

19. *Stashinov Yu.P.* К вопросу о настройке системы управления электропривода постоянного тока на модульную оптимальность [To the question about the configuration of the control system of DC electric drive on the modular optimum], *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2016, No. 1, pp. 2-7.
20. *Eremenko Yu.I., Glushchenko A.I., Petrov V.A.* Об использовании нейросетевого настройщика для адаптации P-регулятора скорости электропривода прокатной клети [On the use of neural network Adjuster to adapt N-controller speed of the electric drive of rolling mill], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2017, No. 10 (18), pp. 685-692.
21. *Huang G.B., Wang D.H., Lan Y.* Extreme learning machines: a survey, *International Journal of Machine Learning Cybernetics*, 2011, No. 2, pp. 107-122.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор М.Е. Семенов.

Глуценко Антон Игоревич – Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) ФГАОУ ВО НИТУ "МИСиС"; e-mail: strondutt@mail.ru; 309516 Белгородская обл., г. Старый Оскол, м-н Макаренко, 42; тел.: +74725451217; кафедра автоматизированных и информационных систем управления; к.т.н.; доцент

Glushchenko Anton Igorevich – Sary Oskol technological institute n.a. A.A. Ugarov (branch) NUST "MISIS"; e-mail: strondutt@mail.ru; 309516, Belgorod region, Sary Oskol, Makarenko microdistrict, 42; phone: +74725451217; the department of automated and information control system; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 004.89:681.51

DOI 10.23683/2311-3103-2017-9-44-53

Ю.И. Еременко, А.И. Глуценко, В.А. Петров

О РАЗРАБОТКЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО НАСТРОЙЩИКА КОНТУРА СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК*

В статье рассматривается вопрос снижения динамических нагрузок электропривода прокатной клети. Динамические моменты, возникающие в механических передачах электроприводов, приводят к ускоренному старению оборудования, а, иногда, к выходу его из строя. Проведен краткий анализ основных способов решения данной задачи. Для снижения динамических нагрузок средствами системы управления предлагается использование нейросетевого настройщика регулятора контура скорости электропривода прокатной клети. Нейросетевой настройщик состоит из искусственной нейронной сети и базы правил, которая определяет моменты, в которые необходимо производить обучение сети, а также скорости обучения для каждого из нейронов выходного слоя. В статье разработан алгоритм работы базы правил для компенсации возмущающих воздействий, вызванных захватом прокатываемой заготовки, и снижения динамических нагрузок в момент возникновения возмущений. Нейросетевой настройщик, выявив момент начала возмущающего воздействия, изменяет коэффициенты ПИ-регулятора скорости электропривода в соответствии с этим алгоритмом. Основным достоинством предлагаемого метода является отсутствие необходимости построения модели объекта управления. В работе построена математическая модель системы управления главным электроприводом второй клети прокатного стана 350 Оскольского электрометаллургического комбината. Проведено математическое моделирование предлагаемой системы с учетом многомассовой механической части

* Исследование проведено при финансовой поддержке прикладных научных исследований Министерством образования и науки Российской Федерации, договор №14.575.21.0133 (RFMEFI57517X0133).

в программном пакете MATLAB & Simulink и на экспериментальном стенде, оснащенном электроприводом постоянного тока. Результаты экспериментов показывают, что применение нейросетевого настройщика позволяет снизить колебания динамического момента на 18 % относительно системы без настройки, а также повысить энергоэффективность отработки возмущения на 3.8 %.

Динамические нагрузки; прокатная клеть; упругая связь; электропривод; ПИ-регулятор; нейросетевой настройщик.

