

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

DOI: 10.15593/2224-9400/2020.4.13

УДК 004.896

Е.А. Муравьева, М.Д. Квиринг

Уфимский государственный нефтяной технический университет,
филиал в г. Стерлитамаке, Россия

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЛАСТИНЧАТЫМИ ТЕПЛООБМЕННИКАМИ И ЕЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

На сегодняшний день на многих предприятиях одной из стадий производства является нагрев жидкости. Для достижения необходимой температуры жидкости чаще всего используются пластинчатые теплообменники, благодаря своей высокой теплопередаче, надежности, меньшему объему по сравнению с другими аппаратами. Однако вследствие воздействия на объект управления внешних возмущающих воздействий происходит отклонение температуры жидкости, получаемой на выходе из теплообменника, от целевых значений. Для поддержания необходимой температуры жидкости без ошибок в системе теплообменников предлагается вместо PID-регуляторов использовать нечеткие регуляторы. Такие регуляторы способны в большей степени компенсировать возникающие возмущения и дать более точный результат конечного значения температуры. Данные нечеткие регуляторы способны повысить качество процесса регулирования, сократить время нагрева жидкости, учитывая внешние воздействия и взаимные влияния и адаптируясь к ним, что приводит к стабильному качеству производимой предприятием продукции.

В данной статье описана разработка адаптивного управления системой взаимосвязанных пластинчатых теплообменников на базе нечетких регуляторов. Представлена технологическая схема работы теплообменных аппаратов и описана их взаимосвязь. Также реализован способ расчета температуры жидкости на выходе из теплообменников в зависимости от заданных входных параметров. Проведено моделирование разработанной системы адаптивного нечеткого управления и сравнение полученных результатов с расчетными значениями.

Представлено описание процесса моделирования разработанной системы в среде MATLAB. Система управления содержит четыре нечетких регулятора. Для работы каждого из них составлены правила нечеткого управления, в процессе которого решается задача нагрева жидкости до необходимой температуры.

Ключевые слова: теплообменник, управление, нечеткий регулятор, клапан, параметр, температура, давление.

E.A. Muravyova, M.D. Kviring

Ufa State Petroleum Technological University Branch of the University
in the City of Sterlitamak, Russian Federation

DEVELOPMENT OF AN ADAPTIVE FUZZY CONTROL SYSTEM FOR PLATE HEAT EXCHANGERS AND ITS MODELING IN MATLAB SIMULINK

Today, in many enterprises, one of the stages of production is heating the liquid. To achieve the required liquid temperature, plate heat exchangers are most often used, due to their high heat transfer, reliability, and smaller volume compared to other devices. However, due to the influence of external disturbances on the control object, the temperature of the liquid obtained at the outlet of the heat exchanger deviates from the target values. To maintain the required liquid temperature without errors in the heat exchanger system, it is proposed to use fuzzy controllers instead of PID controllers. Such regulators are able to compensate for the resulting disturbances to a greater extent, and get a more accurate result of the final temperature value. These fuzzy controllers are able to improve the quality of the control process, reduce the heating time of the liquid, taking into account external influences and mutual influences, and adapting to them, which leads to a stable quality of the products produced by the enterprise.

This article describes the development of adaptive control of a system of interconnected plate heat exchangers based on fuzzy controllers. The technological scheme of operation of heat exchangers is presented and their interrelation is described. A method for calculating the temperature of the liquid at the outlet of heat exchangers depending on the specified input parameters is also implemented. The developed adaptive fuzzy control system is modeled and the results are compared with the calculated values.

The process of modeling the developed system in the Matlab environment is described. The control system contains four fuzzy controls. For the operation of each of them, rules of fuzzy control are drawn up in the process of which the problem of heating the liquid to the required temperature is solved.

Keywords: *heat exchanger, fuzzy controller, parameter, temperature, valve, pressure, control.*

Введение. В настоящее время промышленное производство обладает высокой сложностью. Применение большого количества объектов управления сопровождается различными внешними воздействиями, которые вызывают отклонение технологических параметров от заданных значений.

Большинство отраслей промышленности, таких как нефтеперерабатывающая, химическая, нефтехимическая, энергетическая, используют в своих производствах теплообменные аппараты, так как нагревание различных жидкостей до необходимой температуры – одна из

важнейших стадий на производстве. Самыми распространенными теплообменными аппаратами являются пластинчатые теплообменники, которые получили широкое применение благодаря своей высокой теплопередаче, надежности, меньшим по сравнению с другими аппаратами габаритам.

