

М. Ю. Рябчиков, канд. техн. наук, доц., Е. С. Рябчикова, канд. техн. наук, доц., И. Д. Кокорин, студент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова

Система стабилизации температуры в нагревательной печи с применением скользящего регулирования и нечеткой логики

Рассмотрены проблемы регулирования температуры в нагревательных печах на примере протяжной печи для отжига стальной полосы агрегата непрерывного горячего оцинкования. Показано, что одной из основных проблем является непостоянство динамических свойств объекта управления при гибком управлении производством с изменением производительности печи. С использованием модели теплотехнического состояния рабочего пространства и металла, учитывающей влияние температурных режимов печи на тепловые потери, определены пределы вариации параметров упрощенной модели динамики объекта. Рассмотрены проблемы управления температурным объектом с непостоянными динамическими параметрами. Изучены достоинства и недостатки систем управления объектами, основанными на использовании нечеткой логики и скользящего регулирования. Показано, что система скользящего регулирования при управлении объектом температурного типа может приводить к колебательным переходным процессам вследствие отсутствия амплитудной модуляции управляющего воздействия при приближении к заданию. Предложена система автоматической стабилизации регулируемого параметра для объекта температурного типа, комбинирующая скользящее регулирование и нечеткую логику. В предложенной системе стабилизации направление изменения управляющего воздействия определяется с применением скользящего регулирования, а уровень управляющего воздействия — с использованием нечеткой логики. Представлены результаты вычислительных экспериментов по сравнению с эффективностью управления с использованием предложенной системы, а также системы, основанной на одной нечеткой логике. При вычислительных экспериментах оптимальные варианты параметров настройки систем определялись на основе полного перебора и компьютерного моделирования управления для объекта с заданной вариацией динамических свойств. Компьютерное моделирование осуществлялось в среде VisSim. Показано, что при постоянных значениях параметров масштабирования сигналов, используемых в правилах нечеткой логики, требование по обеспечению качественных переходных процессов с различным уровнем изменения задания приводит к существенному снижению быстродействия по сравнению с системой, комбинирующей нечеткую логику и скользящее регулирование. Продемонстрирована возможность простой подстройки качества переходных процессов в системе, комбинирующей нечеткую логику и скользящее регулирование, при изменении динамических свойств объекта.

Ключевые слова: нагревательная печь, гибкое управление, производительность, автоматическое регулирование, температура, скользящее регулирование, нечеткая логика

Введение

В современных условиях для управления объектами температурного типа, как правило, используются регуляторы на основе ПИД закона. Для температурного объекта с неизменными динамическими характеристиками настройка ПИД регулятора для отработки изменения задания или компенсации внешних возмущений не представляет сложности. Однако непостоянство динамических свойств объекта управления или особенностей возмущений может привести к снижению качества регулирования и потере устойчивости.

Так, при управлении температурой рабочего пространства в зонах нагревательной печи агрегата непрерывного горячего оцинкования

(АНГЦ) № 1 ПАО "ММК" регуляторы настроены на эффективную отработку возмущений при нагреве до 710...720 °С полосы типового сортамента толщиной порядка 0,45 мм при скорости движения полосы 180 м/мин. Доля такой продукции достаточно велика и достигает 70...80 %. Однако при обработке полосы менее распространенного сортамента или изменении скорости движения полосы может наблюдаться возникновение колебательных режимов по температурам рабочего пространства t_{rp} в отдельных зонах (рис. 1).

Причинами колебательных режимов являются различие особенностей межзонного теплового взаимодействия в различных режимах и непостоянство динамических свойств объекта управления. Последнее обусловлено рядом причин.

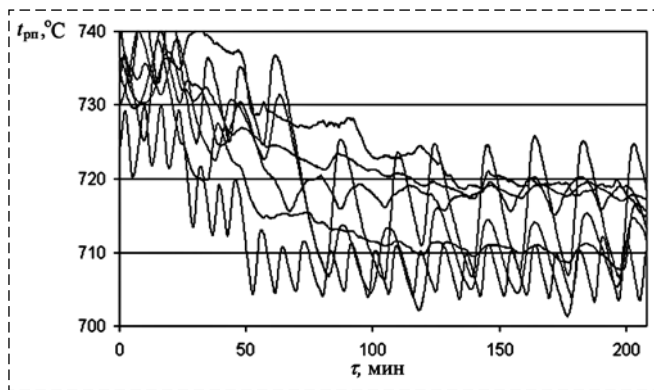


Рис. 1. Пример динамики изменения температуры в семи зонах отделения нагрева АНГЦ № 1 ПАО "ММК" при автоматической стабилизации температуры в каждой зоне

Fig. 1. Dynamics of temperature changes in seven zones of the heating compartment of CHDGU No. 1 at PJSC Magnitogorsk Iron & Steel Works upon automatic temperature stabilization in each zone (an example)

Так, на АНГЦ № 1 ПАО "ММК" горелки включаются группами исходя из уровня управляющего воздействия, сформированного регулятором температуры. При этом датчики контроля температуры расположены вблизи определенных горелок. Поэтому динамические свойства объекта могут изменяться.

Другими особенностями, влияющими на динамику объекта, являются непостоянство уровня внешних тепловых потерь при изменении температуры рабочего пространства и наличие ограничений на максимальную мощность горелок. Кроме того, современные системы управления распределением топливной нагрузки по зонам, решающие задачи энергосбережения, могут ограничивать и минимально допустимый расход топлива на зону. По такому принципу, например, работает система распределения топливной нагрузки в протяженной печи АНГЦ № 3 ПАО "ММК". Регулятор, поддерживающий в зоне заданную температуру, изменяет расход топлива на зону с учетом ограничения.

При изменении сортамента важной задачей является обеспечение своевременного изменения температурного режима печи. Требуется обеспечить высокое быстродействие переходных процессов при минимальном перерегулировании. Однако непостоянство динамики приводит к тому, что выход на новый температурный уровень затягивается и в некоторых ситуациях осуществляется путем серии малых изменений сигнала задания. Это позволяет предотвратить существенное отклонение температуры зон и температуры полосы от регламентированных

уровней при протекании переходных процессов, но снижает их быстродействие.

Заданную температуру металла на выходе из печи можно получить при различной производительности, определяемой скоростью движения полосы. При большей скорости требуется повысить температуру рабочего пространства, чтобы передать металлу требуемое количество теплоты за меньшее время. Однако это сопровождается ростом внешних тепловых потерь и требует дополнительного расхода топлива для их компенсации. Иными словами, рост производительности сопровождается ростом как удельных, так и общих затрат топлива. Изменение общих затрат топлива, в свою очередь, приводит к переключениям горелок и оказывает влияние на динамику объекта управления.

Необходимо отметить, что задача повышения гибкости производства является одной из приоритетных в современных условиях нестабильного рынка [1]. Стремление к варьированию затрат и производительности, определяющих внешнюю гибкость, требует повышения внутренней операционной гибкости. Применительно к нагревательным печам это требует организации управления температурными режимами при различной степени интенсификации процесса. Для этого подсистемы управления температурными режимами должны быть способны функционировать при значимом изменении динамических свойств объекта управления.

1. Влияние производительности на динамику температурных процессов

При управлении температурными режимами нагревательных печей выделенное при сжигании топлива тепло идет на нагрев рабочего пространства, компенсацию тепловых потерь, связанных с нагревом металла, а также на компенсацию внешних тепловых потерь. Заметим, что тепловые потери, связанные с нагревом металла, а также внешние тепловые потери являются определяющими для теплового баланса [2]. Это приводит к тому, что продолжительность переходных процессов по температуре рабочего пространства нагревательных печей может быть значимо различной для разных режимов. Уровень непостоянства продолжительности переходных процессов может возрастать при желании предельно увеличить производительность нагревательных печей. При теоретической предельной

производительности все подводимое тепло тратится на нагрев металла и компенсацию тепловых потерь, что не оставляет резервов по дальнейшему увеличению температуры рабочего пространства зон нагревательной печи. Так, для различного сортамента стальной полосы в протяжных печах для светлого отжига устанавливают предельно допустимые скоростные режимы [3].

В качестве примера рассмотрим режимы обработки стальной полосы в протяжной нагревательной печи башенного типа АГНЦ ПАО "ММК". Изучение существующих режимов показывает наличие определенной связи между скоростью движения полосы v , ее толщиной H и шириной B (рис. 2, а).

Предложенный в работе [2] комплекс моделей, учитывающий влияние температурных режимов на тепловые потери, позволяет оценить влияние скорости движения полосы на требуемый расход топлива Q на печь. При этом для каждой скорости определяется температурный режим зон, обеспечивающий требуемую температуру нагрева полосы на выходе из печи. На рис. 2, б представлена зависимость при среднем уровне тепловых потерь для полосы шириной 1,27 м и толщиной 1,47 мм. Скорость движения полосы 130 м/мин является предельной. При этом расходы топлива и воздуха на зоны достигают допустимого максимума, определяемого конструкцией горелок. Для температурного режима при скорости 130 м/мин нет альтернатив, так как нет возможности варьирования расхода топлива на зоны (в каждой зоне расход максимален). По мере уменьшения скорости движения полосы возможно решение задачи оптимизации температурных режимов в целях экономии топлива. Из рис. 2, а следует, что рабочий скоростной режим существенно отличается от предельного режима, определяемого мощностью горелок. При этом агрегат в целом рассчитан на скорость 180 м/мин. Этот скоростной режим используется для распространного сортамента 0,47 мм.