Yu.I. Eremenko, A.I. Gluschenko, V.A. Petrov

ON DEVELOPMENT OF NEURAL NETWORK TUNER FOR CONTOUR OF VELOCITY IN ROLLING MILL ELECTRIC DRIVE FOR REDUCING DYNAMIC LOADS

A problem of dynamic load reduction influencing a rolling mill is considered. The dynamic load occurring in function-generating mechanisms results in technical equipment excessive wear and even its breakdown. A short analysis of main methods for solving this problem is made. The dynamic load is to be reduced by the means of an automatic control system. In particular, a neural network tuner for the velocity contour controller in rolling mill electric drive is proposed to achieve that aim. The tuner consists of a neural network and a rule base determining moments of learning the network and the learning rate value to be used to do that. The rule base operational algorithm is proposed to reject disturbances caused by the roll bite and reduce dynamic force at moment of such disturbances occurrence. Having found that moment, the tuner adjusts the PI-controller velocity parameters of the drive in accordance with that algorithm. The main advantage of such approach is that there is no necessity to identify the control object. In this research the model of the second mill in the train of 350 Oskol eletrometallurgical plant is used. The tuner is applied to this mathematical model with multi-mass mechanical part implemented in MATLAB & Simulink and a test bench with a DC drive. Having analyzed the experiments results, the conclusion could be made that the tuner allows to: 1) reduce dynamic inertia moment oscillations by 18% in comparison with the control system without the tuner, 2) improve energy efficiency of the disturbance rejection by 3.8 %.

Dynamic force; rolling mill; elastic coupling; electric drive; PI-controller; neural tuner.

Введение. В высокомоощных электроприводах постоянного тока, например, в приводах прокатных клетей, зачастую возникают высокие динамические нагрузки [1]. Это связано с большим количеством передач в механической части клетки, упругими связями, большими массами, а также ударным характером нагрузок при захвате прокатываемой заготовки [2]. Высокие динамические моменты приводят к сокращению времени службы механизма прокатной клетки [3–6].

Существуют различные подходы к снижению указанных моментов. Их можно условно разделить на «механические» [3–7] (они предполагают модификацию механической части прокатной клетки) и «электрические» [8–10] (для снижения динамических нагрузок предлагается модифицировать систему электропривода движения прокатных валков или алгоритм управления им). В данной работе рассматривается второй подход, для которого и изложен нижеприведенный анализ.

Для снижения колебаний в электроприводах с упругостями в передачах широкое применение получили различные наблюдатели динамических моментов и колебаний [11–16]. Также для решения данной проблемы применяются ПИ-регуляторы дробного порядка [17] и управление на основе прогнозирующих моделей [18]. Однако, для применения всех этих методов необходимо наличие точной модели объекта управления, получение которой в условиях производства труднодостижимо.

Кроме этого используются методы мягких вычислений, такие как нечеткая логика [19], нейро-нечеткие сети [20]. Такие методы позволяют использовать опыт человека, знающего особенности работы механизма. Кроме этого подобные методы не требуют наличия модели объекта управления. Однако, для систем с нечеткой логикой остается открытым вопрос о выборе коэффициентов нормировки входных и выходных сигналов адаптивного настройщика, а для применения нейро-нечетких сетей необходима обучающая выборка, характеризующая все режимы работы объекта управления. В данной работе для решения проблемы динамических моментов электропривода при захвате прокатываемой заготовки предлагается использование нейросетевого настройщика параметров линейных регуляторов [21], позволяющего избежать подобных недостатков.

1. Нейросетевой настройщик. Нейросетевой настройщик состоит из искусственной нейронной сети и базы правил. База правил определяет моменты, в которые необходимо проводить обучение нейронной сети, а также скорости обучения для каждого из нейронов выходного слоя сети.

1.1. Искусственная нейронная сеть. В нейросетевом настройщике используется искусственная нейронная сеть прямого распространения сигнала со структурой [21], изображенной на рис. 1.

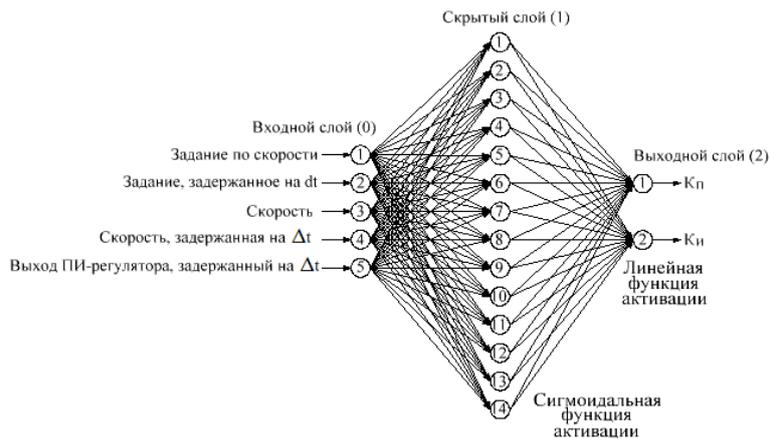


Рис. 1. Искусственная нейронная сеть настройщика

В скрытом слое используется сигмоидальная функция активации, на выходном – линейная. Причем для компенсации возмущений и отслеживания графика задания используются разные наборы весов и смещений для такой структуры сети.

