УДК 004.89:62-503.57

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

ОБ АДАПТИВНОЙ НАСТРОЙКЕ ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА*

Рассмотрена проблема построения адаптивной системы управления электроприводом постоянного тока горно-металлургических машин. Произведен краткий анализ «классических» и интеллектуальных механизмов адаптации. Предложено в контуре скорости использовать нейросетевой настройщик параметров ПИ-регулятора, сочетающий в себе аппарат экспертных систем и искусственных нейронных сетей. Описана разработанная для нейросетевого настройщика база правил, которая отражает опыт инженера АСУ ТП, позволяет работать с линейно нарастающим заданием и определяет в какие моменты и с какой скоростью производить обучение нейронной сети. В программном пакете LabVIEW разработана двухконтурная система управления скоростью электропривода постоянного тока, реализованного на плате Quanser DCMCT. Произведен расчет параметров регулятора тока в соответствии с настройкой на модульный оптимум и параметров регулятора скорости — в соответствии с настройкой на симметричный оптимум. Проведены две серии экспериментов.

Ключевые слова: нейронная сеть, база правил, настройщик, электропривод постоянного тока, адаптивная система, пропорционально-интегральный регулятор, LabVIEW.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-101-112

Электроприводы постоянного тока получили широкое распространение в горно-металлургическом комплексе. Они используются в системах управления энергоемкими агрегатами [1—4]. Современной тенденцией модернизации таких систем является замена приводов постоянного тока на более современные СУЭП [1, 5]. Но подобная модернизация несет существенные материальные затраты. И, как следствие, распространение получают пути модернизации, при которых заменяется на современную цифровую только система управления без замены силовой части электропривода [6]. Как аналоговые, так и цифровые системы управления электроприводами постоянного тока строятся на основе широко известного принципа подчиненного регулирования [7, 8].

Как правило, в таких системах применяются хорошо зарекомендовавшие себя П, ПИ и ПИД законы управления, как и в 90—95% контуров управления в промышленности в целом [9]. Широкое распространение ПИД-регуляторов объясняется простотой их структуры, легкостью для понимания инженерным

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

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 11. С. 101–112.
© Ю.И. Еременко, А.И. Глущенко, В.А. Петров. 2017.

персоналом, и тем, что они позволяют достигать необходимого качества управления для стационарных технологических объектов.

Главным недостатком такой схемы управления является необходимость линейности объекта управления, т.к. ПИД закон является линейным. Это накладывает определенные ограничение на использование подобной схемы для управления электроприводом сложных горнометаллургических машин, поскольку они, как объекты управления, нелинейны, т.к. их параметры изменяются в процессе работы. Это можно объяснить нелинейностью характеристик приводного двигателя, изменением температурных и скоростных режимов работы системы электропривода; износом оборудования, который вызывает неконтролируемое появление люфтов в механической части электропривода.

Учитывая описанные нелинейности, можно сделать вывод о том, что для управления электроприводами сложных горнометаллургических машин в условиях изменения режимов их работы становится недостаточно ПИД-закона управления, в особенности в том случае, когда параметры регулятора настраиваются только в ходе пуско-наладочных работ и не изменяются в процессе работы.

Для решения данной проблемы возможно использовать адаптивные системы управления, подстраивающие параметры указанных линейных регуляторов. Поскольку закон управления остается прежним, внедрение такой системы не повлечет за собой существенных материальных затрат. Для построения подобной системы необходимо рассмотреть существующие способы подстройки ПИ-регуляторов в электроприводах постоянного тока. Они разделяются на два класса: классические и интеллектуальные.

Для использования классических методов настройки необходимо иметь точную модель объекта управления [9—12], или, для идентификации ее параметров, необходимо использовать различные тестовые сигналы [13—17]. Получение точной, нелинейной модели объекта управления в реалиях производства является достаточно сложной задачей, а использование тестового сигнала без остановки оборудования трудноосуществимо.

Однако, основываясь на своем опыте и знаниях об объекте управления, инженер АСУТП на производстве настраивает параметры регулятора без модели объекта. Все это может быть учтено при использовании интеллектуальных методов для решения данной задачи: метод роя частиц [18], нечеткая логика [19], генетические алгоритмы [20, 21], нейронные сети [22, 23].

Каждый из этих методов имеет преимущества и недостатки. В данном случае основными требованиями к разрабатываемой системе является как необходимость ее оперативного дообучения ввиду постоянно изменяющихся параметров объекта, так и наличие знаний об особенностях ее работы (например, о наличии ограничений, накладываемых на различные сигналы). В данной работе для построения нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора, работающего в реальном масштабе времени и не требующего модели *ОУ* предлагается скомбинировать нейронные сети и экспертные системы, которые удовлетворяют указанным выше требованиям.

Нейросетевой настройщик

Нейросетевой настройщик (рис. 1) является «надстройкой» к классическому ПИ-регулятору (в данном случае) и состоит из искусственной нейронной сети и базы правил, которая определяет в какие моменты и с какой скоростью обучать сеть.