В большинстве случаев технологический процесс нагрева жидкости в теплообменниках осуществляется под управлением классических PID-регуляторов, которые не всегда способны в полной мере отработать внешние воздействия на объект управления и взаимное влияние технологических параметров. Чаще всего это происходит из-за того, что PID-регуляторы не всегда способны оптимальным образом компенсировать возникающие возмущения, следствием чего является неустойчивость работы объекта управления (теплообменных аппаратов) и отклонение температуры жидкости от заданного значения на выходе из теплообменников [1, 2]. Таким образом, жидкость будет недостаточно нагретой или, напротив, перегретой, что может привести к возникновению брака на производстве.

Описание технологического объекта управления. Объектом управления является система из трех пластинчатых теплообменников. Разработанная технологическая схема взаимодействия теплообменных аппаратов представлена на рис. 1. Система теплообменных аппаратов содержит три пластинчатых теплообменника ТП1, ТП2 и ТП3. В качестве нагреваемой жидкости принята вода, в качестве теплоносителя – греющий пар.

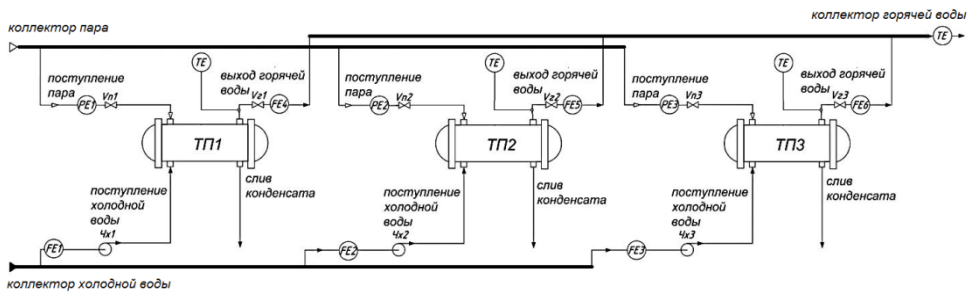


Рис. 1. Технологическая схема работы системы пластинчатых теплообменников

Из коллектора пара греющий пар подается на каждый теплообменник. Холодная вода из соответствующего коллектора подается в каждый теплообменник насосами. Нагретая в теплообменниках вода поступает в общий коллектор и подается в следующий цех на технологические нужды.

В качестве регулируемой величины выбрана температура нагретой воды на выходе из каждого теплообменника, которые измеряются соответствующими датчиками температуры ТЕ1, ТЕ2 и ТЕ3.

На температуру нагреваемой воды влияют такие параметры, как давление греющего пара, расход холодной воды на входе в теплообменник и расход нагретой воды на выходе из теплообменника. Значения технологических параметров, идентичных для всех трех теплообменников, должны находиться в следующих диапазонах:

температура нагреваемой воды, °С.....	70±5
давление греющего пара на входе в теплообменник $P_{\text{п}}$, кПа.....	от 200 до 300
расход холодной воды на входе в теплообменник $F_{\text{х}}$, т/ч	от 4 до 7,5
расход нагретой воды на выходе из теплообменника $F_{\text{г}}$, т/ч	от 4 до 7,5

Для регулирования указанных выше параметров используются следующие исполнительные устройства: насосы с частотными преобразователями $\text{Ч}_{\text{х}}$, служащие для подачи холодной воды в теплообменные аппараты, регулирующие клапаны в линиях подачи греющего пара $V_{\text{п}}$, регулирующие клапаны в линиях отвода нагретой воды $V_{\text{г}}$.

Система теплообменников ТП1-ТП3 функционирует следующим образом. Вода нагревается первым теплообменником ТП1. В ситуации, когда один теплообменник не способен нагреть воду до необходимой температуры, вода поступает на несколько теплообменников сразу, благодаря чему возможно достижение требуемой тепловой мощности за меньшее время. Это позволяет сократить потребление энергоресурсов за счет управления каждым теплообменником в составе общей системы [3–5].

Для осуществления процесса регулирования температуры в трех теплообменниках разработана система адаптивного управления с четырьмя нечеткими регуляторами НР1, НР2, НР3, НР4 (рис. 2).

Задача регулятора НР1 заключается в оценке технологической ситуации, которую он осуществляет на основании значений давления пара и расходов холодной и нагретой воды. Результатом такой оценки является вывод о том, какой из нечетких регуляторов НР2-НР4 необходимо включить для эффективного управления пластинчатыми теплообменниками, а также сокращения энергоресурсов в процессе нагрева жидкости.

