

# ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАСТРОЙКИ ОТДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПИ-РЕГУЛЯТОРА С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕВОГО НАСТРОЙЩИКА ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ НАГРЕВАТЕЛЬНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Глущенко А. И.<sup>1</sup>

(Старооскольский технологический институт  
им. А.А. Угарова (филиал) ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС»,  
Старый Оскол)

*Предложена модифицированная версия разработанного ранее нейросетевого настройщика для придания ему возможности компенсации возмущений, действующих на нагревательные объекты управления в установившемся режиме. Усовершенствована база правил настройщика. Проведены исследования по эффективности применения настройщика (в целом) и целесообразности настройки коэффициента И-канала регулятора (в частности) для компенсации ступенчатых и импульсных возмущений ограниченной амплитуды, действующих на сигнал управления и выход объекта управления, в качестве которого выбрана типовая нагревательная печь СНОЛ 40/1200. Применение настройщика позволило сократить время компенсации возмущений на 18,8%÷28,4% по сравнению с обычным ПИ-регулятором. Принято решение о настройке параметра И-канала для всех возмущений.*

Ключевые слова: адаптивное управление, компенсация возмущений, ПИ-регулятор, нагревательные объекты управления.

## 1. Введение

Проблема повышения энергоэффективности работы промышленных агрегатов является актуальной в настоящее время [7]. Особенно остро она стоит для энергоемких отраслей промышленности, таких как, например, металлургия [13]. Анализируя пути решения указанной проблемы, возможно сделать вывод о том, что совершенствование систем автоматического управления такими агрегатами представляется наиболее перспективным подходом по двум причинам [42]. Во-первых, подобное решение не потребует существенных капи-

---

<sup>1</sup> Антон Игоревич Глущенко, к.т.н., доцент (strondutt@mail.ru).

тальных затрат на модернизацию агрегатов. Во-вторых, современные программируемые логические контроллеры (ПЛК) обладают достаточной мощностью и объемом памяти для реализации на их базе вычислительно емких методов управления.

При этом наиболее часто в ПЛК применяется стандартный П-, ПИ- или ПИД-закон регулирования ввиду своей простоты, надежности и легкости реализации [1, 29]. Проблема заключается в том, что такие законы остаются линейными, в то время как сами объекты управления (ОУ) – нелинейные. Они изменяют значения своих параметров в процессе работы и подвержены действию возмущений. Например, нелинейность металлургических нагревательных печей вызвана изменениями задания по температуре и массы загруженного металла, действием возмущений типа открытия «шторы» печи для загрузки металла, отказом газовой горелки, изменением теплотворных свойств энергоносителя и влиянием соседних зон (для многозонных печей).

Одного постоянного набора значений параметров указанных регуляторов недостаточно для одновременного следования графику задания и компенсации упомянутых возмущений [29]. Это приводит к тому, что ни в одном режиме качество управления объектом не является оптимальным, что, в свою очередь, вызывает перерасход энергоносителя на выполнение технологического режима и существенные экономические потери ввиду высокой мощности объекта.

Решением данной проблемы является применение методов адаптивного и оптимального управления как для задачи отслеживания графика изменения задания, так и для компенсации действующих возмущений. Первая из упомянутых задач была рассмотрена автором в работах [9, 12]. Предметом же данной статьи является именно проблема компенсации возмущающих воздействий для нестационарных теплотехнических объектов, обладающих высокой мощностью потребления.

В частности, для решения данной задачи могут быть применены следующие методы:

1) модальное управление для настройки регулятора на подавление возмущений [3];

2) идентификация ОУ в режиме возмущений с построением адаптивного наблюдателя координат состояния [2, 4, 5, 26, 30];

3) подавление возмущений на основе применения принципа внутренней модели [14, 22, 45, 49, 50];

4) построение адаптивной системы на базе эталонной модели [21, 23, 31, 39, 48].

Подходы 1–3 требуют наличия точной модели ОУ, однако качественная идентификация является трудно осуществимой в условиях производства.

Четвертый подход требует выбора скорости изменения настраиваемых параметров регулятора (шага адаптации), а также решения уравнения Ляпунова. При этом не существует однозначных рекомендаций по выбору значений такого шага и элементов матрицы, записанной в правой части уравнения Ляпунова. Также нет четко установленной связи между упомянутыми параметрами и классическими критериями качества переходных процессов: перерегулирование, колебательность и т.д.

В целом же большинство данных подходов предполагает отказ от классического П-, ПИ- или ПИД закона регулирования. В то же время, согласно [15, 32, 44], более перспективным решением является не усложнение существующего закона управления, а оперативное переопределение его параметров с помощью настройщика, установленного в дополнение к самому регулятору. Поэтому в качестве базового предлагается использовать именно упомянутые выше законы.

Анализируя же применимость методов настройки П-, ПИ-, ПИД-регуляторов [1, 16, 24, 25, 29, 32, 35, 38, 43, 46] для решения задачи компенсации возмущений, возможно сделать вывод о том, что большая их часть также требует наличия модели ОУ или производит ее идентификацию прямо в процессе работы с помощью тестовых сигналов. Подобная идентификация не всегда является достаточно точной и может давать существенно отличающиеся результаты даже из сходных начальных условий. Кроме того, идентификация ОУ в режиме действия возмущения является даже более сложной задачей, поскольку момент возникновения возмущения может быть неизвестен заранее.

В то же время инженер АСУ ТП, не зная модель ОУ, может подстраивать параметры линейного регулятора уже после возникновения возмущения для более эффективного его подавления, например, увеличивая пропорциональный коэффициент регулятора  $K_p$  для уменьшения максимального отклонения контролируемой величины от задания или увеличивая интегральный коэффициент  $K_I$  для устранения статической ошибки. Решая данную задачу, он руководствуется своим опытом, знаниями, умением предвидеть ситуацию.

Данные способности могут быть в некоторой мере учтены путем применения интеллектуальных методов для подстройки параметров линейного регулятора. Так способностью обучаться и предвидеть развитие ситуации обладают нейронные сети [19, 20, 28, 34, 36, 47], а возможность работы со знаниями предоставляют экспертные системы [27, 33, 40]. В работе [17] отмечается перспективность комбинирования указанных методов для решения задач, подобных рассматриваемой.

Коллективом исследователей, в который входит автор данной работы, был предложен нейросетевой настройщик [9, 12], реализующий метод адаптивной подстройки параметров П- и ПИ-регуляторов в режиме реального времени, который сочетает в себе возможности двух упомянутых выше интеллектуальных методов и не требует модель ОУ. Он состоит из базы правил, отражающей опыт инженера АСУ ТП и определяющей, когда необходимо настраивать регулятор, и нейронной сети, которая, обучаясь оперативно, на своих выходах формирует значения параметров регулятора. Такая конфигурация позволяет решить указанные выше проблемы рассмотренных методов.

Нейросетевой настройщик в рамках [9, 12] был применен для поддержания требуемого качества переходных процессов в условиях изменения загрузки нагревательных печей при следовании графику задания. Его применение позволило снизить как время эксперимента, так и энергопотребление печи по сравнению с обычным ПИ-регулятором (Д-канал, в большинстве случаев, не используется для управления печами ввиду его подверженности действию помех [47]). Однако версия настройщика, описанная в данных работах, не способна компенсировать

возмущения, возникающие, в частности, в установившемся режиме работы ОУ, так как приведенные в [9, 12] правила срабатывают только в течение переходных процессов. То есть такой настройщик может компенсировать лишь возмущения, возникшие в течение переходных процессов. Поэтому представляется целесообразной его доработка для решения данной проблемы.

В [8] было предположено, что для эффективной компенсации возмущений необходимо модернизировать структуру настройщика, однако это не было основной целью указанного исследования. В [10] эта мысль получила свое развитие: было проведено два численных эксперимента по компенсации ступенчатых возмущений, действующих на модель нагревательной печи. При этом компенсация импульсных возмущений не рассмотрена, а это потребует переработки базы правил. Кроме того, структура нейронной сети может быть упрощена. Также не исследован вопрос о целесообразности настройки отдельных параметров регулятора для компенсации возмущений различных типов, не проведена апробация на реальной печи.