Обучение сети происходит методом обратного распространения ошибки в моменты, которые определяет база правил. Причем скорости обучения нейронов выходного слоя также определяются базой правил. Скорость обучения в скрытом слое постоянна и равна 10^{-5} . Вызов настройщика производится раз в Δt секунд.

1.2. База правил. Данная база правил используется для работы настройщика в режиме компенсации возмущающего воздействия. При выявлении момента захвата заготовки параметры сети для переходных процессов сохраняются, и происходит вызов указанных ниже правил. После смены задания сохраненные параметры сети вновь загружаются в нейронную сеть, а текущие веса и смещения (найденные для данного конкретного возмущения) отбрасываются.

Правила для определения скорости обучения нейрона выходного слоя, ответственного за вычисление K_{II}

1) Если пик переходного процесса $y_{d \min}$, вызванного возмущением, еще не достигнут, И значение модуля скорости изменения выхода $y(t)$ ОУ выше, чем амплитуда шума N_n , измеренная в течение $2 \cdot \Delta t$ секунд в установившемся режиме, и значение модуля рассогласования ($|r(t) - y(t)|$) больше $S\%$ модуля разницы между текущей уставкой $r(t)$ и предыдущей r_{old} ($|r(t) - r_{old}|$), тогда скорость обучения нейрона выходного слоя $\eta_1^{(2)}$, ответственного за вычисление K_P , должна быть вычислена по следующей формуле:

$$\eta_1^{(2)} = K_{II} \cdot \frac{|r(t) - y(t)|}{|r(t) - r_{old}|}. \quad (1)$$

2) Если $y_{d \min}$ уже был достигнут, И текущее значение выхода ОУ выше, чем измеренное Δt секунд назад, И значение модуля скорости нарастания выхода ОУ $|y(t) - y(t - \Delta t)|$ больше, чем отношение разницы уставки и пика переходного процесса к количеству нейронов в скрытом слое N_{hidden} : $|r(t) - y_{d \min}| / N_{hidden}$, тогда значение K_{II} должно быть уменьшено, причем $\eta_1^{(2)}$ вычисляется по формуле (1).

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

Правило для определения скорости обучения нейрона выходного слоя, ответственного за вычисление K_I

3) Если $y_{d \min}$ достигнут, И значение модуля скорости изменения выхода ОУ ниже, чем амплитуда шума, измеренная в течение $2 \cdot \Delta t$ секунд в установившемся режиме, И значение модуля рассогласования больше $S\%$ модуля разницы между текущей уставкой и предыдущей, тогда скорость обучения нейрона выходного слоя $\eta_2^{(2)}$, ответственного за вычисление K_I , должна быть вычислена по следующей формуле:

$$\eta_2^{(2)} = K_{II} \cdot \frac{|y(t)|}{|y_{d \min}|}. \quad (2)$$

2. Экспериментальная проверка работоспособности настройщика. Для проверки эффективности предлагаемого метода проведено два эксперимента. Первый эксперимент проводился на математической модели прокатной клетки, второй – на экспериментальном стенде, оснащённом электроприводом постоянного тока с упругой связью в механической части.

2.1. Эксперимент на математической модели прокатной клетки. Эксперимент проводился на модели электропривода второй клетки прокатного стана 350 Оскольского электрометаллургического комбината. Данная вертикальная прокатная клеть предназначена для горячего деформирования металла с целью придания ему заданного профиля. Привод осуществляется от двигателя постоянного тока через муфту, редуктор и муфту на передачу шестереночных валков, через универсальные шпиндели на рабочие валки. Клеть оснащена двигателем постоянного тока GMMWO 0914-800 номинальной мощностью $P_n = 1250$ кВт и номинальной скоростью $n_n = 800$ об/мин. Механическая часть электропривода приведена к двухмассовой модели со следующими параметрами: момент инерции первой массы $J_1 = 390.5$ кг·м², момент инерции второй массы $J_2 = 562.4$ кг·м², коэффициент жесткости $c = 625.5 \cdot 10^3$ Н/м.

