

К вопросу использования искусственных нейронных сетей в системах управления электроприводами переменного тока намоточно-размоточных механизмов станов холодной прокатки

Сологубов А.Ю.

Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)
г. Челябинск, Российская Федерация
andrey.1993@rambler.ru

Фарыма В.Н.

ОАО “Магнитогорский металлургический комбинат”
г. Магнитогорск, Российская Федерация
faryma@mail.ru

Аннотация. Намоточно-размоточные механизмы прокатных станов – преимущественно нестационарные объекты. Нестационарность выражается в изменениях параметров механической системы при намотке. Такими параметрами являются радиус рулона, масса, момент инерции, скорость вращения вала двигателя и др. В условиях тесной взаимосвязи параметров электрической и механической частей моталки изменение режимных показателей приводит к возникновению динамических ошибок системы и к необходимости корректировки параметров системы управления для уменьшения данных ошибок. С точки зрения тенденции к повышению производительности агрегатов металлургического производства, требуется повышение точности управления электромеханическими системами, часто в условиях возрастающих возмущающих воздействий, как со стороны силовых механизмов, так и со стороны питающей электрической сети. В связи с этим необходима модернизация системы регулирования натяжения с позиции перспективных методов построения систем автоматического управления, где разработке системы формирования, транспортирования и наматывания металлической полосы должен предшествовать обзор текущего состояния в области систем управления моталками, анализ систем регулирования натяжения электроприводов переменного тока, а также пример приложений одного из самых перспективных методов для нестационарных объектов – нейронных сетей. В статье рассмотрены системы управления электроприводами переменного тока моталок станов холодной прокатки. Во введении проведён обзор литературы на данную тему и показана важность модернизации систем управления в условиях стремительного развития полупроводниковой силовой электроники и повышения вычислительных мощностей микропроцессорных устройств. Показана важность модернизации систем автоматического управления с применением методов интеллектуального управления. В основной части даны общие сведения о технологии намотки металлических полос на станах холодной прокатки, описана важность качественного регулирования натяжения и взаимосвязь натяжения с толщиной полосы. После краткой характеристики систем косвенного и прямого регулирования натяжения, в качестве модернизируемой системы регулирования натяжения представлена структурная схема системы управления технологического модуля T400 и контроллера Symadin D фирмы Siemens для стана 2000 холодной прокатки ОАО “ММК” и дано описание её работы. Отмечена актуальность применения интеллектуальных методов и технологий для исследования сложных электромеханических систем.

Ключевые слова: намоточно-размоточные механизмы, моталки, электропривод переменного тока, система управления, регулирование натяжения, нейронные сети

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно, в качестве электропривода механизмов в прокатном производстве выступал электропривод постоянного тока [1-5]. В [6, 7] описаны функциональные схемы однозонной и двухзонной систем автоматического регулирования натяжения для электропривода моталок постоянного тока. Электроприводы постоянного тока имеют хорошие эксплуатационные показатели в условиях динамических нагрузок и способны обеспечить плавное регулирование скоростей в широких диапазонах. Последние достижения в области силовой электроники, преобразовательных устройств и микропроцессорной техники способствуют повсеместному внедрению электроприводов переменного тока, включая моталки. В [7, 8] приведены сведения о применении асинхронных и синхронных двигателей, т.е. речь идёт об электроприводах переменного тока.

Намоточно-размоточные механизмы, с момента своего появления в промышленности и до настоящего времени, остаются сложными технологическими агрегатами с высокодинамичными интенсивными режимами работы. В различных научных публикациях и технической литературе [9-13] неоднократно упоминается о важности и широких возможностях модернизации систем управления электрическими приводами в условиях стремительного развития полупроводниковой силовой электроники и микропроцессорной техники. Опираясь на данный подход, стоит упомянуть о том, что базирующиеся на методах классической теории управления идеи уже не позволяют достигать значительных положительных результатов в данной области при всё более возрастающих требованиях к электроприводу намоточно-размоточных механизмов. Новый импульс к развитию систем управления могут дать методы интеллектуального управления.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Требуется рассмотреть особенности построения современных систем автоматического управления электромеханической системы намоточно-размоточных механизмов станов холодной прокатки, основные принципы управления, представить структурные схемы систем регулирования натяжения станов холодной прокатки. На основе особенностей технологического процесса, а также

сведений о методах искусственного интеллекта в системах управления и примерах его приложений в прокатном производстве, рассмотреть идею для модернизации существующей системы регулирования натяжения (на примере стана 2000 холодной прокатки ОАО “ММК”).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В процессе реверсивной холодной прокатки моталки применяют для сматывания длинных полос в рулоны. Одновременно, моталки создают натяжение в наматываемом материале, что необходимо для придания рулонам устойчивости (под “устойчивостью рулонов” следует считать способность к сохранению исходной цилиндрической формы), получения рулона с хорошим показателем плотности и правильного направления полосы при входе её в валки и выходе их валков прокатной клетки. Основная причина, определяющая необходимость прокатки с натяжением, заключается в том, что отсутствие натяжения ведёт к перекосу полосы и образованию петли, полоса теряет устойчивость в валках, происходит смещение полосы в сторону относительно оси прокатки, что приводит к аварийному режиму, неизбежному простою стана, возможным поломкам оборудования. Колебания натяжения при прокатке приводят к разнотолщинности полосы, а при больших амплитудах – к порыву ленты. Точность регулирования параметров намотки (размотки) в значительной степени определяет качество выпускаемой продукции (отсутствие волны, коробоватости, рифления), что особенно важно для агрегатов по производству и обработке тонкой и тончайшей холоднокатанной полосы [6, 7].

Наиболее высокие требования по регулированию натяжений предъявляются именно к станам холодной прокатки, т.к. натяжение оказывает значительное влияние на толщину прокатываемой полосы, как на важнейший геометрический параметр конечного продукта.

Это обусловлено тем, что толщина полосы, прокатываемой на стане холодной прокатки, заметно ниже, чем аналогичный параметр на станах горячей прокатки. Фактически, это означает, что влияние со стороны некачественной САРН будет сильнее сказываться на менее тонких полосах.

Влияние натяжения на толщину полосы на выходе из клетки определится в соответствии с зависимостью [7]:

$$h = h_0 + \frac{P}{M_k} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{\text{пер}} + \sigma_{\text{зад}}}{\sigma_{\text{ф}}} \right)$$

где h_0 – заданная толщина полосы, м; P – давление металла на валки при прокатке без натяжения; M_k – модуль жёсткости прокатной клетки; $\sigma_{\text{пер}}$, $\sigma_{\text{зад}}$, $\sigma_{\text{ф}}$ – переднее и заднее удельное натяжения, а также сопротивление металла деформации при прокатке.

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ НАТЯЖЕНИЯ ПРОКАТЫВАЕМОЙ ПОЛОСЫ

В настоящее время известны два принципиально различных способа построения систем регулирования натяжения: косвенный и прямой. Системы косвенного регулирования натяжения основаны на принципе поддержания пропорциональности электромагнитной мощности двигателя моталки P_m и скорости намотки V_m при работе стана на установившейся скорости. Осуществляется регулирование по косвенным параметрам – току или ЭДС двигателя. В этом способе регулирования натяжения качество и

точность регулирования натяжения во многом определяется точностью расчета диаметра рулона и компенсацией влияний различных возмущений [6, 7].

Кардинальное повышение точности поддержания натяжения может быть достигнуто только с применением систем прямого регулирования. Особенно это актуально при обработке тонкой полосы. Известны два основных способа построения систем прямого регулирования натяжения: использование для поддержания натяжения полосы регулирования положения так называемых “плавающих” роликов или применение непосредственных измерителей натяжения материала в промежутке натяжения для получения сигнала, пропорционального уровню текущего натяжения в режиме реального времени. Принцип работы и структурные схемы обоих способов приведены в [14]. В настоящее время наибольшее распространение получил контактный способ измерения натяжения с помощью секционных роликов. Каждый из таких роликов снабжён пьезоэлектрическими датчиками, измеряющими давление на ролик при огибании его полосой. Этот метод основан на том факте, что полоса при изменении направления действует радиальной силой на измерительные валки. С помощью измерительных валков, надлежащим образом расположенных по ширине рулона в зонах измерения, может быть определена локальная продольная сила. Отсюда можно рассчитать натяжение полосы [15, 16]. Натяжение определяется в соответствии с формулой:

$$F_T = \frac{F_R}{2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

где F_R – радиальная сила, с которой изогнутая на угол α полоса давит на ролик, Н; α – угол обхвата полосой измерительного ролика, град; F_T – измеренное значение натяжения, Н.

Рассмотрим типовую систему регулирования натяжения на примере электропривода переменного тока реверсивной моталки стана 2000 ОАО “ММК”. Секция управления включает в себя контроллеры и исполнительные механизмы. Система должна обладать динамическими характеристиками быстрого реагирования, хорошими статическими характеристиками и высокой надежностью. В последнее время широкое распространение в электроприводах переменного тока получили циклоконвертеры Simovert D с системой регулирования Transvektor фирмы Siemens, включая рассматриваемый стан 2000 ХП ОАО “ММК”. На рис. 1 представлена функциональная схема двухзонного регулирования натяжения с зависимым управлением потоком двигателя в функции ЭДС системы “Transvektor” фирмы “Siemens”. В данной системе используется принцип векторного управления.

Система имеет два канала управления: вектором потокосцепления ротора и угловой скорости ротора. Двухканальная система управления даёт возможность осуществить независимое регулирования модуля вектора потокосцепления ротора и скорости ротора при сохранении прямой пропорциональности между моментами, развиваемым двигателем, и намагничивающей силой якоря (статора).

Датчики тока ДТ1-ДТ3 и датчики напряжения ДН1-ДН3 формируют сигналы, пропорциональные токам и напряжениям обмоток якоря. Датчик тока ДТР формирует сигнал, пропорциональный току возбуждения ротора.