Поэтому цели данного исследования включают в себя:

1) доработку структуры нейронных сетей настройщика, а также содержимого базы правил для придания ему возможности эффективной компенсации ступенчатых и импульсных возмущений ограниченной амплитуды, подаваемых в канал управления и на выход нагревательного ОУ и возникающих, в частности, в установившемся режиме работы ОУ;

2) изучение вопроса о целесообразности настройки отдельных параметров ПИ-регулятора при компенсации упомянутых выше видов возмущений. Если настройка параметра  $K_I$  не будет приносить эффект ни для какого типа возмущения, то от нее возможно будет отказаться, упростив тем самым алгоритм работы настройщика;

3) апробация новой версии настройщика на лабораторной нагревательной печи, являющейся типовым нагревательным ОУ, широко применяемым в металлургии, машиностроении и других отраслях промышленности.

## 2. Постановка задачи

Объектом данного исследования является система управления типовой нагревательной печью, в которую включены линейный ПИ-регулятор и нейросетевой настройщик (рис. 1).

Обобщенный объект управления (сам объект управления, контрольно-измерительные приборы, исполнительные механизмы) для нагревательных печей (однозонных или каждой из зон многозонной печи) в большинстве случаев описывается двумя аperiодическими звеньями первого порядка (модели ОУ и термодпары) со звеном запаздывания (1).

$$(1) \quad W(s) = \frac{K}{T_1s + 1} \cdot \frac{1}{T_2s + 1} \cdot e^{-\tau \cdot s},$$

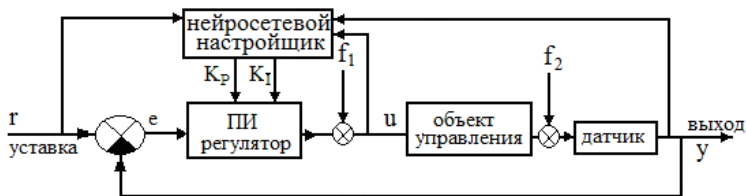


Рис. 1. Система управления с нейросетевым настройщиком  
( $r$  – задание;  $e$  – рассогласование;  $u$  – сигнал управления;  
 $y$  – выход ОУ;  $f_1$  и  $f_2$  – возмущающие воздействия)

где  $K$  – коэффициент усиления ОУ;  $T_1$  – постоянная времени ОУ, с;  $T_2$  – постоянная времени термодпары, с;  $\tau$  – время запаздывания, с. При этом значения всех этих параметров неизвестны. Здесь отсутствует описание исполнительного механизма (ИМ), поскольку для нагревательных печей постоянная времени ИМ существенно меньше постоянной времени самой печи.

$f_1$  и  $f_2$  – ступенчатые или импульсные возмущающие воздействия ограниченной амплитуды (выход из строя горелки, уменьшение теплотворности топлива, перетоки тепла между соседними зонами многозонной печи и др.). Ступенчатое возмущение для печи действует, пока не пройдет несколько переходных процессов, а затем  $f_i = 0$ ,  $i = 1, 2$ . Импульсное возмуще-

ние снимается в тот момент, когда вызванный им переходный процесс максимально отклоняется от значения задания. Такое возмущение является наиболее сложным для компенсации, поскольку к моменту достижения указанной выше точки переходного процесса регулятор успевает накопить необходимое управляющее воздействие для стабилизации температуры. И если в этот момент снять возмущение, то все накопленное управление оказывается избыточным, что приводит к максимально быстрому возврату температуры к уставке. Возмущения возникают в установившемся режиме работы печи.

Реальные промышленные печи обычно являются газовыми, что предполагает наличие контура управления подачей газа, а также ИМ в виде привода заслонки. В данном случае, как уже упоминалось выше, ИМ не рассматривается, так как в промышленных приложениях постоянная времени подобных заслонок на несколько порядков меньше  $T_1$ , что существенно снижает влияние контура газа на работу настройщика. Проверка данного тезиса была проведена в [11]. Это позволяет провести натурные эксперименты на муфельной электрической печи, где нагревательный элемент включается с помощью симисторов, постоянная времени которых пренебрежительно мала относительно постоянной времени печи. Их результаты могут быть перенесены и на задачи управления газовыми печами.

В (1) для реального ОУ  $T_1$  и  $K$  должны быть переменными величинами. Например,  $T_1$  может изменяться в зависимости от загрузки печи (для металлургических печей масса металла внутри печи может изменяться на 20-40% [6]). Значение  $K$  зависит от величины задания, теплотворности энергоносителя, качества работы нагревательных элементов или горелок.

Значение  $f_1$  ограничено сверху 25% от максимально возможного сигнала управления, а  $f_2$  является таким, что в результате его действия отклонение температуры от задания составляет максимум 20-25<sup>0</sup>С (в среднем 10-15<sup>0</sup>С). Значения выбраны согласно реальным данным с печей нагрева металла перед прокатом АО «Оскольский электрометаллургический комбинат».

Известны требования к качеству переходных процессов, в том числе вызванных возмущающими воздействиями. Основ-

ным из них является минимизация времени таких переходов при выполнении ограничений на значения перерегулирования, колебательности и статической ошибки. График уставок представляет собой набор ступенчатых изменений задания. Для выполнения данных требований в условиях нестационарности параметров ОУ, отсутствия его модели и влияния возмущений необходимо оперативно настраивать параметры регулятора  $K_p$ ,  $K_I$ .

ОУ уже функционирует под управлением ПИ-регулятора, и его коэффициенты изначально подобраны для одного из состояний объекта (или «в среднем» для всех состояний) для переходных процессов. Задачей является оперативная подстройка коэффициентов регулятора для минимизации времени компенсации возмущений типа  $f_1$  и  $f_2$ .

Для этого предлагается применить нейросетевой настройщик параметров линейных регуляторов (не требует модели ОУ).

### **3. Принцип организации нейросетевого настройщика с учетом наличия возмущений**

Схема нейросетевого настройщика изображена на рис. 2 (данная схема была приведена в [8], однако в указанном исследовании изучалась ее работа только для случаев изменения задания). Принцип его работы заключается в следующем. Нейронная сеть (НС) получает реальные данные о текущем состоянии регулируемого процесса. На своих выходах она вычисляет параметры регулятора. Сеть способна обучаться оперативно. Моменты времени, когда такое обучение необходимо производить, а также скорости обучения определяет база правил, отражающая опыт инженера АСУ ТП.

Для несимметричного ОУ [41] типа нагревательной печи управление ведется для двух отличающихся по своей динамике процессов: нагревание и охлаждение. Соответственно, для эффективного управления таким ОУ необходимо иметь две пары  $K_p$  и  $K_I$ , а не одну. Установлено [9], что по этой причине в структуру настройщика необходимо ввести две НС, каждая из которых отвечает за настройку регулятора для своего процесса.



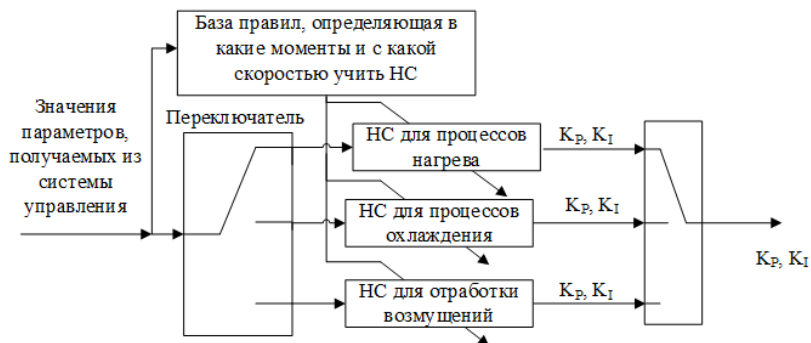


Рис. 2. Функциональная схема нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора

Для компенсации возмущающих воздействий, возникающих в установившемся режиме, в настройщик добавлена еще одна нейронная сеть. Если переходный процесс завершен, а затем разница значения уставки и выхода ОУ оказывается выше допустимой, то на ОУ в настоящее время действует возмущение, а настройщик переключается на данную сеть. Переключение между первыми двумя НС производится при смене задания.

Первичное обучение всех НС производится с помощью метода, приведенного в [12]. Он базируется на методе экстремального обучения [37] и позволяет добиваться того, что в момент запуска настройщика выходы всех его сетей будут равны параметрам регулятора, которые использовались в нем до внедрения настройщика. Оперативное обучение производится методом обратного распространения ошибки [9].

