

М. Ю. Рябчиков, канд. техн. наук, доц., mr_mgn@mail.ru,
Е. С. Рябчикова, канд. техн. наук, доц., С. А. Филиппов, студент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,
г. Магнитогорск, Российская Федерация

Система управления температурой пара после пароперегревательной установки с применением нечеткой логики для упреждающей компенсации возмущений

Рассмотрена задача регулирования температуры пара на выходе пароперегревательной установки при возмущающих воздействиях, связанных с резкими и значительными изменениями температуры входного пара. На примере пароперегревательной установки Магнитогорского металлургического комбината показано, что медленное реагирование на такие возмущения систем регулирования по отклонению приводит к нежелательным колебаниям температуры выходного пара. Выполнен обзор известных предложений в области регулирования температуры пара на выходе пароперегревательной установки и определены основные причины снижения качества регулирования, обусловленные наличием значительного запаздывания и непостоянством характеристик объекта управления, что затрудняет упреждающее управление по возмущению. Для управления в подобных условиях предложена система с двумя степенями свободы, комбинирующая пропорционально-интегральный регулятор и регулятор, основанный на нечеткой логике. В предложенной системе изменение управляемого параметра в зависимости от заданного значения регулируется в основном контуре со стандартным регулятором и отрицательной обратной связью, а возмущение устраняется с применением дополнительного контура, также с отрицательной обратной связью, регулятором на основе нечеткой логики и моделью объекта без компонента, учитывающего запаздывание. Для случая точной информации о свойствах объекта определены особенности взаимодействия контуров, при которых контур отработки задания не будет реагировать на возмущения по температуре входного пара, что обеспечивает возможность раздельной настройки регуляторов контуров. При этом влияние запаздывания на качество регулирования при возмущениях по температуре входного пара проявляется только в смещении во времени траектории переходного процесса на величину запаздывания, что соответствует идее предиктора Смита. Система ориентирована на синтез правил нечеткой логики и уточнение параметров используемой при регулировании модели на основе результатов автоматизированного компьютерного имитационного моделирования управления. Предложена структурная модификация системы управления, позволяющая компенсировать остаточные ошибки регулирования, связанные с нелинейностью нечеткого регулятора, что уменьшает требования к числу параметров настройки, значения которых подбираются на основе затратного в вычислительном плане имитационного моделирования. Представлены результаты компьютерных вычислительных экспериментов по сравнению эффективности управления с использованием предложенной системы, а также системы с применением только стандартного регулятора. Компьютерное моделирование осуществлялось в среде MATLAB Simulink. Показано, что комбинированная система регулирования температуры пара имеет лучшие показатели качества.

Ключевые слова: пароперегревательная установка, автоматическое регулирование, температура пара, нечеткая логика, имитационное моделирование управления

Введение

Температура выходного пара пароперегревательной установки (ППУ) является одной из критически важных переменных, которую необходимо контролировать и поддерживать в заданных пределах исходя из соображений безопасности, с одной стороны, и экономичности работы паровой турбины, с другой. При снижении температуры перегретого пара экономичность снижается, возникает опасность

повышения влажности в последних ступенях турбины и эрозии лопаток, что приводит к увеличению удельного расхода пара [1]. Чрезмерный рост температуры перегретого пара может привести к аварии из-за ползучести металла, а также снижения надежности турбины вследствие недопустимых тепловых расширений. По указанным причинам рекомендуемый диапазон изменения температуры перегретого пара, как правило, принимают достаточно узким, что требует высокого качества регулирования.

Управление температурой перегретого пара осложняется большой тепловой инерцией установки. Вследствие этого возмущения по параметрам входного пара или топлива могут привести к существенным отклонениям температуры выходного перегретого пара от рекомендуемого диапазона. Кроме того, требования к параметрам перегретого пара могут изменяться при варьировании мощности, генерируемой электростанциями, что обуславливает нелинейность объекта управления.

Возмущения по параметрам топлива характерны для предприятий, использующих ППУ в качестве буферных потребителей вторичных топливных газов. В паросиловом цеху Магнитогорского металлургического комбината (ПАО "ММК") на ППУ используют природный газ. Однако изучение качества регулирования в течение последних лет показало существенные периодические колебания температуры выходного пара ППУ из-за непостоянства параметров входного пара.

Перегретый пар от ППУ поступает на турбогенераторы и общую сеть предприятия, пар которой поступает на парозежекторные насосы установки циркуляционного вакуумирования стали кислородно-конвертерного цеха. Работа насосов требует поддержания минимального давления в сети. Чтобы не допустить колебаний давления сетевого пара, мощность турбогенераторов корректируют. При этом входной пар поступает на ППУ с редукционной установки и

общих сетей. Указанные особенности приводят к тому, что при стабильном давлении входного пара возможны существенные колебания его температуры. Это может привести к нежелательным для турбогенераторов проблемам стабилизации температуры выходного пара ППУ.

Особенности объекта управления

Пароперегревательная установка ПАО "ММК" состоит из топочной камеры, а также подъемного газохода, в котором размещен конвективный пароперегреватель и воздухоподогреватель. На рис. 1, а приведена структурная схема объекта.