Можно указать вероятные причины различия между рабочим и предельным скоростными режимами. Непостоянство уровня тепловых потерь в течение календарного года при-

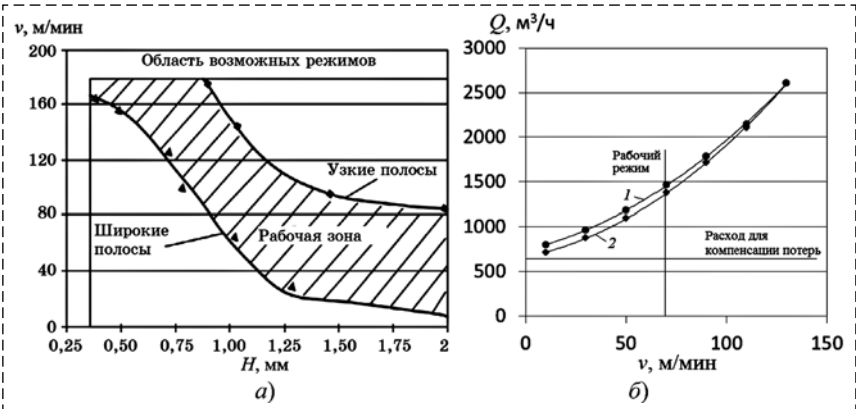


Рис. 2. Используемый скоростной режим (а) для полос с различной толщиной и шириной (узкие полосы — 1 м; широкие полосы — 1,6 м), а также определенная с применением модели связь (б) между скоростью движения полосы и требуемым расходом топлива (ширина — 1,27 м; толщина — 1,47 мм): 1 — типового температурного режима; 2 — энергосберегающего температурного режима

Fig. 2. Speed rate (a) for strips of various thickness and width (narrow strips — 1m; wide strips — 1.6 m), and relationship (b) between the strip speed and the required fuel consumption, determined using the model (width — 1.27 m; thickness — 1.47 mm): 1 — standard temperature conditions; 2 — energy-saving temperature conditions

водит к непостоянству также и предельного скоростного режима. Используемые скорости движения полосы должны быть ниже предельных, определяемых мощностью горелок, для обеспечения возможности регулирования температуры рабочего пространства в печи. В качестве примера рассмотрим результаты компьютерного моделирования переходных процессов в каскадной системе управления температурным режимом зон печи АНГЦ № 1 ПАО "ММК" (рис. 3). При моделировании используется рассмотренный в работе [2] комплекс моделей теплотехнического состояния печи и металла.

Система стабилизации температуры полосы корректирует задание по температурам зон печи относительно уровней, определенных

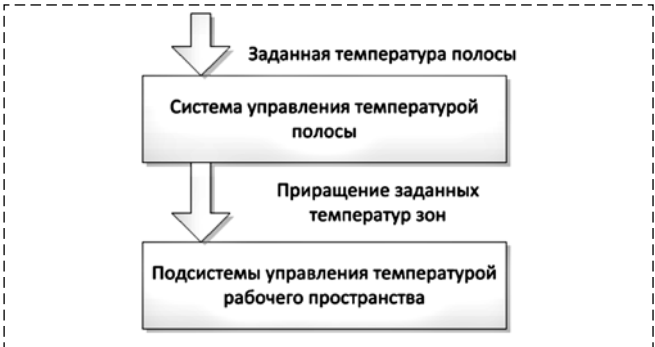


Рис. 3. Каскадная система управления температурным режимом зон

Fig. 3. Cascade system for control of temperature conditions in the zones

с использованием модели по критерию минимизации тепловых потерь. На рис. 4 показаны переходные процессы по температуре полосы $t_{\text{п}}$ на выходе из печи, а также соответствующие температуры в зонах печи при скорости полосы 10 м/мин, а также 130 м/мин. Параметры полосы аналогичны указанным ранее. Видно, что при скорости 130 м/мин протяженность переходных процессов чрезвычайно увеличивается. Причиной является тот факт, что при скорости 130 м/мин расходы топлива близки к предельному уровню для обеспечения заданной температуры полосы.

Рис. 4 демонстрирует значимое влияние скоростного режима на динамику температурных процессов. Однако предложенная в работе [1] модель позволяет прогнозировать такие особенности и дает возможность учесть их при управлении.

В то же время особенности непостоянства динамики, связанные с переключением горелок

и особенностями размещения датчиков, сложно оценить с применением моделей [2]. В ходе эксплуатации АНГЦ № 1 ПАО "ММК" возникали ситуации, когда в некоторых из семи зон протяжной башенной печи из эксплуатации было выведено более трети радиантных труб по причине неисправности (в каждой зоне предусмотрено по двадцать три горелки). Выход труб из строя, переключение горелок, изменение соотношения газ—воздух при сжигании топлива может оказать существенное влияние на динамику температурных процессов.

Для оценки непостоянства динамики температурных процессов использовали данные обычных рабочих режимов печи с управлением расходом топлива в ручном режиме (от оператора). Такие режимы относительно редки для агрегата, но за период длительностью два года в базе было найдено около сорока периодов работы, в течение которых параметры полосы, расходы топлива и воздуха по всем зонам, кроме

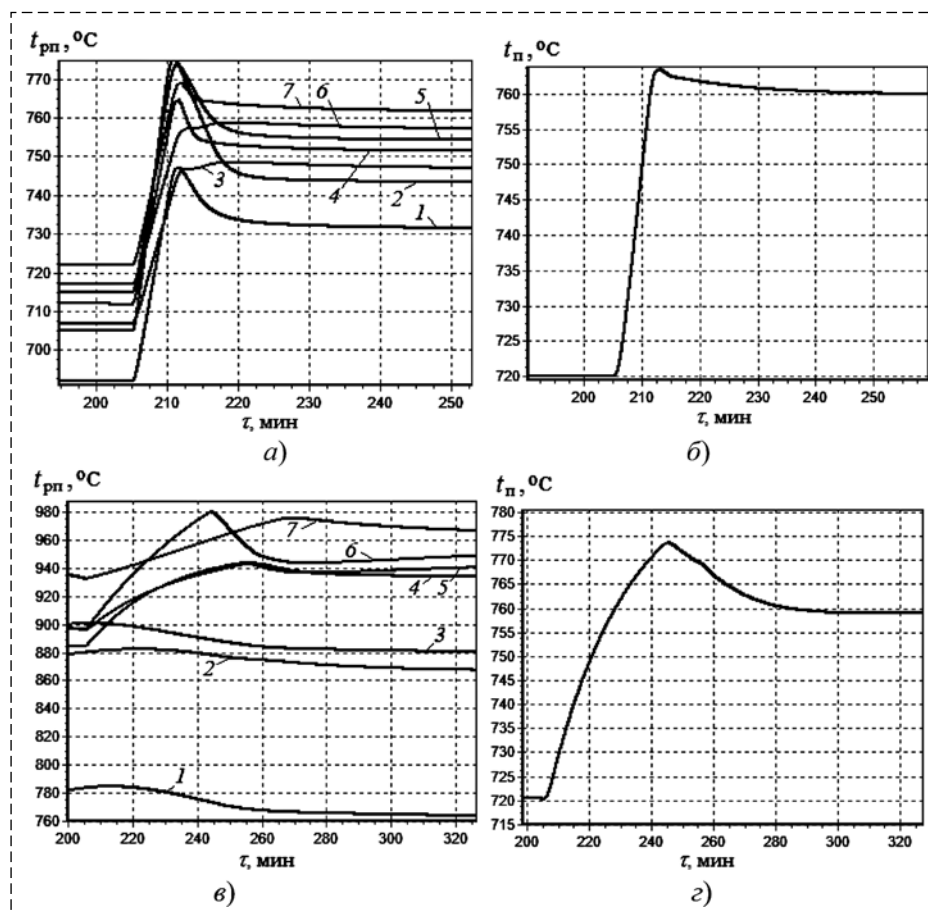


Рис. 4. Переходные процессы при компьютерном моделировании управления температурой полосы и температурами рабочего пространства в зонах (цифрами отмечены номера зон) при скорости движения полосы 10 м/мин (а, б) и 130 м/мин (в, г)

Fig. 4. Transient responses upon computer simulation of control over the strip and cavity temperatures in the zones (digits indicate zone numbers) at the strip speed of 10 m/min (а, б) and 130 m/min (в, г)

одной, были стабильны. При этом в одной из зон оператор однократно скачкообразно изменял расход топлива. Пример подобной динамики изменения расходов топлива на зоны приведен на рис. 5, а. Видно, что в определенный момент времени оператор изменил расход топлива на шестую зону, что повлекло за собой изменение температуры по отношению к прогнозируемой динамике изменения. Разница $\Delta t(\tau)$ между фактической и прогнозируемой динамикой изменения температуры представляет собой кривую разгона как реакцию на изменение расхода топлива на зону.