В работе [10] нейронные сети настройщика имели следующую структуру: 5 нейронов на входе – 15 скрытых нейронов ( $N_{hidden} = 15$ ) – 2 нейрона на выходе. Ее возможно сократить благодаря результатам, полученным в [9]. В данном исследовании сети имеют структуру 4-12-2 ( $N_{hidden} = 12$ ). Входными сигналами НС являются задание  $r(t)$ , выход ОУ в текущий момент  $y(t)$ , такт назад  $y(t - \Delta t)$  и значение управляющего воздействия с ПИ-регулятора  $u(t)$ . В скрытом слое используется сигмоидальная функция, в выходном – линейная. Настройщик вызывается раз в  $\Delta t$  секунд. Метод вычисления  $\Delta t$  предложен в [9].

База правил содержит в себе правила, имеющие следующую структуру: 1) условия – описание ситуаций, когда необходимо вести оперативное обучение НС; 2) следствия – эмпирические формулы для расчета скорости обучения первого  $\eta_1^{(2)}$  и второго  $\eta_2^{(2)}$  нейронов выходного слоя нейронной сети, ответственных за вычисление  $K_p$  и  $K_I$  соответственно. Это делает данные базы универсальными для указанных видов изменения задания для ОУ, подходящих под постановку задачи. Для ступенчатой смены заданий подробно данная база приведена в [12]. Усовершенствованная в рамках данного исследования база правил (в частности, в отличие от существующих разработок, в следствиях правил содержатся упомянутые выше эмпирические формулы) для компенсации возмущений приведена в п. 4. Для скрытого слоя используется постоянная скорость обучения  $\eta^{(1)} = 10^{-4}$ . Обоснование данного значения приведено в [9].

Важной особенностью является постоянная оценка выполнения достаточного критерия устойчивости рассматриваемой системы управления на основе предложенного автором подхода [8], что позволяет гарантировать, что полученная с помощью упомянутых эмпирических формул скорость обучения не будет чрезмерно высокой для нарушения достаточного условия устойчивости подобной системы управления.

Кроме того, необходимо обеспечить устойчивость обучения самих НС. Для этого используется подход В.А. Терехова [18].

Общий принцип работы настройщика изображен на рис. 3.

Для ввода настройщика в эксплуатацию потребуется:

1. Получить данные о текущих параметрах регулятора (использовавшихся до установки настройщика), пределах значений сигнала управления и выхода ОУ, данные о требуемом качестве переходных процессов. Определить число НС в настройщике: для несимметричных – три сети, для симметричных – две сети (одна из них – для возмущений).

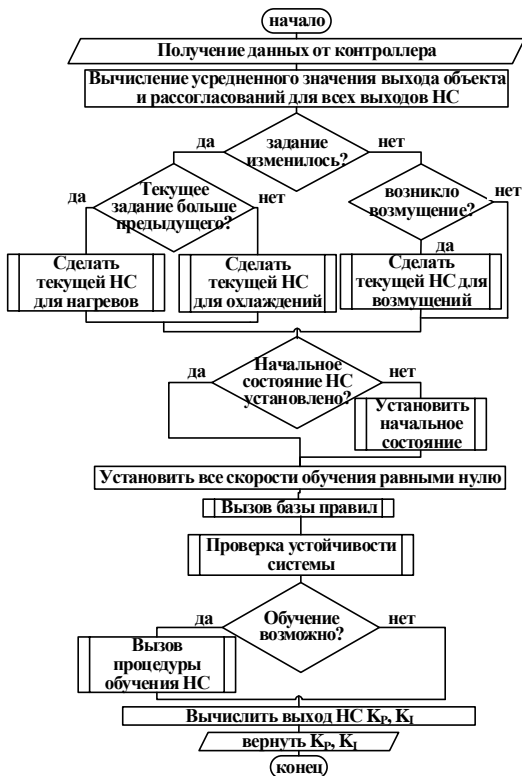


Рис. 3. Алгоритм работы настройщика

2. Получить сведения о форме изменения задания. Это позволит выбрать базу правил, в условия которых подставляются требуемые значения критериев качества переходных процессов. Базы правил являются универсальными для соответствующей формы изменения задания.

3. Определить структуру НС в соответствии с методом, приведенным в [9]. Для этого достаточно знать форму изменения задания и вид настраиваемого регулятора (П-, ПИ-).

4. Вычислить значение  $\Delta t$  согласно [9]. Для этого необходимо знать среднее время переходных процессов под управлением регулятора с текущими настройками. Это и позволит учесть динамику конкретного ОУ без его идентификации.

5. Инициализировать НС настройщика методом экстремального обучения. Для этого необходимо первые  $N_{hidden}$  тактов работы настройщика вычислять выход скрытого слоя его НС, а затем, решив систему линейных уравнений, определить матрицу весовых коэффициентов выходного слоя НС. При этом выход НС на  $(N_{hidden} + 1)$  такте совпадет с известными значениями параметров линейного регулятора, использовавшимися до установки настройщика в систему управления.

6. Подать на вход НС усредненные и нормированные данные с ОУ.

7. Обучать НС нейросетевого настройщика в оперативном режиме, производя оценку устойчивости и вычисление предельной скорости обучения.

#### **4. База правил для компенсации ступенчатых и импульсных возмущающих воздействий ограниченной амплитуды**

Для компенсации возмущающих воздействий потребовалось спроектировать отдельную базу правил, поскольку база, приведенная в [12], предназначена для работы в режиме изменения задания. Для такого режима характерно, например, уменьшение  $K_p$  при увеличении скорости переходного процесса выше допустимой по технологической инструкции. При компенсации возмущающих воздействий увеличение скорости переходного процесса в направлении отклонения от задания наоборот требует увеличения  $K_p$ . Это не единственное отличие, поскольку логика настройки параметров ПИ-регулятора для рассматриваемых режимов отличается.

##### **4.1. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВОЗМУЩЕНИЯ**

1. Если переходный процесс уже достиг установившегося режима, а затем оказалось, что  $|r(t) - y(t)| > S\% \cdot |r(t) - r_{old}|$  ( $r_{old}$  – предыдущее значение задания, значение  $S\%$  определяется технологической инструкцией), то возникло возмущение. Используемые в настоящий момент веса и смещения нейронной сети (для процесса нагрева или охлаждения) сохраняются.

Возникшее возмущение компенсируется путем применения описанных ниже правил. При смене уставки сохраненные параметры сети вновь загружаются в нее, а текущие веса и смещения отбрасываются. Дальнейшие правила могут сработать, только если управляющее воздействие  $u(t)$  находится в допустимых пределах ( $u_{min}; u_{max}$ ) (для экспериментов в данном исследовании этот интервал был определен как (0; 100)). Если  $u(t)$  находится вне границ данного интервала, то никакая настройка параметров не улучшит переходный процесс, поскольку печь или и так уже используется на полную мощность, или не нагревается совсем.

#### 4.2. ПРАВИЛА ДЛЯ КОРРЕКЦИИ $K_P$

2. Если переходный процесс, причиной которого является возмущение, еще не достиг своего экстремума  $y_d$ , И  $|y(t) - y(t - \Delta t)| > N_n$  ( $N_n$  – амплитуда шума, измеренная в установленном режиме), И  $|r(t) - y(t)| > S\% \cdot |r(t) - r_{old}|$ , то  $K_P$  необходимо увеличивать, а скорость обучения для первого выходного нейрона  $\eta_1^{(2)}$  определяется согласно (2) (здесь  $K_P$  – текущее значение параметра  $K_P$ ).

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

3. Если  $y_d$  пройден, И  $y(t) > y(t - \Delta t)$ , И  $|y(t) - y(t - \Delta t)| > > |r(t) - y_d| / N_{hidden}$ , то необходимо снижать значение  $K_P$ .  $\eta_1^{(2)}$  определяется согласно (2).

Если  $|y(t) - y(t - \Delta t)| > 2 \cdot |r(t) - y_d| / N_{hidden}$ , то нейросетевой настройщик не вызывает нейронную сеть, а сразу выдает на своих выходах нулевые значения для  $K_P$  и  $K_I$ . Это необходимо для компенсации импульсных возмущений.