Модель построена в MatLab & Simulink на основе структурной схемы, изображенной на рис. 2.

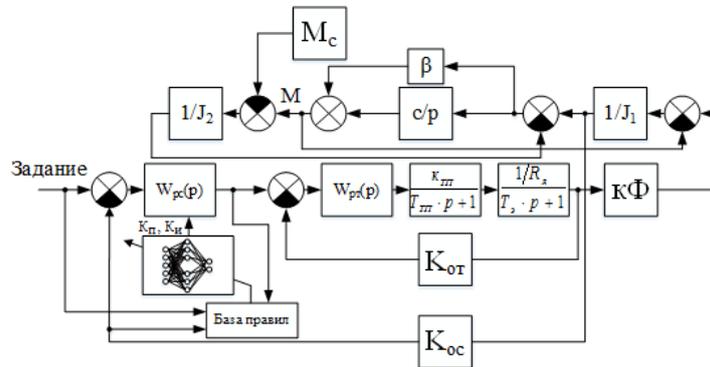


Рис. 2. Структурная схема электропривода прокатной клетки с нейросетевым настройщиком в контуре скорости и двухмассовой механической частью

На данной структурной схеме приняты следующие обозначения: W_{pc} – передаточная функция ПИ-регулятора скорости ($K_{II} = 70$; $K_{II} = 1252$), W_{pt} – передаточная функция ПИ-регулятора тока ($K_{IIm} = 0.279$; $K_{IIm} = 11.96$), $\kappa_{mn} = 131.5$ – коэффициент усиления тиристорного преобразователя, $T_{mn} = 0.007$ с – постоянная времени тиристорного преобразователя, $R_{я} = 0.061$ Ом – суммарное сопротивление якорной цепи, $T_{я} = 0.022$ с – электромагнитная постоянная времени якорной цепи, $K_{от} = 0.003$ – коэффициент обратной связи по току, $K_{ос} = 0.08$ – коэффициент обратной связи по скорости, M_c – момент нагрузки. Для экспериментов приняты следующие значения параметров: $S = 4.3\%$, $\Delta t = 5$ мс.

Момент нагрузки ($M_c = 150$ кН·м), моделирующий захват заготовки прокатными валками, прикладывался при номинальной скорости вращения электродвигателя 800 об/мин, что соответствует технологическому режиму работы прокатной клетки. Нейросетевой настройщик выявил момент возмущения (рис. 3) и, в соответствии с базой правил, изменил коэффициенты регулятора скорости.

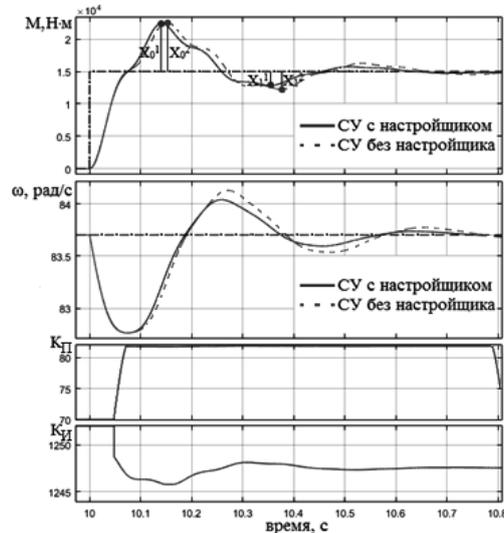


Рис. 3. Результаты эксперимента по компенсации возмущающего воздействия

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

По формуле (3) были вычислены логарифмические декременты затухания динамического момента для системы с нейросетевым настройщиком ($\lambda_1 = 1.009$) и без него ($\lambda_2 = 1.234$). Таким образом, использование нейросетевого настройщика позволило ускорить затухание динамического момента на 18 %.

$$\lambda = \ln \left(\frac{X_0}{X_1} \right). \quad (3)$$

2.2. Эксперимент на стенде. Эксперимент проводился на модифицированном экспериментальном стенде NI Elvis II. На плату QUANCER DCMCT с одним электродвигателем постоянного тока в качестве дополнительной инерционной массы установлен еще один такой же двигатель и маховик. Подключение ведущего двигателя к ведомому с маховиком осуществляется с помощью упругого резинового вала. Система управления реализована в LabVIEW и представляет собой классическую систему подчиненного регулирования скоростью [9]. Внешний контур регулирует скорость и вырабатывает задание для внутреннего контура тока. Выход контура тока подается на управляемый источник напряжения в диапазоне ± 10 В. Нейросетевой настройщик реализован в виде программного кода MATLAB, помещенного в блок MathScript Node.