Изучение множества полученных кривых разгона показало, что динамику объекта управления целесообразно представить последовательным соединением двух инерционных звеньев первого порядка $W(p) = 1/((T_1 p + 1) \times (T_2 p + 1))$. На рис. 6 показаны примеры нормированных кривых разгона $t_{\text{н}}(\tau)$ по температуре рабочего про-

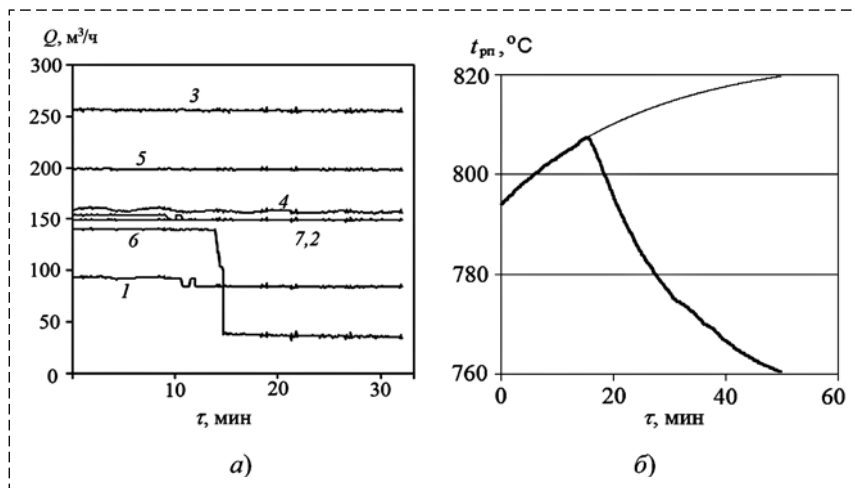


Рис. 5. Пример изменения расходов топлива на зоны (а) и соответствующего изменения температуры в шестой зоне, где тонкой линией показан прогноз (б)

Fig. 5. Changes in fuel consumption for the zones (a) and corresponding temperature changes in zone 6 where prediction is shown with a thin line (b) (an example)

странства и результаты их аппроксимации. При нормировании использовали выражение $t_n(\tau) = \Delta t(\tau)/\Delta t_y$, где Δt_y — установившееся значение $\Delta t(\tau)$.

Свойства температурного объекта часто представляют последовательным соединением инерционного звена и транспортного запаздывания либо соединением двух инерционных звеньев с соотношением $T_1/T_2 \in [0,01 \text{ до } 0,1]$, где T_2 — большая из постоянных времени. При аппроксимации с учетом указанного соотношения большая постоянная времени T_2 изменяется по найденным характеристикам более

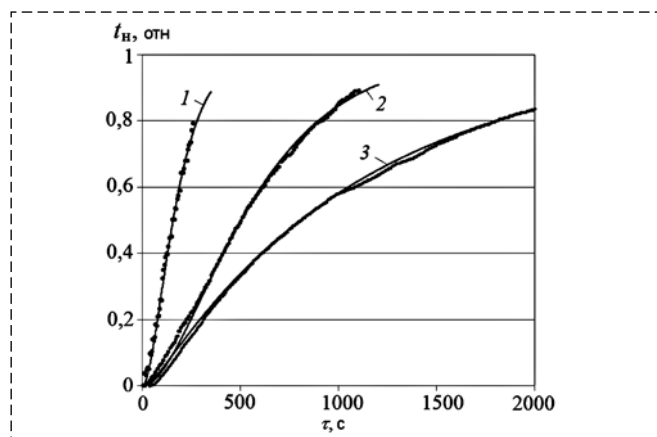


Рис. 6. Примеры полученных нормированных кривых разгона по температуре рабочего пространства и результаты их аппроксимации:

1 — $T_1 = 94 \text{ с}$, $T_2 = 94 \text{ с}$; 2 — $T_1 = 300 \text{ с}$, $T_2 = 300 \text{ с}$; 3 — $T_1 = 52 \text{ с}$, $T_2 = 1090 \text{ с}$

Fig. 6. Examples of derived normalized transient response curves of the cavity temperature and results of their approximation:

1 — $T_1 = 94 \text{ s}$, $T_2 = 94 \text{ s}$; 2 — $T_1 = 300 \text{ s}$, $T_2 = 300 \text{ s}$; 3 — $T_1 = 52 \text{ s}$, $T_2 = 1090 \text{ s}$

чем в пять раз. В дальнейшем при компьютерном моделировании использовали объект с передаточной функцией $W(p) = 1/((T_1 p + 1) \times (T_2 p + 1))$ при $T_1/T_2 = 0,1$.

Для эффективного управления температурой зоны печи целесообразна разработка системы стабилизации, допускающей непостоянство динамики температурных процессов и относительно легко настраиваемой на новые условия работы. Учитывая, что динамика нагрева и охлаждения может существенно различаться при разной производительности агрегата, целесообразно рассмотреть возможность применения систем на основе нечеткой логики, которые позволяют настраивать в форме правил особенности применяемого уровня управляющего воздействия.

2. Системы регулирования для объекта температурного типа с применением нечеткой логики

Применение нечеткой логики для управления объектом температурного типа предлагается в значительном числе работ [4—17]. При принятии решения об использовании нечеткой логики авторы указывают разные причины. В работе [4] на примере системы управления отоплением здания указывается, что при возмущениях, свойства которых изменяются во времени, и при наличии у объекта запаздывания традиционные регуляторы могут не справиться со своей задачей, поскольку принятые при их синтезе исходные предположения о свойствах объекта могут не соответствовать действительности. В работах [5, 6] указывается целесообразность применения нечеткой логики для описания неопределенности, связанной с неточностью, неполнотой и недостоверностью информации о рассматриваемом объекте и среде его функционирования. При этом под объектом понимается нелинейный и нестационарный объект с распределенными параметрами, функционирующий в условиях априорной неопределенности. В работах [7—9] целесообразность применения системы управления на основе нечеткой логики обоснована

достижением дополнительного преимущества, связанного с энергосбережением при выполнении прочих требований. В статье [10] рассматривается задача регулирования температуры горячей воды, и причиной применения нечеткой логики указывается наличие недетерминированного объекта. В работе [11] рассматривается проблема управления процессом гипохлорирования с применением нечеткой логики. Указано, что изменение входных параметров (расход, температура, давление) носит случайный характер с возможностью резких скачкообразных изменений, а гипохлоратор является нелинейным объектом. При этом отсутствуют технические средства для измерения концентрации хлора в реальном времени.

Согласно статье [4] системы автоматического управления с применением нечеткой логики можно классифицировать следующим образом: системы с нечетким контроллером, где используются заранее введенные знания; гибридные нечеткие системы, основанные на сочетании традиционных методов управления, нечеткой логики и искусственных нейронных сетей; самонастраивающиеся нечеткие системы, предусматривающие наличие алгоритма корректировки настроек нечеткой логики.

Гибридные и самонастраивающиеся системы предлагаются в работах [4, 12]. Целью самонастройки является коррекция имеющейся базы знаний нечеткого регулятора для уменьшения воздействия случайных внутренних и внешних возмущений [12]. В то же время, целесообразность дополнения системы на основе нечеткой логики блоком самонастройки в полной мере не обоснована авторами. Так, в статье [4] предложено использовать при самонастройке правил входные переменные, которые и так используются нечетким регулятором. Возможно, требуемое качество управления могло бы быть достигнуто за счет расширения базы правил нечеткого регулятора. Если же самонастраивающаяся подсистема относится к системам поискового типа, то необходимо учитывать, что ее настройки могут оказывать существенное влияние на качество управления. Возможно снижение качества управления за счет поисковых движений. Недостатком такой системы применительно к задаче управления объектом температурного типа является необходимость настройки на реальном объекте, что может привести к аварийной ситуации, связанной с выходом температуры из рабочего

диапазона. Таким образом, при создании самонастраивающихся нечетких систем поискового типа требуется определение взаимосвязи качества управления и параметров настройки самонастраивающейся подсистемы. Такая взаимосвязь, например, определена в работе [13] при управлении объектом температурного типа с применением искусственных нейронных сетей. Однако предлагая самонастраивающиеся нечеткие системы, авторы часто игнорируют отмеченную проблему.

Созданию систем с нечетким контроллером, где используются заранее введенные знания, посвящено множество работ, в том числе рассматривается проблема регулирования для объекта температурного типа [7, 10, 11, 14, 15]. Кратко рассмотрим общую структуру таких систем. Структура регулятора включает три блока, в которых обрабатывается информация, поступающая с объекта управления: фаззификатор; блок формирования логического решения; дефаззификатор.

В фаззификаторе входным переменным присваиваются соответствующие лингвистические переменные, которые имеют несколько лингвистических значений. Степень соответствия между входной переменной и ее лингвистическим значением определяется функцией принадлежности. Часто в качестве входных переменных используют сигнал рассогласования и скорость его изменения, а в качестве выходной переменной — управляющее воздействие. Блок формирования логического решения представляет собой экспертную систему, которая на основании анализа лингвистических значений входных переменных, полученных в фаззификаторе, определяет набор лингвистических значений выходной переменной. Управляющие воздействия в правилах обычно формируются исходя из знаний о поведении объекта. Основой создания правил может являться, например, знание о том, что если имеется рассогласование между текущим и заданным значением регулируемой величины, то необходимо сформировать управляющее воздействие, уменьшающее текущее рассогласование. В дефаззификаторе лингвистические значения выходной переменной принимают реальные значения управляющего воздействия [16].