Настройщик вызывается дискретно раз в Δt секунд. Δt вычисляется в соответствии с [24].

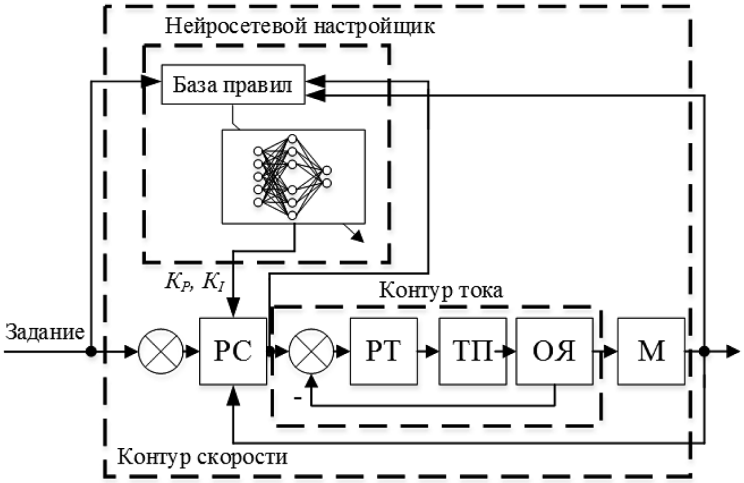

Рис. 1. Функциональная схема электропривода с нейросетевым настройщиком в контуре скорости

Метод по определению структуры нейронной сети описан в [25]. Применение нейросетевого настройщика для регулятора тока (РТ) системы управления электроприводом постоянного тока рассматривается в [26]. Данная статья посвящена построению нейросетевого настройщика для регулятора скорости (РС) рассматриваемой СУЭП. Структура нейронной сети для данного случая имеет вид: 5-14-2.

Перейдем к базе правил для настройщика контура скорости. Каждое правило состоит из условия и следствия. Условие — описание ситуации, которое сравнивается с текущим состоянием *ОУ*; следствие — скорость обучения конкретного нейрона выходного слоя сети, ответственного за вычисление конкретного параметра регулятора.

База правил

НС будет обучаться, только если сигнал управления, формируемый регулятором, находится внутри допустимого диапазона (например, (-10; 10)). Обучение НС при достижении границ диапазона может привести к тому, что коэффициенты регулятора приобретут излишне высокое (или низкое) значение, что приведет к насыщению интегрального канала регулятора.

Если идет переходный процесс и рассогласование по выходу *ОУ* находится в пределах от 10% до 80% разницы между текущим установившемся значением задания и предыдущим, *И*:

1) скорость нарастания сигнала выхода *ОУ* менее амплитуды шума *N* в установившемся режиме, определяемой при первичном запуске нейросетевого настройщика, за Δt секунд, *И* задание не вошло в установившийся режим, *И* кривая выхода *ОУ* не пересекала кривую задания, *И* настройка K_I на текущем переходном процессе не производилась, то переходный процесс достиг своего пика раньше необходимого и следует вызывать блок правил по обучению нейрона выходного слоя, ответственного за формирование коэффициента K_P, выход которого в данном случае следует увеличивать. Скорость обучения такого нейрона $\eta_1^{(2)}$ должна быть на 2 порядка меньше значения K_P.

2) если кривая выхода *ОУ* пересекает кривую задания до того, как последняя достигла установившегося режима, *И* настройка K_I на текущем переходном процессе не производилась, то следует

вызывать блок правил по обучению нейрона выходного слоя, ответственного за формирование коэффициента K_P, выход которого в данном случае следует уменьшить. Скорость обучения такого нейрона $\eta_1^{(2)}$ должна быть на 3 порядка меньше значения K_P.

Если предыдущий блок условий не был вызван, то после уменьшения рассогласования ниже 20% от разницы между текущим установившимся значением задания и предыдущим сработает другой блок условий. Алгоритм его работы следующий:

1) если в момент очередной смены задания рассогласование между заданием и выходом *ОУ* составляет менее *S*% от разницы между текущим установившимся значением задания и предыдущим, то текущее установившееся значение задания и сигнал управления сохраняются в специальный массив. Такие воздействия принимаются как эталонные для соответствующих заданий. В течение любого переходного процесса при первом пересечении кривой выхода *ОУ* и задания (при условии что это первое пересечение произошло уже после того, как кривая задания достигла установившего значения) фиксируется значение сигнала управления в *i*-канале регулятора. Если это значение меньше эталонного, то принимается решение об увеличении K_I, а если больше — то об уменьшении.

Рис. 2. Фотография экспериментального стенда

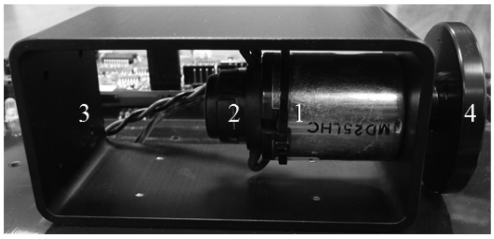

Рис. 3. Фотография электродвигателя постоянного тока на плате Quanser DCMCT

2) если настройка K_I на текущем переходном процессе не производилась, *И* принято решение об увеличении K_I, *И* перерегулирование при этом оказалось более *X*% от разницы между текущим установившимся значением задания и предыдущим, то принимается решение об уменьшении K_P. Для нейрона, формирующего K_P, скорость обучения $\eta_1^{(2)}$ должна быть на 5 порядков меньше значения коэффициента K_P.