Воздухоподогреватель выполнен из двух одноходовых трубчатых кубов, установленных последовательно. Трубы воздухоподогревателя расположены вертикально. Внутри труб проходят топочные газы. Подогретый воздух используется для сжигания топлива в горелке ППУ. Газомазутная горелка ГМ-10 установлена на фронтальной стене топочной камеры. Горелка предназначена для сжигания природного газа в топочной камере ППУ, нагрева пара до необходимой температуры. Пар поступает в радиационную часть пароперегревателя, затем по перепускному паропроводу в два пакета конвективного пароперегревателя, которые выполнены по противоточной схеме, затем в общий паровой коллектор, от которого идет на турбогенераторы и в общую

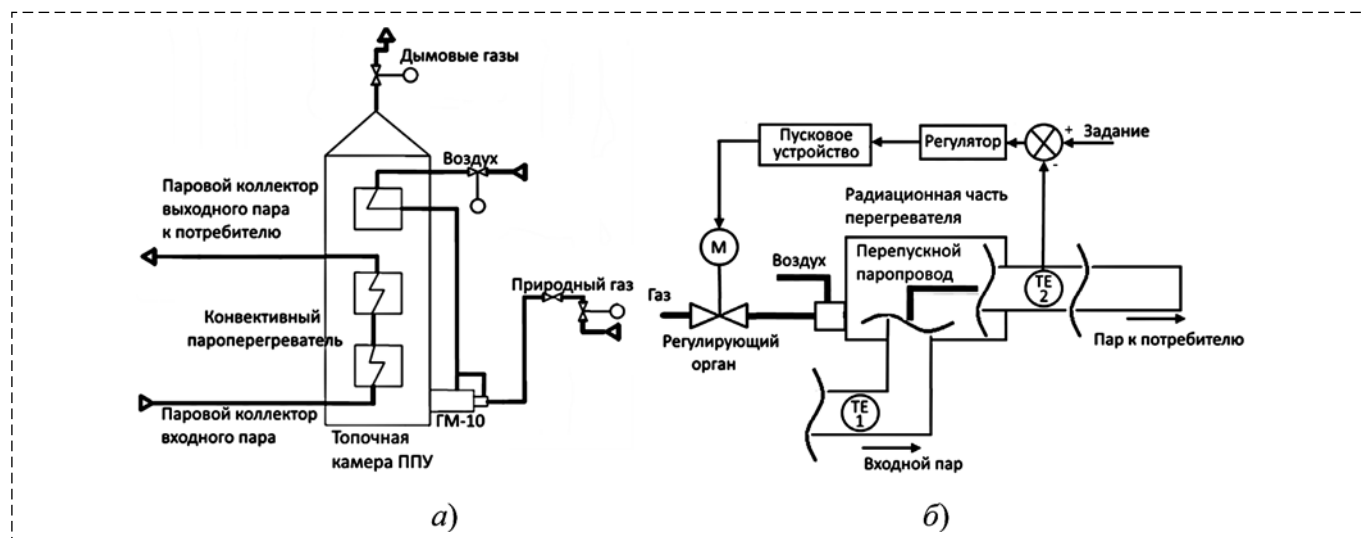


Рис. 1. Структурные схемы пароперегревательной установки (а) и системы регулирования температуры перегретого пара (б):
1, 2 — датчики ТСПУ-100П

Fig. 1. Structural diagrams of the superheater (a) and the superheated steam temperature control system (б):
1, 2 — sensors ТСПУ-100П

сеть. Регулирование температуры пара, контролируемой датчиком ТСПУ-100П, осуществляется путем изменения количества природного газа, поступающего на ППУ (рис. 1, б). Инерционность и запаздывание объекта управления вызваны большим объемом топочной камеры, а также наличием многочисленных паровых коллекторов. Свойства объекта могут быть представлены передаточной функцией:

$$W_{\text{ППУ}}(s) = \frac{K_{\text{ОУ}}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-\tau_3 s}, \quad (1)$$

где запаздывание может быть принято на постоянном уровне $\tau_3 = 3$ мин.

Температура входного пара также контролируется, но используется только для расчета и учета массового расхода пара.

Проблемы существующей системы регулирования

Не всегда пар, поступающий на вход ППУ от редукционной установки, соответствует требуемому качеству, вследствие чего происходят аварийные ситуации, когда температура входного пара резко и значительно изменяется. Такие возмущения являются серьезной проблемой для технологического процесса, так как вследствие запаздывающих и инерционных свойств объекта система регулирования температуры выходного пара не способна быстро отреагировать на изменение температуры входного пара (рис. 2).

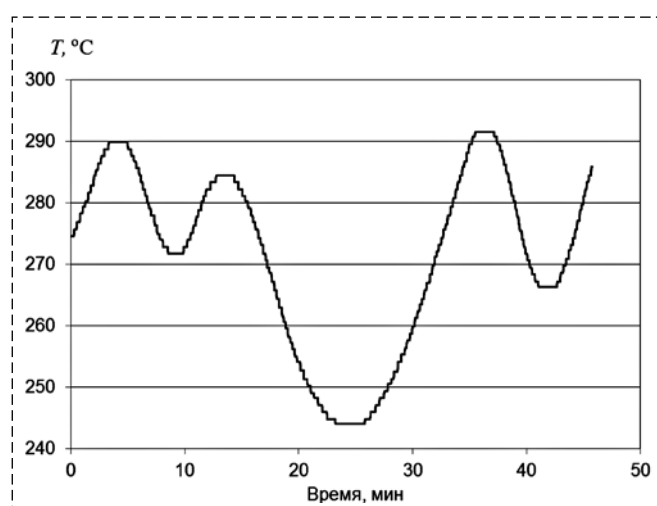


Рис. 2. Пример регулирования температуры пара на выходе из ППУ в существующей системе