При управлении температурными параметрами важным является стабильность качества переходных процессов при различных воздействиях. Для этого правила нечеткой логики

должны быть сформулированы индивидуально для различных состояний системы управления (например, при различных уровнях задания), что на практике может быть затруднительно. Причиной является чрезмерный рост числа правил, многие из которых формируют схожую логику управления применительно к разным состояниям системы. Поэтому, как правило, каждое из правил нечеткой системы охватывает множество схожих производственных ситуаций, определяемых функциями принадлежности. При этом в отдельной ситуации за принятие решения может отвечать множество правил. Это приводит к проблеме взаимного согласования правил для обеспечения высокого и стабильного качества регулирования для множества различных режимов. Несмотря на высокую важность, проблема часто игнорируется при разработке нечеткого регулятора.

Одним из способов ее решения является масштабирование значений входных параметров. Однако задаче масштабирования часто не уделяется достаточного внимания. Например, в работах [7, 11, 15] не указано, применяется ли масштабирование входных параметров. В статьях [6, 8] масштабирование не применяется. Предложенные авторами системы стабилизации температуры (Li-ion батареи и температурного режима здания) предполагают строгую определенность рабочего диапазона температур и оперируют абсолютными значениями сигнала рассогласования и скорости его изменения. В работе [17] рассматривается задача обеспечения комфортной температуры в помещении. Проблемой является значительное число входных параметров, характеризующих комфорт, что требует значительного числа правил. Авторами предложен обобщенный параметр, характеризующий свойства среды и изменяющийся в определенном диапазоне. Это позволяет сгруппировать различные состояния системы и ограничить требуемое для управления число правил.

Функции принадлежности, используемые авторами в работах [10, 14], определены для масштабированных значений входных параметров. При этом в работе [10] не отмечено, с какой целью выполняется масштабирование.

В работе [14] предложена система стабилизации для объекта температурного типа, основанная на множестве правил. При этом предполагается, что система регулирования содержит в своем составе исполнительный механизм постоянной скорости, причем скорость

исполнительного механизма $K_{им}$ ограничивает быстроедействие переходных процессов. В предложенной системе сигнал рассогласования ε и скорость его изменения $d\varepsilon/dt$ масштабируются путем умножения на коэффициенты K_1 и K_2 . Масштабированные значения ε и $d\varepsilon/dt$ используются в фазификаторе. Показано, что параметр масштабирования K_1 можно выбрать по выражению $K_1 = AK_{им}$, где параметр A определяет перерегулирование. Также K_1 может корректироваться исходя из типового уровня изменения сигнала задания.

Недостатком системы, предложенной в работе [14], является то, что типовой уровень рассогласования может быть заранее не известен при отработке возмущений, отличных от изменения задания. Кроме того, в системе управления температурным режимом печи быстроедействие переходных процессов определяется динамикой теплообмена. Быстроедействие систем переключения горелок или изменения скорости полосы несопоставимо высоко по отношению к динамике теплообмена. При управлении температурным режимом печи имеется возможность гибко управлять динамикой изменения управляющего воздействия.

Структура нечеткого регулятора, формирующего приращение управляющего воздействия, обсуждается в работах [14, 18, 24]. Можно предложить разные обоснования добавления интегратора в контур управления, не содержащий интегрирующих исполнительных устройств. По мнению авторов этой статьи, основополагающей причиной является уменьшение числа нечетких правил вследствие отсутствия необходимости дублирования логики отработки рассогласования при различных уровнях задания и соответствующих им управляющих воздействий.

Проблема формирования множества нечетких правил и их согласования для обеспечения стабильного качества переходных процессов в разных режимах во многом порождена восприятием нечеткой логики как средства обобщения мнений одного или группы экспертов — людей. Эксперт, предложивший некоторые из правил, может оказаться неспособен оценить общий эффект применения всего множества правил.

Согласование правил может быть обеспечено на основе обработки технологических данных и компьютерного моделирования управления в условиях возмущений. Это позволяет частично или полностью отказаться от услуг эксперта-человека.

Так, в работах [5, 19] предложена настройка системы управления с применением нечеткой логики на основе обработки технологических данных или компьютерного моделирования управления производственными объектами в условиях априорной неопределенности. Настройка предполагает сбор статистических данных в виде вход-выход нечеткого регулятора. Под входами понимаются параметры, характеризующие текущее состояние производственного объекта управления, а под выходами — сформированные управляющие воздействия. Предполагается, что собранная статистика позволит настроить систему нечеткого регулирования.

Развитие идеи [5] предполагает, что по итогам моделирования каждому состоянию системы управления будут поставлены в соответствие некоторые рациональные управляющие воздействия. Для решения задачи может использоваться регулятор, синтезированный методом теории вероятностей [20]. В таком нечетком регуляторе степень соответствия между входными параметрами и их лингвистическими переменными задается не функцией принадлежности, а плотностями распределения. Значение выходного параметра определяется математическим ожиданием полученных лингвистических переменных. Метод теории вероятностей освобождает разработчика от сложных эвристических операций [20]. Принципиально это позволяет автоматизированно сформировать большое множество правил, каждое из которых отвечает за чрезвычайно ограниченный спектр производственных ситуаций, без участия эксперта-человека.

Однако если подобная настройка нечеткого регулятора выполняется по накопленной технологической информации, то созданный регулятор будет только обобщать опыт управления объектом с применением алгоритмов, которые использовались при аккумуляции информации в базу. В то же время управление, реализуемое алгоритмами в прошлом, может не соответствовать задачам оптимизации управления.

Обеспечение такого соответствия возможно путем настройки нечеткого регулятора по результатам компьютерного моделирования управления. Например, в работе [6] настройка регулятора выполняется с применением упрощенной модели процессов в Li-ion батарее.

Однако поисковый характер решения задачи с применением моделей и ограничения на вычислительные ресурсы затрудняют настройку

при большом числе нечетких правил и, соответственно, настраиваемых параметров. Таким образом, устранение влияния неопределенности за счет настройки правил по результатам компьютерного моделирования предполагает наличие ограниченного (вычислительными ресурсами) множества таких правил, что состояния системы, для которых они определяются, существенно пересекаются. Задача компьютерного моделирования в таком случае — настройка согласованности правил, обеспечивающей устранение влияния неопределенности при управлении.

Тогда нечеткий регулятор может интерпретироваться как статистическая модель, настройка параметров которой направлена на достижение двух основных задач — стабильности качества управления и повышения качества управления. Под последним понимаем устойчивость, быстроедействие, перерегулирование и др. Это позволяет рассматривать задачу синтеза нечеткого регулятора с позиции создания статистической модели. Проблема заключается в том, что выбор значений настраиваемых параметров нечеткого регулятора должен быть одновременно направлен как на стабильность качества управления, так и на повышение качества управления, что требует увеличения числа правил и настраиваемых параметров. Последнее затрудняет согласование правил по результатам компьютерного моделирования.

Одним из вариантов решения проблемы является переход на восприятие нечеткой логики как вспомогательного инструмента обеспечения стабильности качества управления в условиях неопределенности в системах управления, основанных на иных методах. Так, в работе [21] выполнен обзор систем, основанных на комбинировании ПИД регулятора и нечеткой логики.

Используемый метод управления должен быть эффективен для выбранного класса объектов управления, а нечеткая логика должна являться инструментом дополнительного повышения эффективности. В качестве такого метода управления может быть принята предложенная в работе [22] система, основанная на скользящем регулировании, примененная автором для объекта температурного типа и предполагающая наличие в контуре управления интегратора. Рассмотрим особенности и проблемы применения такой системы к задаче управления температурным объектом.

3. Управление температурным объектом с использованием системы скользящего регулирования

Системы, основанные на принципе скользящего регулирования, используют фазовую плоскость для формирования управляющего воздействия. Фазовая плоскость отражает возможные состояния динамической системы. В основном состояние системы в фазовой плоскости описывается двумя видами траекторий: разгон A_+ и торможение A_- . Координатами траекторий являются сигнал рассогласования ΔX и скорость его изменения $\dot{X}$ [22]. Возникновение скользящего режима обусловлено наличием переключений регулятора между двумя траекториями. Переключения осуществляются посредством построения линии переключения Γ под некоторым наклоном относительно координат. Угол наклона линии переключения задается разработчиком скользящего регулятора. При регулировании система меняет траекторию движения с разгона на торможение и обратно, и в определенный момент возникает скольжение. В режиме скольжения движение становится вынужденным и получает особую устойчивость. Оно возникает только в том случае, когда угол наклона линии переключения становится меньше или равен углу касательной к траектории.