3) обучение нейрона, формирующего K_I, для увеличения его выходного сигнала начинается при соблюдении следующих условий: переходный процесс уже достиг своего первого максимума после пересечения задания, а в момент этого пересечения задание уже достигло установившегося значения, скорость изменения выхода *ОУ* за последние 2 такта работы схемы (1 такт — это Δt секунд) менее *N* об/мин, а текущее рассогласование больше *X*% от разницы между текущим установившимся значением задания и предыдущим, настройка K_P на текущем переходном процессе не производилась. Обучение этого нейрона в сторону уменьшения выходного сигнала начинается при соблюдении следующих условий: скорость изменения выхода *ОУ* за последние 2 такта работы схемы более *N* об/мин, а текущее рассогласование больше *X*% от разницы между теку-

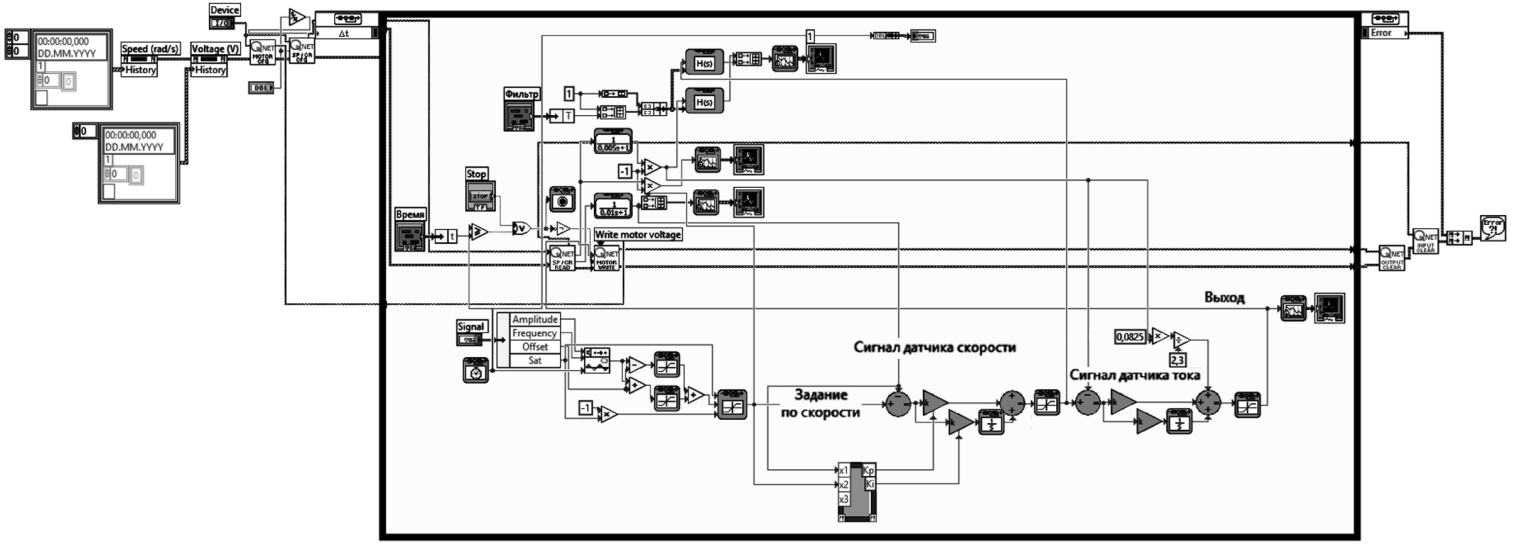

Рис. 4. Система управления электроприводом постоянного тока (вид в целом)

щим заданием и предыдущим, настройка K_P на текущем переходном процессе не производилась. Скорость обучения $\eta_2^{(2)}$ в этих случаях должна быть на 5 порядков меньше значения K_I.

Настройщик применен для управления физической моделью электропривода постоянного тока.

Описание экспериментального стенда и полученные результаты

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

Плата Quanser DCMCT (рис. 3) оснащена электродвигателем постоянного тока с энкодером и маховиком на валу электродвигателя. Управление двигателем реализуется изменением питающего напряжения с применением широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

На рис. 3 используются следующие обозначения: 1 — электродвигатель постоянного тока; 2 — энкодер; 3 — корпус электродвигателя; 4 — маховик;

В программном пакете — среде разработки приложений LabVIEW 2013 была построена система управления (рис. 4, 5). Она состоит из регулятора тока РС и регулятора тока РТ, а также блока компенсации ПротивоЭДС двигателя.

