УДК 004.89 + 669.162

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

О ПРИМЕНЕНИИ НЕЙРОСЕТЕВОГО НАСТРОЙЩИКА ПАРАМЕТРОВ ПИ-РЕГУЛЯТОРА НА ТЕПЛОВЫХ ОБЪЕКТАХ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ В РЕЖИМЕ ОТРАБОТКИ ВОЗМУЩЕНИЙ*

Рассмотрена проблема адаптации параметров ПИ-регулятора для отработки возмущений, действующих на систему управления. Проведен краткий анализ современного состояния адаптивных систем. Адаптацию предложено осуществлять с помощью нейросетевого настройщика, включающего три нейронных сети, отвечающих за вычисление коэффициентов KP, KI для переходных процессов при нагреве, охлаждении объекта управления и отработке возмущений соответственно. Описана структура предлагаемой системы: структура нейронной сети, функции активации нейронов скрытого и выходного слоя. Представлена функциональная схема предлагаемой системы. На данный момент нейросетевой настройщик параметров ПИ-регулятора реализован в пакете математического моделирования Matlab, что делает невозможным его использование на реальном производстве. Одной из целей работы является реализация нейросетевого настройщика на базе микроконтроллерной техники, а именно контроллеров семейства Simatic s7-300/400 фирмы Siemens, широко распространенных на действующих тепловых объектах горнометаллургической отрасли. Приведено описание программной реализации, с учетом особенностей семейства контроллеров S7-300/400. Представлены результаты проведения сравнительного эксперимента на лабораторной муфельной печи в режиме отработки возмущения.

Ключевые слова: нейросетевой настройщик, адаптивные системы, тепловые объекты управления, отработка возмущающих воздействий, нейронные сети, ПИ-регулятор, Siemens Simatic S7-300/400.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-122-133

На сегодняшнем этапе развития средств автоматизации и микроконтроллерной техники, достигнут тот уровень, при котором техническая модернизация в виде замены микроконтроллеров и датчиков не приводит к существенному улучшению качества регулирования. Одной из причин является использование на большей части промышленных производств ПИ и ПИД регуляторов в контурах управления [1—2]. Такие регуляторы являются линейными, при этом объекты управления по своей природе, в большинстве случаев, существенно нелинейны [3]. Результатом использования линейного регулятора при управлении

* 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. № 12. С. 122–133.
© Ю.И. Еременко, А.И. Глущенко, А.В. Фомин. 2017.

нелинейным объектом является снижение качества процесса управления, что приводит к повышенному энергопотреблению и увеличении доли брака.

Одним из способов решения данной проблемы, является использование оптимальных [4—6] и адаптивных [7—13] систем управления. Одним из актуальных направлений в построении подобного класса систем, является разработка методов построения адаптивных систем, производящих подстройку параметров ПИ или ПИД регулятора в реальном масштабе времени.

Интерес к данному направлению объясняется следующими факторами: упрощенная интеграция адаптивной системы в уже действующие контура управления; низкая стоимость внедрения относительно классических оптимальных и адаптивных систем; отсутствие необходимости переобучения технологического и обслуживающего персонала ввиду понятного работникам ПИД-закона управления в качестве базиса системы.

В рассматриваемом классе тепловых объектов управления горно-металлургического комплекса (нагревательные печи, обжиговые машины и пр.), можно выделить следующие технологические и организационные причины, приводящие к необходимости настройки ПИД-регулятора:

- изменение состояния теплотехнологических агрегатов — износ футеровки, выход из строя части горелок агрегатов;
- изменение свойств используемого топлива: колебания теплотворных свойств газа горения;
- зачастую, настройка регулятора проводится единожды при пусконаладочных работах и не меняется в процессе эксплуатации;
- изменение производительности объекта управления, его интенсификация сверх нормативной.

В виду действия вышеперечисленных причин, состояние ОУ может значительно измениться, что, с учетом неизменной настройки регулятора, может привести к перерасходу энергоресурса и увеличению доли брака.

В классе оперативных методов настройки ПИД-регуляторов, можно условно выделить два направления:

- Классические методы [10—12], основой которых является первичная идентификация объекта управления с последующим вычислением параметров регулятора. Главной сложностью применения данного класса методов, является сложность построения и поддержания в актуальном состоянии математической модели объекта в условиях непрерывного производства. В частности, при использовании тестовых сигналов, подаваемых в канал управления, результаты идентификации даже для сходных начальных условий могут существенно различаться. При этом для подачи тестовых сигналов необходимо дожидаться технологической паузы, так как такой сигнал может нарушить действующий технологический режим.
- Интеллектуальные методы, в частности, экспертные системы [14], нечеткая логика [15—18], нейронные сети [18—22]. Интерес к использованию этих методов определяется тем фактом, что в реальности настройка регулятора инженером АСУ ТП осуществляется на основе его личных знаний, опыта, способности предвидеть развитие текущей ситуации, при этом ему не требуется математическую модель ОУ. Все это возможно в некоторой степени учесть при использовании интеллектуальных методов, позволяющих моделировать поведение человека. При этом решения на базе нечеткой логики и экспертных систем жестко привязаны к динамике конкретного ОУ, так как у данных методов не предусмотрен механизм оперативного обучения.

