

УДК 621.771.01, 62-83-52, 669:658.011.56

Кожевников А. В.

## КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ГЛАВНЫХ ПРИВодОВ ЛИСТОВЫХ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Проблемам повышения стабильности и снижения различных динамических эффектов в листопрокатном производстве последние 15–20 лет посвящено немало исследований в России и за рубежом [1–4]. Данная проблема выражена в колебаниях основных технологических и энергосиловых параметров в процессе прокатки, уровень и частота которых в определенные моменты приводит к возникновению вибраций, негативно влияющих на оборудование, качество прокатываемой полосы и может привести к возникновению аварийных ситуаций. Данные вибрации носят так называемый стохастический характер, который сложно, а зачастую невозможно отрегулировать существующими алгоритмами автоматизированных систем управления.

Причины существующих нестабильностей различны. К основным из них можно отнести разнотолщинность прокатываемых полос, влияющую на колебания момента прокатки, наличие зазоров в механической части линии привода рабочих клеток прокатных станов, некорректную работу систем автоматизированного управления, возникновение автоколебаний и резонансных вибраций (в англоязычной литературе описывается как явление «chatter»), инерционностью многомассовых систем [1, 2].

Повышение технологической стабильности процесса производства листов и полос стало особенно актуально в задачах повышения энергоэффективности процесса прокатки. Колебания момента прокатки, линии привода, высокий уровень динамических моментов, различные управляющие воздействия в сложных приводных системах приводят к возникновению вынужденных колебаний тока якоря двигателей главных приводов прокатных станов, что приводит к возникновению существенных потерь электроэнергии и снижению полезной мощности двигателей главных приводов рабочих клеток [4]. Пример таких колебаний представлен на рис. 1.

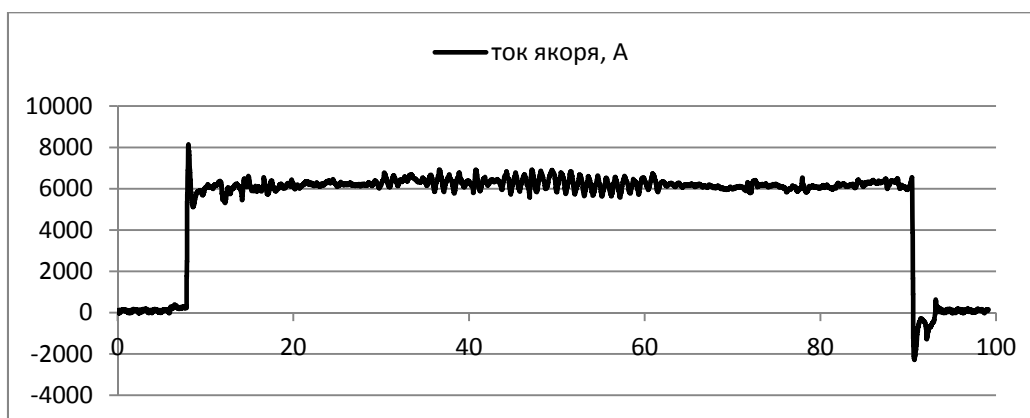


Рис. 1. Колебания тока якоря главного привода шестой клетки стана «2000» ЧерМК ОАО «Северсталь»

Существующие отечественные и зарубежные исследования по моделированию и разработке технических решений в рамках обеспечения стабильности технологического процесса листовой прокатки и снижения уровня негативных динамических эффектов не предлагают вариантов снижения уровня негативных колебаний, повышения энергоэффективности процесса прокатки без конструктивных изменений существующего прокатного оборудования и систем управления.

В этом случае в рамках развития и повышения эффективности исследований в данной области следует особое внимание уделить автоматизированным электроприводам рабочих клеток прокатных станов, а именно, применяющимся в настоящее время алгоритмам и способам управления двигателями главных приводов прокатных станов.

Целью работы является разработка на основании анализа технологических режимов работы листовых станов горячей и холодной прокатки, а также их автоматизированных систем эффективных методов и алгоритмов контроля и управления автоматизированными приводами листовых прокатных станов и оптимальных режимов их работы.

Представленные ниже исследования являются результатами научной работы кафедры Электроэнергетики и электротехники Череповецкого государственного университета, выполненными в период 2012–2013 г. г.

Разработка нового метода диагностики электропривода [5].

В металлургической промышленности автоматизированный электрический привод применяется в подавляющем большинстве установок и технологических комплексов. До 60 % потребляемой металлургическими предприятиями электроэнергии приходится на электроприводную технику.