Эксперимент производился следующим образом. В систему управления ведущего двигателя подавалось задание по скорости 100 рад/с. После разгона электропривода в установившемся режиме в канал управления этим двигателем вносилось возмущающее воздействие величиной 10 В. Нейросетевой настройщик, выявив момент возникновения возмущения, изменил значение параметров ПИ-регулятора скорости в соответствии с базой правил. Результаты данного эксперимента приведен на рис. 4.

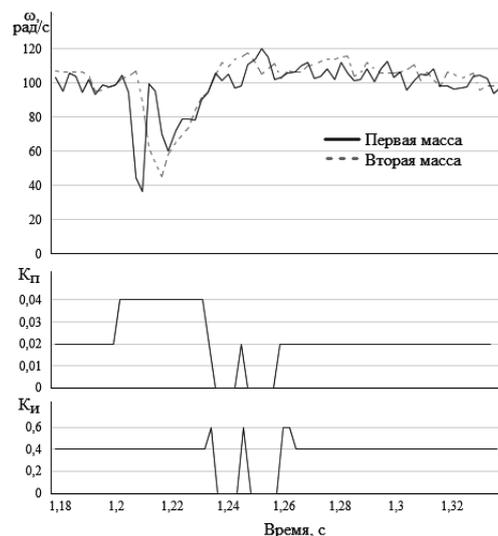


Рис. 4. Результаты эксперимента с нейросетевым настройщиком

Аналогичный эксперимент производился для системы без настройки регулятора скорости (рис. 5). Применение нейросетевого настройщика позволило снизить колебания первой массы (ведущий двигатель), относительно системы без настройки.

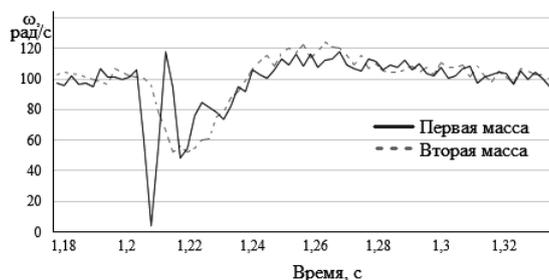


Рис. 5. Результаты эксперимента без нейросетевого настройщика

На рис. 6 приведено сравнение графиков тока для указанных экспериментов для ведущего двигателя для системы с нейросетевым настройщиком (ПИ+НН) и без него (ПИ). Система с настройщиком позволила снизить суммарный ток, затраченный на отработку возмущающего воздействия на 3.8%.

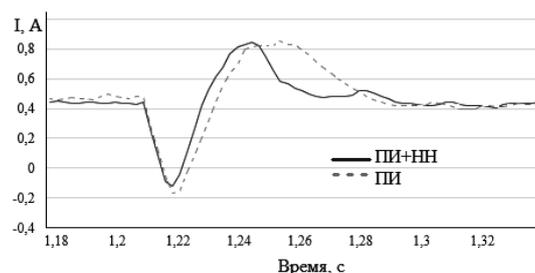


Рис. 6. Сравнение токов двигателя для системы с настройщиком и без него

В целом, результаты экспериментов, как на математической модели системы управления электропривода, так и на экспериментальном стенде показывают эффективность предлагаемого метода. В отличие от работ [11–16] нейросетевой настройщик позволяет снизить динамические моменты и колебания скорости, не требуя модели объекта управления.

Заключение. На основе проведенных экспериментов возможно сделать вывод о том, что оперативная настройка регулятора скорости с использованием нейросетевого настройщика позволяет снизить колебания динамического момента главного электропривода прокатной клетки на 18 %. Это позволит повысить надежность рассматриваемой прокатной клетки. Эксперименты на стенде показали, что нейросетевой настройщик также позволяет повысить энергоэффективность отработки возмущения на 3.8 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. – М.: Энергия, 1971. – 380 с.
2. Лехов О.С. Динамические нагрузки в линии привода обжимных станов. – М.: Машиностроение, 1975. – 184 с.
3. Вернев В.В., Большаков В.И., Белобров Ю.И., Бобух И.А. Динамические перегрузки в приводах клеток широкополосных станов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1999. – № 1. – С. 72-75.