Аппарат нейронных сети, в свою очередь, такими механизмами обладает, однако, обучение не требуется вести постоянно (что определяет проблему выбора моментов для проведения данной процедуры), так как возможны ситуации, когда необходимость настройки коэффициентов отсутствует. Также при использовании нейронных сетей актуальна задача выбора скоростей обучения.

Исходя из вышеперечисленных особенностей интеллектуальных методов, перспективным представляется направление построения систем автоматической оперативной настройки параметров ПИ- и ПИД-регуляторов на основе интегрирования в единую систему аппарата нейронных сетей (НС) и экспертных систем (ЭС). Данное решение позволит, используя ЭС, учитывать специфику объекта управления (такую как невозможность принудительного охлаждения печи), а использование аппарата НС позволит системе оперативно обучаться во время работы.

Системой с такими свойствами является нейросетевой настройщик параметров регуляторов [23], и представляющий собой нейросетевую надстройку над классическим ПИ-регулятором. Используя базу правил, определяющую необходимость настройки регулятора и скорость обучения отдельных нейронов сети, система производит обучение такой сети, выходами которой являются новые параметры ПИ-регулятора. Высокая эффективность работы настройщика достигнута при использовании данной системы при работе с тепловыми объектами в технологических режимах, в которых преобладают частые смены уставок [23], также положительные результаты получены в режиме отработки возмущающих воздействий [24]. Однако нейросетевой настройщик реализован в пакете математического моделирования Matlab, что делает невозможным интеграцию модуля нейросетевого настройщика в действующие системы управления без применения дополнительных аппаратных средств. Дальнейшей целью стала реализация данной системы на базе промышленных контроллеров. Данная реализация облегчит дальнейшее внедрение. Базовым был выбрано семейство контроллеров фирмы Siemens Simatic S7-300/400 из-за их широкого распространения и применения в горно-металлургическом комплексе.

Описание нейросетевого настройщика

Проведем краткое описание нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора. Он представляет собой надстройку над классическим контуром управления. Использование данной схемы позволяет, не внося существенных изменений в систему управления, организовать адаптивное управление процессом.

В нейросетевом настройщике реализована нейронная сеть с тремя наборами весовых коэффициентов и смещений. Данная реализация объясняется различным характером нелинейности объекта управления при нагреве и остывании. Для оптимального управления каждым из этих процессов необходимы свои значения коэффициентов регулятора. Функционирование на одном наборе весов приводит к подбору неоптимальных параметров и ухудшению переходного процесса [2, 23]. Переключения между различными наборами весовых коэффициентов происходят при смене температурной уставки, и по знаку разности между новой и предыдущей уставкой определяется тип процесса — охлаждение или остывание. Третий набор весовых коэффициентов служит для отработки возмущающих воздействий. Функциональная схема полученной системы показана на рис. 1.

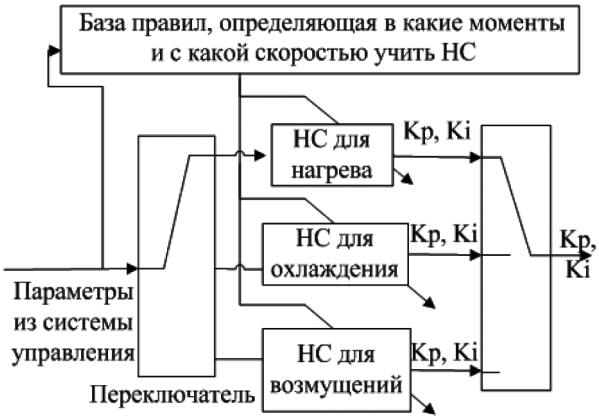

Рис. 1. Функциональная схема нейросетевого настройщика

Нейронная сеть, используемая в структуре нейросетевого настройщика, представляет собой трехслойную сеть прямого распространения сигнала, структура которой показа на рис. 2 [24]. Входами нейронной сети являются уставка по температуре, усредненный выход объекта управления, задержанный на 1 с, Δt и $2\Delta t$ с и выход с ПИ-регулятора. Коэффициент Δt напрямую связан с динамикой объекта управления, и в настоящее время предложен метод его определения [25]. В рассмотренном в статье эксперименте использовалось значение Δt = 20 с.