Особые требования в металлургии предъявляются к автоматизированным электроприводам листовых непрерывных прокатных станов. Там традиционно применяются электроприводы постоянного тока с независимым возбуждением, имеющие хорошие эксплуатационные показатели в условиях динамических нагрузок и способные обеспечить плавное регулирование скоростей в широких диапазонах.

Существующие системы автоматического управления электроприводами непрерывных листовых прокатных станов способны оперативно обнаруживать и локализовать возникновение аварийных ситуаций. К таким ситуациям можно отнести неполадки в преобразовательной технике, электродвигателях или механической части. Однако обнаружение неисправности системой автоматики часто происходит на той стадии, когда разрушения значительны и требуют существенных ремонтов.

Такие предвестники неполадок, как: колебательный характер скорости, ухудшение качества переходных процессов, старение подшипниковых узлов или механических передач не фиксируются датчиками в начальной стадии. Обнаружить их в настоящее время могут только квалифицированные специалисты, используя соответствующие приборы и аналитические экспертные методы. Они анализируют совокупность признаков в работе оборудования по данным с различных приборов и способны оценить всю динамику процессов.

Другое решение состоит в модернизации оборудования, приобретении оборудования, способного к интеллектуальной обработке информации. Но подобное оборудование имеет высокую стоимость и переход всего парка электроприводов на подобные системы невозможен.

В вышеприведенной ситуации целесообразным выглядит разработка относительно недорогих и универсальных технических решений, способных производить диагностику состояния электропривода прокатных станов, в постоянном режиме оценивая динамику работы клеток.

Задачей проведенных исследований на кафедре Электроэнергетики и электротехники Череповецкого государственного университета являлось создание более эффективного и универсального метода диагностики электроприводов, позволяющего производить оценку технического состояния электропривода в работе на ранней стадии развития дефектов, предупреждая внезапные остановки и снижая затраты на ремонт.

Технический результат состоит в повышении точности и надежности диагностирования с уменьшением вычислительных затрат на оценку состояния электропривода за счет применения рекуррентной нейронной сети в качестве основного инструмента анализа состояния электропривода.

Указанный результат достигается тем, что перед эксплуатацией конкретного электропривода, предварительно производится построение его динамической нейросетевой модели, использование которой в дальнейшем позволяет произвести анализ состояния электропривода в работе и удаленно.

Сущность метода заключается в том, что с определенным интервалом времени производится замер тока, напряжения, скорости и управляющего задания электропривода, преобразование параметров в цифровую форму и передача в персональный компьютер для обработки. Программно реализованная и обученная на конкретном электроприводе перед его эксплуатацией рекуррентная нейронная сеть воспроизводит динамику параметров электропривода, после чего производится сравнение результата динамики нейросетевой модели с реальной динамикой электропривода. В неисправном электроприводе возникает отклонение динамики  $El(t)$  его параметров от модели  $M(t)$  и рассчитывается функция рассогласования динамики во времени  $Err(t)$ .

$$Err(t) = M(t) - El(t). \quad (1)$$

Разработанный метод диагностики не требует существенных капитальных затрат и высокой квалификации обслуживающего персонала для внедрения и эксплуатации. При этом он может быть реализован как в виде дополнительного блока, работающего в фоновом режиме, так и в виде дополнительного кода в программном обеспечении имеющихся контроллеров. Применение нового метода диагностики может быть расширено и применено к различным типам электроприводов металлургического производства.

Теоретические исследования особенностей скоростных режимов в прокатном производстве [6].

В реальных производственных условиях, зная заданную скорость прокатки, режимы обжатий в клетях и диаметры валков, требуется с учетом коэффициента опережения определить скорости вращения рабочих валков стана. Неправильный выбор скоростного режима может привести к обрывам стальных полос или к возникновению нестационарных режимов прокатки (и при стационарных, и при переходных режимах работы электромеханических систем стана могут возникнуть стохастические колебания основных технологических параметров – скоростей, натяжений, моментов, токов двигателей). Указанные колебания не только влияют на качество проката и надежность оборудования, но и существенно (до 20–25 %) увеличивают потери электрической энергии, снижая энергоэффективность процесса прокатки.

Для практических расчетов важно не только знать опережение  $S$  в каждой из прокатных клетей, но и возможную погрешность этой величины. Ввиду неизбежных отклонений всех расчетных параметров от их номинальных величин, величины опережений также могут изменяться в определенном диапазоне, и это необходимо учитывать при расчете режимов прокатки в непрерывных станах.

В результате теоретических исследований, проведенных на кафедре Электроэнергетики и электротехники, приведены и изложены в работе [6] формулы для расчета опережений и диапазонов их возможных колебаний при горячей и холодной прокатке.