4. *Krot P.V.* Transient torsional vibrations control in the geared drive trains of the hot rolling mills // 3rd IEEE Multi-Conf. on Systems and Control (MSC 2009). July 8-10. – St. Petersburg: IEEE, 2009. – P. 1368-1373.
5. *Плахтин В.Д.* Подбор рабочих валков широкополосных станов в зависимости от угловых зазоров в линии привода // *Сталь*. – 1999. – № 3. – С. 29-32.
6. *Адамия Р.Ш., Кашакашвили Г.В., Лобода В.М.* и др. Оценка предельных нагрузок в трансмиссии металлургических машин // *Сталь*. – 2003. – № 3. – С. 49-51.
7. *Карпунин И.И.* Снижение динамических нагрузок и повышение долговечности машин широкополосных станов горячей прокатки // Бюллетень «Черная металлургия», ОАО Черметинформация. – 2004. – № 07. – С. 31-35.
8. *Храмышин В. Р.* и др. Снижение динамических нагрузок в универсальных клетях прокатного стана // *Металлург*. – 2015. – № 4. – С. 41-47.
9. *Храмышин В.Р.* и др. Снижение динамических нагрузок механического и электрического оборудования черновой подгруппы клетей стана горячей прокатки // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2013. – № 2. – С. 69-77.
10. *Мещеряков В. Н., Толчеев В. М.* Разработка способа снижения динамических нагрузок электропривода прокатной клетки стана холодной прокатки // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2015. – № 3 (28). – С. 14-19.
11. *Dhaouiadi R., Kubo K., Tobise M.* Two-degree-of-freedom robust speed controller for high-performance rolling mill drives // *IEEE transactions on industry applications*. – 1993. – Vol. 29.5. – P. 919-926.
12. *Hori Y., Iseki H., Sugiura K.* Basic consideration of vibration suppression and disturbance rejection control of multi-inertia system using SFLAC (state feedback and load acceleration control) // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 1994. – Vol. 30.4. – P.889-896.
13. *Szabat K., Orłowska-Kowalska T.* Vibration suppression in a two-mass drive system using PI speed controller and additional feedbacks—Comparative study // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2007. – Vol. 54, No. 2. – P. 1193-1206.
14. *Zhang R. et al.* Torsional vibration suppression control in the main drive system of rolling mill by state feedback speed controller based on extended state observer // *In proceedings of IEEE 2007 International Conference on Control and Automation (ICCA)*. – IEEE, 2007. – P. 2172-2177.
15. *Zhang R., Tong C.* Torsional vibration control of the main drive system of a rolling mill based on an extended state observer and linear quadratic control // *Journal of Vibration and Control*. – 2006. – Vol. 12, No. 3. – P. 313-327.
16. *Chen Y. Q., Vinagre B. M., Podlubny I.* Fractional order disturbance observer for robust vibration suppression // *Nonlinear Dynamics*. – 2004. – Vol. 38, No. 1-4. – P. 355-367.
17. *Erenturk K.* Fractional-Order $\text{P}\lambda\text{D}\mu$ and Active Disturbance Rejection Control of Nonlinear Two-Mass Drive System // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2013. – Vol. 60, No. 9. – P. 3806-3813.
18. *Wang J. et al.* Torsional vibration suppression of rolling mill with constrained model predictive control // *The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006*. – IEEE, 2006. – Vol. 2. – P. 6401-6405.
19. *Li W., Hori Y.* Vibration suppression using single neuron-based PI fuzzy controller and fractional-order disturbance observer // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2007. – Vol. 54, No. 1. – P. 117-126.
20. *Orłowska-Kowalska T., Szabat K.* Damping of torsional vibrations in two-mass system using adaptive sliding neuro-fuzzy approach // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2008. – Vol. 4, No. 1. – P. 47-57.
21. *Еременко Ю.И., Глуценко А.И., Петров В.А.* О нейросетевой адаптации параметров ПИ-регулятора контура тока системы управления прокатной клетью в реальном времени // *Системы управления и информационные технологии*. – 2016. – № 3 (65). – С. 62-68.