Скрытый слой представлен 15 нейронами с сигмоидальными функциями активации, в составе выходного слоя два нейрона с линейными функциями активации, отвечающими за коэффициенты Кп и Ки регулятора соответственно. Для оперативного обучения нейронной сети выбран классический метод обратного распространения ошибки [22] с незначительным видоизменением в виде использования различных значений скоростей обучения для скрытого слоя и каждого из нейронов выходного слоя. Это позволяет проводить настройку одного коэффициента регулятора, не затрагивая другой.

Для учета особенностей функционирования объекта управления и определения моментов, когда необходимо производить подстройку параметров регулятора, в нейросетевом настройщике была реализована база эмпирических правил. Основой для создания правил яв-

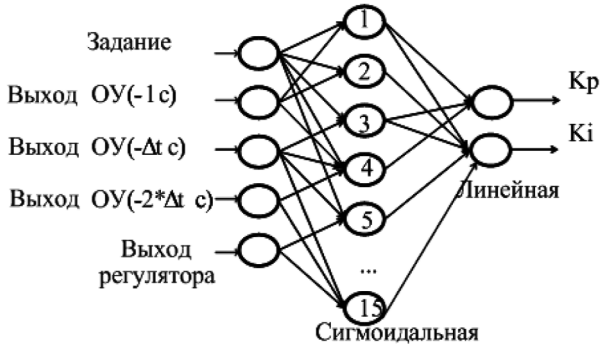

Рис. 2. Структура нейронной сети

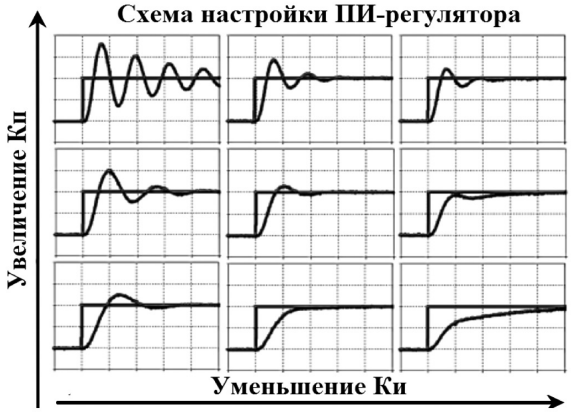

Рис. 3. Схема настройки регулятора

лялись эмпирические рекомендации по настройке ПИ-регулятора по качеству переходного процесса. На рис. 4 в качестве примера, показаны рекомендации по настройке ПИ-регулятора от фирмы Allen Bradley.

Рекомендации показывают, какой из каналов регулятора необходимо изменить в сторону увеличения или уменьшения, для получения более качественного переходного процесса. При этом количественное изменение параметров регулятора остается за специалистом, производящем настройку регулятора. В представленной системе ответственной за количественное изменение параметров регулятора является нейронная сеть, а база правил — формализованным логическим описанием эмпирических рекомендаций. Для отработки ступенчатых изменений задания такая база приведена в [23], для отработки возмущающих воздействий база приведена в [24].

Реализация нейросетевого настройщика на базе контроллера S7

Для реализации нейросетевого настройщика в контроллере S7-300/400 использовалось программное обеспечение Step7+SCL, позволяющее проводить комплекс работ по созданию и обслуживанию систем автоматизации. Дополнительный пакет SCL содержит в себе структурированный язык управления SCL (Structured Control Language), являющийся языком программирования высокого уровня для SIMATIC S7. Язык SCL

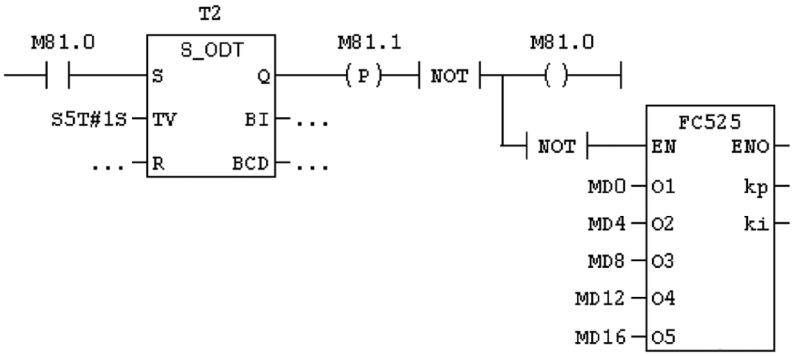

Рис. 4. Функциональная схема (LAD)

поддерживает характерную для STEP 7 блочную структуру, а также позволяет создавать S7-программы, включающие в себя фрагменты на базовых языках STL, LAD и FBD. Также язык SCL относится к языкам ST (Structured Text), широко применяемых в других контроллерах — OMRON, ОВЕН и других, что позволяет тиражировать решение на базе Simatic на другие платформы.