Причинами колебаний величин опережения могут быть, главным образом, изменения коэффициента трения и большие натяжения между клетями. Для обеспечения стабильности процесса прокатки, особенно при малых углах захвата, необходимо стабилизировать условия смазки и повышать точность контроля натяжений.

Повышение энергоэффективности работы автоматизированных приводов прокатных станов [7, 8].

Любой технологический процесс нестабилен и выражен в колебаниях основных технологических параметров, в работе автоматизированных электроприводов технических систем – это токи якоря, скорости вращения, моменты и т. д.

В процессе работы электроприводы сложных технических систем подвергаются нагрузкам различного характера. Наличие колебательного характера технологического процесса и различный характер (систематический, случайный и т. д.) нагрузок приводит к различного рода техническим проблемам, выражающимся, как правило, в повышенных колебаниях параметров технологического процесса и, соответственно, росту потерь электроэнергии.

Данный факт существенно влияет на энергоэффективность технологии, надежность и коэффициент полезного действия электротехнического оборудования, качество и себестоимость выпускаемой продукции.

Например, колебания тока якоря в установившемся режиме работы привода 5-клетового непрерывного стана холодной прокатки «1700» ЧерМК ОАО «Северсталь» могут достигать до 200 А.

При работе станов горячей прокатки, где нагрузки на приводы еще больше, эти колебания достигают в установившемся процессе 400–600 А, а в переходных процессах разгона и торможения могут достигать 1000–1500 А. Все это приводит к возникновению существенных потерь электроэнергии и снижению эффективности работы оборудования.

На основании результатов адекватного моделирования и лабораторного исследования различных методов управления в среде MATLAB Simulink [4] сделаны следующие выводы:

1. Нестационарность технологических параметров является не только результатом работы системы АСУ ТП, а зависит от упругих колебаний механической части главной линии стана.

2. Колебания технологических параметров являются результатом нерационального алгоритма управления системы управления электропривода двигателей главной линии стана.

Для того, чтобы выяснить и устранить причины (снизить их влияние) возникновения нежелательных колебаний токов нагрузки двигателей электроприводов постоянного тока, обеспечив тем самым снижение потерь электроэнергии, производственных издержек и повышение энергоэффективности работы указанных приводов, необходимо также исследовать существующие способы и методы управления объектами регулирования, и на их основе разработать усовершенствованные инновационные системы управления автоматизированными электрическими приводами.

Например, использование регуляторов нечеткой логики (FUZZY-регуляторов) приводит к снижению потерь электроэнергии от 13 до 28 раз (рис. 2).

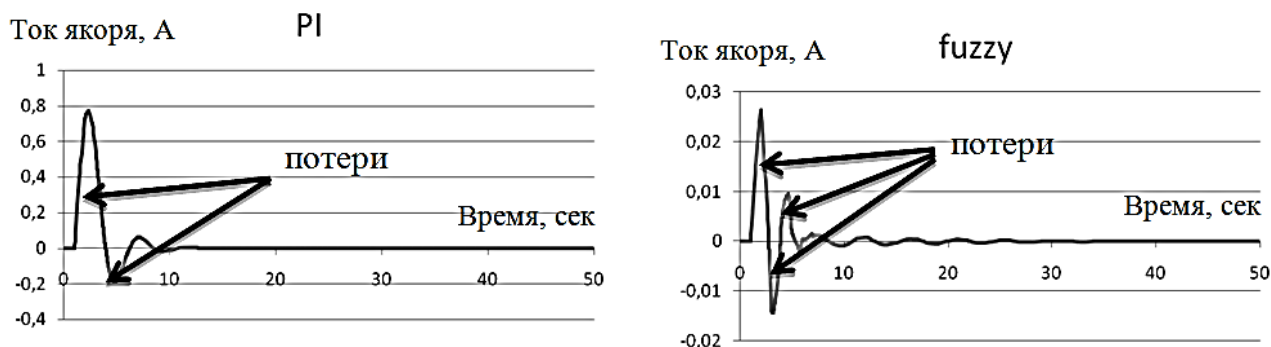


Рис. 2. Сравнение потерь электроэнергии при работе двигателя постоянного тока при *PI*- и *FUZZY*-регулировании

Другим методом, повышающим энергоэффективность работы систем управления автоматизированных приводов прокатных станов, является модальное управление [7]. Сравнение модального регулирования (МР) с классической системой подчиненного регулирования (СПР) представлено в табл. 1.