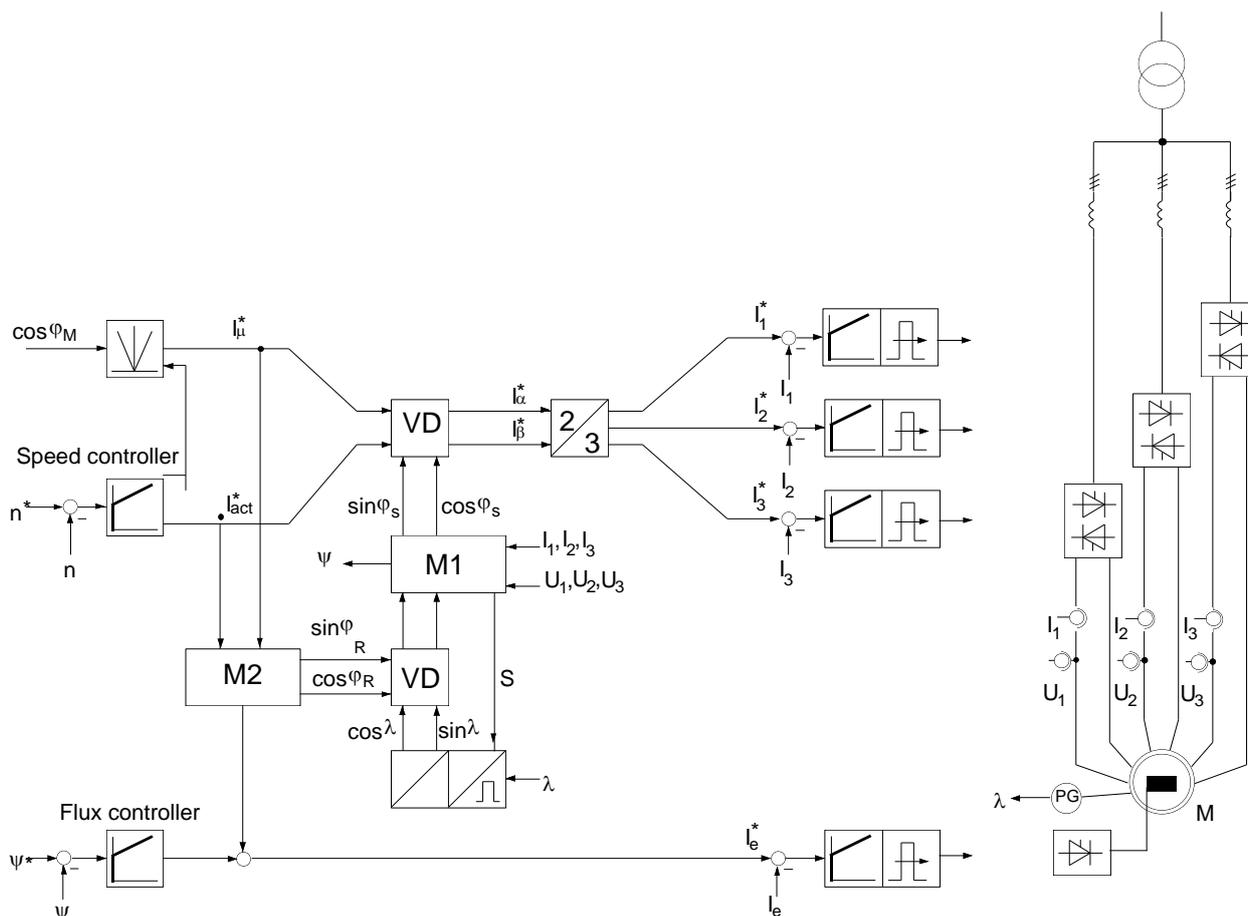


Рис. 1. Функциональная схема система НПЧ-СД

Сигналы с датчиков тока и напряжения поступают в модель M1, где вычисляются мгновенные значения магнитного потока и его пространственное расположение относительно статора. Датчик положения ротора ДПР установлен на валу синхронного двигателя и формирует сигнал, пропорциональный углу оси ротора относительно статора. При остановке привода ДПР запоминает текущее положение ротора. Канал управления угловой скоростью ротора является двухконтурным, построенным по принципу подчинённого регулирования координат с внутренним контуром тока статора и внешним контуром скорости. Причём контур скорости работает только во вспомогательных режимах, а в процессе намотки РС находится в насыщении.

Внутренний трёхмерный контур регулирования тока образован тремя регуляторами РТ1-РТ3, имеющими ПИ-структуру с адаптацией в прерывистом режиме. Каждый регулятор подключен к соответствующей фазе непосредственного преобразователя частоты.

Регулятор скорости также имеет ПИ-структуру. Однако в переходных режимах работает только П-часть, что снижает или полностью устраняет в них перерегулирование. В статических режимах работы для исключения просадки скорости подключается интегральная часть. В режиме регулирования натяжения уровень выходного сигнала регулятора скорости ограничивается блоком ограничения БО. При этом учитывается изменение радиуса рулона: сигнал задания U_{3T} является пропорционально зависимым от радиуса.

На рис. 2 ниже приведена структурная схема прямого управления натяжением двигателем моталки, реализован-

ная на базе технологического модуля T400 (разматыватель) и в контроллере Simadyn D (моталки) фирмы Siemens.

К входным сигналам данной системы управления относятся: T_3 – заданное натяжение, Н; dV/dt – ускорение, m/c^2 ; $V_{лин}$ – линейная скорость полосы, m/c ; b – ширина полосы, м. Сигналы с датчиков скорости вращения барабана моталки, изгибающего ролика и роликов измерения планшетности. Данные величины могут поступать к преобразователю, как по коммуникационной шине Profibus DP, так и через аналоговые входы преобразователя от вышестоящей системы управления агрегатом [9, 10].

В схеме на рис. 2 осуществляется расчёт параметров, необходимых для работы моталки: заданное значение скорости вращения вала барабана n_3 , момент трения $M_{тр}$, момент для создания натяжения $M_{нат}$, сигнал компенсации динамического момента $M_{дин}$, диаметр рулона и момент инерции с помощью набора свободных функциональных блоков. Схема работает следующим образом. Поступающие на вход блока “Расчёт диаметра рулона” величины скоростей вращения вала барабана моталки, ролика планшетности, а также исходные значения передаточных чисел позволяют рассчитать диаметр рулона в соответствии с зависимостью:

$$D_{рул} = \frac{n_{рол} \cdot i_{мот} \cdot D_{рол}}{n_{рол} \cdot i_{рол}}$$

где $n_{рол}$ – скорость вращения ролика планшетности, об/мин; $i_{мот}$ – передаточное число электропривода моталки; $D_{рол}$ – диаметр ролика измерения планшетности, м; $n_{мот}$ – скорость вращения вала барабана моталки, об/мин; $i_{рол}$ – передаточное число привода ролика, об/мин.

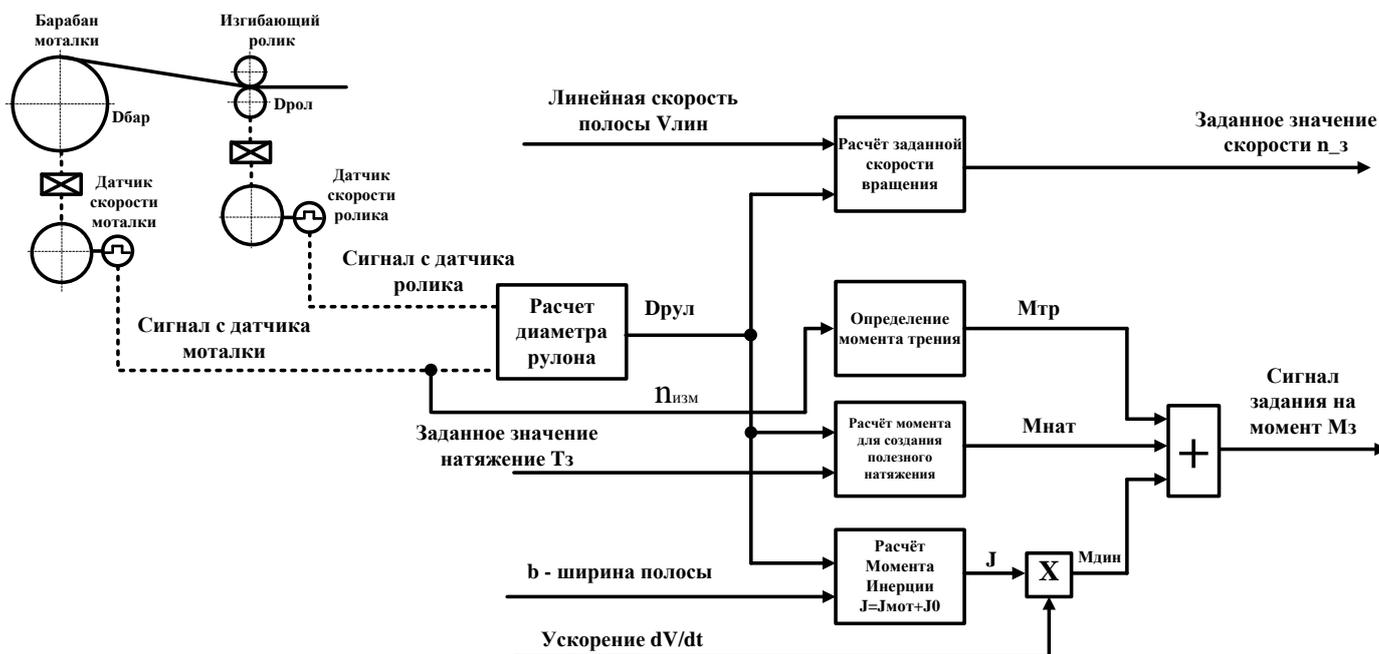


Рис. 2. Структурная схема управления технологического модуля Т400 (разматыватель) и контроллера Symadin D (моталки) для намоточно-размоточных механизмов

Блок “Расчёт момента инерции” позволяет рассчитать изменяющийся в процессе намотки момент инерции рулона. Для этого на его вход подаются значения текущего диаметра $D_{рул}$ и ширина полосы b . На основе входных данных, а также плотности материала полосы ρ , диаметра барабана $D_{бар}$ и передаточного числа i механизма моталки в соответствие с зависимостью вычисляется момент инерции:

$$J_{рул} = \frac{\pi \cdot \rho \cdot b}{32 \cdot i_{рол}^2} \cdot (D_{рул}^4 - D_{бар}^4)$$

где b – ширина полосы, м; ρ – плотность материала, кг/м³; $D_{бар}$ – диаметр барабана, м.