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

Картина уставок представляет собой следующую последовательность смен заданий по скорости:

0 об/мин → 100 об/мин →
→ 0 об/мин → -100 об/мин.

Причем на скорости 100 об/мин электропривод работает 1,25 с, а на скорости 0 об/мин — 1 с. Смена задания происходит в виде линейно-нарастающего сигнала, причем значение задания по скорости 100 об/мин достигается за 1/8 с.

Нейросетевой настройщик реализован в виде программного кода MATLAB и импортирован в LabVIEW при помощи узла Математики (MathScript Node).

Параметры регулятора тока ($K_{Pтока}$ = = 8,33 $K_{Iтока}$ = 1670) рассчитаны в соответствии с настройкой на модульный оптимум, параметры регулятора скорости (K_P = 0,01 K_I = 0,2) — на симметричный

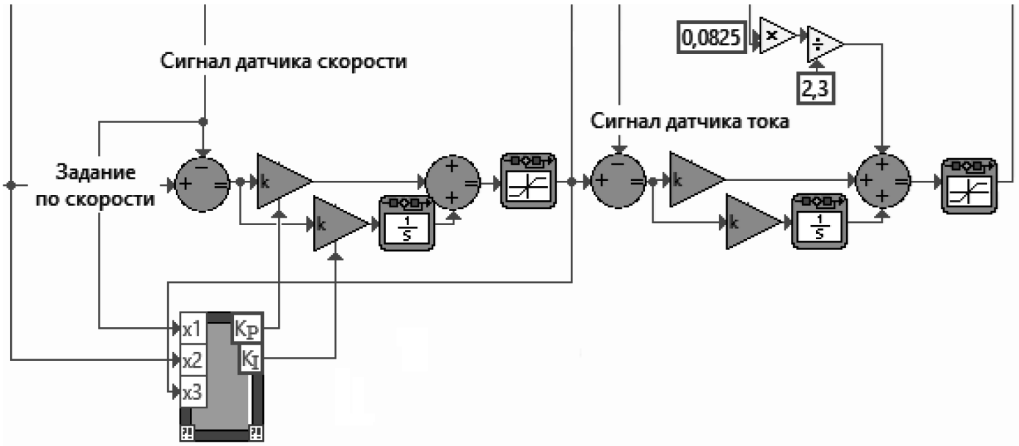

Рис. 5. Система управления электроприводом постоянного тока

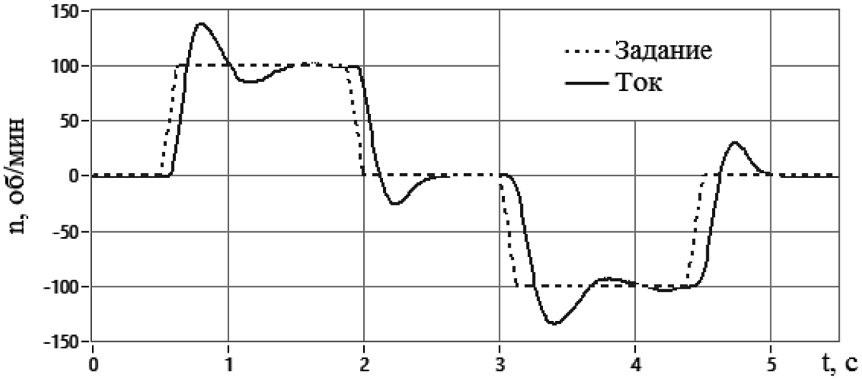

Рис. 6. Результаты эксперимента с оптимальными параметрами ПИ-регуляторов тока и скорости

оптимум. При этом перерегулирование составляет 40%, а статическая ошибка равна нулю. На рис. 6 показана работа системы с оптимальными настройками регуляторов. Здесь и далее *n* — скорость вращения электродвигателя.