В работе [22] отмечается, что в ряде случаев при построении линии переключения можно добиться того, что система перейдет в режим скольжения уже после первого переключения. Рассматривая систему управления инерционным объектом, автор отмечает, что для организации управления такими объектами в состав контура нужно ввести интегратор. Сочетание инерции и интегратора искажает фазовые траектории, но это не препятствует применению принципа скользящего регулирования. В то же время в некоторые моменты времени регулируемая величина слишком быстро стремится к заданию, что может стать причиной аварий и колебательных переходных процессов. В качестве примера рассмотрим переходные процессы (рис. 7) в линейной системе при $T_2 = 72$ с и уровнях управляющего воздействия $+U = 0,6$ и $-U = -0,6$. При определении линии переключения Γ оперировали масштабированным значением сигнала рассогласования $\varepsilon_m = \varepsilon K_1$ ($K_1 = 1/300$). Масштабированная скорость изменения рассогласования $\varepsilon'_m = K_2 \varepsilon'$ ($K_2 = 1/10$)

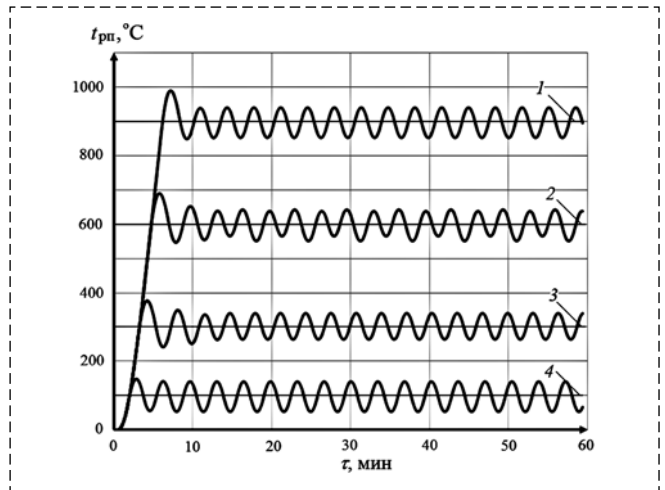


Рис. 7. Пример переходных процессов по заданию (цифрами отмечены процессы при разных заданиях) для объекта температурного типа при скользящем регулировании

Fig. 7. Transient set-point responses (digits indicate responses at different set-points) for a temperature object upon sliding mode control (an example)

в формате мин^{-1} . Далее по тексту под ε и ε' понимаются соответственно ε_m и ε'_m . В уравнении линии переключения $\varepsilon'_m = K_{\text{пр}} \varepsilon_m$ параметр $K_{\text{пр}} = -0,2$.

Видно, что независимо от уровня задания в системе наблюдается колебательный режим. Было получено, что при различных значениях параметра линии переключения $K_{\text{пр}}$ колебания не устраняются, а меняется лишь их амплитуда. Для ограничения скорости приближения к заданию в работе [22] предлагается усовершенствовать линию переключения, сделав ее нелинейной. Однако это приведет к более сложной настройке на действующем объекте.

Устранить проблему можно путем дополнения системы на основе скользящего регулирования нечеткой логикой. При этом направление изменения управляющего воздействия определяется на основе скользящего регулирования, а уровень управляющего воздействия — с использованием нечеткой логики.

4. Система стабилизации на основе нечеткой логики и скользящего регулирования

Структура предлагаемой системы стабилизации представлена на рис. 8. Модель системы состоит из элемента сравнения, регулятора, интегратора и объекта управления, состоящего из двух инерционных звеньев первого порядка с постоянными времени T_2 и T_1 . Регу-

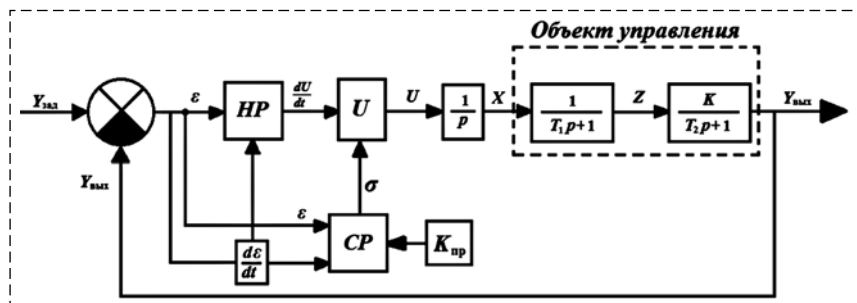


Рис. 8. Структура системы управления основанной на нечетких правилах и скользящем режиме управления

Fig. 8. Structure of a control system based on fuzzy logic and sliding mode control

лятор состоит из двух связанных блоков: блока нечеткого регулятора $НР$ и блока скользящего регулирования $СП$. Нечеткий регулятор формирует скорость приближения регулируемой величины к сигналу задания, а скользящий регулятор определяет направление движения. Коэффициент наклона линии переключения $K_{пр}$ является настроечным параметром и обеспечивает устойчивость движений регулируемой величины с помощью режима скольжения.

На вход системы подается сигнал задания $Y_{зад}$, который сравнивается с текущим значением регулируемой величины $Y_{вых}$. В результате сравнения двух сигналов на вход $НР$ подается сигнал рассогласования ε и скорость его изменения ε' . После масштабирования способом, рассмотренным ранее, в фазификаторе нечеткого регулятора выполняется интерпретация значений входных параметров с применением лингвистических переменных: A_1 — "Большое положительное"; A_2 — "Малое положительное"; A_3 — "Нулевой уровень сигнала"; A_4 — "Малое отрицательное"; A_5 — "Большое отрицательное".

Функция принадлежности μ определяет степень соответствия значений входных парамет-

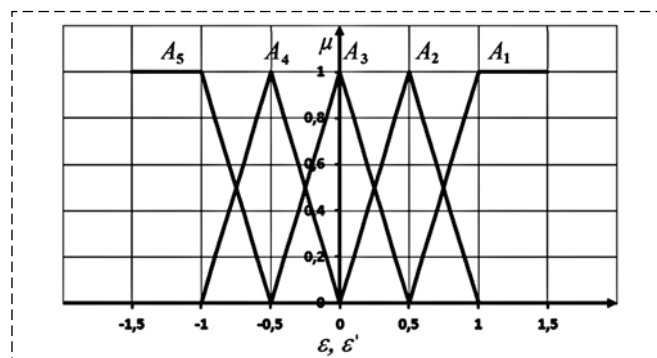


Рис. 9. Принятые функции принадлежности нечетких множеств $\mu(\varepsilon)$ и $\mu(\varepsilon')$

Fig. 9. Adopted fuzzy-set membership functions $\mu(\varepsilon)$ and $\mu(\varepsilon')$

тров лингвистическим переменным (рис. 9). Функция принадлежности максимальна, когда значение входного параметра в наибольшей степени соответствует понятию лингвистической переменной.

Для работы нечеткого регулятора требуются правила. Обычно нечеткие правила отражают логику технолога — эксперта, который спрогнозировал желаемое поведение системы в каждой из ситуаций [12, 14, 20]. Нечеткий вывод пред-

ставляет собой процедуру нахождения функции принадлежности каждого из множества заключений логических правил вида "ЕСЛИ-ТО", которые являются нечеткими лингвистическими высказываниями в форме лингвистических переменных. Часть "ЕСЛИ" означает сопряжение логических операций, а часть "ТО" указание лингвистической величины для управляющего воздействия нечеткого регулятора.

Применительно к задаче стабилизации можно сформулировать ряд правил, отражающих желаемое управление инерционным объектом. Однако в условиях неопределенности, связанной с величиной изменения задания, динамическими свойствами и другими особенностями, сложно заранее выбрать рациональные значения управляющих воздействий для каждой ситуации, оперируя только опытом эксперта. Выбор конкретных уровней управляющих воздействий можно провести по результатам компьютерного моделирования переходных процессов на модели с учетом вариации неопределенных параметров. При таком эксперименте для каждого варианта значений неопределенных параметров требуется полный перебор уровней управляющих воздействий, используемых в правилах. Учитывая, что число правил может быть значительно, такой эксперимент осуществить сложно. Однако если допустить возможность группировки правил по управляющему воздействию, то задача может быть решена методом полного перебора.

Рассмотрим типовой подход к группировке правил. Примем следующие типовые уровни управляющего воздействия: B_1 — "Большое положительное"; B_2 — "Малое положительное"; B_3 — "Нулевой уровень"; B_4 — "Малое отрицательное"; B_5 — "Большое отрицательное". Дополнительно примем, что $|B_1| = |B_5|$ и $|B_2| = |B_4|$. Процесс нечеткого вывода выполним в соответствии с разработанной базой правил:

П1 (группа 1): $(\varepsilon = A_1) \wedge (\varepsilon' = A_3) \rightarrow U_n = U_1 = B_1$;
 П2 (группа 2): $(\varepsilon = A_4) \wedge (\varepsilon' = A_4) \rightarrow U_n = U_2 = B_2$;
 П3 (группа 0): $(\varepsilon = A_3) \wedge (\varepsilon' = A_3) \rightarrow U_n = U_3 = B_3$;
 П4 (группа 1): $(\varepsilon = A_2) \wedge (\varepsilon' = A_5) \rightarrow U_n = U_4 = B_1$;
 П5 (группа 2): $(\varepsilon = A_2) \wedge (\varepsilon' = A_2) \rightarrow U_n = U_5 = B_4$;
 П6 (группа 1): $(\varepsilon = A_4) \wedge (\varepsilon' = A_1) \rightarrow U_n = U_6 = B_5$;
 П7 (группа 1): $(\varepsilon = A_5) \wedge (\varepsilon' = A_3) \rightarrow U_n = U_7 = B_5$;
 П8 (группа 1): $(\varepsilon = A_3) \wedge (\varepsilon' = A_1) \rightarrow U_n = U_8 = B_5$;
 П9 (группа 1): $(\varepsilon = A_3) \wedge (\varepsilon' = A_5) \rightarrow U_n = U_9 = B_1$;
 П10 (группа 1): $(\varepsilon = A_5) \wedge (\varepsilon' = A_5) \rightarrow U_n = U_{10} = B_5$;
 П11 (группа 1): $(\varepsilon = A_1) \wedge (\varepsilon' = A_1) \rightarrow U_n = U_{11} = B_1$;
 П12 (группа 2): $(\varepsilon = A_1) \wedge (\varepsilon' = A_5) \rightarrow U_n = U_{12} = B_2$;
 П13 (группа 2): $(\varepsilon = A_5) \wedge (\varepsilon' = A_1) \rightarrow U_n = U_{13} = B_4$.