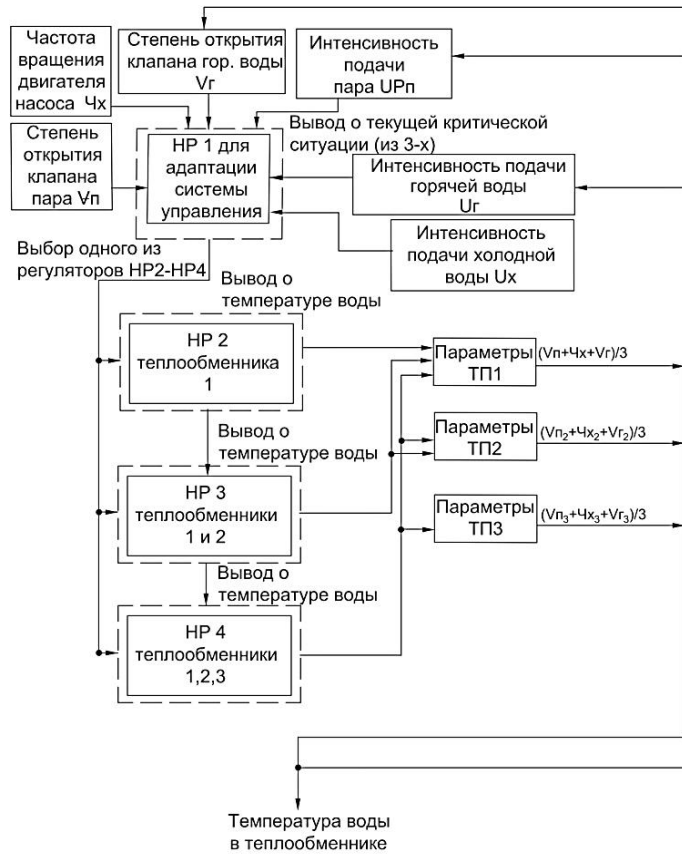


Рис. 2. Блок-схема нечеткого адаптивного управления

Регуляторы НР2-НР4 служат для регулирования входных параметров.

На вход нечеткого регулятора НР2 будут подаваться 4 параметра: P_p – давление пара в теплообменнике ТП1; F_r – расход горячей воды из теплообменника ТП1; F_x – расход холодной воды в теплообменник ТП1; T – температура внутри теплообменника ТП1.

На вход нечеткого регулятора НР3 будут подаваться 8 параметров: P_p – давление пара в теплообменнике ТП1; F_r – расход горячей воды из теплообменника ТП1; F_x – расход холодной воды в теплообменник ТП1; T – температура внутри теплообменника ТП1; $P_{п2}$ – давление пара в теплообменнике ТП2; F_{r2} – расход горячей воды из теплообменника ТП2; F_{x2} – расход холодной воды в теплообменник ТП2; T_2 – температура внутри теплообменника ТП2.

На вход нечеткого регулятора НР4 будут подаваться 12 параметров: P_p – давление пара в теплообменнике ТП1; F_r – расход горячей

воды из теплообменника ТП1; F_x – расход холодной воды в теплообменник ТП1; T – температура внутри теплообменника ТП1; $P_{п2}$ – давление пара в теплообменнике ТП2; $F_{г2}$ – расход горячей воды из теплообменника ТП2; $F_{х2}$ – расход холодной воды в теплообменник ТП2; T_2 – температура внутри теплообменника ТП2; $P_{п3}$ – давление пара в теплообменнике ТП2; $F_{г3}$ – расход горячей воды из теплообменника ТП2; $F_{х3}$ – расход холодной воды в теплообменник ТП2; T_3 – температура внутри теплообменника ТП2.

Для реализации системы адаптивного управления разработана блок-схема, описывающая взаимодействие четырех нечетких регуляторов (см. рис. 2). В блок-схеме представлено взаимодействие 4 нечетких регуляторов. НР1 служит для анализа текущей ситуации в системе теплообменников, в зависимости от подачи давления пара, холодной воды и выхода нагретой жидкости. Для повышения эффективности производства в системе присутствуют три идентичных теплообменных аппарата. Исходя из поступивших на НР1 параметров, последний определяет, сколько теплообменников из трех требуется включить в работу.

Адаптивное управление призвано сократить количество правил в базе регуляторов НР2–НР4, повысив тем самым эффективность и точность управления системой из трех теплообменных аппаратов.

После блока «Параметры ТП1» на выходе имеет значение температуры в теплообменнике 1, полученной при регулировании параметров посредством клапанов $V_{п}$, $V_{г}$ и частотного преобразователя $\mathcal{C}_x$.

Значение температуры после системы теплообменников определяется по формуле

$$\frac{V_{п} + V_{г} + \mathcal{C}_x}{3}, \quad (1)$$

где $V_{п}$ – степени открытия клапанов пара $V_{п1}$ – $V_{п3}$ соответственно после теплообменников НР2–НР4; $V_{г}$ – степени открытия клапанов нагретой воды $V_{г1}$ – $V_{г3}$ соответственно после теплообменников НР2–НР4; $\mathcal{C}_x$ – это диапазон регулирования скорости частотными преобразователями $\mathcal{C}_x$ – $\mathcal{C}_{х3}$ соответственно после теплообменников НР2–НР4.