Одной из задач при программной реализации на базе S7 стала задача универсальности решения — программный продукт должен функционировать на всем семействе контроллеров Simatic Siemens 300/400 под управлением любого процессора. В связи с этим, учитывая особенности функционирования нейросетевого настройщика, выраженные в виде вызова раз в Δt секунд, при реализации на Simatic необходимо добиться столь же строго дискрета вызова. Также для расчета средних температур и задержанных сигналов, модуль нейросетевого настройщика должен вызываться 1 раз в секунду и выполняться единожды. Первоначальным вариантом реализации стала схема (в виде контактно-релейных схем языка LAD), приведенная на рис. 5.

Данная схема предполагает использование функции таймеров (S_ODT — таймер задержки включения) и блока, фиксирующего положительный фронт (-P-). При подаче на таймер в течение времени 1 с сигнала «1» происходит передача сигнала «1» далее на блок определения фронта сигнала. Выходом «P» является сигнал «1» в течение 1 такта, после чего единожды вызывается функциональный блок FC525, где реализован нейросетевой настройщик. Бит 81.0 становиться равным 1 и цикл повторяется.

Однако данная схема успешно функционировала лишь на эмуляторе контроллера (PLC-SIM) и при отладке программы на реальном контроллере возникли проблемы, суть которых заключалась в различии времени прерывания блока OB1 и частоты его вызова. Данная проблема приводила к различным временам вызова нейросетевого настройщика и ситуации, при которой за 1 с настройщик вызывался более чем 1 раз. Данная проблема не позволяет добиться строго дискрета вызова.

Рассматривалась возможность использования различного времени прерывания организационных блоков (OB 30—39), однако не все процессоры семейст-

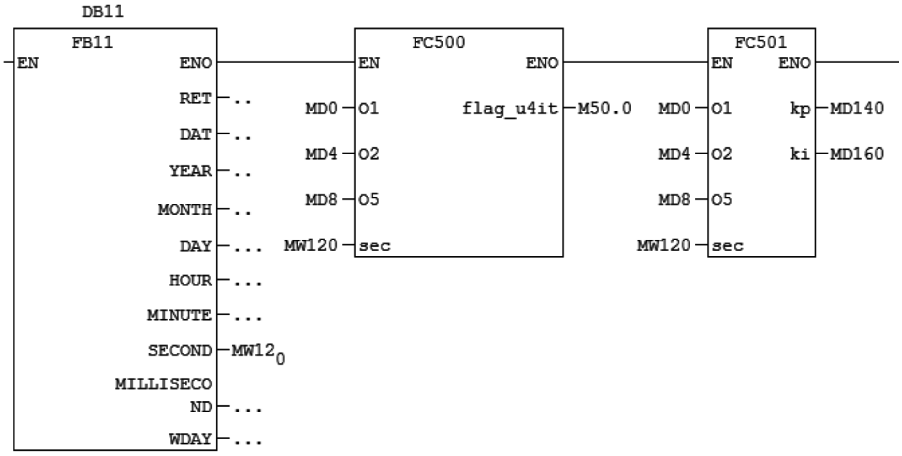

Рис. 5. Программная реализация нейросетевого настройщика в s7-300/400

Массивы данных переменных нейронастройщика

Название массива данных	Содержание массива
DB1	Весовые коэффициенты скрытого слоя нейронной сети для переходных процессов
DB2	Весовые коэффициенты выходного слоя нейронной сети для переходных процессов
DB3	Весовые коэффициенты скрытого слоя нейронной сети для отработки возмущающих воздействий
DB4	Весовые коэффициенты выходного слоя нейронной сети для отработки возмущающих воздействий
DB11	Массив для работы блока FB11
DB58	Переменные ПИД-регулятора FB58
DB77	Переменные нейросетевого настройщика

ва S7 300/400 поддерживают настройку времен прерывания, из-за чего не выполняется требование по универсальности программного продукта.

Для обеспечения строго дискрета было решено использовать системное время контроллера с использованием системной функции «SFC1». Данная функция позволяет получить системное время в формате DATA: год-месяц-неделя-день-час-минута-секунда-миллисекунда. Знание системного времени позволяет оперировать этими данными и реализовать таймер на их основе. Для этого на языке SCL был реализован функциональный блок FB11, выходами которого являются год, месяц, неделя, день, час, минута и секунды, но уже как отдельные переменные, а не единая переменная формата DATA. Дискрет вызова нейросетевого настройщика предполагает использование секунд, в связи с чем выход блока FB11 «SEC» записывается в область памяти MW120 для дальнейшего использования.