Представленные правила можно пояснить в словесной и графической форме. В качестве примера рассмотрим правило П4 (рис. 10). Если регулируемая величина меньше задания ($\varepsilon = A_2$ "Малое положительное") и приближается к нему с большой скоростью ($\varepsilon' = A_5$ "Большое отрицательное"), то, чтобы регулируемая величина гарантированно достигла задания, будем формировать воздействие $U_n = B_1$ "Большое положительное".

Однако эксперт мог бы предложить и иной вариант правила. Если регулируемая величина меньше задания ($\varepsilon = A_2$ "Малое положительное") и приближается к нему с большой скоростью ($\varepsilon' = A_5$ "Большое отрицательное"), то вскоре вследствие наличия инерции следует ожидать достижения задания, и поэтому заранее будем формировать упреждающее воздействие B_4 — "Малое отрицательное", направленное на торможение (снижение $|\varepsilon'|$).

Представленное противоречие является следствием того, что система управления до-

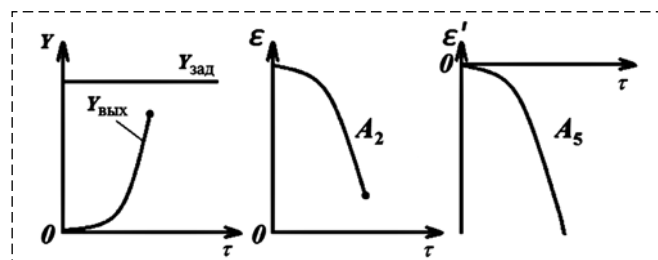


Рис. 10. Состояние объекта (момент показан точкой на рисунке) для применения правила П4

Fig. 10. Object state (the point in the figure indicates the moment) for rule R4

пускает сильно различающиеся по абсолютной величине изменения сигнала задания без соответствующего изменения параметров масштабирования ε и ε' . Для частичного разрешения этой проблемы примем иную группировку правил по уровню управляющего воздействия:

П1 (группа 1): $(\varepsilon = A_1) \wedge (\varepsilon' = A_3) \rightarrow U_n = U_1 = X_1$;
 П2 (группа 2): $(\varepsilon = A_4) \wedge (\varepsilon' = A_4) \rightarrow U_n = U_2 = X_2$;
 П3 (группа 0): $(\varepsilon = A_3) \wedge (\varepsilon' = A_3) \rightarrow U_n = U_3 = 0$;
 П4 (группа 1): $(\varepsilon = A_2) \wedge (\varepsilon' = A_5) \rightarrow U_n = U_4 = X_1$;
 П5 (группа 2): $(\varepsilon = A_2) \wedge (\varepsilon' = A_2) \rightarrow U_n = U_5 = -X_2$;
 П6 (группа 1): $(\varepsilon = A_4) \wedge (\varepsilon' = A_1) \rightarrow U_n = U_6 = -X_1$;
 П7 (группа 1): $(\varepsilon = A_5) \wedge (\varepsilon' = A_3) \rightarrow U_n = U_7 = -X_1$;
 П8 (группа 3): $(\varepsilon = A_3) \wedge (\varepsilon' = A_1) \rightarrow U_n = U_8 = -X_3$;
 П9 (группа 3): $(\varepsilon = A_3) \wedge (\varepsilon' = A_5) \rightarrow U_n = U_9 = X_3$;
 П10 (группа 3): $(\varepsilon = A_5) \wedge (\varepsilon' = A_5) \rightarrow U_n = U_{10} = -X_3$;
 П11 (группа 3): $(\varepsilon = A_1) \wedge (\varepsilon' = A_1) \rightarrow U_n = U_{11} = X_3$;
 П12 (группа 2): $(\varepsilon = A_1) \wedge (\varepsilon' = A_5) \rightarrow U_n = U_{12} = X_2$;
 П13 (группа 2): $(\varepsilon = A_5) \wedge (\varepsilon' = A_1) \rightarrow U_n = U_{13} = -X_2$.

Таким образом, значение параметра X_1 является общим для управляющих воздействий правил П1, П4, П6, П7, значение параметра X_2 — общее для правил П2, П5, П12, П13, а значение параметра X_3 — общее для правил П8 — П11. Добавление новой группы направлено на разрешение рассмотренного противоречия.

Для определения абсолютной величины управляющего воздействия в дефазификаторе рассчитывали взвешенное среднее:

$$|U_n| = \left| \frac{\sum_{i=\text{П1}}^{\text{П13}} \mu_i U_i}{\sum_{i=\text{П1}}^{\text{П13}} \mu_i} \right|. \quad (1)$$

Выходное управляющее воздействие формируется согласно условию

$$U = |U_n| \sigma, \text{ где } \sigma = \begin{cases} 1 & \text{при } \varepsilon' > K_{\text{пр}} \varepsilon; \\ -1 & \text{при } \varepsilon' \leq K_{\text{пр}} \varepsilon. \end{cases} \quad (2)$$

На рис. 11 показан пример фазового портрета переходного процесса с использованием предложенной системы. Вследствие наличия инерции скольжение проявляется в движении системы в окрестностях линии переключения.

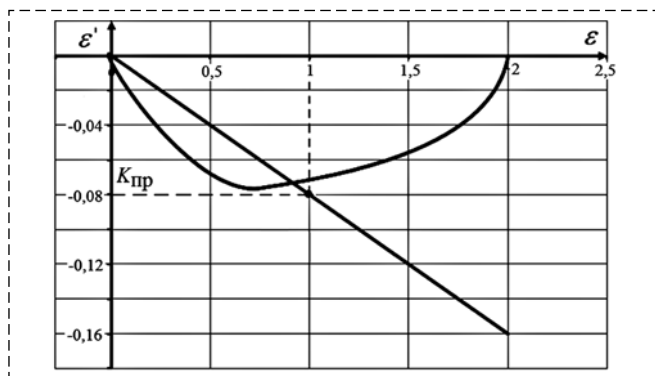


Рис. 11. Пример фазового портрета при работе предложенной системы

Fig. 11. Phase image in operation of the system suggested (an example)

Для работы системы необходим выбор значений множества $X = \{X_1, X_2, X_3\}$ на основе результатов компьютерного моделирования управления.

5. Результаты компьютерного моделирования управления

При вычислительном эксперименте тестировалась работа двух систем управления. Первой является предложенная система с использованием принципов скользящего регулирования и нечеткой логики. Второй является система с использованием только нечеткой логики ($U = U_n$). Параметры множества X варьировались в диапазоне $[-2; 2]$. Параметр $K_{пр}$ варьировался в диапазоне $[-0,02; -0,2]$ совместно с параметрами X . Метод варьирования — полный перебор с заданным шагом. Критерий качества τ_p рассчитывался как сумма времени регулирования при четырех различных уровнях задания. Под временем регулирования понимается время от начала процесса до входа регулируемого параметра в область в окрестностях задания, равную $\pm 5\%$ от изменения задания. По результатам вычислительного эксперимента были отобраны оптимальные по минимуму τ_p параметры настройки (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что система на основе принципов скользящего регулирования и нечеткой логики показывает более высокое быстродействие по сравнению с системой на основе одной только нечеткой логики. По-видимому, отсутствие масштабирования входных параметров регулятора под конкретный переходный процесс негативно сказывается на работоспособности нечеткого регулятора и приводит к росту продолжительности переходного процесса для возможности обеспечения работы в разных ситуациях при постоянных

параметрах настройки. На рис. 12 показаны переходные процессы при оптимальных параметрах настройки для обеих систем управления.

Для сравниваемых систем целесообразно оценить степень влияния изменения динамических свойств объекта на качество переходных процессов. При таком сравнении целесообразно сопоставлять системы при параметрах настройки, обеспечивающих равное быстродействие (близкие значения критерия τ_p). Параметры настройки при сравнении систем представлены в табл. 2. Варьировали параметр T_2 модели объекта управления. Полученные результаты представлены на рис. 13, 14.