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

1. В первой серии проверялась способность настройщика возвращать не-

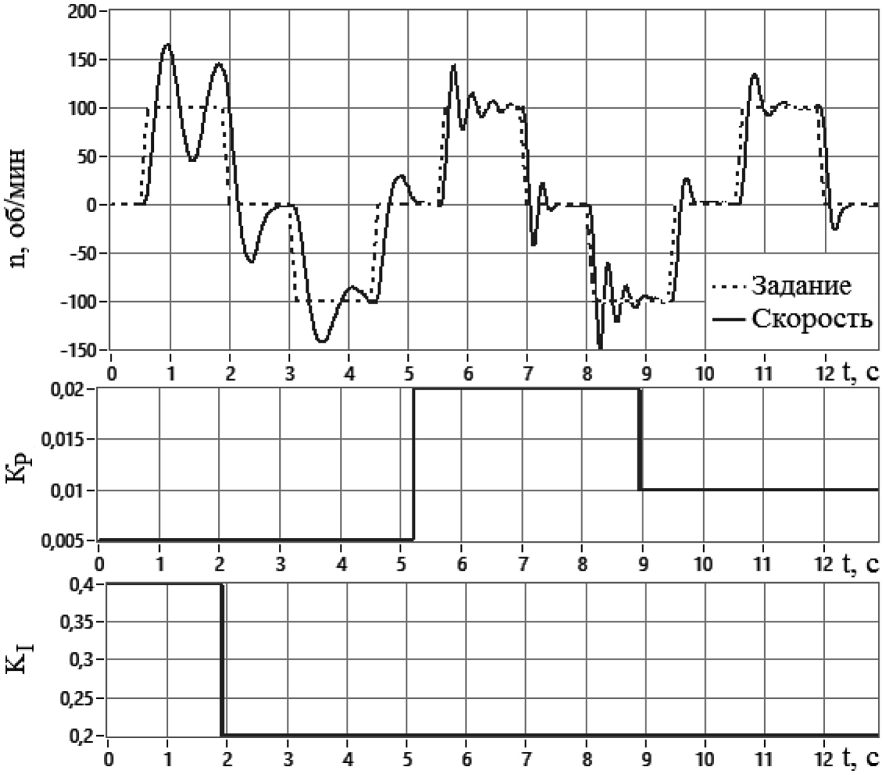

Рис. 7. Результаты эксперимента с оптимальными параметрами ПИ-регулятора тока и вдвое измененными параметрами ПИ-регулятора скорости

Результаты первой серии экспериментов

№	$K_{Рнач}$	$K_{Інач}$	$K_{Ркон}$	$K_{Ікон}$	$\Delta K_Р$, %	ΔK_I, %	$n_с$
1	0,01	0,2	0,01	0,2	0	0	—
2	0,02	0,2	0,011	0,2	10	0	2
3	0,05	0,2	0,009	0,21	10	5	4
4	0,01	0,4	0,01	0,22	0	10	3
5	0,01	0,1	0,01	0,18	0	10	5
6	0,02	0,4	0,011	0,17	10	15	9
7	0,005	0,4	0,01	0,02	0	0	7
8	0,02	0,1	0,011	0,19	10	5	9
9	0,005	0,1	0,01	0,22	0	10	3

оптимальную настройку регулятора скорости к расчетной. На рис. 7 приведены результаты эксперимента с неоптимальными коэффициентами (начальные значения $K_Р$ = 0,005, K_I = 0,4). Нейросетевой настройщик вернул значения коэффициентов ПИ-регулятора скорости к расчетным. Подобных экспериментов проведено 9 для различных начальных коэффициентов (таблица).

Система управления начинала работу с коэффициентов $K_{Рнач}$ и $K_{Інач}$, в процессе работы системы настройщик в соответствии с базой правил изменял коэффициенты. Конечные коэффициенты ($K_{Ркон}$ и $K_{Ікон}$) указаны в таблице. Также в