Непосредственно сам нейросетевой настройщик реализован в виде функций FC500 и FC501, написанных на языке SCL. Первоначально предполагалось реализовать нейросетевой настройщик одной функцией, однако, ввиду ограничений на размер функции FC в 16 Кбайт (для всего семейства процессов S7-300, за исключением CPU-317) было решено разделить программу на две части. В результате, в функции FC500 реализована база правил, а в FC501 — нейронная сеть и модуль обучения.

Одной из особенностей реализации, учитывающей требования языка программирования, является хранение переменных функции не в ее теле, а в отдельных массивах данных (таблица). Данное решение позволяет экономить пространство функций FC 500-501 и локального стека (L-стек) процессора.

В результате, готовый участок программы приведен на рис. 5. Здесь Fb11 — блок расчета системного времени, выходом является текущая секунда, записываемая в участок меркерной памяти MW120, FC500-501 — модуль нейросетевого настройщика, входами в который являются значение температуры (MD4), выход с ПИ-регулятора (MD8) и уставка по температуре из SCADA системы (MD0).

Выходом нейросетевого настройщика являются коэффициенты $K_п$ и $K_и$ ПИ-регулятора. ПИД-регулятор реализован фирмой Siemens и представляет собой функциональный блок FB58. Так как ПИД-регулятор должен вызываться со строгим дискретом, блок FB58 реализован в организационном блоке OB35, что при-

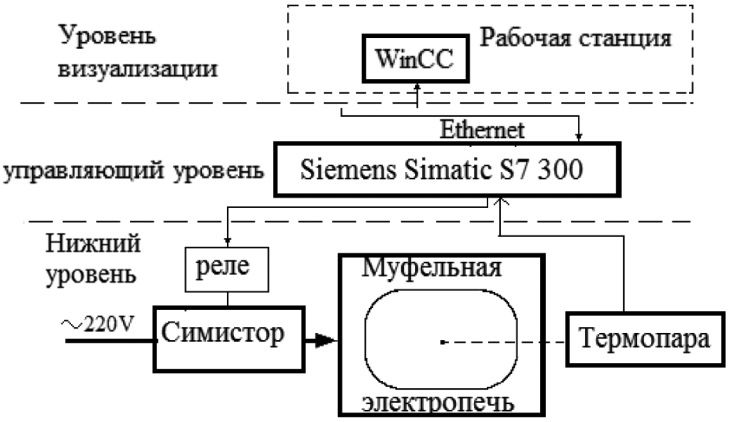

Рис. 6. Функциональная схема управления муфельной печью

водит к тому, что его вызов осуществляется раз в 100 мс.

Проведение эксперимента и полученные результаты

Для проверки работоспособности полученной системы было решено провести эксперимент на лабораторной муфельной печи СНОЛ. Система управления данным объектом показана на рис. 6.

При этом в прошлых работах [21, 23] нейросетевой настройщик был реализован в Matlab, контроллер S7-300 выполнял лишь задачу ПИ-управления. В данном же эксперименте, настройщик реализован уже в S7-300, в результате чего контроллер выполняет как задачу управления, так и задачу адаптации параметров ПИ-регулятора. Выбор муфельной печи не случаен, так как ее математическая модель, полученная в результате идентификации, представляет собой два апериодических звена первого порядка и звено запаздывания (1). При этом большинство тепловых ОУ описываются аналогичными звеньями [3], что позволяет рассматривать данную печь как физическую модель одной из зон обжиговой машины, на которую другие зоны оказывают возмущающее воздействие из-за разности температур в зонах.

$$W(s) = \frac{20,72}{1636s+1} * \frac{1}{69,4s+1} * e^{-63,8s} \quad (1)$$

Эксперимент проводился для отработки возникающих возмущений:

• Муфельная печь выводилась на уставку 300 °С (в другом опыте — 500 °С). По завершению переходного процесса и перехода печи в установившейся режим на печь подавались возмущения двух видов. Возмущение типа «А» представляло собой снижение напряжения питания на ТЭН с 220 В до 200 В. Данное возмущение аналогично подаче ступенчатого воздействия в канал управления. Возмущение типа «Б» представляет собой открытие дверцы муфельной печи, что эквивалентно подаче ступенчатого возмущающего воздействия после объекта управления.

• На первом этапе отработка возмущающих воздействий велась ПИ-регулятором со статическими коэффициентами, подобранными для оптимального переходного процесса без применения нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора. На втором этапе действующие возмущения отрабатывались ПИ-регулятором с использованием нейросетевого настройщика. В результате получены следующие графики, представленные на рис. 7.