Fig. 2. Example of adjusting the steam temperature of steam exiting a superheater in the current system

На данный момент система регулирования температуры выходного пара включает в свой состав стандартный пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор. Изучение работы существующей системы регулирования показало, что при характерных для системы возмущениях по температуре входного пара на выходе системы возможны отклонения температуры пара от заданных значений порядка 20...25 °C, причем устранение возмущений в существующей системе регулирования длится до 30 мин.

Современное состояние проблем управления температурой пара

Синтезу систем автоматического регулирования температуры пара посвящены работы [1—11]. Авторы предлагают различные решения, как правило, основанные на применении упреждающего управления по возмущению.

В работе [1] предложен каскадный регулятор температуры пара путем изменения количества впрыскиваемого охладителя. Типовой ПИ регулятор принимает в качестве входного сигнала сумму сигнала рассогласования и сигнала, характеризующего скорость изменения температуры пара за впрыском. В системе используется автоподстройка параметров регулятора в зависимости от режима работы котла. Однако параметры режимов рассчитываются вручную и требуют периодической корректировки в зависимости от изменения динамических свойств объекта. Схожее решение предложено в работе [2], где по экспериментальным данным была настроена динамическая модель при различной нагрузке, однако не указывается, насколько стабильны найденные значения параметров передаточных функций по различным каналам.

Автором работы [3] предлагается использование каскадной системы регулирования температуры пара с контуром прямого разомкнутого регулирования по возмущению. Это позволяет системе реагировать в момент нанесения возмущения, не дожидаясь изменения регулируемого параметра. Однако для точного проектирования контура прямой связи необходимо знать зависимость между возмущением и регулируемой величиной.

В работе [4] разработан новый закон регулирования температуры перегретого пара и синтезирована система управления. Компенсация инерционности сигналов термопар и инерци-

онности канала влияния расхода пара на температуру пара после пароперегревателя способствует сокращению до двух раз продолжительности переходных процессов. Отмечается, что повышение точности поддержания температуры пара на выходе пароперегревателя до $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (при норме до $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) позволяет снизить расход топлива при работе котла за счет уменьшения периодов времени, при которых происходит снижение температуры пара ниже допустимого значения. Для реализации системы необходима достоверная информация о динамических свойствах объекта управления, которые на практике могут быть неопределенными.

Проблема неопределенности динамических параметров объекта рассматривается в работах [5, 6]. Авторами предложен способ построения гибридной системы прямого адаптивного управления с существенным запаздыванием в основном контуре на примере управления температурным режимом пароперегревателя. Чтобы придать линейной части системы желаемые свойства, предложено включить параллельно с объектом управления стабилизирующее устройство с корректируемыми параметрами. Действительно, подобный подход должен способствовать сохранению устойчивости, потеря которой применительно к объектам управления температурного типа в значительной степени может быть обусловлена изменением соотношения между мерой инерции и чистым транспортным запаздыванием. Однако такой подход не способствует повышению быстродействия регулирования.

Авторами работы [7] было изучено влияние запаздывания на качество регулирования температуры пара при настройке регуляторов различными способами. Были отмечены особенности настройки, а также тот факт, что достичь значимого повышения качества можно при управлении с применением предиктора Смита. Целесообразность применения предиктора Смита для управления объектами подобного типа отмечается также в работе [8].

Автором работы [9] предложено использовать нечеткий регулятор в качестве блока аддитивной коррекции сигнала рассогласования в системе с типовым регулятором. В качестве входных сигналов блок нечеткой коррекции использует сигнал рассогласования и скорость его изменения. При этом параметры блока нечеткой коррекции были определены с применением адаптивной нейронечеткой структуры.

В то же время автором предложена комбинация использования блока нечеткой коррекции с типовым регулятором, но причина такого решения неясна, так как нет обоснования выбора структуры. В работе [10] предлагается использовать искусственную нейронную сеть (ИНС) для прогноза температуры выходного пара и упреждающей коррекции задания системы управления температурой пара по отклонению с ПИД регулятором. При этом неясно, как обеспечить адекватность модели, подстроить ИНС под изменяющиеся свойства объекта и как согласовать упреждающее управление с дифференцирующим компонентом закона регулирования. В работе [11] для синтеза модели ППУ на основе технологических данных используется метод идентификации подпространства (SID), что позволяет избежать многих проблем настройки модели. Так как метод предназначен для линейных систем, авторами предложено применение нечеткой логики для комбинирования результатов набора линейных моделей. Модели используются для прогноза состояния объекта, однако авторы не рассматривают особенности формирования управляющих воздействий и не изучают работу системы в условиях значительного запаздывания.