Момент, необходимый для создания натяжения, состоит из следующих величин:

$$M_з = M_{тр} + M_{дин} + M_{нат}$$

где $M_{тр}$ – момент, необходимый для преодоления сил трения, Н·м; $M_{дин}$ – сигнал компенсации момента в переходных режимах, Н·м; $M_{нат}$ – полезный момент, необходимый для создания заданного натяжения, Н·м.

Все эти величины рассчитываются в блоках “Определение момента трения”, “Расчёт момента для создания полезного натяжения” и путём умножения суммарного момента инерции механизма на сигнал ускорения dV/dt .

После сложения $J_{рул}$ с постоянной составляющей момента инерции (барабан, редуктор моталки) преобразователь получает суммарный момент инерции J , который используется для расчёта динамического момента $M_{дин}$, требуемого двигателю в переходных процессах. Расчёт динамического момента осуществляется путём умножения суммарного момента инерции J и ускорения dV/dt , осуществляемого с помощью множительного устройства.

Момент для создания полезного натяжения $M_{нат}$ является функцией от заданного натяжения $T_з$ и текущего радиуса рулона $D_{рул}$ и рассчитывается по формуле:

$$M_{нат} = \frac{T_з \cdot D_{рул}}{2 \cdot i}$$

где $T_з$ – заданное натяжение, Н.

Момент трения $M_{тр}$ является нелинейной функцией скорости и записывается в преобразователе при наладке, на схеме рис. 2 представлен в виде блока “Определение момента потерь”, характеристика которого пояснена на рис. 3.

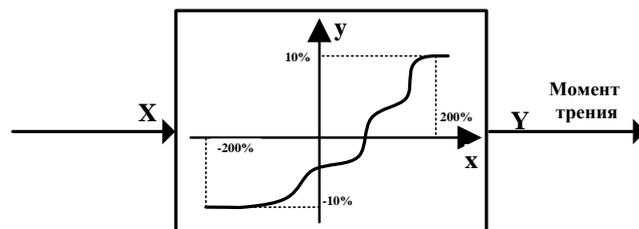


Рис. 3. Характеристика блока “Определение момента потерь”

Динамический момент вычисляется как произведение момента инерции J и ускорения dV/dt .

$$M_{дин} = J \cdot dV/dt$$

Выходы блоков, суммируясь в блоке, формируют значение заданного момента.

Блок “Расчёт заданной скорости вращения” рассчитывает по формуле заданную скорость вращения:

$$n_з = \frac{V_{мп} \cdot i \cdot 60}{D_{рул} \cdot \pi}$$

где $V_{мп} = V_з \pm \Delta V$ – расчётная скорость прокатки, м/с; $V_з$ – заданная скорость прокатки, м/с; ΔV – скорость обгона, м/с; i – передаточное число редуктора; $D_{рул}$ – рассчитанный диаметр, м.

Система регулирования натяжения для станов холодной прокатки, реализованная на базе технологического модуля Т400 (разматыватель) и в контроллере Simadyn D (моталки), показана на рис. 4.

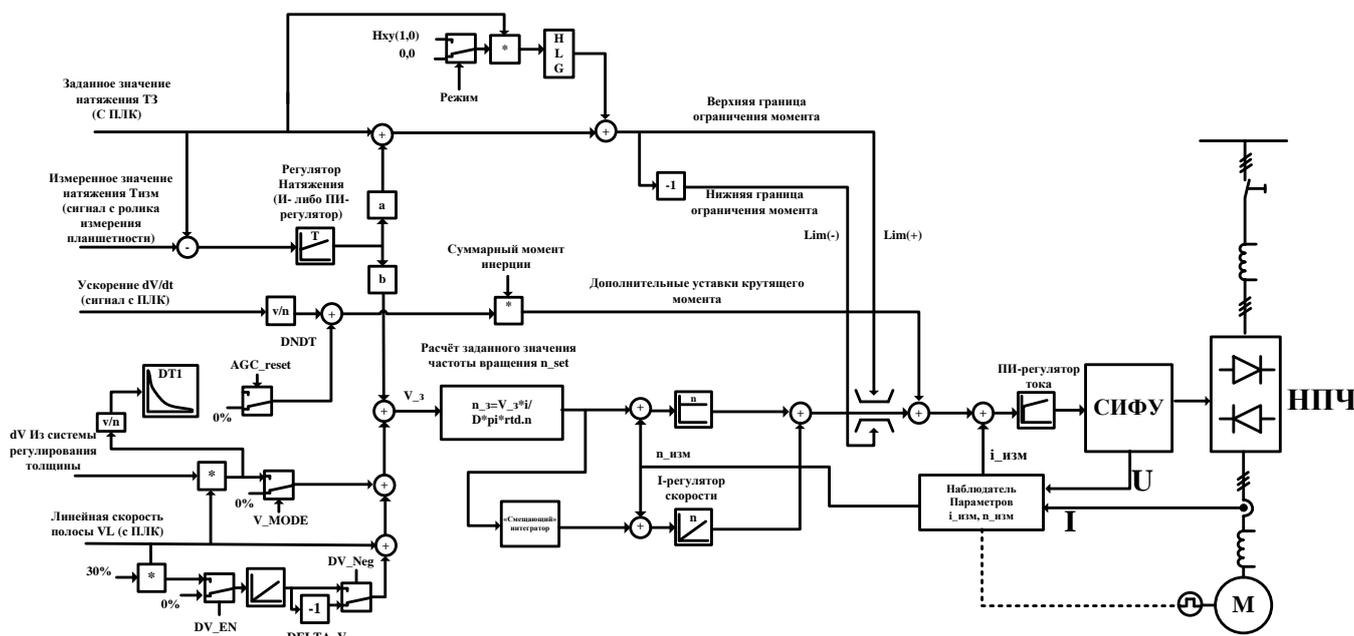


Рисунок 4. Система регулирования натяжения на станах холодной прокатки

Данная система является трёхконтурной системой подчинённого регулирования параметров, в которой регулятор натяжения выполняет в роль корректора линейной скорости полосы при намотке. Внутренний контур регулирования активной составляющей тока статора подчинён внешнему по отношению к нему контуру регулирования скорости. Внешним по отношению к контуру регулирования скорости является внешний контур регулирования натяжения. Система работает в двух основных режимах: косвенное (V_SET) и прямое регулирование натяжения (T_SET). Косвенное регулирование делится на простой контроль (без выравнивания) и непосредственно косвенный контроль натяжения. В режиме прямого регулирования натяжения подключается сигнал с измерителя натяжения. Продвинутое управление расхода массы не рассматривается. Переключение режима управления натяжения происходит в зависимости от заданной скорости намотки (при линейных скоростях выше 5-10 м/с включается режим прямого регулирования натяжения). Кроме этого, возможно работа с косвенным регулированием в переходном режиме и с прямым в статическом. Данная структура и принцип управления являются, в общем случае, общепринятыми для станов холодной прокатки с электроприводами переменного тока.

В режиме простого контроля без выравнивания регулятор скорости устраняет рассогласование между заданным значением линейной скорости $V_{лин}$ и фактическим значением скорости. Ограничение выхода регулятора скорости определяет заданное значение на момент. Заданное значение крутящего момента действует непосредственно в пределах ($Lim [-]; Lim [+]$). Значение крутящего момента складывается из трёх составляющих $M_3 = M_{тр} + M_{лин} + M_{нат}$. На вход регулятора скорости, помимо сигнала задания на линейную скорость $V_{лин}$ подаётся сигнал дополнительной скорости 30% от $V_{лин}$ путём включения сигнала "DV_EN". Способ применяется только при заправке, в состоянии покоя и в процессе намотки первых витков рулона.

В режиме непосредственного косвенного контроля регулятор скорости работает как ПИ-регулятор. Заданное

натяжение влияет на косвенный контроль натяжения с помощью регулятора натяжения. Выход регулятора натяжения действует как добавка к заданной величине крутящего момента и, таким образом, влияет на сигналы ограничения ($Lim [-]; Lim [+]$). В этом случае предельные значения крутящего момента должны быть освобождены от сигнала "TQ_EN", а сигнал дополнительной скорости 30% от dV должен быть отключен (сигнал V-Mode=0). Регулятор натяжения работает с постоянным коэффициентом усиления (в случае ПИ-структуры). При остановке моталки коэффициент усиления регулятора натяжения должен быть установлен на небольшую величину для того, чтобы процесс остановки протекал без перерегулирования.

В режиме прямого регулирования натяжения контроль натяжения непосредственно действует на заданное значение скорости. Этот способ может быть использован в первую очередь на моталки только при более высоких линейных скоростях ($> 5-10$ м/сек). Заданное значение натяжения подаётся на регулятор натяжения. Выход регулятора натяжения подаётся в качестве одного из сигналов на сумматор, осуществляющий сложение различных компонент линейной скорости. Регулятор скорости работает в качестве контроллера P, I-компонента устанавливается в режим адаптации к изменяющемуся моменту инерции. Ограничение регулятора скорости формируется с учётом дополнительной скорости (+/- 130%). В этом режиме параметр $DV_En=1, V-MODE=0$. Регулятор натяжения в процессе изменения линейной скорости $V_{изм} - V_L$ формирует такой закон изменения, чтобы переходный процесс был как можно более плавным.