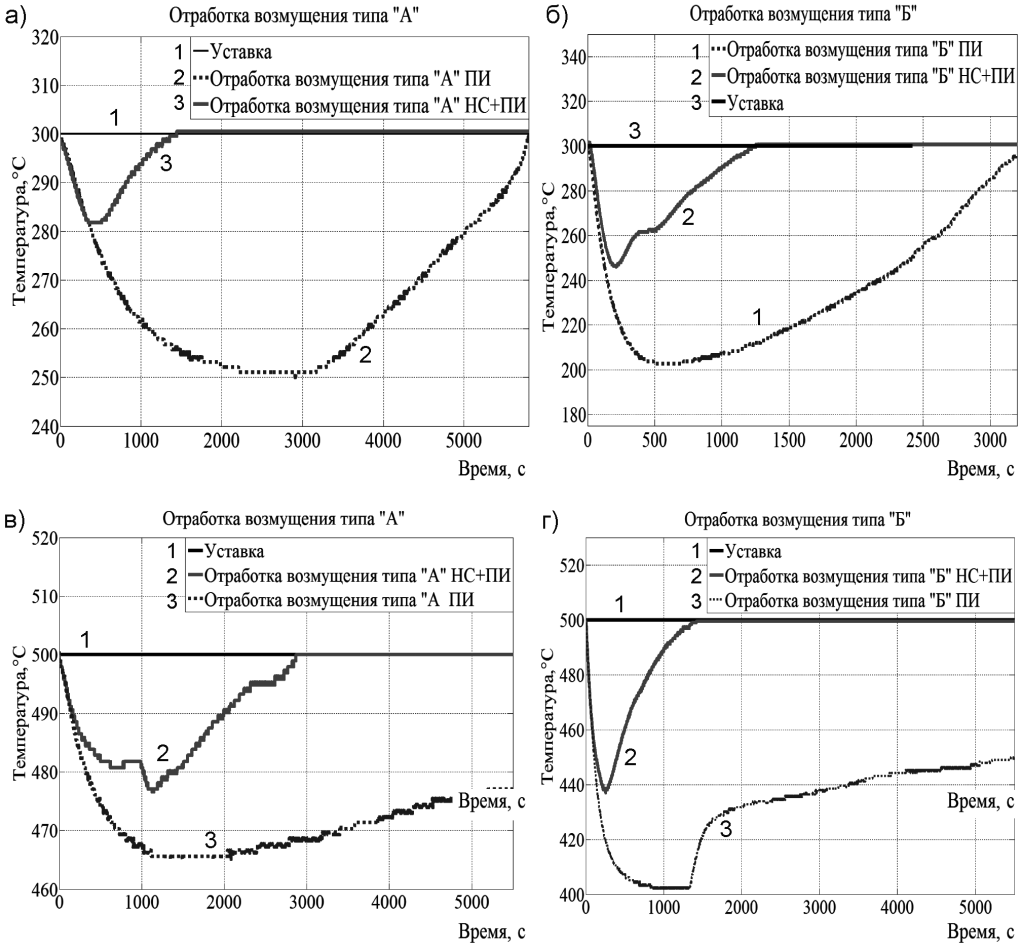

Рис. 7. Графики отработки возмущающих воздействий типа А (а, в) и Б (б, г)

Как видно из графиков, полученная система эффективно отрабатывает действующие на систему возмущающие воздействия, снижая время возращения на уставку минимум на 25% и 52% и снижая максимальную амплитуду ошибки минимум на 15% и 33% соответственно для возмущений типов «А» и «Б». Реализация на базе контроллера Simatic S7-300/400 позволит интегрировать полученный нейросетевой настройщик в уже действующие системы управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vilanova R., Visioli A.* PID Control in the Third Millennium. Lessons Learned and New Approaches. — London: Springer, 2012. — 595 p.

2. *Astrom K. J.*, Hagglund T. Advanced PID Control. — Research Triangle Park: The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. — 461 p.

3. *Mimura K., Shiotsuki T.* Experimental study of PID auto-tuning for unsymmetrical processes. Proceedings of ICCAS-SICE 2009. — IEEE, 2009. — Pp. 2967—2971.

4. *Салихов З. Г., Арунянц Г. Г., Рутковский А. Л.* Системы оптимального управления сложными технологическими объектами. — М.: Теплоэнергетик, 2004. — 496 с.

5. *Оморов Т. Т., Джолдошев Б. О.* Краткий обзор методов анализа и синтеза нелинейных САУ // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. — 2012. — № 26. — С. 172—183.

6. *Романова И. К.* Применение аналитических методов к исследованию парето-оптимальных систем управления // Наука и образование. — 2014. — № 4. — С. 238—266. DOI: 10.7463/0414.0704897.