Выполненный обзор позволяет выделить две основные цели, которые, как правило, преследуют авторы работ в сфере управления температурой пара: упреждающая компенсация возмущений; придание системе управления свойства нечувствительности к непостоянству динамических свойств объекта. При этом в рассмотренных работах авторы достигают только одну из указанных целей. Причиной является тот факт, что упреждающая компенсация возмущений сама по себе требует информации о динамических свойствах объекта управления. В то же время для рассматриваемого типа объектов управления только транспортное запаздывание является в значительной степени постоянной величиной, а коэффициенты передачи и значения мер инерции могут быть непостоянны.

При неопределенности динамических свойств объекта управления аналитическое решение задачи выбора рационального упреждающего воздействия может быть затруднено. Одной из возможных альтернатив является выбор настроек системы упреждающей компенсации возмущений с применением компьютерного имитационного моделирования. В качестве такой системы упреждающей компенсации может

использоваться отдельный контур управления с отрицательной обратной связью. Однако разработка системы с двумя степенями свободы, в которой один из замкнутых контуров с отрицательной обратной связью ориентирован на обработку возмущений по каналу задания, а другой — на упреждающую обработку возмущений по температуре входного пара, требует обоснования.

Выбор структуры системы регулирования с двумя степенями свободы

В предлагаемой структуре системы (рис. 3) можно выделить два замкнутых контура. Первый контур, включающий регулятор 1, предназначен для обеспечения желаемой реакции на изменение сигнала задания. Второй контур, содержащий регулятор 2, формирует воздействие для упреждающей компенсации возмущения F .

Свойства объекта управления (ОУ) представим дробно-рациональной передаточной функцией $W_{OY}(s)$ и передаточной функцией $W_3(s)$, характеризующей запаздывающие свойства объекта. Контур для компенсации возмущения F содержит соответствующие модели $W'_{OY}(s)$ и $W'_3(s)$. Передаточные функции регуляторов 1 и 2 обозначим как $W_p(s)$ и $W'_p(s)$. Свойства исполнительного устройства (механизма) (ИМ) представим передаточной функцией $W_{ИМ}(s)$. Контур для компенсации возмущения содержит модель ИМ $W'_{ИМ}(s)$.

Докажем, что структура системы на рис. 3 соответствует идее управления с использованием предиктора Смита. Из схемы следует, что второй контур (компенсации F) оказывает воздействие на первый контур посредством сигнала

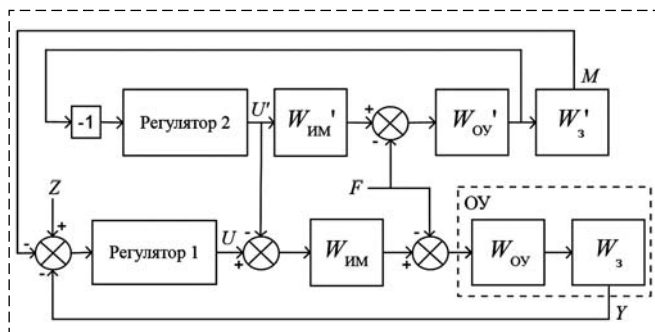


Рис. 3. Предлагаемый вариант структуры системы управления с двумя степенями свободы

Fig. 3. Proposed control system structure with two degrees of freedom

лов U' и M . Выразим изображения по Лапласу этих сигналов через изображение по Лапласу $L\{F\}$ возмущения F . С этой целью для второго контура запишем:

$$-(L\{U'\}W'_{ИМ}(s) - L\{F\})W'_{OY}(s)W'_p(s) = L\{U'\}; \quad (2)$$

$$\frac{L\{M\}}{W'_3(s)} = \left(-\frac{L\{M\}}{W'_3(s)} W'_p(s)W'_{ИМ}(s) - L\{F\} \right) W'_{OY}(s), \quad (3)$$

откуда после преобразований получим:

$$L\{U'\} = L\{F\} \frac{W'_{OY}(s)W'_p(s)}{1 + W'_{ИМ}(s)W'_{OY}(s)W'_p(s)} = L\{F\}W_u(s); \quad (4)$$

$$L\{M\} = -L\{F\} \frac{W'_3(s)W'_{OY}(s)}{1 + W'_{ИМ}(s)W'_{OY}(s)W'_p(s)} = -L\{F\}W_m(s). \quad (5)$$

Для основного первого контура при $Z = 0$ можем записать:

$$(((-L\{Y\} - L\{M\})W_p(s) - L\{U'\})W_{ИМ}(s) + L\{F\})W_{OY}(s)W_3(s) = L\{Y\}. \quad (6)$$

Подставим выражения (4) и (5) в уравнение (6), а также поделим обе части уравнения (6) на изображение по Лапласу возмущения F :

$$(((W_m(s) - W_y(s))W_p(s) - W_{ИМ}(s)W_{ИМ}(s) + 1)W_{OY}(s)W_3(s) = W_y(s), \quad (7)$$

где $W_y(s)$ — характеризует воздействие возмущения F на регулируемую переменную Y .