Данная структурная схема реализует основные принципы регулирования натяжения на моталках станов холодной прокатки и является достаточно сложной разновидностью систем автоматического регулирования АСУ ТП прокатного производства. На рис. 6 представлены осциллограммы, снятые при помощи iBaAnalyzer и представляющие собой графики изменения натяжения с фильтрацией от помех при измерении.

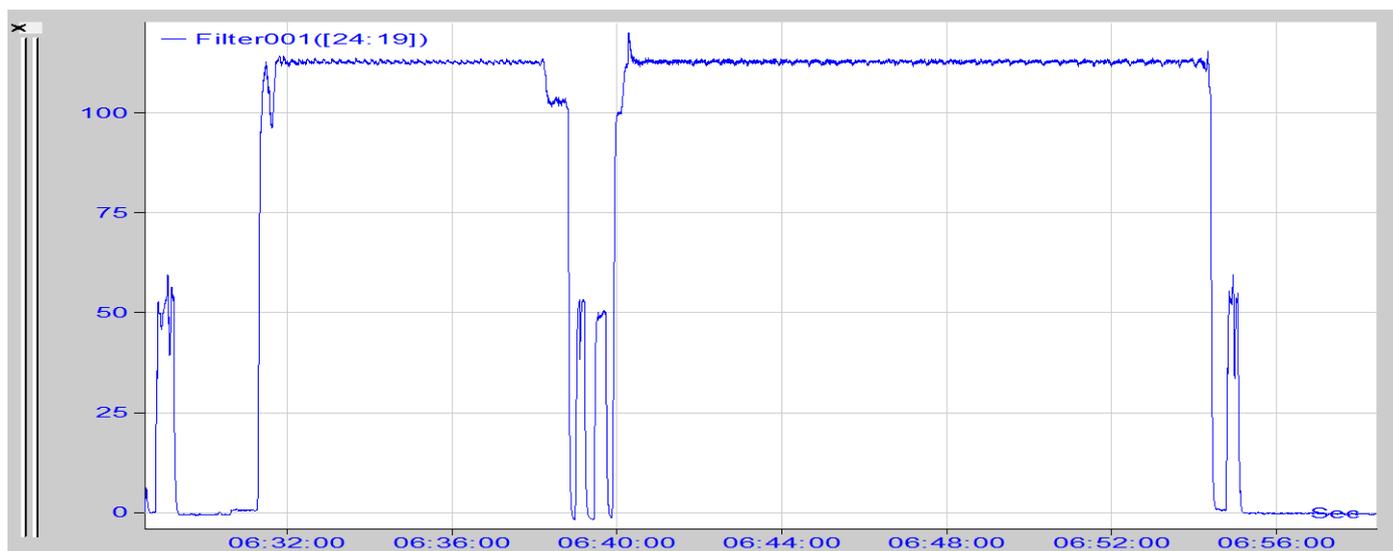


Рис. 6. Осциллограмма переходного процесса регулировки натяжения при намотке полосы

Динамическое отклонение от заданного значение натяжения составило 17 % при норме 5-15%. Перерегулирование составило 21%. Очевидно, что нестационарность работы электроприводов моталок зависит как от способа управления, так и от свойств механизмов в процессе эксплуатации. Это связано с изменением параметров электромагнитных контуров в цепи “преобразователь-двигатель”, потока возбуждения двигателей, моментов инерции механизмов, частот упругих механических колебаний, параметров гибких передач, взаимного изменения механических параметров в многосвязных многодвигательных электромеханических системах (ЭМС) происходит изменение режимных показателей электроприводов. Кроме того, наблюдаются значительные изменения интенсивности возмущающих и управляющих воздействий, что приводит к существенному увеличению динамических ошибок системы и к необходимости коррекции параметров регулирования для минимизации этих ошибок. Стоит отметить, что система НПЧ-СД – нелинейная система за счёт входящих в её состав существенно нелинейных элементов. В начале размотки двигатель вращается в обратном направлении, и линейная скорость с уменьшением радиуса также уменьшаться. В процессе намотки радиус рулона будет увеличиваться, как и линейная скорость. Это приведет к изменению момента инерции нагрузки, следовательно, системные динамические уравнения изменятся и повлияют на натяжение. С другой стороны, при изменении радиуса изменяется момент инерции рулона и линейная скорость, что приводит к изменениям натяжения. Другими словами, при увеличении радиуса рулона окружная скорость вала моталки должна снижаться, а при уменьшении – увеличиваться с целью постоянства поддержания заданного уровня натяжения.

Система контроля натяжения должна быстро достигать точки постоянного напряжения в процессе намотки. Это показатель хорошей динамической производительности. Кроме того, система должна обеспечить фактическое значение натяжения в пределах допустимого диапазона погрешностей изменения радиуса и линейной скорости. Это означает, что уровень натяжения в процессе намотки или размотки должен иметь более стабильное состояние. В

настоящее время в подобных системах применяют ПИ-закон регулирования. Его легко реализовать, но его настройка параметров требует опыта, а его способность адаптироваться к изменению параметров системы оставляет желать лучшего. Очевидно, что существующая система регулирования натяжения нуждается в модернизации, т.к. показатели качества регулирования натяжения уже не удовлетворяют современным требованиям, в частности:

- недостаточно плавное ускорение и замедление;
- большая длительность и колебательность переходных процессов (переходный процесс длится порядка 0,5-2 сек, максимальное перерегулирование составляет порядка 16%);
- не обеспечивается требуемая динамика в условиях постоянно изменяющихся параметров системы;
- простые и некачественные механизмы адаптации, основанные на корректировке изменяющихся параметров системы, входящих в состав настраиваемых параметров регуляторов;
- высокая восприимчивость к различным параметрическим возмущениям в процессе работы.

Комплексная модернизация АСУ ТП станов прокатки, показанная, например, в [17] подразумевает повышение производительности, качества продукции, надёжности работы оборудования посредством замены морально и физически устаревших образцов, а также сжатые сроки монтажных и пусконаладочных работ в совокупности с интеграцией новой АСУ ТП в существующую структуру АСУ цехового (заводского) уровня с целью, как минимум, ведения контроля за потоком материалов и за соблюдением ТП на всех переделах и за качеством готовой продукции. При этом внимания практически не уделяется совершенствованию алгоритмов регулирования параметров при прокатке. Выходом из сложившейся ситуации может стать использование алгоритмов интеллектуального управления. В основе интеллектуального управления лежит построение высокоорганизованных САР с выполнением таких, традиционно присущих человеку функций, как выработка стратегии поведения и закона управления в условиях неопределённости, обучение и обобщение полученного опыта в условиях из-

меняющейся внешней среды. Основными элементами искусственного интеллекта в настоящее время являются:

- 1) нейронные сети;
- 2) нечёткие системы;
- 3) эволюционные (генетические) алгоритмы.

Становится актуальным вопрос рассмотрения классических электромеханических систем с позиций мехатронных систем третьего поколения, для которых элементы искусственного интеллекта являются априорным признаком. Рассмотрение прокатного агрегата с позиции мехатронного комплекса с достаточной степенью глубины раскрыт в [18]. В литературных изданиях вопрос применения интеллектуальных технологий применительно к актуальным технологическим агрегатам освещается в ничтожно малом количестве. По крайней мере, авторам в процессе тщательного поиска качественной информации обнаружить таких источников не удалось. Отдельные фрагменты и частные случаи встречаются в периодических изданиях, в т.ч. и в зарубежных. В [19] показано нечеткое управление с регулируемым коэффициентом “а” в системе прямого контроля натяжения. В этой системе параметр “а” отвечает за адаптацию базы правил в процессе работы системы. В [20] исследуется адаптации параметров ПИД-регулятора с помощью одиночного нейрона применительно к системе косвенного регулирования натяжения. В [21] исследуется поддержание натяжения при размотке, при этом вводится дополнительная инверсная модель двух намоточных механизмов, связанных перематываемым материалом, с дополнительным каналом т.н. активного демпфирования. Это позволило повысить устойчивость системы к различным помехам. При этом применялся стандартный ПИД-регулятор. В [22] применяется т.н. “наблюдатель” – математическая модель тех. процесса или сложных для измерения параметров и подсистема выравнивания скоростей, которая позволила повысить качество управления и быстродействия, а так же устранить броски натяжения в динамических режимах, вызванных неравенством скоростей механизмов. В [23] используются μ - и H_∞ -контроллеры для повышения робастности системы регулирования натяжения. В [24, 25] содержатся успешные примеры применения нейросетевых технологий в системах прямого регулирования натяжения материала. Продолжать список публикаций можно достаточно долго. Если обобщить информацию, содержащуюся в них, касающихся систем регулирования натяжения, то основными направлениями станут:

1. Качественная адаптация при изменении параметров рулона наматываемого материала;
2. Простота и попытка уйти от предварительной точно математической идентификации объекта управления;
3. Повышение устойчивости к различным возмущениям;
4. В [7] приводится ещё один крайне важный с точки зрения качества намотки металлической полосы момент – закон регулирования натяжения. Отсюда выводим четвёртое направление – задание закона регулирования натяжения.

По мнению авторов, в условиях очевидной потребности в вышеописанных вещах, целесообразно рассмотреть применение нейросетевых технологий. Поскольку объект высокдинамичный и нестационарный, то для таких объектов наиболее целесообразно применять рекуррентные нейронные сети (RNN) – нейронная сеть с обратными свя-

зями на базе многослойного персептрона, позволяющая управлять динамическим объектом по целой серии предыдущих состояний объекта. Типовая структура такой сети показана на рис. 7.