#### 4.3. ПРАВИЛО ДЛЯ КОРРЕКЦИИ $K_I$

4. Если  $y_d$  пройден, И  $|y(t) - y(t - \Delta t)| < N_n$ , И  $|r(t) - y(t)| > S\% \cdot |r(t) - r_{old}|$ , то скорость обучения для второго выходного нейрона  $\eta_2^{(2)}$  вычисляется согласно (3) (здесь  $K_I$  – текущее значение параметра  $K_I$ ).

$$(3) \quad \eta_2^{(2)} = K_I \cdot \frac{|r(t) - y(t)|}{|r(t) - y_d|}.$$

В следствиях данных правил указано, с какой скоростью следует учить отдельные нейроны сети. Это значение вычисляется на основе оценок характеристик переходного процесса. Однако оно может оказаться избыточным и привести к потере устойчивости системой управления. Поэтому параллельно вычисляются предельно допустимые значения для скоростей обучения отдельных нейронов (с которыми и производится сравнение текущих скоростей) согласно подходам, указанным в п. 3.

Согласно логики работы настройщика и принципов организации базы правил возможно оценить максимальную амплитуду отклонения графика температуры от задания, вызванного возмущением,  $\Delta t_{max}^0$ , выше которой применение настройщика станет бесполезным. Предположим, что выход ОУ «удерживается» на необходимой текущей уставке  $r_{тек}$  (так как график задания является ступенчатым, то  $r_{тек}$  – это одна из «полок» на таком графике). При этом выход регулятора также практически постоянен и равен  $u_{тек}$ . Значение параметра пропорциональной части регулятора равно  $K_{P\text{ тек}}$ . Тогда  $\Delta t_{max}^0$  может быть рассчитано как  $(u_{max} - u_{тек}) / K_{P\text{ тек}}$ . Если отклонение по температуре превысит  $\Delta t_{max}^0$ , то значение  $u(t)$  выйдет за пределы допустимого диапазона, а правила настройщика перестанут срабатывать.

Соответственно, настройщик способен компенсировать возмущения, которые вызывают отклонение выхода ОУ от задания на величину, меньшую  $\Delta t_{max}^0$ .

## **5. Результаты натурных экспериментов по применению настройщика для компенсации возмущающих воздействий**

Для проведения экспериментов использовалась лабораторная муфельная электронагревательная печь СНОЛ 40/1200, являющаяся типовым нагревательным ОУ. Система управления печью, также представляющая собой типовую АСУ ТП, применяемую на производстве, представлена на рис. 4.

На нижнем уровне находились термopара, измеряющая температуру в печи, и реле, включающее нагревательный элемент. Simatic S7-300 осуществлял управление муфельной элек-

тропечью. Контроллер получал данные от термопары и вычислял выход ПИ-регулятора. Также в нем производилась широтно-импульсная модуляция управляющего воздействия. В память контроллера был интегрирован нейросетевой настройщик, реализованный средствами языка программирования SCL. Блок настройщика имеет четыре входа, совпадающие со входами ПИ, описанной в п. 3. В качестве ПИ-регулятора использовался стандартный программный блок Siemens FB58. На уровне визуализации находилась рабочая станция оператора.

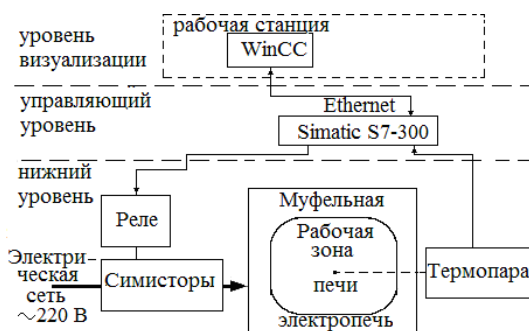


Рис. 4. Принцип организации системы управления печью ШОЛ

Исходя из технологического регламента для печей нагрева металлургических предприятий, выбран следующий график заданий для нагрева литой заготовки:  $590^{\circ}\text{C} \rightarrow 640^{\circ}\text{C} \rightarrow 505^{\circ}\text{C} \rightarrow 590^{\circ}\text{C}$ . Для смены уставки температура должна удерживаться в течение 30 минут в окрестности задания, равной 5% от  $|r(t) - y(t)|$ . Окрестность задания выбрана равной 5%, поскольку для термопары лабораторной печи такая точность является достижимой. Если на реальном производстве такая точность недостижима, то вместо 5% возможно выбрать любое другое число, которое подставится в базу правил настройщика, никак более не влияя на его синтез.

Всего за один эксперимент производилось 36 переходных процессов. Для изменения состояния ОУ проводилась загрузка нагревательной печи стальной заготовкой, объем которой составлял примерно 30% от внутреннего пространства печи: пу-

стоя печь (12 смен задания) → загруженная печь (12 смен задания) → пустая печь (12 смен задания). Подобный перепад по загрузке также типичен для металлургических печей нагрева и отжига металла.

Согласно рис. 1,  $f_1$  – это возмущение, действующее на сигнал управления. Для реальной промышленной печи оно имеет смысл изменения теплотворности подаваемого на эту печь топлива и проблем с работой горелок (нагревателей). В рассматриваемом случае оно было реализовано путем применения лабораторного автотрансформатора для снижения напряжения, подаваемого на печь (220 В), на 25%.

$f_2$  – это возмущение, подаваемое на выход ОУ. Для реальной промышленной печи оно означает открытие двери печи для загрузки материала или постоянную утечку тепла, или переток тепла между зонами печи. В данном случае оно было реализовано путем открытия двери печи на постоянный малый угол.

Оба возмущения  $f_1$  и  $f_2$  могут быть импульсными и ступенчатыми. Импульсные возмущения подаются после перехода системы управления в установившийся режим после 6-го, 9-го, 18-го, 21-го, 30-го и 33-го переходных процессов для указанного выше графика уставок. Возмущение снимается в тот момент, когда вызванный им переходный процесс достигает своего пика (максимального отклонения от задания). Ступенчатые возмущения подаются после возникновения установившегося режима после 6-го, 18-го и 30-го переходных процессов, а снимаются после входа в установившийся режим после 9-го, 21-го и 33-го переходного процессов.

Значения параметров ПИ-регулятора для пустой печи для переходного процесса  $505^{\circ}\text{C} \rightarrow 590^{\circ}\text{C}$  были найдены экспериментально:  $K_P = 2,5$ ,  $K_I = 1,67 \cdot 10^{-2}$ . Это было сделано для того, чтобы эксперимент соответствовал постановке задачи – настройщик устанавливается на ОУ, который уже функционирует под управлением ПИ-регулятора с известными параметрами. При этом, согласно наиболее распространенной ситуации на реальном производстве, никакие другие наборы значений параметров регулятора неизвестны, модель ОУ неизвестна и проведение процедуры идентификации затруднено.



Эти значения  $K_P$  и  $K_I$  обеспечивают отсутствие колебательности и перерегулирование и статическую ошибку не более 5% разницы между текущим заданием и предыдущим. В начале каждого эксперимента как ПИ-регулятор с нейросетевым настройщиком, так и без него использовал эти значения. Значение  $\Delta t$  было вычислено как 10 секунд.

Для каждого вида возмущения проводилось по три эксперимента: 1) с неизменными параметрами ПИ-регулятора; 2) с нейросетевым настройщиком, который в моменты действия возмущения изменял значения только параметра  $K_P$ ; 3) с нейросетевым настройщиком, который в моменты действия возмущения изменял и  $K_P$ , и  $K_I$ . Это позволит сделать выводы о необходимости настройки  $K_I$  для различных возмущений.

Рассмотрим полученные результаты экспериментов для всех указанных типов возмущений.

### *5.1. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ СУПЕНЧАТОГО ВОЗМУЩЕНИЯ, ПОДАВАЕМОГО В КАНАЛ УПРАВЛЕНИЯ*

Результаты опытов для всех рассматриваемых систем управления приведены на рис. 5-7 (здесь и на последующих рисунках: линия 1 – момент загрузки печи заготовкой, линия 2 – момент разгрузки печи) и в таблице 1 (здесь и в последующих таблицах: НН – нейросетевой настройщик, вер. 1 – версия с настройкой  $K_I$  при компенсации возмущений, вер. 2 – версия без настройки  $K_I$  при компенсации возмущений). На рис. 5-7 и в дальнейшем показано 36 переходных процессов, первый из которых  $590^{\circ}\text{C} \rightarrow 640^{\circ}\text{C}$  начинается непосредственно в нулевой момент времени. В целом обе версии нейросетевого настройщика, несмотря на изменение динамики работы печи, позволили сократить как общее время эксперимента (например,  $(39,42 - 38,38) / 39,42 = 0,0263$  часа (2,63%)) и время компенсации возмущений (например,  $(36,40 - 28,66) / 36,40 = 0,213$  мин (21,3%)), так и расход электроэнергии на проведение опыта (например,  $(25,27 - 24,42) / 25,27$  кВт·ч = 0,0336 (3,36%)).