Подставим в уравнение (7) развернутые выражения для $W_{ИМ}(s)$ и $W_m(s)$ и приведем его к общему знаменателю при условии равенства $W'_3(s) = W_3(s)$:

$$\frac{W_3(s)^2 W_{OY}(s)^2 W_p(s) W_{ИМ}(s)}{1 + W'_{ИМ}(s) W'_{OY}(s) W'_p(s)} - W_y(s) W_p(s) W_{OY}(s) W_3(s) - \frac{W_3(s) W_{OY}(s)^2 W'_p(s) W'_{ИМ}(s)}{1 + W'_{ИМ}(s) W'_{OY}(s) W'_p(s)} + W_{OY}(s) W_3(s) = W_y(s); \quad (8)$$

$$\frac{W_3(s)^2 W_{OY}(s)^2 W_p(s) W_{IM}(s) + W_{OY}(s) W_3(s) + W_3(s) W'_{OY}(s)^2 W'_p(s) W'_{IM}(s) - W_3(s) W'_{OY}(s)^2 W'_p(s) W'_{IM}(s)}{1 + W'_{IM}(s) W'_{OY}(s) W'_p(s)} =$$

$$= W_y(s) (1 + W_p(s) W_{IM}(s) W_{OY}(s) W_3(s)), \quad (9)$$

откуда получаем:

$$\frac{W_{OY}(s) W_3(s) (W_3(s) W_{OY}(s) W_p(s) W_{IM}(s) + 1)}{1 + W'_{IM}(s) W'_{OY}(s) W'_p(s)} = \quad (10)$$

$$= W_y(s) (1 + W_p(s) W_{IM}(s) W_{OY}(s) W_3(s));$$

$$W_y(s) = \frac{W_{OY}(s)}{1 + W'_{IM}(s) W'_{OY}(s) W'_p(s)} W_3(s). \quad (11)$$

Согласно соотношению (11) влияние запаздывания $W_3(s)$ на качество регулирования при возмущениях по каналу F проявляется только в смещении во времени траектории переходного процесса на величину запаздывания, что соответствует идее предиктора Смита.

В составе контура 2 для упреждающей компенсации возмущений могут использоваться регуляторы различных типов. Одним из способов реализации управления является применение нечеткой логики. При этом параметры настройки правил нечеткой логики могут быть сформированы как на основе опыта эксперта, так и подобраны в ходе автоматизированного эксперимента на основе компьютерного имитационного моделирования.

Модификация структуры системы для применения нечеткого управления

Применение нечеткой логики для управления объектами различного типа в энергетике и металлургии достаточно распространено [12–17]. Авторы указывают различные преимущества и причины использования таких систем: возможность синтеза системы с требуемыми свойствами на основе решения оптимизационной задачи подбора параметров настройки [12–14]; синтез базы знаний для уменьшения воздействия случайных внутренних и внешних возмущений [15]; наличие недетерминированного объекта [16]; резкие скачкообразные изменения значений входных параметров при нелинейности объекта управления [17].

Особенности синтеза правил регулятора на основе нечеткой логики путем сравнения результатов множества вычислительных экс-

периментов по компьютерному имитационному моделированию управления рассмотрены в работе [12]. Была продемонстрирована проблема настройки нечеткого регулятора, связанная с тем, что настройка должна осуществляться с учетом одновременного достижения нескольких целей управления.

Допустим, что заданы ограничения, определяющие условия достижения целей управления. Тогда для того чтобы регулятор обеспечивал достижение одновременно всех целей управления, требуется большее число варьируемых в экспериментах переменных, по сравнению с ситуациями, когда требуется достичь только некоторых из целей. Если ограничения, определяющие условие достижения целей, не определены, то проблему настройки можно сформулировать как необходимость компромисса между значениями различных оценок эффективности при фиксированном числе варьируемых переменных, которое определяется доступными вычислительными ресурсами на имитационное моделирование. Так, в работе [12] показано, что комбинирование системы на основе нечеткой логики с системой скользящего регулирования при равном числе настраиваемых переменных позволяет достичь большего быстродействия при отсутствии перерегулирования, чем у системы на основе одной только нечеткой логики.

Применительно к рассматриваемой задаче упреждающей компенсации возмущений можно выделить две цели, первая из которых заключается в том, чтобы не допустить кратковременных, но значительных отклонений регулируемой переменной вследствие возмущений, а вторая — в том, чтобы обеспечить отсутствие установившейся ошибки регулирования в долгосрочной перспективе. Контур компенсации возмущений F , основанный на использовании нечеткой логики, относится к нелинейным системам. Быстрая реакция на значительные отклонения от сигнала задания не означает наличие определенной реакции на малые отклонения. В то же время из вида соотношения (10) следует, что регулятор основного контура при соответствии свойств модели и объекта управления не участвует в фор-

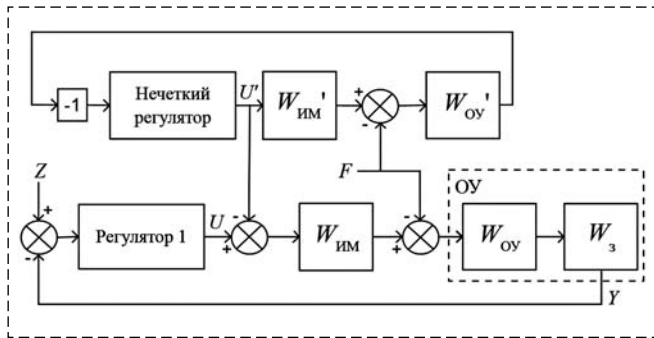


Рис. 4. Система с упреждающей компенсацией возмущений на основе нечеткой логики

Fig. 4. Fuzzy logic-based system with preemptive compensation for perturbations

мировании воздействий, направленных на компенсацию возмущения F .

