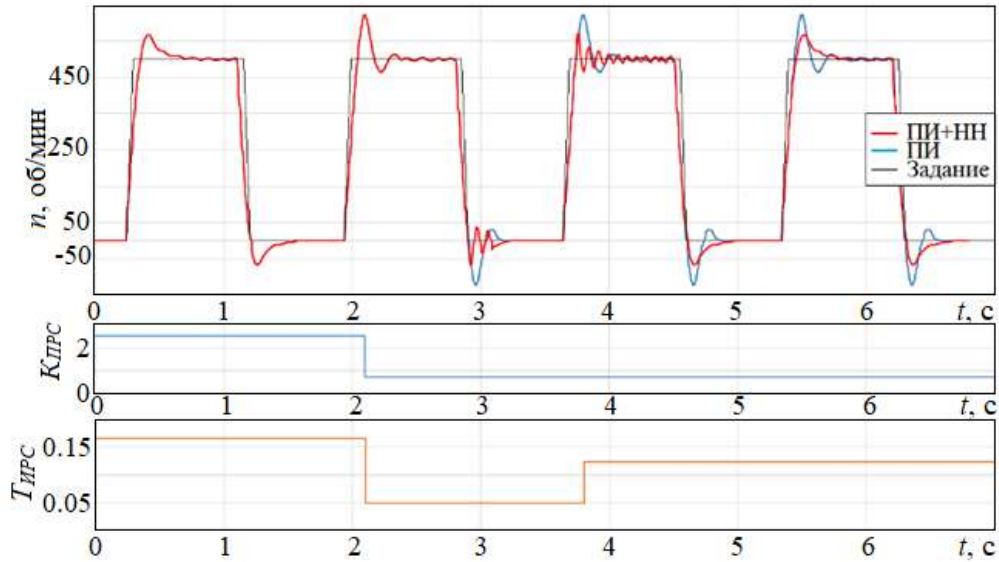


Рис.17 Результаты эксперимента с нейросетевым настройщиком

В приложениях к диссертации приведены фрагменты программного кода нейросетевого настройщика. Также в них вынесены справки о возможности использования результатов работы.

Основные результаты диссертационного исследования

1. Проведен анализ прокатного производства, по результатам которого установлено, что для реверсивных режимов прокатных клетей, вопрос повышения качества регулирования стоит наиболее остро. К причинам, по которым необходима адаптация, можно отнести нелинейности электродвигателей, нестационарность параметров прокатываемого металла, разнообразный сортамент заготовок, а также технология реверсивной прокатки.

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. Разработан метод построения адаптивной системы управления для повышения качества управления электроприводом постоянного тока прокатной

клетки на базе нейросетевого настройщика. Выбрана структура искусственной нейронной сети.

4. Исследована зависимость качества переходных процессов от коэффициентов настраиваемых линейных регуляторов. Она выражена в виде трехслойной нейронной сети с динамически изменяемыми весовыми коэффициентами и смещениями.

5. 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%.

6. 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.

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

Рекомендации. Результаты диссертационного исследования предлагается использовать в системах управления электроприводами постоянного тока в прокатном производстве, а также на предприятиях, в производственных циклах которых используются аналогичные по структуре высокомоментные привода.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Планируются дальнейшие исследования по применению нейросетевого настройщика в более сложных системах управления электроприводами других видов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях из списка ВАК РФ

1. Еременко Ю.И., Глущенко А.И., Фомин А.В., Петров В.А. О применении нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора для отработки возмущающих воздействий для объектов с различной динамикой // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2017. – № 4. – С.83-94.

2. Еременко Ю.И., Глущенко А.И., **Петров В.А.** Об использовании нейросетевого настройщика для адаптации П регулятора скорости электропривода прокатной клетки // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – № 10 (18). – С.685–692.
3. Еременко Ю.И., Глущенко А.И., **Петров В.А.** Сравнительная оценка эффективности нейросетевого настройщика как альтернативы адаптивному управлению двигателем постоянного тока с помощью наблюдателя // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2018. – № 3. – С.11-17.
4. Еременко Ю.И., Глущенко А.И., **Петров В.А.** О разработке нейросетевого настройщика контура скорости электропривода прокатной клетки для снижения динамических нагрузок // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 9 (194). – С.44-53.
5. Еременко Ю.И., Глущенко А.И., **Петров В.А.** Об адаптивной настройке пропорционально-интегрального регулятора скорости на физической модели электропривода постоянного тока // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 11. – С.101–112.
6. Еременко Ю.И., Глущенко А.И., **Петров В.А.** О нейросетевой адаптации параметров ПИ-регулятора контура тока системы управления прокатной клетью в реальном времени клетки // Системы управления и информационные технологии. – 2016. – Т.65. – № 3. – С.62-68.
7. Еременко Ю.И., Глущенко А.И., **Петров В.А.** Нейросетевой настройщик для компенсации возмущающих воздействий в системе управления электропривода постоянного тока // Системы управления и информационные технологии. – 2017. – № 4 (70). – С.79-82.

В изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science

8. Y.I. Eremenko, A.I. Glushchenko and **V.A. Petrov** On Neural Network Based Online Tuning of Rolling Mill Drive Armature Current PI-controller Parameters // Proceedings of X IEEE International Scientific and Technical Conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)», 2016, – P.1-7.
9. Y.I. Eremenko, A.I. Glushchenko, **V.A. Petrov** DC Electric Drive Adaptive Control System Development Using Neural Tuner // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2017 ElConRus). – St. Petersburg: IEEE, 2017. – P.1-6.
10. Eremenko, A.I. Glushchenko, **V.A. Petrov** On PI-controller Parameters Adjustment for Rolling Mill Drive Current Loop Using Neural Tuner // Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 103. – P. 355-362.
11. Eremenko Y.I., Glushchenko A.I., **Petrov V.A.** Neural Tuner Based Adaptive Control System Development to Improve Roll Bite Process Effectiveness // Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM- 2017). – Saint Petersburg, Russia: IEEE, 2017. – P. 1-4.
12. A.I. Glushchenko, **V.A. Petrov** On Neural Tuner Application to Adjust Speed P-controller of Rolling Mill Main DC Drive // Proceedings of IEEE Siberian

Conference on Control and Communications (SIBCON). – Astana, Kazakhstan: IEEE, 2017. – P. 1-5.

13. Eremenko Y.I., Glushchenko A.I., **Petrov V.A.** Development of the method for joint operation of neural-network tuners for current and speed circuits // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 6 (9-90). – P. 17-21.

14. Y.I. Eremenko, A.I. Glushchenko, **V.A. Petrov** Efficiency Analysis of P-controller Neural Tuner and Adaptive Controller Based on Observer for DC Drive Speed Control Problem // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Vol. 658. – P. 284-292.

15. A.I. Glushchenko, **V.A. Petrov** On Comparative Evaluation of Effectiveness of Neural Network and Fuzzy Logic Based Adjusters of Speed Controller for Rolling Mill Drive // Studies in Computational Intelligence. – 2019. – Vol. 799. – P. 144–150.

Объекты интеллектуальной собственности

16. Св-во об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2016615445 РФ. Нейросетевой настройщик параметров ПИ-регулятора для отработки возмущающих воздействий // Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Глущенко А.И., Фомин А.В., **Петров В.А.**; заявл. 30.03.2016; опубл. 20.06.2016. РОСПАТЕНТ.

17. Св-во об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2016619946 РФ. Нейросетевой настройщик параметров ПИ-регулятора контура тока // Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Глущенко А.И., **Петров В.А.**; заявл. 07.07.2016; опубл. 01.09.2016. РОСПАТЕНТ.

18. Св-во об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2017616217 РФ. Нейросетевой настройщик параметров П-регулятора контура скорости // Еременко Ю.И., Глущенко А.И., **Петров В.А.**; заявл. 07.04.2017; опубл. 02.06.2017. РОСПАТЕНТ.

В других изданиях (выборочно)

19. Ю.И. Еременко, А.И. Глущенко, **В.А. Петров** О снижении динамических нагрузок в главном электроприводе прокатной клетки путем применения нейросетевого настройщика линейных регуляторов // Материалы 10-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (с. Дивноморское, 11–16 сентября 2017 г.): в 3 т. / [редкол.: И. А. Каляев (отв. ред.) и др.]. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. – Т.2. – С. 155-157.

20. **Петров В.А.**, Глущенко 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. – Т. I. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2016. С. 61-71.

21. Молодых А.В., **Петров В.А.**, Глущенко А.И. О целесообразности применения алгоритмов адаптации параметров ПИД-регулятора при управлении

электроприводом ДУО-реверсивной прокатной клетки с двухзонным регулированием скорости // Материалы XII Всероссийской школы-конференции молодых ученых "Управление большими системами" - М.: ИПУ РАН, 2015. С.768-779.

22. Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Глущенко А.И., **Петров В.А.** О применении нейросетевого оптимизатора параметров линейных регуляторов в системе тиристорный преобразователь - двигатель постоянного тока // Сборник трудов VIII Международной конференции Современные метод прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий "ПМТУКТ-2015". – Воронеж: Изд-во "Научная книга", 2015. – С. 133-135.

23. Еременко Ю.И., Глущенко А.И., **Петров В.А.** О совместной работе нейросетевых настройщиков регуляторов тока якоря и скорости для решения задачи адаптивного управления электроприводом прокатной клетки // Труды XIX Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». – Самара: ООО «Офорт», 2017. – С.117-122.

24. **В.А. Петров**, А.И. Глущенко Разработка нейросетевого настройщика для снижения динамических нагрузок электропривода прокатной клетки // Современные сложные системы управления HTCS'2017: материалы XII международной научно-практической конференции. – Липецк: Издательство Липецкого государственного технического университета, 2017. – Ч.1. – С. 164-168.

25. Еременко Ю.И., Глущенко А.И., **Петров В.А.** Нейросетевой настройщик для отработки возмущений в систем управления прокатной клетью // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: Труды XI Всероссийской научно-практической конференции / Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2017. – С. 171-173.

26. Еременко Ю.И., Глущенко А.И., **Петров В.А.** Анализ применимости методов настройки линейных регуляторов для решения задачи адаптивного управления двигателем ДУО-реверсивной прокатной клетки // Современная металлургия нового тысячелетия. Сборник трудов Международной научно-практической конференции. 8-11 декабря. – Липецк: Издательство Липецкого государственного технического университета, 2015. – Ч.1. – С. 337-342.