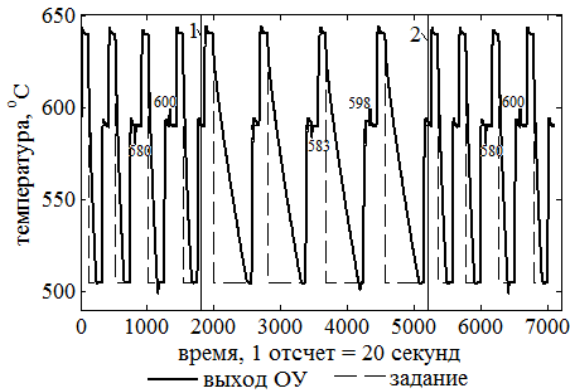


Рис. 5. Результаты работы системы с обычным ПИД-регулятором для ступенчатых возмущений в канале управления

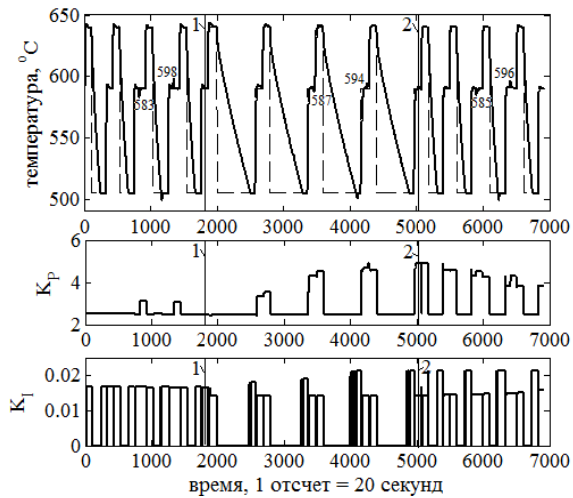


Рис. 6. Нейросетевой настройщик без настройки  $K_i$  в моменты действия ступенчатых возмущений в канале управления

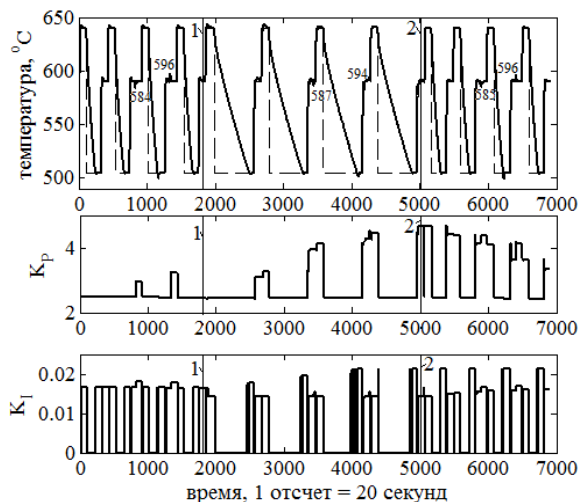


Рис. 7. Нейросетевой настройщик с настройкой  $K_I$  в моменты действия ступенчатых возмущений в канале управления

Таблица 1. Сравнительные результаты работы систем управления для ступенчатых возмущений в канале управления

Критерий оценки	ПИ+НН (вер.1)	ПИ+НН (вер.2)	ПИ
Время опыта, ч	38,38	38,44	39,42
Экономия времени, %	2,63	2,5	0
Расход электроэнергии, кВт·ч	24,42	24,34	25,27
Экономия по электроэнергии, %	3,36	3,82	0
Время компенсации возмущения, мин	28,66	32,66	36,40
Экономия времени на обработку возмущения, %	21,3	11,5	0
Среднее отклонение от задания при возмущении, °С	5	5,5	9,17

Однако необходимо заметить, что настройка И-канала в процессе компенсации возмущений позволила сократить время такой компенсации практически на 8 минут относительно обычного ПИ-регулятора. В то время как в случае отсутствия

подобной настройки для И-канала выигрыш по времени составил лишь 4 минуты. При этом общий расход электроэнергии на проведение эксперимента для обеих версий настройщика отличается на 0,3%.

Кроме того, был произведен расчет среднего отклонения температуры от задания во время действия возмущения. Это усредненное значение максимальных отклонений от задания для всех возмущений в опыте. Например, для рис. 7 расчет произведен следующим образом:  $(590^{\circ}\text{C} - 584^{\circ}\text{C}) + (596^{\circ}\text{C} - 590^{\circ}\text{C}) + (590^{\circ}\text{C} - 587^{\circ}\text{C}) + (594^{\circ}\text{C} - 590^{\circ}\text{C}) + (590^{\circ}\text{C} - 585^{\circ}\text{C}) + (596^{\circ}\text{C} - 590^{\circ}\text{C}) = 5^{\circ}\text{C}$ . По данному показателю настройщик с подстройкой  $K_I$  также отработал эффективнее на 5%, чем система без нее.

Таким образом, общий вывод по данному типу возмущений для проделанных опытов имеет следующий вид: в процессе компенсации возмущений необходимо настраивать и  $K_P$ , и  $K_I$ , что может быть объяснено тем фактом, что данное возмущение имеет самую низкую динамику среди рассматриваемых.

## 5.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ СТУПЕНЧАТОГО ВОЗМУЩЕНИЯ, ПОДАВАЕМОГО НА ВЫХОД ОУ

Результаты приведены на рис. 8-10 и в таблице 2.

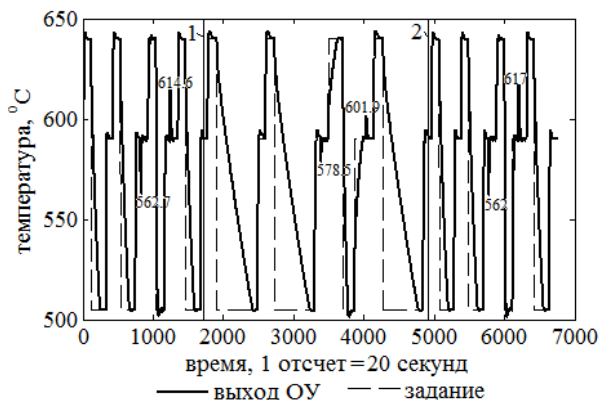


Рис. 8. Результаты работы системы с обычным ПИ-регулятором для ступенчатых возмущений на выходе ОУ

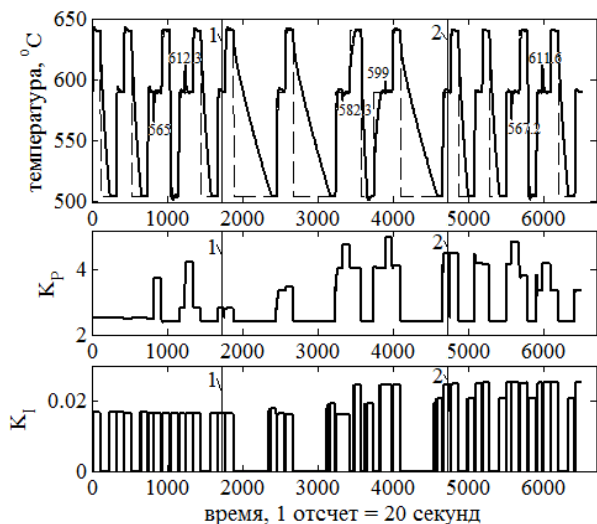


Рис. 9. Нейросетевой настройщик без настройки  $K_i$  в моменты действия ступенчатых возмущений на выходе ОУ

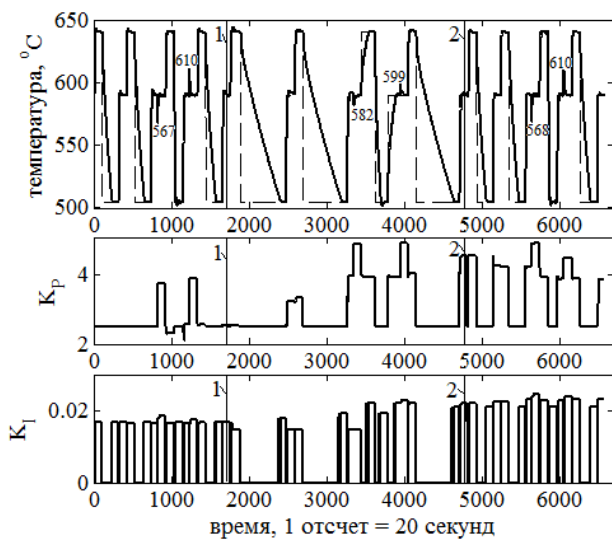


Рис. 10. Нейросетевой настройщик с настройкой  $K_i$  в моменты действия ступенчатых возмущений на выходе ОУ

Таблица 2. Сравнительные результаты работы систем управления для ступенчатых возмущений на выходе ОУ

Критерий оценки	ПИ+НН (вер.1)	ПИ+НН (вер.2)	ПИ
Время опыта, ч	36,52	36,15	37,47
Экономия времени, %	2,54	3,5	0
Расход электроэнергии, кВт·ч	33,06	32,17	35,5
Экономия по электроэнергии, %	6,7	9,3	0
Время компенсации возмущения, мин	49	48	62
Экономия времени на отработку возмущения, %	20,9	22,6	0
Среднее отклонение от задания при возмущении, °С	17,18	18,03	21,72

В данном случае динамика возмущения существенно выше по сравнению с п. 5.1, поэтому его влияние более заметно.