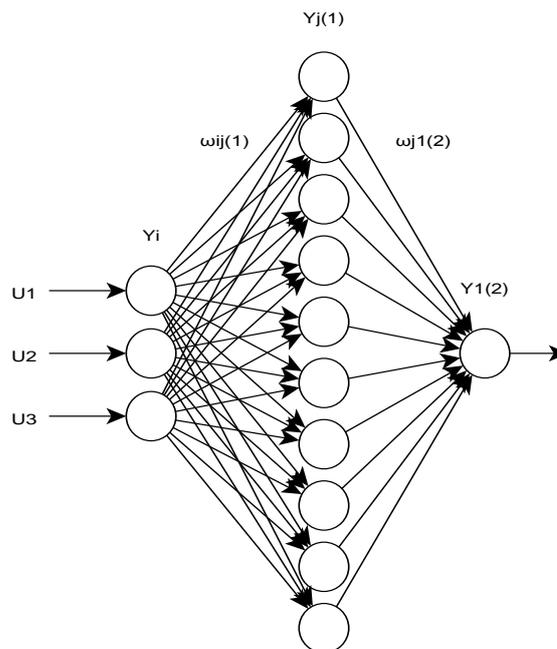


Рис. 7. Типовая архитектура многослойного персептрона

Как видно из рис. 7, многослойный из нескольких слоёв нейронов: входного слоя (число входов может быть произвольным); одного или более скрытых или промежуточных слоёв и выходного слоя нейронов. Входной вектор $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ подаётся на входной слой, а выходной вектор $Y=(y_1, y_1, \dots, y_m)^T$ (в нашем случае на выходе получается единственный вектор). Определяется путём поочерёдного вычисления уровней активности элементов каждого слоя (от 1-го скрытого слоя до выходного) с использованием уже известных функцией активации предшествующих слоёв.

Обозначим через $U^l=(u_1^l, u_2^l, \dots, u_{n_k}^l)^T$ набор выходных сигналов нейронов l-о слоя; $W^l=||w_{ij}^l||$ - матрицу весов синоптических связей, соединяющих нейроны l-о слоя с нейронами (l+1)-го слоя, $(l=1, 2, \dots, N-1)$. Тогда работа нейронной сети описывается следующими уравнениями:

- для входного слоя ($l=1$)

$$U^1=X, \text{ где } X=(x_1, x_2, \dots, x_n) - \text{входной вектор};$$

- для 1-го скрытого слоя ($l=2$)

$$u_j^2=f\left(\sum_{i=1}^n w_{ij}^1 \cdot u_i^1\right), j=1, 2, \dots, n_2;$$

- для второго скрытого слоя ($l=3$)

$$u_j^3=f\left(\sum_{i=1}^{n_2} w_{ij}^2 \cdot u_i^2\right), j=1, 2, \dots, n_3;$$

- для выходного слоя ($l=N$)

$$u_j=f\left(\sum_{i=1}^{n_{N-1}} w_{ij}^{N-1} \cdot u_i^{N-1}\right), j=1, 2, \dots, m;$$

где n_l – число нейронов l-го слоя ($n_1=n$; $n_N=m$); N – число слоёв НС; $f(\cdot)$ – функция активации нейрона.

Предполагается, что, выбрав соответствующим образом веса синаптических связей w_{ij}^l ($l=1,2,\dots,N-1$), можно обеспечить желаемый характеристики “вход-выход”. Данная процедура носит название обучения сети и состоит в выполнении следующих шагов:

- 1) инициализируются случайным образом веса синаптических связей НС. На практике в качестве начальных значений w_{ij}^l обычно принимают малые числа, например $[-0,05; 0,05]$;
- 2) на входы НС поочередно подаются входные векторы X^r из обучающей выборки $\Omega=\{(X^1,D^1);(X^2,D^2);(X^R,D^R)$. Здесь $D^r=(d_1^r, d_2^r, \dots, d_m^r)^T$ - желаемая реакция (вектор «эталон») НС в ответ на входной вектор $X^r=(x_1^r, x_2^r, \dots, x_n^r)^T$ в r -м эксперименте;
- 3) вычисляется реакция $Y^r=(y_1^r, y_2^r, \dots, y_m^r)^T$ нейронной сети на соответствующий входной вектор X^r ;
- 4) вычисляется вектор ошибки сети $\varepsilon^r=D^r-Y^r$, т.е. разность между желаемым и фактическим значением вектора выходов НС;
- 5) вычисляется суммарная квадратичная ошибка

$$E = \frac{1}{2} \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^m (d_j^r - y_j^r)^2$$

подсчитываемая по всем выходам НС и для всех её входных образов;

- б) производится изменение весов НС в направлении уменьшения ошибки обучения ($E \rightarrow \min$), после чего переход к шагу 2.

Наиболее простой способ настройки весов НС – использование градиентного алгоритма минимизации ошибки E

$$w_{ij}^l(k) = w_{ij}^l(k-1) + \Delta w_{ij}^l(k-1) = w_{ij}^l(k-1) - \alpha \left[\frac{\partial E}{\partial w_{ij}^l(k)} \right], \quad (l=1,2,\dots,N-1)$$

где $k=0,1,2,\dots$ – номер итерации (цикла обучения); α – параметр, определяющий скорость обучения сети (обычно, $0 < \alpha < 1$, но может быть и больше).

На практике процесс обучения требует достаточно много итераций, причём длительность процесса обучения тем больше, чем выше сложность НС, т.е. чем больше число входящих в неё нейронов и связей между ними. Учитывая, что число таких связей (а значит и число настраиваемых весовых коэффициентов) может достигать достаточно большого количества, необходимо использование специальных алгоритмов обучения.

Одним из таких алгоритмов, получившим широкое распространение в задачах построения НС, является алгоритм обратного распространения (Back Propagation Algorithm). Основными преимуществами данного алгоритма состоит в том, что подстройка весов синаптических связей осуществляется послойно, используя достаточно простые математические выкладки и, что самое главное, быстро, что подходит для обучения в реальном времени. Для вычисления частных производных $\partial E / \partial w_{ij}^l$ можно воспользоваться правилом дифференцирования сложной функции. Полагая для простоты, что обучающая выборка состоит из одной пары (X,D) , т.е. $R=1$, можно записать:

- для выходного слоя

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}^{N-1}} = -(d_j - y_j) \cdot f_j' \cdot u_j^{N-1}$$

- для последнего скрытого слоя

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}^{N-2}} = - \sum_l [(d_j - y_j) \cdot f_j' \cdot w_{ij}^{N-1}] \cdot f_l' \cdot u_{ij}^{N-2}$$

Если в качестве функции активации нейрона используется сигмоидная функция $f(s)=1/(1+\exp(-s))$, то получаем, что $f_j' = f_j(1-f_j)$ и выражения принимают вид:

- для выходного слоя

$$\delta_j^{N-1} = (d_j - y_j) \cdot y_j \cdot (1 - y_j); \quad \frac{\partial E}{\partial w_{ij}^{N-1}} = \delta_j^{N-1} \cdot u_{ij}^{N-1}$$

- для последнего скрытого слоя

$$\delta_j^{N-2} = \sum_e [\delta_e^{N-1} \cdot w_{je}^{N-1}] \cdot u_j^{N-1} \cdot (1 - u_j^{N-1}); \quad \frac{\partial E}{\partial w_{ij}^{N-2}} = \delta_j^{N-2} \cdot u_{ij}^{N-2}$$

- для первого скрытого слоя

$$\delta_j^1 = \sum_e [\delta_e^2 \cdot w_{je}^2] \cdot u_j^2 \cdot (1 - u_j^2); \quad \frac{\partial E}{\partial w_{ij}^1} = \delta_j^1 \cdot u_{ij}^1$$

Таким образом, приращение силы синаптической связи Δw_{ij}^l должно быть пропорционально произведению сигнала ошибки l -го слоя δ_j^l и выходного сигнала l -о слоя u_{ij}^l . Вычисляя δ_j^l и Δw_{ij}^l слой за слоем по направлению ко входу сети, можно скорректировать весовые коэффициенты НС.

Вместе с тем, несмотря на кажущуюся простоту реализации алгоритма ВР, его применение встречается с рядом “подводных камней”, а именно:

- 1) При малых значениях скорости обучения процесс обучения обычно очень медленно сходится, что особенно критично при управлении инерционными объектами с изменяющимися во времени параметрами. Чрезмерное увеличение скорости обучения может привести к ухудшению сходимости, а в некоторых случаях и к неустойчивости системы;
- 2) Как и любой градиентный метод оптимизации, ВР может встречаться с такими серьёзными затруднениями, как наличие локальных минимумов;
- 3) Скорость сходимости существенно зависит от выбора начальных условий (при правильно подобранном коэффициенте обучения и малых начальных значений весовых коэффициентов не имеет существенности).

Выход из данной ситуации в использовании более совершенных алгоритмов оптимизации, обеспечивающих повышение качество процесса обучения. В последнее время одним из таких алгоритмов стал генетический алгоритм, примеры применения которого для адаптации регуляторов показаны в [26]. Совокупность генетического алгоритма и алгоритма ВР сейчас называется гибридным алгоритмом обучения, в котором алгоритм ВР выступает в качестве ускорителя работы ГА, становится одним из самых перспективных алгоритмов оптимизации при построении мехатронных систем.

Покажем достаточно простое исследование процесса следования за эталонной траекторией, адаптацию и подавление возмущений на примере управления линейным инерционным объектом с передаточной функцией следующей:

$$W_{об} = \frac{1}{5s+1}$$

При этом эталонная траектория имеет такую передаточную функцию:

$$W_э = \frac{1}{s+1}$$

Несмотря на большое количество вариантов нейрорегулирования [27] базисом является схема, показанная на рис. 8. Это схема, в которой нейросетевой контроллер в замкнутой системе управляет промышленным объектом и его параметрами. На вход НС подаются сигналы с датчиков или иные сигналы, образуя обратную связь. Различные модификации данной схемы можно посмотреть в [27]. Однако, выбор конкретной модели необходимо осуществлять на этапе разработки системы управления, что выходит за рамки данной статьи.