REFERENCES

1. *Klyuchev V.I.* Ogranichenie dinamicheskikh nagruzok elektroprivoda [Limitation of dynamic loads of the actuator]. Moscow: Energiya, 1971, 380 p.
2. *Lekhov O.S.* Dinamicheskie nagruzki v linii privoda obzhimnykh stanov [Dynamic loads in drive line cogging mills]. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 184 p.

3. Verenev V.V., Bol'shakov V.I., Belobrov Yu.I., Bobukh I.A. Dinamicheskie peregruzki v privodakh kletey shirokopolosnykh stanov [Dynamic overload of the drives of the stands broadband mill], *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry], 1999, No. 1, pp. 72-75.
4. Krot P.V. Transient torsional vibrations control in the geared drive trains of the hot rolling mills, *3rd IEEE Multi-Conf. on Systems and Control (MSC 2009). July 8-10. Sain. Petersburg: IEEE, 2009*, pp. 1368-1373.
5. Plakhtin V.D. Podbor rabochikh valkov shirokopolosnykh stanov v zavisimosti ot uglovykh zazorov v linii privoda [The selection of the work rolls broadband mill depending on the angular gaps in the line drive], *Stal'* [Steel], 1999, No. 3, pp. 29-32.
6. Adamiya R.Sh., Kashakashvili G.V., Loboda V.M. i dr. Otsenka predel'nykh nagruzok v transmssii metallurgicheskikh mashin [Evaluation of limit loads in the transmission metallurgical], *Stal'* [Steel], 2003, No. 3, pp. 49-51.
7. Karpukhin I.I. Snizhenie dinamicheskikh nagruzok i povyshenie dolgovechnosti mashin shirokopolosnykh stanov goryachey prokatki [Reduction of dynamic loads and increase durability of machines of broadband hot rolling mills], *Byulleten' «Chernaya metallurgiya», OAO Chermetinformatsiya* [The Bulletin "ferrous metallurgy", OAO "Chermetinformatsiya"], 2004, No. 07, pp. 31-35.
8. Khramshin V. R. i dr. Snizhenie dinamicheskikh nagruzok v universal'nykh kletyakh prokatnogo stana [Reduction of dynamic loads in the universal stands of the rolling mill], *Metallurg* [Metallurg], 2015, No. 4, pp. 41-47.
9. Khramshin V.R. i dr. Snizhenie dinamicheskikh nagruzok mekhanicheskogo i elektricheskogo oborudovaniya chernovoy podgruppy kletey stana goryachey prokatki [Reduction of dynamic loads mechanical and electrical equipment subgroup roughing stands of the hot rolling mill], *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Engineering: network electronic scientific journal], 2013, No. 2, pp. 69-77.
10. Meshcheryakov V.N., Tolcheev V.M. Razrabotka sposoba snizheniya dinamicheskikh nagruzok elektroprivoda prokatnoy kleti stana kholodnoy prokatki [Development of a method for reducing dynamic loads of the electric drive of rolling mill cold rolling mill], *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical complexes and systems], 2015, No. 3 (28), pp. 14-19.
11. Dhaouadi R., Kubo K., Tobise M. Two-degree-of-freedom robust speed controller for high-performance rolling mill drives, *IEEE transactions on industry applications*, 1993, Vol. 29.5, pp. 919-926.
12. Hori Y., Iseki H., Sugiura K. Basic consideration of vibration suppression and disturbance rejection control of multi-inertia system using SFLAC (state feedback and load acceleration control), *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1994, Vol. 30.4, pp.889-896.
13. Szabat K., Orłowska-Kowalska T. Vibration suppression in a two-mass drive system using PI speed controller and additional feedbacks—Comparative study, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, Vol. 54, No. 2, pp. 1193-1206.
14. Zhang R. et al. Torsional vibration suppression control in the main drive system of rolling mill by state feedback speed controller based on extended state observer, *In proceedings of IEEE 2007 International Conference on Control and Automation (ICCA)*. IEEE, 2007, pp. 2172-2177.
15. Zhang R., Tong C. Torsional vibration control of the main drive system of a rolling mill based on an extended state observer and linear quadratic control, *Journal of Vibration and Control*, 2006, Vol. 12, No. 3, pp. 313-327.
16. Chen Y. Q., Vinagre B. M., Podlubny I. Fractional order disturbance observer for robust vibration suppression, *Nonlinear Dynamics*, 2004, Vol. 38, No. 1-4, pp. 355-367.
17. Erenturk K. Fractional-Order $\lambda D\mu$ and Active Disturbance Rejection Control of Nonlinear Two-Mass Drive System, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, Vol. 60, No. 9, pp. 3806-3813.
18. Wang J. et al. Torsional vibration suppression of rolling mill with constrained model predictive control, *The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006*. IEEE, 2006, Vol. 2, pp. 6401-6405.
19. Li W., Hori Y. Vibration suppression using single neuron-based PI fuzzy controller and fractional-order disturbance observer, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, Vol. 54, No. 1, pp. 117-126.