7. *Morse A. S.* Global stability of parameter-adaptive control systems // IEEE Trans. on Automat. Control. — 1980. — Vol. 25. — No 3. — Pp. 433—439.

8. *Колюбин С. А., Ефимов Д. В., Никифоров В. О., Бобцов А. А.* Двухканальное адаптивное гибридное управление соотношением воздух-топливо и крутящим моментом автомобильных двигателей // Автоматика и телемеханика. — 2012. — № 11. — С. 42—59.

9. *Narendra K. S., Valavani L. S.* Stable adaptive controller design — direct control // IEEE Trans. on Automat. Control. — 1978. — Vol. 23. — No.4. — Pp. 570—583.

10. *O'Dwyer A.* Handbook of PI and PID controller tuning rules. London, UK: Imperial college press, 2009.

11. *Chien K. L., Hrones J. A., Reswick J. B.* On the Automatic Control of Generalized Passive Systems // Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. — 1952. — Vol. 74. — Pp. 175—185.

12. *Ротач В. Я.* Адаптация в системах управления технологическими процессами // Промышленные АСУ и контроллеры. — 2005. — № 1. — С. 4—10.

13. *Alexandrov A. G., Palenov M. V.* Self-tuning PID-I controller // Proceedings of the 18th IFAC World Congress. Milano, Italy, 2011. — Pp. 3635—3640.

14. *Begum K. G., Rao A. S., Radhakrishnan T. K.* Maximum sensitivity based analytical tuning rules for PID controllers for unstable dead time processes. Chemical Engineering Research and Design, 2016, vol. 109, pp. 593—606.

15. *Кудинов Ю. И., Келина А. Ю.* Упрощенный метод определения параметров нечетких ПИД регуляторов // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2013. — № 1. — С. 12—22.

16. *Андриевская Н. В., Резников А. С., Черанев А. А.* Особенности применения нейро-нечетких моделей для задач синтеза систем автоматического управления // Фундаментальные исследования. — 2014. — № 11—7. — С. 1445—1449.

17. *Шулаева Е. А., Шулаев Н. С.* Система управления температурными режимами электродинамического реактора // Нефтегазовое дело. — 2013. — № 11—4. — С. 133—136.

18. *Кудинова Ю. И., Кудинов И. Ю., Келина А. Ю.* Адаптивный нечеткий регулятор температуры отжига стали в электрической колпаковой печи // Промышленные АСУ и контроллеры. — 2005. — № 9. — С. 37—40.

19. *Effati S., Pakdaman M.* Optimal control problem via neural networks // Neural Computing and Applications. — 2013. — Vol. 23. — № 7—8. — С. 2093—2100.

20. *Егупов Н. Д.* Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления. изд. 2-е. — М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. — 744 с.

21. *Chen J., Huang T.* Applying neural networks to on-line updated PID controllers for nonlinear process control // J. of Process Control. — 2004. — № 14. — Pp. 211—230.

22. *Omatu S., Khalid M., Yusof R.* Neuro-Control and its Applications. — London: Springer, 1995. — 255 p.

23. *Еременко Ю. И., Полещенко Д. А., Глущенко А. И.* О применении нейросетевого оптимизатора параметров ПИ-регулятора для управления нагревательными печами в различных режимах работы // Управление большими системами. — 2015. — Вып. 56. — С. 143—175.

24. *Еременко Ю. И., Глущенко А. И., Фомин А. В.* Применение нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора нагревательной печи для отработки возмущающих воздействий различных типов // Системы управления и информационные технологии. — 2016. — № 2 (64). — С. 86—91.

25. *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 (116). — С. 157—168. 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,
Фомин Андрей Вячеславович[1] — аспирант,
e-mail: verner444@yandex.ru,
[1] Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал),
НИТУ «МИСиС».

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 12, pp. 122–133.

UDC 004.89 + 669.162

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

APPLICATION OF NEURAL NETWORK CUSTOMIZER FOR THE PROPORTIONAL-INTEGRAL CONTROLLER IN THE MODE OF RESPONSE TO DISTURBANCES AT THERMAL UNITS IN THE MINING AND METALLURGICAL INDUSTRY

PI-controller parameters adjustment to reject disturbances acting on a control system is the scope of this article. Short review of methods to solve this problem is made. A neural tuner is chosen to do that. It includes three neural networks, which are responsible for KP, KI parameters calculation for both transients types (heating and cooling) and disturbances rejection respectively.

The tuner structure is described. Particularly, the neural networks structure and activation functions of hidden and output layers are shown. Earlier the neural tuner has been implemented in Matlab.

That fact makes its usage in industry rather difficult. So one of the aims of this research is to implement the tuner by means of a programmable logic controller only. Siemens S7-300/400 controllers are chosen for this task, as they are widely used to control processes in mining processing industry.