Таблица 1
Table 1

Оптимальные параметры настройки для системы с нечеткой логикой

Optimal setting parameters for the system with fuzzy logic

Тип системы	τ_p	X_1	X_2	X_3	$K_{пр}$
С нечеткой логикой	32,8	-0,2	0,3	1,9	—
С нечеткой логикой и скользящим регулированием	16,9	-2	-0,5	1,8	-0,08

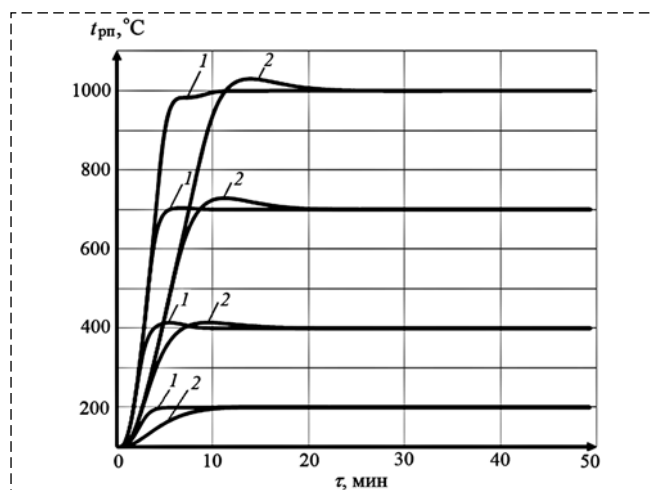


Рис. 12. Переходные процессы при настройке систем на основе нечеткой логики и скользящего регулирования (1) и только нечеткой логики (2) на оптимум по τ_p

Fig. 12. Transient responses upon adjustment of the systems based on fuzzy logic and sliding mode control (1) and on fuzzy logic only (2) for optimum at τ_p

Таблица 2
Table 2

Параметры настройки при сравнении систем
Adjustment parameters upon comparison of the systems

Тип системы	τ_p	X_1	X_2	X_3	$K_{пр}$
С нечеткой логикой	32,8	-0,2	0,3	1,9	—
С нечеткой логикой и скользящим регулированием	37,6	-2	-0,2	2	-0,04

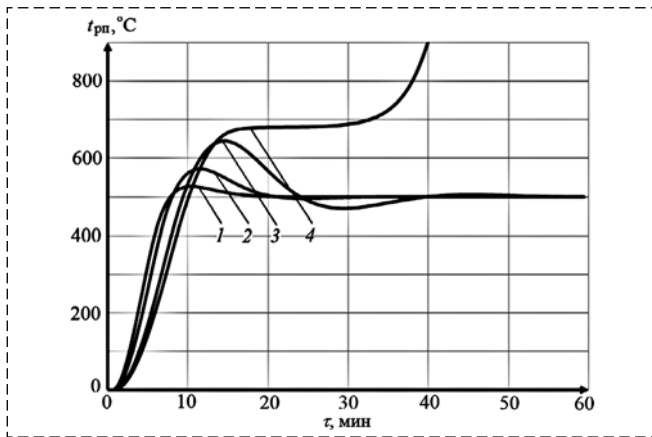


Рис. 13. Переходные процессы в системе на основе нечеткой логики:

1 — $T_2 = 1,2$ мин; 2 — $T_2 = 2$ мин; 3 — $T_2 = 4$ мин; 4 — $T_2 = 5,1$ мин

Fig. 13. Transient responses in the system based on fuzzy logic:

1 — $T_2 = 1.2$ min; 2 — $T_2 = 2$ min; 3 — $T_2 = 4$ min; 4 — $T_2 = 5.1$ min

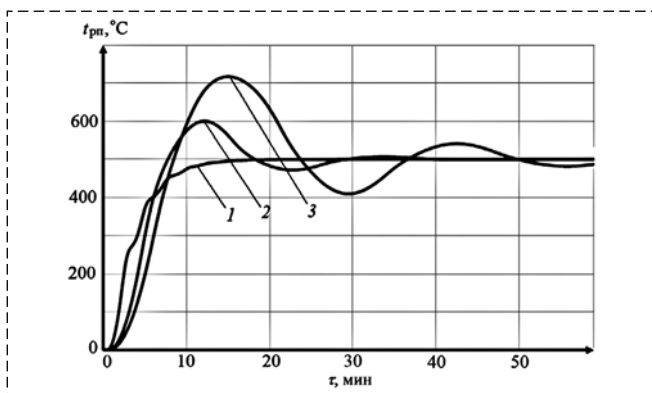


Рис. 14. Переходные процессы в системе на основе принципов нечеткой логики и скользящего регулирования:

1 — $T_2 = 1,2$ мин; 2 — $T_2 = 6$ мин; 3 — $T_2 = 10$ мин

Fig. 14. Transient responses in the system based on fuzzy logic and sliding mode control:

1 — $T_2 = 1.2$ min; 2 — $T_2 = 6$ min; 3 — $T_2 = 10$ min

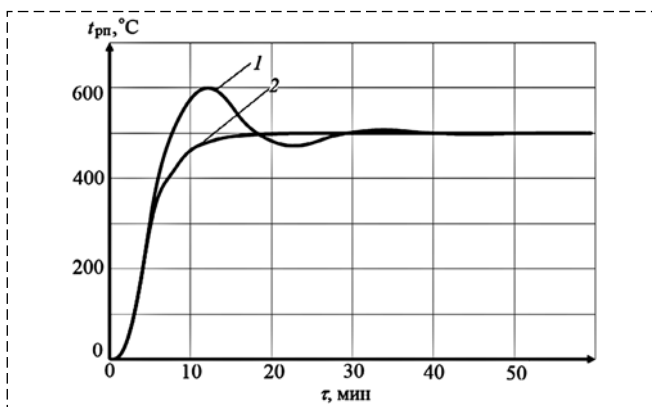


Рис. 15. Переходные процессы в системе на основе принципов нечеткой логики и скользящего регулирования при разных $K_{ср}$:

1 — $K_{ср} = -0,04$; 2 — $K_{ср} = -0,03$

Fig. 15. Transient responses in the system based on fuzzy logic and sliding mode control at different K_{sw} :

1 — $K_{sw} = -0.04$; 2 — $K_{sw} = -0.03$

Из приведенных графиков переходных процессов можно сделать вывод о том, что система на основе скользящего регулирования и нечеткой логики имеет большие запасы устойчивости, чем система с нечетким регулятором, которая теряет техническую устойчивость при $T_2 \geq 5,1$ мин.

Еще одной особенностью предложенной системы на основе скользящего регулирования является удобство настройки качества переходного процесса за счет корректирования параметра $K_{ср}$. Например, при постоянной времени $T_2 = 6$ мин и значении параметра $K_{ср} = -0,03$ качество переходного процесса улучшается (рис. 15).

Заключение

В работе предложена система стабилизации для объекта температурного типа, которая допускает вариативность динамических свойств объекта и при необходимости может быть подстроена на действующем объекте управления путем воздействия на единственный параметр настройки $K_{ср}$, оказывающий влияние на выбор направления изменения управляющего воздействия. Проблема снижения качества в системе скользящего регулирования, связанная с динамикой температурного объекта, устраняется путем применения нечеткой логики с постоянными параметрами настройки для выбора уровня управляющего воздействия. Это позволяет использовать модификации линии переключения или перенастраивать правила нечеткой логики в целях учета таких особенностей объекта, как непостоянство динамических свойств при нагреве или охлаждении.

Рассматривая перспективы нечеткого регулирования в целом, следует отметить, что синтез нечетких правил не обязательно должен проводиться на основе опыта эксперта. К решению задачи может привлекаться база технологической информации или результаты компьютерного моделирования над объектом заданного типа. Потенциально это позволяет получать множества нечетких правил, допускающих достаточно простую подстройку на действующем объекте (проще типовых итерационных алгоритмов ручной настройки ПИД регуляторов). Это компенсирует недостатки, связанные со сложностью аналитического проектирования и затруднениями получения экспертных оценок, указанные в работе [23].