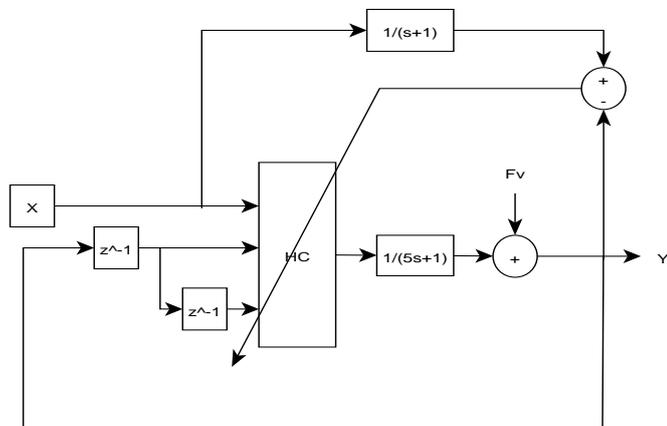


Рис. 8. Элементарная схема нейрорегулирования

На рис. 9. показано следование за эталонной траекторией в режиме непрерывной адаптации, а на рис. 10 – подавление возмущений с помощью НС.

Анализ рис. 9 показывает, что по мере роста скорости обучения происходит более быстрая адаптация. Анализ рис. 10 показывает, что по мере роста скорости обучения активнее подавляются колебания.

Результаты эксперимента показывают успешность применения адаптируемого в реальном времени НС-регулятора для управления инерционным линейным объектом. Дальнейшие исследования будут направлены на управление более сложными объектами. Следует отметить, что добиваться поставленных четырёх критериев стоит не только регулированием скорости обучения, хотя этот приём и может быть эффективным. Стоит менять число слоёв, число нейронов внутренних слоёв, сигналы, подаваемые на входы НС и т.д.

С развитием методов искусственного интеллекта, и в частности нейросетевых технологий, появилась возможность заменить применяемые классические методы теории автоматического управления нелинейными регуляторами, которые при правильно выбранной структуре и алгоритме обучения могут формировать требуемое выходное управляющее воздействие для объекта регулирования. С этой целью возможна реализация нелинейного регулятора в виде нейроконтроллера [28], который представляет собой нейронную сеть, функционирующую по принципу биологических нейронов [29].

Повышение качества управления с использованием нейросетевых технологий обосновано следующими положениями [30, 31]:

- нейросетевые модели рассматриваются как естественное развитие традиционной теории автоматического управления;

- нейронные сети имеют способность к самообучению, что исключает необходимость иметь большой объем информации для нейроконтроллеров и делает пригодными их для регулирования в условиях существенных неопределенностей;

- реализации эвристических и эмпирических алгоритмов управления;

- нейронные сети могут диагностировать или прогнозировать намечающиеся нарушения технологических процессов и отказы работы технологического оборудования;

- способность переформулировать алгоритмы управления на основе новых данных о параметрах объекта;

- выбор подходящих законов управления на основе текущих оценок состояния объекта;

- объяснение текущей ситуации оператору (пользователю);

- высокая степень параллелизма нейронных сетей позволяет реализовывать быстрые методы микропроцессорной обработки.

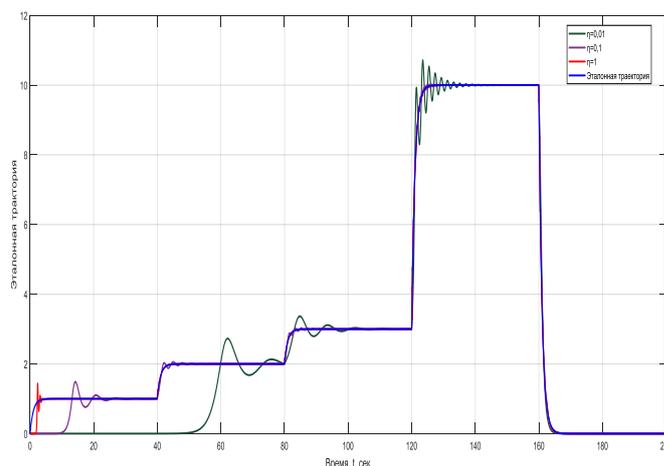


Рис. 9. Следование за эталонной траекторией в режиме непрерывной адаптации

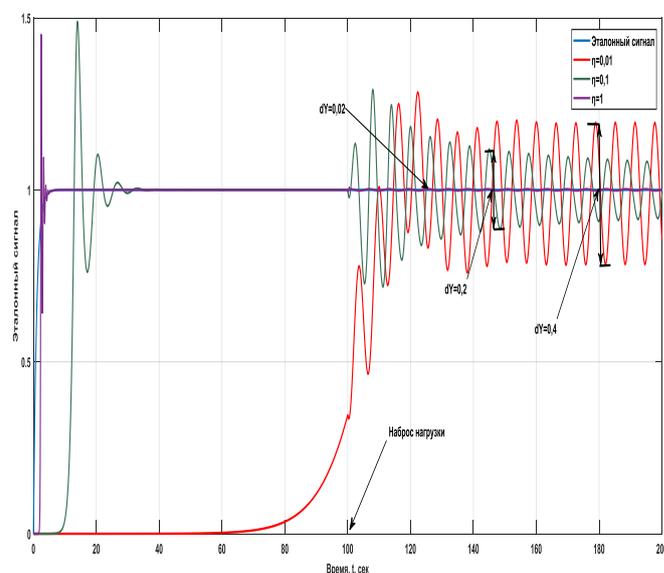


Рис. 10. Подавление возмущений с помощью НС

Анализ литературы [32-33] показал, что существующие варианты работы нейросетевых регуляторов в составе систем подчинённого регулирования можно обобщить в виде трёх вариантов:

1. Создание нейронной сети, имитирующей некий линейный регулятор;
2. Синтез оптимального нелинейного нейросетевого регулятора;
3. Создание нелинейного нейросетевого регулятора, обучающегося и работающего в режиме реального времени в соответствии с заданной динамикой.

Необходимо отметить, что при создании систем управления процессами прокатки в реальном времени скорость, в отличие от других металлургических процессов, несомненно, является важнейшим фактором, так как в этом случае необходимо отлеживать и управлять быстрыми процессами [34].

Фирма SIEMENS в течение нескольких лет использует различные методы ИИ в системах автоматизации прокатных станов [35]. Примером применения нейронной сети является работа над повышением точности прогнозирования усилия прокатки на широкополосных станах горячей прокатки с помощью ИНС. Чем точнее прогнозируема величина усилия прокатки, тем точнее можно выполнить предварительные уставки прокатного стана и тем меньше отклонения по толщине в начале процесса. При этом нейронные сети, фактически, заменяют имеющуюся модель усилия прокатки, вначале функционирования просто дополняя её и корректируя остаточную ошибку, а по окончании обучения полностью заменяющую её. В частности, они учитывают влияние химического состава стали на её твердость. По сравнению с обычными методами точность прогнозирования усилия прокатки повысилась в среднем на 20%. В отличие от обычной техники регулирования и управления, они могут самосовершенствоваться в процессе работы и приспосабливаться к изменившимся условиям. Другие примеры применения можно посмотреть в [35].

Имеющийся опыт использования нейронных сетей в системах автоматизации прокатного производства является положительным, а связанные с их внедрением расходы оправданы. В будущем тенденция использования искусственного интеллекта в системах автоматизации будет развиваться.

ВЫВОДЫ

1. Описано назначение намоточно-размоточных механизмов.
2. В результате анализа работы существующего электроприводного комплекса САРН стана были выяснено, что существующая система является работоспособной, однако не создаёт качественных переходных процессов с удовлетворяющими современные требования показателями качества.
3. Широко используемый регулируемый высоковольтный синхронный электропривод моталок оказывает неблагоприятное воздействие на динамические свойства главных приводных линий. Следует разрабатывать законы и принципы работы САРН двигателей, снижающие влияние данных факторов на качество регулировки натяжения.

4. В результате литературного обзора, а также рассмотрения некоторых структурных схем систем регулирования натяжения, выяснено, что практически все современные системы базируются на прямом измерении натяжения стальной полосы, что подразумевает модернизацию без глубокой реконструкции моталок, поскольку всё необходимое оборудование, в т.ч. и ролики прямого регулирования натяжения, уже установлены. Поэтому усовершенствование САРН стана является работой по повышению эффективности регулирования натяжения прямого типа.

5. Стремительное развитие силовой электроники и повышение вычислительных мощностей микропроцессорных устройств в совокупности с развитием методов искусственного интеллекта позволяет в настоящее время рассматривать варианты синтеза нейросетевых САУ для модернизации существующих САР синхронных электроприводов и внедрения их на уровне автоматических регуляторов на стане холодной прокатки для регулирования натяжения с целью повышения качества регулирования, улучшения энергетических показателей электропривода и осуществления различных режимов регулировки натяжения при прокатке металла.

6. При проведении простейшего эксперимента управления инерционным объектом показана работоспособность нейросетевого регулятора в процессе адаптации и подавления возмущений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев В.Д. Автоматизированный электропривод в прокатном производстве: учеб. пособие для вузов по спец. "Автоматизация металлург. производства и обработка металлов давлением". – М.: Металлургия, 1977. – 280 с.
2. Бычков В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1977. – 391 с.
3. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов" направления подготовки дипломированных специалистов "Электротехника, электромеханика и электротехнологии". – 3-е изд., испр / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М.: Академия, 2007. – 574 с.
4. Филатов. А.С. Электропривод и автоматизация реверсивных станов холодной прокатки. – М.: Металлургия, 1973. – 376 с.
5. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Т.3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката: учебник для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. / А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребеник и др. – М.: Металлургия, 1988. – 680 с.
6. Шохин В.В. Автоматизированный электропривод механизмов металлургического производства: учебное пособие. / В.В. Шохин, А.С. Сарваров. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2013. – 187 с.
7. Радионов А.А. Автоматизированный электропривод намоточно-размоточных устройств агрегатов прокатного

производства. / А.А. Радионов, А.С. Карандаев. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. – 131 с.