Избежать необходимости настраивать нечеткий регулятор второго контура на устранение малых отклонений возможно, если такие отклонения будут устранены за счет управления от регулятора первого основного контура. В качестве такого регулятора применительно к задаче управления объектами температурного типа целесообразно использовать ПИ регулятор. Рассмотрим структуру системы на рис. 4.

Отсутствие воздействия второго контура на первый посредством сигнала M приводит к тому, что ПИ регулятор основного контура будет компенсировать отклонения от задания, вызванные действием возмущения F . Однако следует учитывать, что к моменту времени, когда отклонение выхода объекта от задания, вызванное действием возмущения F , можно будет наблюдать с учетом запаздывания процесса, упреждающее воздействие на объект вторым контуром будет уже в значительной степени сформировано. Таким образом, запаздывание объекта управления позволяет разделить во времени упреждающую компенсацию возмущения вторым контуром и устранение малых остаточных отклонений ПИ регулятором основного первого контура.

Изучение работы модели системы на рис. 4 подтвердило работоспособность предложенной системы при относительной простоте настройки нечеткого регулятора, допускающей при необходимости выбор правил человеком-экспертом без привлечения затратных в вычислительном плане автоматизированных вычислительных экспериментов для выбора параметров настройки нечеткой логики с привлечением поисковых методов.

Структура нечеткого регулятора

Принятая структура нечеткого регулятора соответствует рассмотренной в работе [12]. В качестве входных переменных используются линейно-масштабированные значения сигнала рассогласования e и скорости его изменения de/dt . В качестве лингвистических переменных приняты уровни сигнала $\{A5, A4, A3, A2, A1\}$ и функции принадлежности в соответствии с рис. 5.

Для работы регулятора был сформирован набор правил, в которых использовался ограниченный набор вариантов значений управляющих воздействий $B1, \dots, B5$:

1. IF (e is A5) and (de/dt is A5) then (U' is B5);
2. IF (e is A5) and (de/dt is A4) then (U' is B5);
3. IF (e is A5) and (de/dt is A3) then (U' is B4);
4. IF (e is A4) and (de/dt is A5) then (U' is B4);
5. IF (e is A4) and (de/dt is A3) then (U' is B4);
6. IF (e is A4) and (de/dt is A2) then (U' is B3);
7. IF (e is A4) and (de/dt is A1) then (U' is B3);
8. IF (e is A3) and (de/dt is A5) then (U' is B3);
9. IF (e is A3) and (de/dt is A3) then (U' is B3);
10. IF (e is A2) and (de/dt is A1) then (U' is B2);
11. IF (e is A2) and (de/dt is A3) then (U' is B2);
12. IF (e is A2) and (de/dt is A4) then (U' is B3);
13. IF (e is A1) and (de/dt is A5) then (U' is B2);
14. IF (e is A1) and (de/dt is A3) then (U' is B2);
15. IF (e is A1) and (de/dt is A1) then (U' is B1);
16. IF (e is A1) and (de/dt is A2) then (U' is B1).

В качестве примера рассмотрим первое правило. Если на входе нечеткого регулятора появилась ошибка A5 ("Большая отрицательная"), и скорость изменения ошибки также максимальна в сторону ее увеличения, то сформируем максимальное выходное воздействие, в нашем случае B5 ("Большое отрицательное"). Формирование управляющего воздействия по совокупности правил при дефазификации осуществлялось методом центра тяжести.

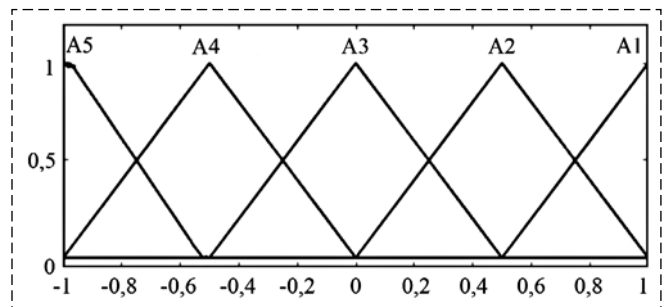


Рис. 5. Принятые типовые функции принадлежности

Fig. 5. Standard membership functions adopted in the study

ного контура с отрицательной обратной связью позволяет синтезировать регулятор для формирования упреждающего воздействия при неопределенности некоторых их динамических свойств объекта управления.

Предложенная система может быть применена к различным объектам с существенным транспортным запаздыванием для организации управления по возмущению.