Таблица 1

Основные показатели качества переходных процессов

Параметр	Система	при управлении				при возмущении			
		$t_{nn}$ , с	$\sigma$ , %	$\varepsilon$ , %	$M$	$t_{nn}$ , с	$\sigma$ , %	$\varepsilon$ , %	$M$
Ток якоря	САУ с МР	0,7	45	0	1,5	0,8	25	0	1,5
	САУ с СПР	1,8	35	0	9	6,0	35	0	12
Скорость двигателя	САУ с МР	0,7	0	0	0,5	0,8	5	5	1,5
	САУ с СПР	1,8	5	-5	9	6,0	15	10	12

В приведенной таблице  $t_{nn}$  – время переходного процесса,  $\sigma$  – перерегулирование,  $\varepsilon$  – статическая ошибка  $M$  – показатель колебательности.

Перерегулирование  $\sigma$  характеризует динамическую ошибку начала переходного процесса, а показатель колебательности  $M$  – количество полных колебаний до достижения установившегося режима.

Сравнение параметров показывает, что система автоматизированного управления электропривода с модальным управлением по всем показателям существенно превосходит классическую систему подчиненного регулирования: по эффективности сглаживания колебаний и, особенно, по быстродействию: время переходных процессов  $t_{mn}$  в контуре тока и скорости уменьшается от 1,8 с до 0,7 с, т. е. в 2,5 раза при реакции на управление и от 6,0 с до 0,8 с, т. е. в 7,5 раза при реакции на возмущение; показатель колебательности  $M$  уменьшается от 9,0 до 1,5, т. е. в 6 раз при реакции на управление и от 12 до 1,5 с, т. е. в 8 раз при реакции на возмущение. Модальная система управления превосходит также систему с подчиненным регулированием по перерегулированию  $\sigma$  (снижается от 5 % до нуля) и допустимой статической ошибке  $\varepsilon$  (снижается от 10 % до нуля).

Несмотря на эффективность и широкую распространенность ПИД-регуляторы имеют ряд недостатков. Контур ПИД-регулирования трудно настраивать, их поведение не всегда предсказуемо, не всегда удается достичь требуемого быстродействия, затруднен поиск неисправностей.

ПИД-регуляторы описываются выражением:

$$U(t) = Ke(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{d_e(t)}{dt}, \quad (2)$$

где  $u$  – выходная величина регулятора;  $e$  – сигнал рассогласования;  $t$  – время;  $K$  – пропорциональный коэффициент (безразмерный);  $T_i$  – постоянная интегрирования (размерность времени);  $T_d$  – постоянная дифференцирования (размерность времени).

На практике постоянная дифференцирования чаще всего равна нулю, то есть используются только пропорциональная и интегральная составляющие регулятора в связи с тем, что дифференциатор усиливает высокочастотные помехи, короткие выбросы и шум.

Задача, на решение которой направлена разработка эффективных способов управления, заключается в снижении отклонения от заданной скорости вращения двигателя, что позволит повысить точность управления техническими устройствами с электроприводом постоянного тока и уменьшить рассогласования между синхронно работающими приводами.

Решение данной задачи достигается за счет того, что в системе подчиненного электропривода постоянного тока формируется определенный сигнал, зависящий от сигнала задания скорости вращения, усиливается с эмпирическим коэффициентом усиления и подается на вход сумматора контура тока. Таким образом, выражение, описывающее ПИД-регулятор контура скорости, принимает вид:

$$U(t) = Ke(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{dg(t)}{dt}. \quad (3)$$

Техническим результатом внедрения оптимальных способов управления автоматизированными приводами прокатных станов является уменьшение величины рассогласования и снижение времени выхода на заданное значение. Кроме того, влияние внешних шумов минимально.

Указанное техническое решение по усовершенствованию работы автоматизированных приводов постоянного тока стана было программно реализовано специалистами кафедры Электроэнергетики и электротехники Череповецкого государственного университета в приводах фирмы Siemens марки Simoreg и Simatic стана «2000» ЧерМК ОАО «Северсталь» и экспериментально апробировано в реальных производственных условиях. При суммарном расходе электроэнергии на главных приводах 1000000 МВтч экономия составит более 4200 МВтч. Снижение потребления электроэнергии при разгоне клетки составило более 14,5 % [8].