8. Лимонов Л.Г. Автоматизированный электропривод промышленных механизмов. – Харьков: ФОРТ, 2009. – 272 с.

9. Мещеряков В.Н. Применение современных тиристорных преобразователей для модернизации электропривода намоточных механизмов в прокатных производствах / В.Н. Мещеряков, С.В. Усов // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2009. – №4. – С. 26-30.

10. Модернизация электропривода намоточного механизма с применением тиристорного преобразователя / Е.Э. Бодров, А.Р. Мубарашкин, Д.А. Ахметдинов и др. // Энергетические и электротехнические системы: сб. науч. тр. – 2015. – С. 304-312.

11. ЧАО "Тяжпромавтоматика": Труды сотрудников отдела ОП-5 по результатам разработок автоматизированных электроприводов и систем управления. – 8 изд. – 2001-2013.

12. Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Проблемы автоматизированного электропривода. / Под ред. В.Б. Клепикова и др. – Харьков: НТУ ХПИ, 2010. – №28. – 700 с.

13. Шиялев П.В. Основные направления модернизации электроприводов технологических агрегатов в ходе реконструкции ОАО "ММК" / П.В. Шиялев, В.В. Головин, А.В. Косенков // Вестник МГТУ им. Носова. – 2006. – №2. – С. 22-26.

14. Структуры систем прямого регулирования натяжения намоточно-размоточных механизмов / К.Я. Гаврилюк Н.А. Черногоуб Н.М. Баран, Л.Г. Лимонов // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ". Проблемы автоматизированного электропривода: сб. науч. тр. – 2013. – №36(1009). – С. 282-283.

15. Edwin Kiel. Drive Solutions. Mechatronics for Production and Logistics. – Berlin, 2008. – 546 p.

16. Синицкий О.В. Элементы современных технологических систем для обеспечения геометрии и формы листового проката / О.В. Синицкий, П.П. Полецков // Калибровочное бюро. – 2015. – №6. – С. 72-99.

17. Браун А.Е. Модернизация АСУ ТП реверсивного стана 1200 ПТС / А.Е. Браун, С.М. Вахрушев // Автоматизация в промышленности. – №8. – 2009. – С. 57-60.

18. Гасияров В.Р. Мехатронный технологический комплекс толстолистого стана 5000 горячей прокатки / В.Р. Гасияров, А.А. Радионов // Электротехнические системы и комплексы. – 2013. – № 21. – С. 13-20.

19. He F. Fuzzy Control with Adjustable Factors in Tension Control System / F. He, J. Han, Q. Wang // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 902. – P. 201-206.

20. Yan J. Research on Tension Control System of Filament Winding Machine / J. Yan, Qiu Ju Zhu // Advanced Materials Research. – 2012. – Vols. 383-390. – P. 7631-7636.

21. Li J. Research on Unwinding Tension System Control Based on Inverse System Theory / J. Li, X. Mei, S. Liu // Applied Mechanics and Materials. – 2011. – Vols. 44-47. – P. 2822-2826.

22. Du Y.H. Speed Control System Design of Winding Mechanism for Composite Films // Key Engineering Materials. – 2010. – Vols. 426-427. – P. 417-421.

23. Gassmann V. H. unwinding web tension control of a strip processing plant using a pendulum dancer / V. Gassmann, D. Knittel, R. Prabhakar // American Control Conference Hyatt Regency Riverfront (St. Louis, June 10-12 2009). – St. Louis, MO, USA, 2009.

24. Wang Y. Research on Tension Control Model for Traction and Take-up System of Loom / Y. Wang, J. Huang, H. Chen // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 627. – P. 444-448.

25. Li Z. Tension Control System Design Of A Filament Winding Structure Based On Fuzzy Neural Network // Engineering Review. – 2015. – Vol. 35, Is. 1. – P. 9-17.

26. Application of Genetic Algorithms to the Online Tuning of Electric Drive Speed Controllers / G. Wander, S. Acarnley, P. Paul, J.W. Finch // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2000. – vol. 47, no.1.

27. Чернодуб А.Н. Обзор Методов Нейроуправления / А.Н. Чернодуб, Д.А. Дзюба // Проблемы программирования. – 2011. – №2. – С. 79-94.

28. Сигеру Омату. Нейроуправление и его приложения. Книга 2 / Сигеру Омату, Рубия Юсоф, Мазуки Халид. Пер. с англ. Н.В. Батина. Под ред. А.И. Галушкина, В.А. Птичкина. – М.: Радиотехника, 2000. – 272 с.

29. Хайкин Саймон. Нейронные сети: полный курс. – 2-е издание: пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1104 с.

30. Филимонова Е.М. Разработка методов расчёта и оптимизации систем энергосберегающего управления электромеханическими системами технологического оборудования: автореф. дис. канд. техн. наук. – Москва, 2014. – 16 с.

31. Елисеев В.Л. Разработка и исследование нейросетевых алгоритмов управления стационарными и нестационарными объектами: автореф. дис. канд. техн. наук. – Москва, 2012. – 20 с.

32. Терехов В.А. Нейросетевые системы управления: учеб. пособие для вузов. / В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю. Тюкин. – М.: Высшая школа, 2002. – 183 с.

33. Буянкин В.М. Нейроуправление электродвигателями и электроприводами. Переход от классических регуляторов к нейрорегуляторам. – Москва, 2015. – 156 с.

34. Труды первого конгресса прокатчиков. – М.: Черметинформация, 1996. – 240 с.

35. Чертов А.Д. Применение систем искусственного интеллекта в металлургической промышленности (обзор) // Металлург. – 2003. – №7. – С. 32-37.

On the Use of Artificial Neural Networks in Control Systems of Electric Drives of Alternating Current Winding-Anwinding Mechanisms of Cold Rolling Mills

Sologubov A.Yu.

South Ural State University (National Research University)
Chelyabinsk, Russian Federation
andrey.1993@rambler.ru

Faryma V.N.

Magnitogorsk Iron & Steel Works
Magnitogorsk, Russian Federation
faryma@mail.ru

Abstract. The winding-unwinding mechanisms of rolling mills are predominantly non-stationary objects. Non-stationarity is expressed in changes in the parameters of the mechanical system during winding. These parameters are the radius of the roll, the mass, the moment of inertia, the speed of rotation of the motor shaft, etc. In the conditions of close interrelation of the parameters of the electric and mechanical parts of the coiler, the change in the regime parameters leads to the appearance of dynamic errors of the system and to the need for adjusting the parameters of the control system to reduce Data errors. From the point of view of the tendency to increase the productivity of aggregates of metallurgical production, it is required to improve the accuracy of control of electromechanical systems, often in conditions of increasing disturbances, both from the side of power mechanisms and from the side of the power supply network. In this connection, it is necessary to modernize the tension control system from the standpoint of promising methods for constructing automatic control systems, where the development of a system for the formation, transport and winding of a metal strip should be preceded by an overview of the current state in the field of coil management systems, analysis of tension control systems for AC drives, As well as an example of applications of one of the most promising methods for nonstationary objects - neural networks. The article deals with the control systems of AC electric drives of coilers of cold rolling mills. Introduction introduces a review of the literature on this topic and shows the importance of modernizing control systems in the rapidly developing semiconductor power electronics and increasing the computing power of microprocessor-based devices. The importance of modernizing automatic control systems with the use of intelligent control methods is shown. The main part gives general information on the technology of winding metal strips in cold rolling mills, describes the importance of quality regulation of tension and the relationship of tension with the thickness of the strip. After a brief description of the systems of indirect and direct tension control, a structural diagram of the control system of the T400 process module and the Siemens Symadin D controller for the cold rolling mill of OJSC MMK 2000 is presented as a modernized tension control system and its operation is described. The relevance of the use of intellectual methods and technologies for the study of complex electromechanical systems is noted.

Keywords: winding-unwinding mechanisms, coiler, AC electric drive, control system, tension control, neural networks

REFERENCES

1. Afanasyev V.D. *Avtomatizirovannyy elektroprivod v prokatnom proizvodstve: ucheb. posobie dlya vuzov po spets. - Avtomatizatsiya metallurg. proizvodstva i obrab. metallov*

davleniem [Automated electric drive in rolling production: study guide], Moscow, Metallurgy, 1977, 280 p. (In Russ.)

2. Bychkov V.P. *Elektroprivod i avtomatizatsiya metallurgicheskogo proizvodstva: ucheb. posobie dlya vuzov. – 2-e izd., pererab. i dop.* [Electric drive and automation of metallurgical production: study guide], Moscow, High school, 1977, 391 p. (In Russ.)

3. Belov M.P., Novikov V.A., Rassudov L.N. *Avtomatizirovannyy elektroprivod tipovykh proizvodstvennykh mekhanizmov i tekhnologicheskikh kompleksov: uchebnik dlya studentov vysshikh uchebnykh za-vedeniy, obuchayushchikhsya po spetsial'nosti "Elektroprivod i avtomatika promyshlennykh ustanovok i tekhnologicheskikh kompleksov" napravleniya podgotovki diplomirovannykh spetsialistov "Elektrotehnika, elektromekhanika i elektrotekhnologii". – 3-e izd., ispr.* [Automated electric drive of standard production mechanisms and technological complexes: a textbook for students of higher educational], Moscow, Academy, 2007, 574 p. (In Russ.)