Обе версии настройщика позволили сократить время компенсации возмущений, причем разница в результатах составила всего одну минуту. В то же время по общему времени эксперимента и расходу электроэнергии более высокие результаты показала система без настройки  $K_I$  в моменты действия возмущений. Такая разница может быть вызвана немного отличавшейся степенью прогрева футеровки печи к моменту начала каждого из экспериментов.

Если же сравнивать только показатели, относящиеся к возмущениям (время компенсации и среднее отклонение от задания), то можно сделать вывод о том, что в данном случае настройка  $K_I$  в моменты действия возмущений не является обязательной. Это возможно объяснить динамикой данного возмущения. В то же время осуществление настройки  $K_I$  практически не ухудшает получаемые результаты.

### 5.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ, ПОДАВАЕМОГО В КАНАЛ УПРАВЛЕНИЯ

Результаты для данного типа возмущений приведены на рис. 11–13 и в таблице 3.

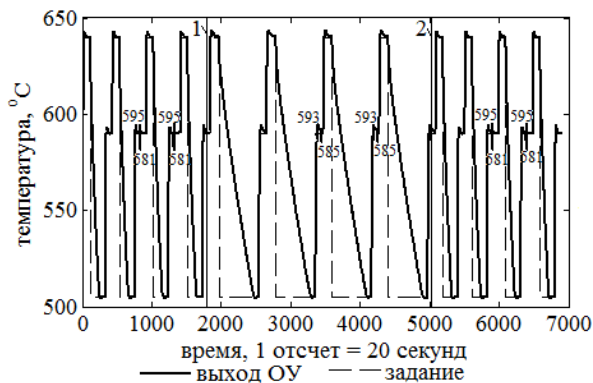


Рис. 11. Результаты работы системы с обычным ПИД-регулятором для импульсных возмущений в канале управления

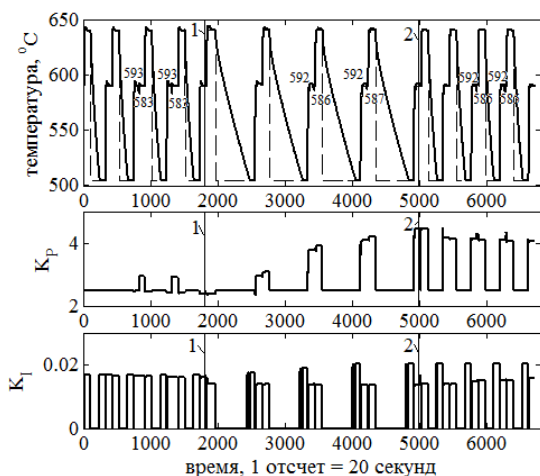


Рис. 12. Нейросетевой настройщик без настройки  $K_I$  в моменты действия импульсных возмущений в канале управления

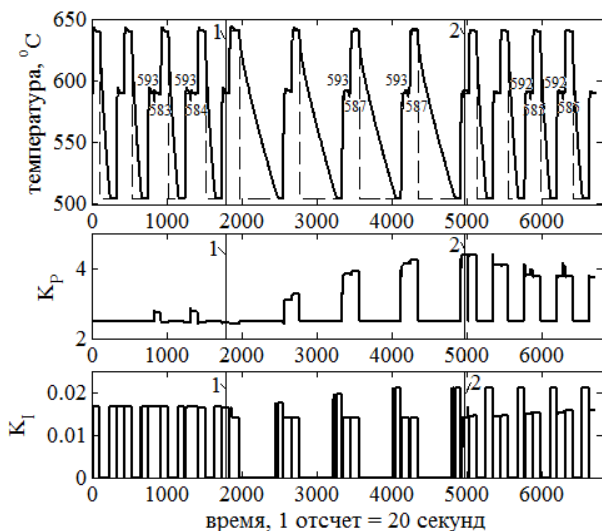


Рис. 13. Нейросетевой настройщик с настройкой  $K_I$  в моменты действия импульсных возмущений в канале управления

Таблица 3. Сравнительные результаты работы систем управления для импульсных возмущений в канале управления

Критерий оценки	ПИ+НН (вер.1)	ПИ+НН (вер.2)	ПИ
Время опыта, ч	37,27	37,24	38,29
Экономия времени, %	2,66	2,74	0
Расход электроэнергии, кВт·ч	18,47	18,63	19,14
Экономия по электроэнергии, %	3,5	2,66	0
Время компенсации возмущения, мин	26	26	32
Экономия времени на обработку возмущения, %	18,8	18,8	0
Среднее отклонение от задания при возмущении, °С	3,75	3,75	6

В данном случае возмущение имеет импульсный характер, причем оно прекращает свое действие в наиболее неудобный для системы управления момент – момент достижения пика переходного процесса, вызванного таким возмущением. В этом



случае ПИ-регулятор накапливает в И-канале управляющее воздействие, которое в момент снятия возмущения становится избыточным, что приводит к быстрому возврату к заданию и возможному перерегулированию. Данное возмущение является более динамичным, чем описанное в п. 5.1, и менее динамичным по сравнению с представленным в п. 5.2.

Оценка возмущения производится, в частности, по амплитуде двух пиков переходного процесса, вызванного его появлением.

Проведя анализ полученных результатов, возможно сделать вывод о том, что обе версии настройщика позволили добиться абсолютно одинаковых результатов как по времени компенсации возмущений, так и по среднему отклонению температуры от задания. Разница в результатах как по общему времени опыта, так и по потреблению электроэнергии составляет менее 1%, что, как и в предыдущем случае, можно отнести на несущественные различия в изначальном прогреве футеровки печи.

В целом настройка  $K_I$  для данного типа возмущения не дает существенных результатов, что можно объяснить высокой динамикой возврата температуры к заданию.

#### *5.4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ, ПОДАВАЕМОГО НА ВЫХОД ОУ*

Результаты для данного типа возмущений приведены на рис. 14–16 и таблице 4.

Данный тип возмущения вызывает переходный процесс с наиболее высокой динамикой как по отклонению температуры от задания, так и по ее возврату к уставке. В связи с этим полученные результаты в целом сходны с результатами, приведенными в п. 5.2 и п. 5.3.