Список литературы

1. Коньков Д. И., Захаркина С. В., Власенко О. М. Система эффективного автоматического регулирования температуры пара на выходе из котла // Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2017. № 23. С. 159–166.
2. Kuzishchina V. F., Ismathodzhayevb S. K. Controlling the Superheated Steam Temperature during Buffer Consumption of Gaseous Production Waste through Adjusting the Injection and Flame Position // Thermal Engineering. 2020. Vol. 67. P. 43–51. DOI: 10.1134/S0040601520010048.
3. Нуртазин А. С. Разработка и модернизация автоматической системы управления температуры перегретого пара котла БКЗ-420-140-5 // Актуальные проблемы современности. 2016. № 4 (14). С. 155–158.
4. Журавлев А. А., Шит М. Л., Попонова О. Б., Шит Б. М., Зубатый А. Л. Система автоматического регулирования температуры перегретого пара барабанного котла // Проблемы региональной энергетики. 2006. № 1. С. 16–29.
5. Еремин Е. Л., Теличенко Д. А., Чепак Л. В. Дискретно-непрерывная система адаптивного управления температурным режимом пароперегревателя // Информатика и системы управления. 2004. № 1(7). С. 117–129.
6. Siddikov Isamidin Hakimovich, Bakhrieva Xurshida Askarxodjaevna. Designs Neuro-Fuzzy Models in Control Problems of a Steam Heater // Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering. 2019. Vol. 6(5). P. 359–365. DOI: 10.13189/ujee.2019.060506
7. Кулаков Г. Т., Горелышева М. Л. Исследование влияния относительной постоянной времени инерционного участка пароперегревателя на качество регулирования тем-

пературы перегретого пара за котлом в широком диапазоне изменения нагрузок // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2008. № 5. С. 53–60.

8. Karppanen E. Advanced control of an industrial circulating fluidized bed boiler using fuzzy logic. Oulu: Oulun Yliopisto, 2000.

9. Владыко А. Г. Разработка и исследование моделей систем управления параметрами котлоагрегата на основе математического аппарата теории нечетких множеств: дис. канд. техн. наук: 05.13.18. Комсомольск-на Амуре, 2000.

10. Liangyu Ma, Wenjie Liu, Tingting Chen, Qianqian Li. Intelligent Compensation for the Set Values of PID Controllers to Improve Boiler Superheated Steam Temperature Control // Proceedings of the 39th Chinese Control Conference. 2020. P. 5707–5712.

11. Xiao Wu, Jiong Shen, Yiguo Li, Kwang Y. Lee. Fuzzy Modeling and Predictive Control of Power plant Steam Temperature System // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48, N. 30. P. 397–402.

12. Рябчиков М. Ю., Рябчикова Е. С., Кокорин И. Д. Система стабилизации температуры в нагревательной печи с применением скользящего регулирования и нечеткой логики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21, № 3. С. 143–157. DOI: 10.17587/mau.21.143-157.

13. Meysam Gheisarnejad, Mohammad Hassan Khooban. Design an optimal fuzzy fractional proportional integral derivative controller with derivative filter for load frequency control in power systems // Transactions of the Institute of Measurement and Control. 2019. P. 1–19.

14. Рябчиков М. Ю., Парсункин Б. Н., Андреев С. М., Полько П. Г., Логунова О. С., Рябчикова Е. С., Головкин Н. А. Нечеткое экстремальное управление процессом измельчения руды для обеспечения максимальной производительности // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2011. № 4 (36). С. 65–69.

15. Савин Д. В., Дроздов В. Г. Современный подход к системам автоматического управления отопления здания // Технические науки — от теории к практике. 2014. № 30. С. 51–56.

16. Хижняков Ю. Н. Нечеткое регулирование температуры теплоносителя // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2016. № 20. С. 5–12.

17. Штепа В. Н., Прокопья О. Н., Кот Р. Е., Пуха В. М. Микропроцессорная система дозирования реагентов на основе нечеткой логики // Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение. 2015. № 4 (94). С. 60–64.

A Fuzzy Logic-Based System for Controlling the Temperature of Steam Exiting a Superheater for the Purpose of Preemptive Perturbation Compensation

M. Yu. Ryabchikov, mr_mgn@mail.ru, E. S. Ryabchikova, mika.Elena@mail.ru,

S. A. Filippov, filippov211088@mail.ru,

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk city,
455000, Chelyabinsk Region, Russian Federation

Corresponding author: Ryabchikov Mikhail Yu., Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk city, 455000, Chelyabinsk Region, Russian Federation,
e-mail: mr_mgn@mail.ru

Accepted on January 12, 2021

Abstract

This paper discusses the issue of adjusting the temperature of steam exiting a superheater in an environment that is affected by perturbations due to the sudden and significant fluctuations in the inlet steam temperature. Using the superheater at the Magnitogorsk Iron & Steel Works as an example, we highlight that a slow response to the aforementioned perturbations in the systems that adjust for deviations leads to undesired rises and drops in the outlet steam temperature. We review the current suggestions on adjusting the temperature of steam exiting a superheater and determine the main reasons behind the drop in adjustment quality. These reasons are related to a significant lag and the variability of the control object's features, which make preemptive perturbation control difficult. In order to control such environments, we propose a system with two degrees of freedom, which combines a proportional-integral controller and a fuzzy logic-based controller. In the system that we are proposing, the changes in the controlled parameter (depending on the input value) are adjusted within the main loop that has a standard controller and negative feedback, while the perturbations are removed by using a secondary loop, which also has negative feedback, a fuzzy logic-based controller, and a simulation of the object without the component that accounts for the lag. For situations when the information on the object's features is precise, we describe the specifics of the loops' interaction, specifically in cases when the task processing loop does not respond to the perturbations in the inlet steam temperature, thus allowing for setting up the loops' controllers separately. In situations when the inlet steam temperature is experiencing perturbations, the impact of the lag on adjustment quality only becomes evident when the trajectory of the transition process shifts along the time scale by a lag value, which is completely in line with the Smith predictor principles. The system is focused on synthesizing the fuzzy logic rules and refining the parameters of the simulation used for adjustment purposes, based on the results of automated computer-aided control simulation. We propose a structural modification of the control system that makes it possible to compensate for any residual control errors caused by the non-linear structure of the fuzzy controller; this reduces the number of requirements for those set-up parameters where the value selection is based on the needs of simulation modeling, which requires a lot of computing resources. We demonstrate the results of simulation experiments that compare the efficiency of control using the system suggested and the efficiency of control using a system with a standard controller only. The computer simulation was performed in the MATLAB Simulink environment. We reaffirm that a combined control system performs better when adjusting the steam temperature.