20. *Orlowska-Kowalska T., Szabat K. Damping of torsional vibrations in two-mass system using adaptive sliding neuro-fuzzy approach, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2008, Vol. 4, No. 1, pp. 47-57.*
21. *Eremenko Yu.I., Glushchenko A.I., Petrov V.A. О нейросетевой адаптации параметров PI-регулятора контура тока системы управления прокатной клетью в реальном времени [About neural adaptation of the parameters of the PI-controller of current loop of a control system of a rolling mill in real time], Системы управления и информационные технологии [Control systems and information technology], 2016, No. 3 (65), pp. 62-68.*

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор М.Е. Семенов.

Еременко Юрий Иванович – Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) ФГАОУ ВО НИТУ "МИСиС"; e-mail: erem49@mail.ru; 309516 Белгородская обл., г. Старый Оскол, м-н Макаренко, 42; тел.: +74725451210; кафедра автоматизированных и информационных систем управления; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Глушченко Антон Игоревич – e-mail: strondutt@mail.ru; тел.: +74725451217; кафедра автоматизированных и информационных систем управления; к.т.н.; доцент.

Петров Владислав Анатольевич – e-mail: 79040882508@yandex.ru; тел.: +74725451217; кафедра автоматизированных и информационных систем управления; аспирант.

Eremenko Yuri Ivanovich – Stary Oskol technological institute n.a. A.A. Ugarov (branch) NUST "MISIS"; e-mail: erem49@mail.ru; 309516, Belgorod region, Stary Oskol, Makarenko microdistrict, 42; phone: +74725451210; the department of automated and information control system; head department; dr. of eng. sc.; professor.

Glushchenko Anton Igorevich – e-mail: strondutt@mail.ru; phone: +74725451217; the department of automated and information control system; cand. of eng. sc.; associate professor.

Petrov Vladislav Anatol'evich – e-mail: 79040882508@yandex.ru; phone: +74725451217; the department of automated and information control system; postgraduate student.

УДК 004.75+004.052.3

DOI 10.23683/2311-3103-2017-9-53-64

Э.В. Мельник, А.Б. Клименко, Д.Я. Иванов, В.А. Гандурин

**МУЛЬТИАГЕНТНЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ
РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЕВЫХ
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ С КЛАСТЕРИЗАЦИЕЙ
НА ОСНОВЕ РЕПЛИКАЦИИ ДАННЫХ***

В настоящее время информационно-управляющие системы (ИУС) являются неотъемлемым компонентом любой сложной мехатронной системы, включая нефте- и газодобывающую промышленность, автономные и мобильные робототехнические системы, авиацию, энергетику и многое другое. Поскольку объекты, находящиеся под управлением ИУС в случае возникновения отказов могут представлять угрозы как для населения, так и для экологической обстановки, к таким системам предъявляются повышенные требования к надежности. Надежность является комплексным и многоаспектным понятием, и может быть оценена количественно, в то время как отказоустойчивость является средством обеспечения надежности и опирается на существование в системе избыточности. Сетецентрические информационно-управляющие системы с децентрализованным управлением являются перспективными в аспектах интегрируемости, масштабируемости и отказоустойчивости, в то время как резервирование производительности вычислительных узлов и применение принципов выравнивания нагрузки позволяют повысить значения веро-

* Работа выполнена в рамках проектов ЮНЦ РАН № 0256-2014-0008, 0256-2015-0080 (в рамках задания 007-01114-16 PR).