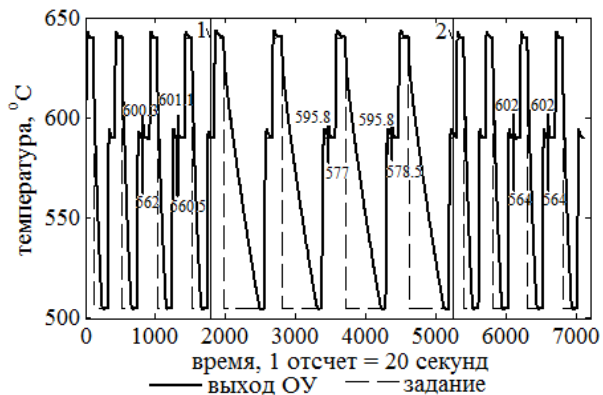


Рис. 14. Результаты работы обычного ПИ-регулятора для импульсных возмущений на выходе ОУ

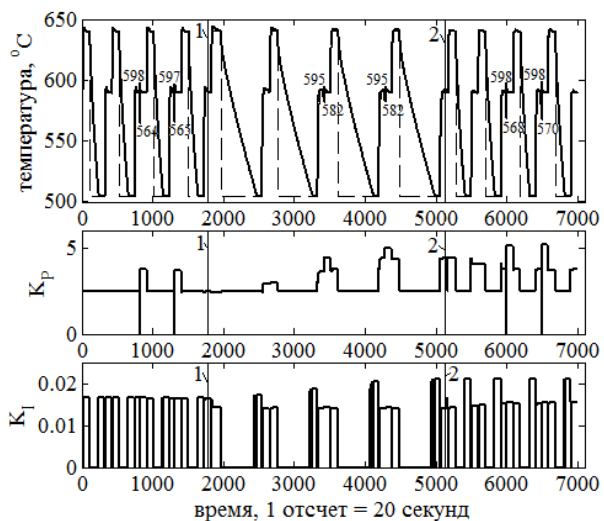


Рис. 15. Нейросетевой настройщик без настройки  $K_i$  в моменты действия импульсных возмущений на выходе ОУ

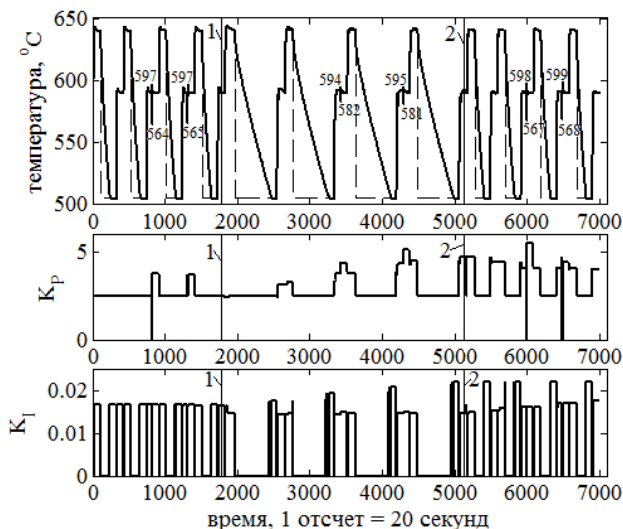


Рис. 16. Нейросетевой настройщик с настройкой  $K_i$  в моменты действия импульсных возмущений на выходе ОУ

Таблица 4. Сравнительные результаты работы систем управления для импульсных возмущений на выходе ОУ

Критерий оценки	ПИ+ИИ (вер.1)	ПИ+ИИ (вер.2)	ПИ
Время опыта, ч	38,94	38,88	39,51
Экономия времени, %	1,4	1,6	0
Расход электроэнергии, кВт·ч	19,79	19,64	20,39
Экономия по электроэнергии, %	2,9	3,6	0
Время компенсации возмущения, мин	21	20	29,33
Экономия времени на обработку возмущения, %	28,4	31,8	0
Среднее отклонение от задания при возмущении, °C	12,66	12,45	15,6

В данном случае разница между результатами работы обеих версий настройщика составляет одну минуту по времени компенсации возмущений, а по остальным показателям – менее 1%.

Таким образом, ввиду высокой динамики возмущения настройка  $K_I$  в данном случае не позволяет улучшить качество компенсации возмущающих воздействий.

## 6. Заключение

Проведенные исследования по применению нейросетевого настройщика для компенсации возмущающих воздействий различных типов позволяют сделать следующие выводы.

Предложенные усовершенствования настройщика позволили обеспечить возможность компенсации ступенчатых и импульсных возмущений ограниченной амплитуды, действующих на нагревательный объект управления. Экономия времени на подобную компенсацию составила от 18,8% до 28,4% для настройщика с подстройкой параметра И-канала регулятора по сравнению с обычным ПИ-регулятором. Ни в одном опыте с нейросетевым настройщиком не произошло срабатывания критерия о нарушении устойчивости системы управления.

Снижение времени на компенсацию возмущения приводит к более быстрому возврату на режим и переключению на следующую уставку. Это позволяет сократить время эксперимента в целом, что для реального производства обеспечит повышение интенсивности работы промышленных печей.

Изучение влияния настройки параметра  $K_I$  ПИ-регулятора на эффективность компенсации возмущений показало, что данный прием эффективен для ступенчатых возмущающих воздействий, подаваемых в канал управления ОУ (чем ниже динамика возмущения, тем большее влияние оказывает настройка  $K_I$ ). Для остальных типов возмущений его применение практически никак не отражается на получаемых результатах. Однако отказаться от настройки  $K_I$  при компенсации возмущений не представляется возможным.

При этом на промышленном ОУ в условиях производства будет достаточно сложно идентифицировать тип возникшего возмущающего воздействия. Поэтому, согласно полученным результатам, настройку  $K_I$  предлагается задействовать все время.

Ввиду типичности выбранного для экспериментов ОУ для класса нагревательных объектов, полученные результаты позволяют предположить, что и для других ОУ данного класса настройщик с указанной конфигурацией и рекомендациями по настройке параметров регулятора, в частности, в моменты действия возмущений, позволит получать сходные результаты.

В дальнейшем исследования о применении настройщика для компенсации возмущений предполагается провести для электроприводов переменного тока, применяемых в прокатных клетях металлургического производства.

Исследование проведено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, договор №14.575.21.0133 (RFMEFI57517X0133).

### Литература

1. АЛЕКСАНДРОВ А.Г., ПАЛЕНОВ М.В. *Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов в технических системах* // Автоматика и телемеханика. – 2014. – №2. – С. 16–30.
2. АРАНОВСКИЙ С.В. *Идентификационные методы для синтеза адаптивных наблюдателей нелинейных систем*: Автореф дис. докт. техн. наук: 05.13.01. – СПб., 2016. – 32 с.
3. БЕЗРЯДИН М.М., ЛОЗГАЧЕВ Г.И. *Синтез модального регулятора с компенсацией внешнего возмущения для объекта с параметрической неопределенностью по критерию максимальной робастности* // Труды СПИИ РАН. – 2012. – №2(21). – С.157–169.
4. БОБЦОВ А.А., НИКИФОРОВ В.О., ПЫРКИН А.А. *Адаптивное управление возмущенными системами. Учебное пособие*. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 126 с.
5. БОБЦОВ А.А., ШАВЕТОВ С.В. *Управление по выходу линейным параметрически неопределенным объектом в условиях возмущающих воздействий и неучтенной динамики* // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2011. – №1(71). – С. 33–39.

6. БОЙКО В.И., СМОЛЯК В.А. *Автоматизированные системы управления технологическими процессами в металлургии*. – Днепродзержинск: Типография им. Воровского, 1997. – 574 с.
7. ВАГИН Г.Я. *К вопросу о повышении энергетической эффективности промышленных предприятий* // Промышленная энергетика. – 2013. – №5. – С. 2–6.
8. ГЛУЩЕНКО А.И. *О методе определения скорости обучения нейронной сети для задачи оперативной настройки линейных регуляторов при управлении нелинейными объектами* // Управление большими системами. – 2018. – Вып. 72. – С. 52–107.
9. ЕРЕМЕНКО Ю.И., ГЛУЩЕНКО А.И. *О разработке метода выбора структуры нейронной сети для решения задачи адаптации параметров линейных регуляторов* // Управление большими системами. – 2016. – Вып. 62. – С. 75–123.
10. 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.
11. ЕРЕМЕНКО Ю.И., ГЛУЩЕНКО А.И., ФОМИН А.В. *О влиянии исполнительного механизма на эффективность применения нейросетевого настройщика для управления нагревательными печами* // Системы управления и информационные технологии. – 2017. – №3(69). – С. 32–37.
12. 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.
13. ЖУРАВЛЕВ Ю.П., КОПЦЕВ Л.А. *Организация и методы энергосбережения в ОАО “Магнитогорский металлургический комбинат”* // Промышленная энергетика. – 2010. – №10. – С. 6–13.