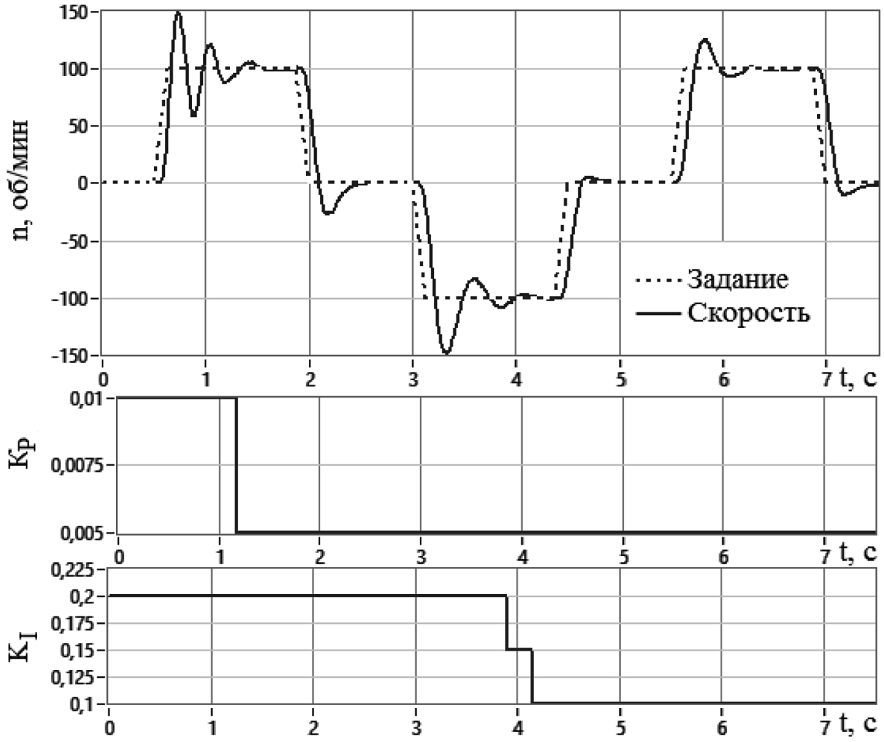

Рис. 8. Результаты эксперимента с уменьшенным моментом инерции

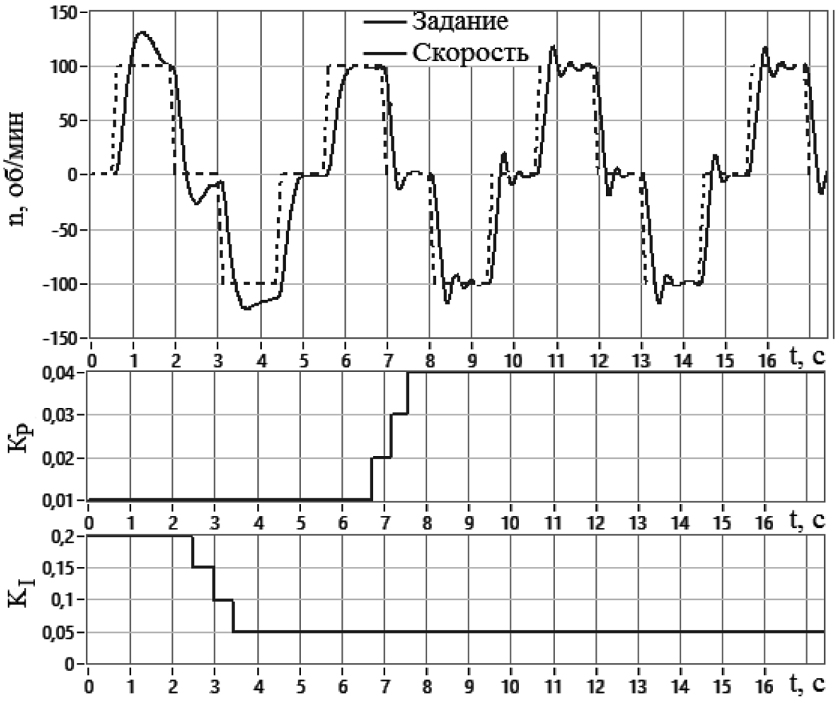

Рис. 9. Результаты эксперимента с увеличенным моментом инерции

таблице указаны относительные разности ΔK_P, ΔK_I конечных коэффициентов и рассчитанных.

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

2. Во второй серии экспериментов нейросетевой настройщик изменял настройку регулятора скорости в условиях изменения параметров объекта управления.

На рис. 8 приведены результаты эксперимента с уменьшенным моментом инерции электропривода (это достигалось снятием маховика). Нейросетевой настройщик изменил параметры ПИ-регулятора скорости в соответствии с базой правил, что позволило снизить перерегулирование на 25% и колебательность переходных процессов. Поддержание требуемого качества регулирования в контуре скорости позволило добиться экономии электроэнергии 1,5% за время эксперимента по сравнению с системой управления без нейросетевой настройки.

На рис. 9 представлены результаты эксперимента с увеличенным вдвое моментом инерции электропривода (это достигалось установкой маховика большей массы). Нейросетевой настройщик, в соответствии с базой правил, изменил настройку ПИ-регулятора скорости, что позволило снизить перерегулирование на 10% и повысить динамику контура скорости. Поддержание требуемого качества регулирования в контуре скорости позволило добиться экономии электроэнергии 1% за время эксперимента по сравнению с системой управления без нейросетевой настройки.

В заключение можно сказать, что адаптивная система управления электроприводом постоянного тока, построенная на основе нейросетевого настройщика позволяет повысить эффективность привода при дрейфе его параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сарваров А. С. и др.* Анализ состояния электроприводов агрегатов ГОП ОАО «ММК» и пути модернизации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова. — 2011. — № 3. — С. 8—11.

2. *Еремин А. В.*, *Федоров О. В.*, *Шевырев Ю. В.* Модернизации электропривода агломерационной машины // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2010. — № 3—3. — С. 38—43.

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

4. *Виноградов К. М. и др.* Способы повышения энергоэффективности электропривода стана холодной прокатки труб // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2016. — Т. 16. — № 1. — С. 42—46.

5. *Омельченко Е. Я.*, *Козин А. Н.*, *Маколов В. Н.*, *Бовшик П. А.*, *Попов С. Н.* Электрооборудование современных цехов ОАО «ММК» // ЭС и К. — 2014. — № 1 (22). — С. 43—46.

6. *Головин В. В.*, *Косенков А. В.*, *Разворотнев В. П.* Опыт внедрения современных электроприводов в ОАО «ММК» // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2010. — № 3—2. — С. 149—156.

7. *Stashinov Yu. P.* On the issue of control system adjustment of a direct current drive on the modular optimum. Part 1 // Russian Electrical Engineering. — 2016. — № 87.1. — Pp. 1—5.

8. *Stashinov Yu. P.* On the issue of control system adjustment of a direct current drive on the modulus optimum. Part 2 // Russian Electrical Engineering. — 2016. — № 87.3. — Pp. 125—129.

9. *Александров А. Г.*, *Паленов М. В.* Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов в технических системах // Автоматика и телемеханика. — 2014. — № 2. — С. 16—30.

10. *Шубладзе А. М.*, *Кузнецов С. И.* Автоматически настраивающиеся промышленные ПИ и ПИД регуляторы // Автоматизация в промышленности. — 2007. — № 2. — С. 15—17.