Keywords: superheater, automated control, steam temperature, fuzzy logic, control simulation

For citation:

Ryabchikov M. Yu., Ryabchikova E. S., Filippov S. A. A Fuzzy Logic-Based System for Controlling the Temperature of Steam Exiting a Superheater for the Purpose of Preemptive Perturbation Compensation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 4, pp. 181–190.

DOI: 10.17587/mau.22.181-190

References

1. Konkov D. I., Zakharkina S. V., Vlasenko O. M. System of effective automatic control of the steam temperature at the out of boiler, *PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems*, 2017, no. 23, pp. 159–166 (in Russian).
2. Kuzishchina V. F., Ismathhodzhaevb S. K. Controlling the Superheated Steam Temperature during Buffer Consumption of Gaseous Production Waste through Adjusting the Injection and Flame Position, *Thermal Engineering*, 2020, vol. 67, pp. 43–51, DOI: 10.1134/S0040601520010048
3. Nurtazin A. S. Development and modernization of an automatic control system for the temperature of the superheated steam boiler BKZ-420-140-5, *Actual problems of our time*, 2016, no. 4, vol. 14, pp. 155–158 (in Russian).
4. Zhuravlev A. A., Shit M. L., Poponova O. B., Shit B. M., Zubatyj A. L. Automatic control system for the temperature of the superheated steam drum boiler, *Regional energy problems*, 2006, no. 1, pp. 16–29 (in Russian).
5. Eremin E. L., Telichenko D. A., Chepak L. V. Discrete-continuous system for adaptive control of the superheater temperature, *Computer Science and Control Systems*, 2004, no. 1, vol. 7, pp. 117–129 (in Russian).
6. Siddikov Isamidin Xakimovich, Bakhrieva Xurshida Askarxodjaevna. Designs Neuro-Fuzzy Models in Control Problems of a Steam Heater, *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 2019, vol. 6(5), pp. 359–365, DOI: 10.13189/ujee.2019.060506
7. Kulakov G. T., Harelyshava M. L. Investigation of relative time constant influence of inertial part of superheater on quality of steam temperature control behind boiler in broad band of loading variations, *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2008, no. 5, pp. 53–60 (in Russian).
8. Karppanen E. Advanced control of an industrial circulating fluidized bed boiler using fuzzy logic. Oulu: Oulun Yliopisto, 2000.
9. Vlado A. G. Designing and studying the models of control systems for adjusting the boiler unit parameters, based on the mathematical concepts of the fuzzy set theory, Diss. Cand. Tech. Sci.: 05.13.18, Komsomolsk-on-Amur, 2000 (in Russian).
10. Liangyu Ma, Wenjie Liu, Tingting Chen, Qianqian Li. Intelligent Compensation for the Set Values of PID Controllers to Improve Boiler Superheated Steam Temperature Control, *Proceedings of the 39th Chinese Control Conference*, 2020, pp. 5707–5712.
11. Xiao Wu, Jiong Shen, Yiguo Li, Kwang Y. Lee. Fuzzy Modeling and Predictive Control of Power plant Steam Temperature System, *IFAC-PapersOnLine*, 2015, vol. 48, no. 30, pp. 397–402.
12. Ryabchikov M. Yu., Ryabchikova E. S., Kokorin I. D. System of Temperature Stabilization in a Heating Furnace Based on Sliding Mode Control and Fuzzy Logic, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 3, pp. 143–157, DOI: 10.17587/mau.21.143-157.
13. Meysam Gheisarnejad, Mohammad Hassan Khooban. Design an optimal fuzzy fractional proportional integral derivative controller with derivative filter for load frequency control in power systems, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2019. P. 1–19.
14. Ryabchikov M. Yu., Parsunkin B. N., Andreev S. M., Polyko P. G., Logunova O. S., Ryabchikova E. S., Golovko N. A. Maximal efficiency fuzzy logic based extremal control system, *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2011, no. 4, pp. 65–69 (in Russian).
15. Savin D. V., Drozdov V. G. Modern approach to systems automatic control heating building, *Tekhnicheskije nauki — ot teorii k praktike*, 2014, no. 30, pp. 51–56 (in Russian).
16. Hizhnyakov Yu. N. Fuzzy control of the heat-carrier temperature, *PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems*, 2016, no. 20, pp. 5–12 (in Russian).
17. Shtepa V. N., Prokopenya O. N., Kot R. E., Puha V. M. The microprocessor control system of the dosing reagents based on the fuzzy logic, *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie*, 2015, no. 4 (94), pp. 60–64 (in Russian).