## ВЫВОДЫ

Таким образом, приведенные в статье разработанные методы контроля, диагностики и корректировки существующих алгоритмов работы (управления и регулирования) автоматизированных приводов листовых прокатных станов, их лабораторная и промышленная апробация, позволяют судить об эффективности их применения в рамках снижения потребления электроэнергии, повышения надежности оборудования и стабильности технологического процесса прокатки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hu P. H. *Stability Analysis of Chatter on a Tandem Rolling Mill* / P. H. Hu, K. F. Ehmman // *International Journal of Manufacturing Processes*. – 2000. – № 4. – P. 217–224.
2. Пименов В. А. О классификации моделирования колебаний полосы в межклетевом промежутке многоклетевого стана. Часть 1 / В. А. Пименов, Ю. Г. Лихачева // *Производство проката*. – 2014. – №1. – С. 33–37.
3. Харахнин К. А. Разработка алгоритма идентификации вибраций в рабочих клетях станов холодной прокатки / К. А. Харахнин, А. В. Кожевников, Е. А. Маслов // *Сталь*. – 2010. – № 10. – С. 38–40.
4. Кожевников А. В. Пути снижения потерь электроэнергии при работе автоматизированных приводов прокатных станов / А. В. Кожевников, Г. А. Сорокин // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. – 2012. – №4. – С. 79–85.
5. Кожевников А. В. Диагностирование приводов прокатных станов с помощью нейросетевой оценки / А. В. Кожевников // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2013. – №3. – С. 54–60.
6. Кожевников А. В. Исследование возможных колебаний опережения при листовой прокатке / А. В. Кожевников // *Производство проката*. – 2013. – №5. – С. 2–8.
7. Кочнева Т. Н. Модальное управление электромеханическими системами в металлургии / Т. Н. Кочнева, А. В. Кожевников, Н. В. Кочнев // *Вестник Череповецкого государственного университета. Научный журнал*. – Череповец: ФБГОУ ВПО ЧГУ, 2013. – № 1 (45). Т. 1. – С. 11–16.
8. Кожевников А. В. Опыт внедрения энергоэффективных режимов работы главных приводов широкополосных станов горячей прокатки / А. В. Кожевников, Г. А. Сорокин // *Металлург*. – 2013. – № 12. – С. 61–65.

## REFERENCES

1. Hu P. H. *Stability Analysis of Chatter on a Tandem Rolling Mill* / P. H. Hu, K. F. Ehmman // *International Journal of Manufacturing Processes*. – 2000. – № 4. – P. 217–224.
2. Pimenov V. A. O klassifikatsii modelirovaniya kolebaniy polosy v mezhkletevom proezhnutke mnogokletevogo stana. Chast 1 / V. A. Pimenov, Yu. G. Likhacheva // *Proizvodstvo prokata*. – 2014. – №1. – S. 33–37.
3. Kharakhnin K. A. Razrabotka algoritma identifikatsii vibratsiy v rabochikh kletyakh stanov kholodnoy prokatki / K. A. Kharakhnin, A. V. Kozhevnikov, Ye. A. Maslov // *Stal*. – 2010. – № 10. – S. 38–40.
4. Kozhevnikov A. V. Puti snizheniya poter elektroenergii pri rabote avtomatizirovannykh privodov prokatnykh stanov / A. V. Kozhevnikov, G. A. Sorokin // *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya*. – 2012. – № 4. – S. 79–85.
5. Kozhevnikov A. V. Diagnostirovaniye privodov prokatnykh stanov s pomoshchyu neyrosetevoy otsenki / A. V. Kozhevnikov // *Metallurgicheskiye protsessy i oborudovaniye*. – 2013. – № 3. – S. 54–60.
6. Kozhevnikov A. V. Issledovaniye vozmozhnykh kolebaniy operezheniya pri listovoy prokatke / A. V. Kozhevnikov // *Proizvodstvo prokata*. – 2013. – № 5. – S. 2–8.
7. Kochneva T. N. Modalnoye upravleniye elektromekhanicheskimi sistemami v metallurgii / T. N. Kochneva, A. V. Kozhevnikov, N. V. Kochnev // *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauchnyy zhurnal*. – Cherepovets: FBGOU VPO ChGU, 2013. – № 1 (45). Т. 1. – S. 11–16.
8. Kozhevnikov A. V. Opyt vnedreniya energoeffektivnykh rezhimov raboty glavnykh privodov shirokopolosnykh stanov goryachey prokatki / A. V. Kozhevnikov, G. A. Sorokin // *Metallurg*. – 2013. – № 12. – S. 61–65.

Кожевников А. В. – канд. техн. наук, доц. ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет»

ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет» – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Череповецкий государственный университет», г. Череповец, Россия.

E-mail: [kojevnikovav@chsu.ru](mailto:kojevnikovav@chsu.ru), [avk7777@bk.ru](mailto:avk7777@bk.ru)

Статья поступила в редакцию 21.02.2014 г.