11. *Ротач В. Я.*, *Кузищин В. Ф.*, *Петров С. В.* Настройка регуляторов по переходным характеристикам систем управления без их аппроксимации аналитическими выражениями // Автоматизация в промышленности. — 2009. — № 11. — С. 9—12.

12. *Alexandrov A. G.*, *Palenov M. V.* Self-tuning PID-I controller. Proc. 18th IFAC World Congress, Milano, Italy, 2011. — Pp. 3635—3640.

13. *Leva A., Cox C.*, *Ruano A. E.* Hands-on PID autotuning: a guide to better utilisation // IFAC Professional Brief. — Laxenburg: IFAC, 2002. — 84 p.

14. *Li Y., Ang K., Chong C.* Patents, software, and hardware for PID control — an overview and analysis of the current art // IEEE Control Systems Magazine. — 2006. — No. 26(1). — Pp. 42—54.

15. *Kuhn U.* A practice oriented setting rule for pid-controllers: The t-sum-rule // Automatisierungstechnische Praxis. — 1995. — Vol. 37. — No. 5. — Pp. 10—16.

16. *Schaedel H. M.* A new method of direct PID controller design based on the principle of cascaded damping ratios // European Control Conference (ECC). — IEEE, 1997. — Pp. 1265—1271.

17. *Ang K., Chong G., Li Y.* PID control system analysis, design, and technology // IEEE Trans. Control System Technology. — 2005. — Vol. 13. — pp. 559—576.

18. *Allaoua B., Gasbaoui B., Abderrahamani A.* Neuro-Fuzzy DC Motor speed Control Using Particle Swarm Optimization // Leonaro Electronic Journal of Practices and Technologies. — 2009. — № 15. — pp. 1—18.

19. *Maher M. F.* Algreer, Design fuzzy self tuning of PID controller for chopper-fed dc motor drive // Al-Rafidain engineering. — 2008. — Vol. 16. — Pp. 54—66.

20. *Sundareswaran K., Vasu M.* Genetic tuning of PI controller for speed control of DC motor drive // Industrial Technology 2000. Proceedings of IEEE International Conference on. — IEEE, 2000. — Vol. 1. — Pp. 521—525.

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

22. *Zhang S., Zhou X., Yang L.* Adaptive PID regulator based on neural network for DC motor speed control. Proc. IEEE Conf. Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011. — Pp. 1950—1953.

23. *Zhang Jing, et al.* PID neural network control of hydraulic roll gap control system. 2012 International Conference on Measurement, Information and Control (MIC). — IEEE, 2012. — Vol. 2. — Pp. 791—795.

24. *Еременко Ю.И.*, *Полещенко Д.А.*, *Глущенко А.И.* О разработке метода определения значений задержек входных сигналов нейронной сети при реализации нейросетевого оптимизатора параметров ПИ-регулятора // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2015. — № 10. — С. 157—168.

25. *Еременко Ю.И.*, *Глущенко А.И.* О разработке метода выбора структуры нейронной сети для решения задачи адаптации параметров линейных регуляторов // Управление большими системами. — 2016. — Т. 62. — С. 75—123.

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

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Еременко Юрий Иванович[1] — доктор технических наук, профессор, e-mail: erem49@mail.ru,
Глущенко Антон Игоревич[1] — кандидат технических наук, доцент, e-mail: strondutt@mail.ru,
Петров Владислав Анатольевич[1] — аспирант, e-mail: 79040882508@ya.ru,
[1] Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал), НИТУ «МИСиС».

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 11, pp. 101–112.

UDC 004.89:62-503.57

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

ADAPTIVE ADJUSTMENT OF PROPORTIONAL–INTEGRAL ACTION VELOCITY CONTROL ON DC DRIVE PHYSICAL MODEL

The subject of this research is an adaptive control system development for DC motors of ore mining and smelting facilities. A brief analysis of classical and artificial intelligence methods to solve this problem is made. A neural tuner is proposed to be used in a DC motor speed control loop to adjust a PI-controller. The tuner combines advantages of expert systems and neural networks. A tuner rule base based on process automation engineer experience is developed. It is able to function when speed setpoint signal is a ramp function with saturation. The base defines both the moments when to teach a neural network and what learning rate value to be used. The network outputs are KP and KI values. LabVIEW software is chosen to implement two-loop control system of a DC motor based on Quanser DCMCT. The speed and armature current PI-controllers parameters are calculated according to technical and symmetrical optimums respectively. Two sets of experiments are arranged. The first one includes nine experiments with nonoptimal speed controller parameters KP and KI. The task is to tune them back to calculated ones. The second set includes two experiments with changed DC motor inertia moment value. The task is to find new speed controller parameters values. Obtained results analysis allows to conclude that the neural tuner keeps the demanded transient quality in the speed control loop irrespective to the motor parameters change. In its turn, that leads to the drive energy consumption reduction by 1%. So the experiments show the effectiveness of the proposed method.