The tuner software implementation is described. It takes into account different features of the controllers chosen. Experiments are conducted to estimate effectiveness of the control system ability to reject disturbances acting on a laboratory muffle furnace.

The results obtained by the system with the tuner are compared to the ones obtained by the system with a conventional PI-controller. Having analyzed the results, the conclusion could be made that the tuner has been successfully implemented using programmable logic controller only. It allows to reject disturbances effectively and could be applied to industry.

Key words: neural tuner, adaptive control, heating plants, disturbances rejection, neural network, PI-controller, Siemens Simatic S7-300/400.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-122-133

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,
Fomin A.V.[1], Graduate Student,
e-mail: verner444@yandex.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. Vilanova R., Visioli A. *PID Control in the Third Millennium. Lessons Learned and New Approaches*. London: Springer, 2012. 595 p.

2. Astrom K.J., Hagglund T. *Advanced PID Control. Research Triangle Park: The Instrumentation, Systems, and Automation Society*, 2006. 461 p.

3. Mimura K., Shiotsuki T. *Experimental study of PID auto-tuning for unsymmetrical processes. Proceedings of ICCAS-SICE 2009*. IEEE, 2009. Pp. 2967—2971.

4. Salikhov Z.G., Arunyants G.G., Rutkovskiy A.L. *Sistemy optimal'nogo upravleniya slozhnymi tekhnologicheskimi ob"ektami* (Optimal control systems of complex technological objects), Moscow, Teploenergetik, 2004, 496 p.

5. Omorov T.T., Dzholdoshev B.O. *Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova*. 2012, no 26, pp. 172—183.

6. Romanova I.K. *Nauka i obrazovanie*. 2014, no 4, pp. 238—266. DOI: 10.7463/0414.0704897.

7. Morse A.S. Global stability of parameter-adaptive control systems. *IEEE Trans. on Automat. Control*. 1980. Vol. 25, no 3, pp. 433—439.

8. Kolyubin S.A., Efimov D.V., Nikiforov V.O., Bobtsov A.A. *Avtomatika i telemekhanika.* 2012, no 11, pp. 42—59.

9. Narendra K.S., Valavani L.S. Stable adaptive controller design direct control. *IEEE Trans. on Automat. Control*. 1978. Vol. 23. No.4. Pp. 570—583.

10. O'Dwyer A. *Handbook of PI and PID controller tuning rules*. London, UK: Imperial college press, 2009.

11. Chien K.L., Hrones J.A., Reswick J.B. On the Automatic Control of Generalized Passive Systems. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*. 1952. Vol. 74. Pp. 175—185.

12. Rotach V.Ya. *Promyshlennye ASU i kontrollery*. 2005, no 1, pp. 4—10.

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

14. Begum K.G., Rao A.S., Radhakrishnan T.K. Maximum sensitivity based analytical tuning rules for PID controllers for unstable dead time processes. *Chemical Engineering Research and Design*, 2016, vol. 109, pp. 593—606.

15. Kudinov Yu.I., Kelina A.Yu. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2013, no 1, pp. 12—22.

16. Andrievskaya N.V., Reznikov A.S., Cheranev A.A. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2014, no 11—7, pp. 1445—1449.

17. Shulaeva E.A., Shulaev N.S. *Neftegazovoe delo*. 2013, no 11—4, pp. 133—136.

18. Kudinova Yu.I., Kudinov I.Yu., Kelina A.Yu. *Promyshlennye ASU i kontrollery*. 2005, no 9, pp. 37—40.

19. Effati S., Pakdaman M. Optimal control problem via neural networks. *Neural Computing and Applications*. 2013. Vol. 23, no 7—8, pp. 2093—2100.

20. Egupov N.D. *Metody robastnogo, neyro-nechetkogo i adaptivnogo upravleniya*. izd. 2-e (Methods of robust, neuro-fuzzy and adaptive control, 2nd edition), Moscow, Izd-vo MGTU im. Baumana, 2002, 744 p.

21. Chen J., Huang T. Applying neural networks to on-line updated PID controllers for nonlinear process control. *J. of Process Control*. 2004, no 14. Pp. 211—230.

22. Omatu S., Khalid M., Yusof R. *Neuro-Control and its Applications*. London: Springer, 1995. 255 p.

23. Eremenko Yu.I., Poleshchenko D.A., Glushchenko A.I. *Upravlenie bol'shimi sistemami*. 2015, issue 56, pp. 143—175.

24. Eremenko Yu.I., Glushchenko A.I., Fomin A.V. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2016, no 2 (64), pp. 86—91.

25. Eremenko Yu.I., Poleshchenko D.A., Glushchenko A.I. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*. 2015, no 10 (116), pp. 157—168.