14. РЕМИЗОВА О.А., СЫРОКВАШИН В.В., ФОКИН А.Л. *Улучшение качества управления технологическими процессами с запаздыванием с использованием типовых регуляторов с компенсацией возмущений* // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2015. – №31. – С. 94–98.
15. РОТАЧ В.Я. *Теория автоматического управления*. 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2008. – 396 с.
16. РОТАЧ В.Я. КУЗИЦИН 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.
17. РЫБИН В.М., САМХАРАДЗЕ Т.Г., ЩЕРБАКОВ Н.С. *Применение динамических интегрированных экспертных систем для интеллектуального управления* // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2012. – №4. – С. 29–32.
18. ТЕРЕХОВ В.А., ТЮКИН И.Ю. *Исследование устойчивости процессов обучения многослойной нейронной сети. Часть II* // Автоматика и телемеханика. – 1999. – №11. – С. 145–161.
19. ТЕРЕХОВ В.А., ЕФИМОВ Д.В., ТЮКИН И.Ю. *Нейросетевые системы управления: Учеб. пособие для вузов*. – М.: Высш. шк., 2002. – 183 с.
20. ТЮКИН И.Ю., ТЕРЕХОВ В.А. *Адаптация в нелинейных динамических системах*. – М.: ЛКИ, 2008. – 384 с.
21. ФУРТАТ И.Б. *Динамическая компенсация возмущений в условиях насыщения сигнала управления* // Управление большими системами. – 2017. – Вып. 65. – С. 24–40.
22. ЦЫКУНОВ А.М. *Робастное управление с компенсацией возмущений*. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 300 с.
23. ШПИЛЕВАЯ О.Я. *Анализ влияния ограниченных возмущений на свойства адаптивной системы стабилизации* // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2008. – №3. – С. 81–89.

24. ШУБЛАДЗЕ А.М., КУЗНЕЦОВ С.И. *Автоматически настраиваемые промышленные ПИ и ПИД регуляторы* // Автоматизация в промышленности. – 2007. – №2. – С. 15–17.
25. ALEXANDROV A.G., PALENOV M.V. *Self-tuning PID-I controller* // Proc. 18th IFAC World Congress, Milano, Italy, 2011. – P. 3635–3640.
26. AL-KALBANI F. et al. *Active disturbance rejection control of a heat integrated distillation column* // Proc. of 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). – IEEE, 2016. – P. 278–283.
27. ANDERSON K.L., BLANKENSHIP G.I., LEBOW L.G. *A rule-based adaptive PID controller* // Proc. 27th IEEE Conf. Decision. Control. – IEEE, 1988. – P. 564–569.
28. ANDRÁŠIK A., MÉSZÁROS A., DE AZEVEDO S.F. *On-line tuning of a neural PID controller based on plant hybrid modeling* // Computers & Chemical Engineering. – 2004. – Vol. 28, No. 8. – P. 1499–1509.
29. ASTROM K.J., HAGGLUND T. *Advanced PID Control*. – Research Triangle Park: ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. – 461 p.
30. ATASSI A.N., KHALIL H.K. *A separation principle for the stabilization of class of nonlinear systems* // IEEE Trans. on Automat. Control. – 1999. – Vol. 44, No. 9. – P. 1672–1687.
31. BARROS C.L., OLM J.M., COSTA-CASTELLÓ R. *Rejection of periodic disturbances using MRAC with minimal controller synthesis* // Proc. of 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). – IEEE, 2016. – P. 1–6.
32. BERNER J., SOLTESZ K., HAGGLUND T., ASTROM K.J. *An experimental comparison of PID autotuners* // Control Engineering Practice. – 2018. – Vol. 73. – P. 124–133.
33. CALVO-ROLLE J.L. et al. *A hybrid intelligent system for PID controller using in a steel rolling process* // Expert Systems with Applications. – 2013. – Vol. 40, No. 13. – P. 5188–5196.



34. CHEN J., HUANG T. *Applying neural networks to on-line updated PID controllers for nonlinear process control* // Journal of Process Control. – 2004. – No. 14. – P. 211–230.
35. CHIEN K.L., HRONES I.A., RESWICK J.B. *On the automatic control of generalized passive systems* // Trans on ASME. – 1952. – Vol. 74. – P. 633–640.
36. FANG M., ZHUO Y., LEE Z. *The application of the self-tuning neural network PID controller on the ship roll reduction in random waves* // Ocean Engineering. – 2010. – No. 37. – P. 529–538.
37. HUANG G.-B., WANG D.H., LAN Y. *Extreme learning machines: a survey* // Int. Journal of Machine Learning and Cybernetics. – 2011. – Vol. 2, No. 2. – P. 107–122.
38. KUHN U. *A practice oriented setting rule for pid-controllers: The t-sum-rule* // Automatisierungstechnische Praxis. – 1995. – Vol. 37, No. 5. – P. 10–16.
39. LANDAU Y.D. *Adaptive control: The model reference approach* // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1984. – No. 1. – P. 169–170.
40. LEE T.H., HANG C.C., HO W.K., YUE P.K. *Implementation of a knowledge-based PID auto-tuner* // Automatica. – 1993. – Vol.29, No. 4. – P. 1107–1113.
41. MIMURA K., SHIOTSUKI T. *Experimental study of PID auto-tuning for unsymmetrical processes* // Proc. of ICCAS-SICE 2009. – IEEE, 2009. – P. 2967–2971.
42. MORI M., FUJISHIMA M., INAMASU Y., ODA Y. *A study on energy efficiency improvement for machine tools* // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2011. – Vol. 60, Issue 1. – P. 145–148.
43. PFEIFFER B.-M. *Towards «plug and control»: self-tuning temperature controller for PLC* // Int. Journal of Adaptive Control and Signal Processing. – 2000. – No. 14. – P. 519–532.
44. RIBEIRO J.M.S., SANTOS M.F., CARMO M.J., SILVA M.F. *Comparison of PID controller tuning methods: analytical/classical techniques versus optimization algorithms* // 18th Int. Carpathian Control Conference (ICCC). – IEEE, 2017. – P. 533–538.

45. SAXENA S., HOTE Y.V. *Simple Approach to Design PID Controller via Internal Model Control* // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2016. – Vol. 41, No. 9. – P. 3473–3489.
46. 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. – P. 1265–1271.
47. SONG Y., GUO J., HUANG X. *Smooth Neuroadaptive PI Tracking Control of Nonlinear Systems with Unknown and Non-smooth Actuation Characteristics* // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning systems. – 2016. – Vol. 99. – P. 1–13.
48. STOTEN D.P., BECHOUBANE H. *Empirical studies of an MRAC algorithm with minimal controller synthesis* // Int. Journal of Control. – 1990. – Vol. 51, No. 4. – P. 823–849.
49. VISIOLI A. *Improving the load disturbance rejection performances of IMC-tuned PID controllers* // IFAC Proceedings Volumes (15th IFAC World Congress). – 2002. – Vol. 35, No. 1. – P. 295–300.
50. ZHANG W., WANG Y., ZHANG W. *Optimal disturbance rejection controller design for integrating processes with dead time based on algebraic theory* // Int. Journal of Systems Science. – 2017. – Vol. 48, No. 6. – P. 1266–1280.

## ON EFFICIENCY OF EACH OF PI-CONTROLLER PARAMETERS ADJUSTMENT WITH NEURAL TUNER TO REJECT DUSTURBANCES ACTING ON HEATING FURNACES

**Anton Glushchenko**, Stary Oskol Technological Institute n.a. A.A. Ugarov (branch) NUST "MISIS", Stary Oskol, Cand.Sc., assistant professor (Stary Oskol, Makarenko Microdistrict, 42, (4725) 45-12-17, strondutt@mail.ru).

*Abstract: The scope of this research is to develop a modified version of previously proposed PI-controller neural tuner. Its rule base is improved. The new version is to be able to reject disturbances acting on heating furnaces at a steady-state mode. The following types of disturbances of limited amplitude are considered to be attenuated by the tuner– step and pulse disturbances acting the plant output signal, step and pulse disturbances acting the control action signal. The problem of appropriateness of KI parameter adjustment during the disturbance attenuation is considered for all mentioned above types of disturbances. Experiments are conducted using a muffle electroheating furnace SNOL 40/1200. Having analyzed the obtained results, the conclusion could be made that the most appropriate disturbance to adjust KI is the step one acting the control action signal, but the best course of action is to adjust this parameter for all types of disturbances. The tuner application allowed to reduce the disturbances rejection time by 18,8% ÷ 28,4% comparing to a conventional PI-controller.*

Keywords: adaptive control, disturbances rejection, PI-controller, heating plants.

УДК 004.89 + 681.51

ББК 32.813

DOI: 10.25728/ubs.2019.78.4

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии В.И. Зоркальцевым.*

*Поступила в редакцию 20.07.2018.*

*Опубликована 31.03.2019.*