Key words: neural network, rule base, tuner, DC drive, adaptive control system, proportional-integral controller, LabVIEW.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-101-112

AUTHORS

Eremenko Yu.I.[1], Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: erem49@mail.ru,
Glushchenko A.I.[1], Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: strondutt@mail.ru,

Petrov V.A.[1], Graduate Student, e-mail: 79040882508@ya.ru,
[1] Stary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov,
National University of Science and Technology «MISiS» branch, 309530, Stary Oskol, Russia.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was conducted with financial support of applied scientific research by the Ministry of education and science of the Russian Federation, agreement № 14.575.21.0133 (RFMEFI57517X0133).

REFERENCES

1. Sarvarov A.S. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2011, no 3, pp. 8—11.
2. Eremin A.V., Fedorov O.V., Shevyrev Yu.V. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2010, no 3—3, pp. 38—43.
3. Khramshin V.R. *Vestnik IGEU*. 2012, no 6, pp. 100—104.
4. Vinogradov K.M. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*. 2016, vol. 16, no 1, pp. 42—46.
5. Omel'chenko E.Ya., Kozin A.N., Makolov V.N., Bovshik P.A., Popov S.N. *ES i K*. 2014, no 1 (22), pp. 43—46.
6. Golovin V.V., Kosenkov A.V., Razvorotnev V.P. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. 2010, no 3—2, pp. 149—156.
7. Stashinov Yu.P. On the issue of control system adjustment of a direct current drive on the modular optimum. Part 1. *Russian Electrical Engineering*. 2016, no 87.1. Pp. 1—5.
8. Stashinov Yu.P. On the issue of control system adjustment of a direct current drive on the modulus optimum. Part 2. *Russian Electrical Engineering*. 2016, no 87.3. Pp. 125—129.
9. Aleksandrov A.G., Palenov M.V. *Avtomatika i telemekhanika*. 2014, no 2, pp. 16—30.
10. Shubladze A.M., Kuznetsov S.I. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*. 2007, no 2, pp. 15—17.
11. Rotach V.Ya., Kuzishchin V.F., Petrov S.V. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*. 2009, no 11, pp. 9—12.
12. Alexandrov A.G., Palenov M.V. *Self-tuning PID-I controller. Proc. 18th IFAC World Congress*, Milano, Italy, 2011. Pp. 3635—3640.
13. Leva A., Cox C., Ruano A.E. Hands-on PID autotuning: a guide to better utilisation. *IFAC Professional Brief*. Laxenburg: IFAC, 2002. 84 p.
14. Li Y., Ang K., Chong C. Patents, software, and hardware for PID control an overview and analysis of the current art. *IEEE Control Systems Magazine*. 2006. No. 26(1). Pp. 42—54.
15. Kuhn U. A practice oriented setting rule for pid-controllers: The t-sum-rule. *Automatisierungstechnische Praxis*. 1995. Vol. 37. No. 5. Pp. 10—16.
16. Schaedel H.M. A new method of direct PID controller design based on the principle of cascaded damping ratios. *European Control Conference (ECC)*. IEEE, 1997. Pp. 1265—1271.
17. Ang K., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology. *IEEE Trans. Control System Technology*. 2005. Vol. 13. pp. 559—576.
18. Allaoua B., Gasbaoui B., Abderrahamani A. Neuro-Fuzzy DC Motor speed Control Using Particle Swarm Optimization. *Leonaro Electronic Journal of Practices and Technologies*. 2009, no 15. pp. 1—18.
19. Maher M.F. Algreer, Design fuzzy self tuning of PID controller for chopper-fed dc motor drive. *Al-Rafidain engineering*. 2008. Vol. 16. Pp. 54—66.
20. Sundareswaran K., Vasu M. Genetic tuning of PI controller for speed control of DC motor drive. *Industrial Technology 2000. Proceedings of IEEE International Conference on. IEEE*, 2000. Vol. 1. Pp. 521—525.
21. Xia C. et al. Speed control of brushless DC motor using genetic algorithm based fuzzy controller. *Proceeding of the 2004 International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation*, Chengdu, China, 3rd edn. A Treatise on Electricity and Magnetism. 2004. Vol. 2. Pp. 68—73.
22. Zhang S., Zhou X., Yang L. Adaptive PID regulator based on neural network for DC motor speed control. *Proc. IEEE Conf. Electrical and Control Engineering (ICECE)*, 2011. Pp. 1950—1953.
23. Zhang Jing, et al. PID neural network control of hydraulic roll gap control system. *2012 International Conference on Measurement, Information and Control (MIC)*. IEEE, 2012. Vol. 2. Pp. 791—795.
24. Eremenko Yu.I., Poleshchenko D.A., Glushchenko A.I. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*. 2015, no 10, pp. 157—168.
25. Eremenko Yu.I., Glushchenko A.I. *Upravlenie bol'shimi sistemami*. 2016. T. 62, pp. 75—123.
26. Eremenko Yu.I., Glushchenko A.I., Petrov V.A. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2016, no 3 (65), pp. 62—68.