4. Filatov. A.S. *Elektroprivod i avtomatizatsiya reversivnykh stanov kholodnoy prokatki* [Electric drive and automation of re-version cold-rolling mills], Moscow: Metallurgy, 1973, 376 p. (In Russ.)

5. Tselikov A.I., Polukhin P.I., Grebenik V.M. et al. *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov. V 3-kh tomakh. T.3. Mashin i agregaty dlya proizvodstva i otdelki prokata: uchebnik dlya vuzov. – 2-e izd. pererab. i dop.* [Machines and units of metallurgical plants. In 3 volumes. T.3. Machines and units for the production and finishing of rolled products: a textbook for universities], Moscow: Metallurgy, 1988, 680 p. (In Russ.)

6. Shokhin V.V., Sarvarov A.S. *Avtomatizirovannyy elektroprivod mekhanizmov metallurgicheskogo proizvodstva: uchebnoe posobie* [Automated electric drive mechanisms of metallurgical production: study guide], Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosova Publ., 2013, 187 p. (In Russ.)

7. Radionov A.A., Karandaev A.S. *Avtomatizirovannyy elektroprivod namotochno-razmotochnykh ustroystv agregatov prokatnogo proizvodstva* [Automated electric drive of winding-unwinding devices of rolling mill units], Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosova Publ., 1999, 131 p. (In Russ.)

8. Limonov L.G. *Avtomatizirovannyi elektroprivod promyshlennykh mekhanizmov* [Automated electric drive of industrial mechanisms], Kharkov, FORT Publ., 2009, 272 p.
9. Meshcheryakov V.N., Usov S.V. Application of modern thyristor converters for modernization of the electric drive of winding mechanisms in rolling manufactures [Primenenie sovremennykh tiristornykh preobrazovateley dlya modernizatsii elektroprivoda namotochnykh mekhanizmov v prokatnykh proizvodstvakh], *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya* [Electrotechnical complexes and control systems], 2009, no.4, pp. 26-30. (In Russ.)
10. Bodrov E.E., Mubarashkin A.R., Akhmetdinov D.A., Moiseev V.S., Prokhorov I.B. Modernization of electric winding mechanism using the thyristor converter [Modernizatsiya elektroprivoda namotochnogo mekhanizma s primeneniem tiristornogo preobrazovatelya], *Energeticheskie i elektrotekhnicheskie sistemy: sbornik nauchnykh trudov* [Energy and electrical systems: Sat. Sci. Tr.], 2015, pp. 314-320. (In Russ.)
11. ChAO "Tyazhpromavtomatika": *Trudy sotrudnikov otdela OP-5 po rezul'tatam razrabotok avtomatizirovannykh elektroprivodov i sistem upravleniya. – 8 izd.* [PJSC "Tyazhpromavtomatika": Works of the employees of the department OP-5 on the results of the development of automated electric drives and control systems. - 8 ed.], 2001-2013. (In Russ.)
12. Klepikova V.B. et al. (Eds.). *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta "Khar'kovskiy politekhnicheskii institut". Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda* [Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Problems of automated electric drive], Kharkov, Kharkov Polytechnic Institute Publ., 2010, no.28, 700 p.
13. Shilyaev P.V., Golovin V.V., A.V. Kosenkov. The main directions of modernization of electric drives of technological units during the reconstruction of OJSC "MMK" [Osnovnye napravleniya modernizatsii elektroprivodov tekhnologicheskikh agregatov v khode rekonstruktsii OAO "MMK"], *Vestnik MGTU im. Nosova. [Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosova]*, 2006, №2, pp. 22-26. (In Russ.)
14. Gavrilyuk K.Ya. Chernogub N.A. Baran N.M. Limonov L.G. Structures of direct tension control systems for winding-unwinding mechanisms [Struktury sistem pryamogo regulirovaniya natyazheniya namotochno-razmotochnykh mekhanizmov], *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universitetata "Khar'kovskiy Politekhnicheskii institut". Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda: sb. nauch. tr.* [Bulletin of the National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute". The problems of automated electric drive: Sat. Sci. Tr], Kharkov, Kharkov Polytechnic Institute Publ., 2013, no.36 (1009), pp. 282-283.
15. Edwin Kiel. *Drive Solutions. Mechatronics for Production and Logistics*, Berlin, 2008, 546 p.
16. Sinitskiy O.V., Poletskov P.P. Elements of modern technological systems for providing geometry and shape of sheet metal [Elementy sovremennykh tekhnologicheskikh sistem dlya obespecheniya geometrii i formy listovogo prokata], *Kalibrovochnoe byuro* [Calibration Bureau], 2015, no.6, pp. 72-99. (In Russ.)
17. Braun A.E., Vakhrushev S.M. Modernization of the automated process control system of the reversing mill 1200 PTS [Modernizatsiya ASU TP reversivnogo stana 1200 PTS], *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in the industry], 2009, no.8, pp.57-60. (In Russ.)
18. Gasiyarov V.R., Radionov A.A. mechatronical technological complex of hot plate mill 5000 [Mekhatronnyy tekhnologicheskii kompleks tolstolistovogo stana 5000 goryachey prokatki], *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [The journal Electrical systems and complexes], 2013, no.21, 13-20. (In Russ.)
19. Fang He, Jia Han, Qiang Wang. Fuzzy Control with Adjustable Factors in Tension Control System, *Advanced Materials Research*, 2014, Vol. 902, pp. 201-206.
20. Yan J., Qiu Ju Zhu. Research on Tension Control System of Filament Winding Machine, *Advanced Materials Research*, 2012, Vols. 383-390, pp. 7631-7636.
21. Li J., Mei X., Liu S. Research on Unwinding Tension System Control Based on Inverse System Theory, *Applied Mechanics and Materials*, 2011, Vols. 44-47, pp. 2822-2826.
22. Du Y.H. Speed Control System Design of Winding Mechanism for Composite Films, *Key Engineering Materials*, 2010, Vols. 426-427. pp. 417-421.
23. Gassmann V. Knittel D., Prabhakar R. ∞ unwinding web tension control of a strip processing plant using a pendulum dancer, *American Control Conference Hyatt Regency Riverfront (St. Louis, June 10-12 2009)*, St. Louis, Missouri, 2009.
24. Wang Y. Huang J., Chen H. Research on Tension Control Model for Traction and Take-up System of Loom, *Advanced Materials Research*, 2013, Vol. 627, pp. 444-448.
25. Li Z. Tension Control System Design Of A Filament Winding Structure Based On Fuzzy Neural Network, *Engineering Review*, 2015, Vol. 35, Is. 1. pp. 9-17.
26. Wander G. Paul P. Acarnley S. Finch J.W. Application of Genetic Algorithms to the Online Tuning of Electric Drive Speed Controllers, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2000, vol. 47, no.1.
27. Chernodub A.N., Dzyuba D.A. Review of Methods of Neuropravity [Obzor Metodov Neyroupravleniya], *Problemy programirovaniya* [Problems of programming], 2011, No2, pp. 79-94. (In Russ.)
28. Sigeru Omatu, Rubiya Yusof, Mazuki Khalid. *Neyroupravlenie i ego prilozheniya. Kn.2.* [Neuropravlennie and its applications. Book 2], Per. s angl. N.V. Batina. Pod red. A.I. Galushkina, V.A.Ptchikina, Moscow, Radio engineering Publ., 2000, 272 p. (In Russ.)
29. Khaykin Saymon. *Neyronnye seti: polnyy kurs. 2-e izdanie: Per. s angl.* [Neural networks: a full course], Moscow, Williams Publ., 2006, 1104 p.
30. Filimonova E.M. *Razrabotka metodov rascheta i optimizatsii sistem energosberegayushchego upravleniya elektromekhanicheskimi sistemami tekhnologicheskogo oborudovaniya. avtoref. dis. kand. tekhn.* [Development of methods for calculating and optimizing systems for energy-saving control of electromechanical systems of process equipment: the author's abstract. PhD dissertation], Moscow, 2014, 16 p. (In Russ.)
31. Eliseev V.L. *Razrabotka i issledovanie neyrosetevykh algoritmov upravleniya statsionarnymi i nestatsionarnymi ob'ektami. avtoref. dis. kand. tekhn. (ili polit. ili dr.) nauk. – Moskva*, 2012. – 20 p.

32. Terekhov V.A. Efimov D.V., Tyukin I.Yu. *Neyrosetevyye sistemy upravleniya: ucheb. posobie dlya vuzov* [Neural network management systems: study guide], Moscow, High school, 2002, 183 p. (In Russ.)

33. Buyankin V.M. *Neyroupravlenie elektrodvigatelyami i elektroprivodami. Perekhod ot klassicheskikh regulyatorov k neyroregulyatoram* [Electric control of electric motors and electric drives. The transition from classical regulators to neuroregulators], Moscow, 2015, 156 p. (In Russ.)

Библиографическое описание статьи

Сологубов А.Ю. К вопросу использования искусственных нейронных сетей в системах управления электроприводами переменного тока намоточно-размоточных механизмов станов холодной прокатки / А.Ю. Сологубов, В.Н. Фарыма // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2017. – Т.4, №1. – С. 24-37.

34. *Trudy pervogo kongressa prokatchikov* [Proceedings of the first congress of distributors], Moscow, Chermetinformat, 1996, 240 p. (In Russ.)

35. Chertov A.D. Application of artificial intelligence systems in the metallurgical industry (review) [Primenenie sistem iskusstvennogo intellekta v metallurgicheskoy promyshlennosti (obzor)], *Metallurg*, 2003, no.7, pp. 32-37. (In Russ.)

Reference to article

Sologubov A.Yu., Faryma V.N. On the use of artificial neural networks in control systems of electric drives of alternating current winding-unwinding mechanisms of cold rolling mills, *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2017, vol.4, no.1, pp. 24-37.