1. **Yong Yin, Kathryn E. Stecke & Dongni Li.** The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0, *International Journal of Production Research*, no. 56:1-2, pp. 848–861.
2. **Рябчиков М. Ю.** Адаптация теплотехнических моделей протяжной башенной печи и нагрева металла для управления температурными режимами отжига стальной полосы // Проблемы управления. 2017. № 5. С. 61–69.
3. **Рябчиков М. Ю., Самарина И. Г.** Изучение режимов нагрева стальной полосы в протяжной печи башенного типа для светлого отжига // Металлообработка. 2013. № 1 (73). С. 43–49.
4. **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.
5. **Финаев В. И., Синявская Е. Д., Пушнина И. В.** Нечеткая модель управления температурой в хлебопекарной камере // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 4 (165). С. 149–159.
6. **Xiaojing Gao, Yan Ma, Hong Chen.** Active Thermal Control of a Battery Pack Under Elevated Temperatures, *IFAC PapersOnLine*, 2018, no. 51–31, pp. 262–267.
7. **Пиляев С. Н., Афоничев Д. Н.** Энергосберегающая система автоматического управления процессом активного вентилирования зерна // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 5-4. С. 140–144.
8. **Jin Woo Moon, Jin Chul Park, Sooyoung Kim.** Development of control algorithms for optimal thermal environment of double skin envelope buildings in summer, *Building and Environment*, 2018, no. 144, pp. 657–672.
9. **Ahmad Esmailzadeh, Mohammad Reza Zakerzadeh, Aghil Yousefi Koma.** The comparison of some advanced control methods for energy optimization and comfort management in buildings, *Sustainable Cities and Society*, 2018, no. 43, pp. 601–623.
10. **Хижняков Ю. Н.** Нечеткое регулирование температуры теплоносителя // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2016. № 20. С. 5–12.
11. **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.
12. **Лубенцова Е. В., Володин А. А., Лубенцов В. Ф.** Нейро-нечеткая система управления температурным режимом ферментационного процесса // Информационные технологии. 2014. № 3. С. 55–62.
13. **Рябчиков М. Ю., Рябчикова Е. С.** Самонастройка нейросетевого регулятора с использованием интегральной оценки противоречий команд обучающего алгоритма и памяти // Автоматика и телемеханика. 2018. № 2. С. 154–166.
14. **Полько П. Г., Логунова О. С., Андреев С. М., Рябчикова Е. С., Рябчиков М. Ю., Парсункин Б. Н.** Алгоритм нечеткого управления для синтеза цифровых контуров автоматической стабилизации технологических параметров // Автоматизация в промышленности. 2010. № 11. С. 32–37.
15. **Новиков С. И., Шахнович В. Р., Сафронов А. В.** Методы нечеткой логики в задачах автоматизации тепловых процессов электростанций // Вестник ИГЭУ. 2010. № 4. С. 1–4.
16. **Чернецкая И. В., Чернецкий В. О.** Нечеткие регуляторы в системах автоматического регулирования // Вестник ЮУрГУ. 2006. № 14. С. 156–159.
17. **Lei Hang, Do-Hyeun Kim.** Enhanced Model-Based Predictive Control System Based on Fuzzy Logic for Maintaining Thermal Comfort in IoT Smart Space, *Appl. Sci.*, 2018, no. 8, p. 1031.
18. **Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** К вопросу построения нечетких ПИД регуляторов // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2018. № 2. С. 112–116.
19. **Suman Debnath, Jagannath Reddy, Jagadish and Biplob Das.** Investigation of thermal performance of SAC variables using fuzzy logic based expert system, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, vol. 33, no. 8, pp. 4013–4021.
20. **Кудинов Ю. И., Дорохов И. Н., Пашенко Ф. Ф.** Нечеткие регуляторы и системы управления // Проблемы управления. 2004. № 3. С. 2–14.
21. **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, pp. 1–19.
22. **Ивайкин В.** Использование скользящих режимов в регулировании // Современные технологии автоматизации. 2006. № 1. С. 90–94.
23. **Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Некоторые проблемные аспекты нечеткого ПИД регулирования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19. № 12. С. 762–769.
24. **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.

System of Temperature Stabilization in a Heating Furnace Based on Sliding Mode Control and Fuzzy Logic

M. Yu. Ryabchikov, mr_mgn@mail.ru, **E. S. Ryabchikova**, mika.Elena@mail.ru,
I. D. Kokorin, chickslover97@gmail.com,
 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 July 12, 2019

Abstract

The paper addresses issues of temperature control in heating furnaces using the example of a strand-type furnace for steel strip annealing of a continuous hot-dip galvanizing unit. The authors demonstrate that one of the main problems is variability of dynamic properties in the controlled object upon flexible production management with changes in the furnace capacity.

Using a model of thermal state of the furnace cavity and metal, considering the impact of furnace temperature conditions on heat losses, variation limits of the parameters in a simplified model of object dynamics are determined. Issues of controlling a temperature object with variable dynamic parameters are reviewed. Advantages and disadvantages of systems used to control such objects, based on fuzzy logic and sliding mode control, are studied. It is shown that, in controlling a temperature object, a sliding mode control system can lead to fluctuating transient responses due to the absence of amplitude modulation in the control action when approaching the set-point. The authors suggest a system for automatic stabilization of the controlled parameter of a temperature object where sliding mode control and fuzzy logic are combined. In the stabilization system suggested, the direction of changes in the control action is determined using sliding mode control, while the control action level is determined using fuzzy logic. The paper provides results of simulation experiments comparing the efficiency of control using the system suggested and efficiency of control using the system based only on fuzzy logic. During those experiments, optimal system setting parameters were determined using complete enumeration and computer simulation of control for an object with the set variation of dynamic properties. Computer simulation was performed in the VisSim environment. The paper also shows that, with constant values of signal scaling parameters used in fuzzy logic, the requirement for qualitative transient responses with various set-point change levels results in the significantly reduced response speed in comparison with the system that combines fuzzy logic and sliding mode control. The authors demonstrate that it is possible to adjust quality of transient responses in the system that combines fuzzy logic and sliding mode control, changing dynamic properties of the object.

Keywords: heating furnace; flexible management; capacity; automatic control; temperature; sliding mode control; fuzzy logic

For citation:

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

References

1. Yong Yin, Kathryn E. Stecké & Dongni Li. The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0, *International Journal of Production Research*, no. 56:1-2, pp. 848–861.
2. Ryabchikov M. Yu. Adaptation of strand-type tower furnace heating simulation and of metal heating for steel strip annealing heating modes management, *Control Sciences*, 2017, no. 5, pp. 61–69 (in Russian).
3. Ryabchikov M. Yu., Samarina I. G. Studying of strip heating dynamics in the tower type furnace, *Metallobrabotka*, 2013, no. 1 (73), pp. 43–49 (in Russian).
4. Savin D. V., Drozdov V. G. Modern approach to systems automatic control heating building, *Tekhnicheskie nauki — ot teorii k praktike*, 2014, no. 30, pp. 51–56 (in Russian).
5. Finaev V. I., Sinyavskaya E. D., Pushnina I. V. Fuzzy control model of temperature at the bread baking chamber, *IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES*, 2015, no. 4 (165), pp. 149–159 (in Russian).
6. Xiaojing Gao, Yan Ma, Hong Chen. Active Thermal Control of a Battery Pack Under Elevated Temperatures, *IFAC PapersOnLine*, 2018, no. 51-31, pp. 262–267.
7. Pilyaev S. N., Afonichev D. N. Energy saving automatic control system for the process of aeration of grain, *Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*, 2015, vol. 3, no. 5-4, pp. 140–144 (in Russian).
8. Jin Woo Moon, Jin Chul Park, Sooyoung Kim. Development of control algorithms for optimal thermal environment of double skin envelope buildings in summer, *Building and Environment*, 2018, no. 144, pp. 657–672.
9. Ahmad Esmaeilzadeh, Mohammad Reza Zakerzadeh, Aghil Yousefi Koma. The comparison of some advanced control methods for energy optimization and comfort management in buildings, *Sustainable Cities and Society*, 2018, no. 43, pp. 601–623.
10. 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).
11. 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. Mashinostroyeniye*, 2015, no. 4 (94), pp. 60–64 (in Russian).
12. Lubencova E. V., Volodin A. A., Lubencov V. F. Neuro-fuzzy control system for temperature control fermentation, *Information Technology*, 2014, no. 3, pp. 55–62 (in Russian).
13. Ryabchikov M. Yu., Ryabchikova E. S. Self-tuning of a neural network controller with an integral estimate of contradictions between the commands of the learning algorithm and memory, *Automation and Remote Control*, 2018, no. 2, pp. 154–166 (in Russian).
14. Pol'ko P. G., Logunova O. S., Andreev S. M., Ryabchikova E. S., Ryabchikov M. Yu., Parsunkin B. N. Fuzzy control algorithm for synthesis of automatic stabilization systems, *Automation in Industry*, 2010, no. 11, pp. 32–37 (in Russian).
15. Novikov S. I., Shahnovich V. R., Safronov A. V. Fuzzy Logic Methods in the Tasks of Thermal Processes Automation of Power Plant, *Vestnik IGEU*, 2010, no. 4, pp. 1–4 (in Russian).
16. Cherneckaya I. V., Cherneckij V. O. Fuzzy regulators in automatic control systems, *Bulletin of the South Ural State University*, 2006, no. 14, pp. 156–159 (in Russian).
17. Lei Hang, Do-Hyeun Kim. Enhanced Model-Based Predictive Control System Based on Fuzzy Logic for Maintaining Thermal Comfort in IoT Smart Space, *Appl. Sci.*, 2018, no. 8, p. 1031.
18. Filimonov A. B., Filimonov N. B. To the question of constructing fuzzy PID regulators, *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika*, 2018, no. 2, pp. 112–116 (in Russian).
19. Suman Debnath, Jagannath Reddy, Jagadish and Biplab Das. Investigation of thermal performance of SAC variables using fuzzy logic based expert system, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, vol. 33, no. 8, pp. 4013–4021.
20. Kudinov Yu. I., Dorohov I. N., Pashchenko F. F. Fuzzy controllers and control systems, *Control Sciences*, 2004, no. 3, pp. 2–14 (in Russian).
21. 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, pp. 1–19.
22. Ivajkin V. Application of Sliding Mode in the Automatic Systems, *Contemporary Technologies in Automation*, 2006, no. 1, pp. 90–94 (in Russian).
23. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Certain Problematic Aspects of Fuzzy PID Regulation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 12, pp. 762–769 (in Russian).
24. 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).