Для управления системой теплообменников сигналы от датчиков поступают на НР1, который обрабатывает их и после анализа решает, какой НР нужно активизировать, чтобы поддержать заданные значения параметров.

Таким образом, сигнал поступает на один из трех НР. Если сигнал от НР1 поступает на НР2, который управляет параметрами тепло-

обменника ТП1, то в работу запускается только теплообменник ТП1. Если сигнал от НР1 поступает на НР3, который управляет параметрами теплообменников ТП1 и ТП2, то в работу запускаются теплообменники ТП1 и ТП2. Если сигнал от НР1 поступает на НР4, который управляет параметрами теплообменников ТП1, ТП2 и ТП3, то в работу запускаются все теплообменники: ТП1, ТП2 и ТП3.

Для достижения оптимальной температуры необходимо регулировать степень открытия клапанов пара $V_{п1}$ - $V_{п3}$, клапанов выхода нагретой воды $V_{г1}$ - $V_{г3}$, частоту преобразователей $\text{Ч}_{х1}$ - $\text{Ч}_{х3}$. В итоге система адаптивного управления теплообменниками поддерживает значение температуры нагретой жидкости на уровне $70 \pm 5^\circ\text{C}$.

Таким образом, совместная работа регуляторов НР1-НР4 позволяет поддерживать заданную температуру нагреваемой воды.

Разработка базы правил управления. Для реализации нечетких регуляторов НР1-НР4 сформулированы эвристические правила, описывающие работу системы управления. В качестве примера приводятся по одному правилу для каждого регулятора. Остальные правила составляются аналогичным способом.

Правило управления для НР1. Если давление подаваемого в теплообменник ТП1 пара высокое и предполагается повышение интенсивности подачи пара в диапазоне от 260 до 300 кПа и расход поступающей в теплообменник ТП1 холодной воды высокий и предполагается повышение интенсивности подачи холодной воды в диапазоне от 6 до 7,5 т/ч и расход нагретой воды на выходе из теплообменника ТП1 низкий и предполагается понижение интенсивности выхода горячей воды в диапазоне от 4 до 5,5 т/ч и температура выходящей из теплообменника жидкости высокая, то включен только НР2, который управляет теплообменником ТП1.

Правило управления для НР2. Если давление подаваемого в теплообменник ТП1 пара среднее в диапазоне от 230 до 270 кПа и расход поступающей жидкости F_x средний в диапазоне от 5 до 6,5 т/ч и расход нагретой жидкости F_r средний в диапазоне от 5 до 6,5 т/ч и температура выходящей из теплообменника жидкости средняя, то клапан пара $V_{п}$ полуоткрыт в диапазоне от 50 до 85 % и клапан нагретой жидкости V_r полуоткрыт в диапазоне от 50 до 85 %, и скорость частотного преобразователя для двигателя насоса на подачу холодной воды теплообменника ТП1 работает на средней мощности Ч_x в диапазоне от 30 до 70 %.

Правило управления для НР3. Если давление пара $P_{\text{п}}$ среднее в диапазоне от 230 до 270 кПа и расход поступающей жидкости $F_{\text{х}}$ низкий в диапазоне от 4 до 5,5 т/ч и расход нагретой жидкости $F_{\text{г}}$ высокий в диапазоне от 6 до 7,5 т/ч и температура выходящей из теплообменника жидкости низкая у первого теплообменника, и давление пара $P_{\text{п2}}$ среднее в диапазоне от 230 до 270 кПа и расход поступающей жидкости $F_{\text{х2}}$ низкий в диапазоне от 4 до 5,5 т/ч и расход нагретой жидкости $F_{\text{г2}}$ высокий в диапазоне от 6 до 7,5 т/ч и температура выходящей из теплообменника жидкости низкая у второго теплообменника, то клапан пара $V_{\text{п}}$ полуоткрыт в диапазоне от 50 до 85 % и клапан нагретой жидкости $V_{\text{г}}$ открыт в диапазоне от 65 до 100 % скорость частотного преобразователя для двигателя насоса на подачу холодной воды теплообменника ТП1 работает на средней мощности $\text{Ч}_{\text{х}}$ в диапазоне от 30 до 70 % и клапан пара $V_{\text{п2}}$ открыт в диапазоне от 65 до 100 %, и клапан нагретой жидкости $V_{\text{г2}}$ открыт в диапазоне от 65 до 100 % и скорость частотного преобразователя для двигателя насоса на подачу холодной воды теплообменника ТП2 работает на средней мощности $\text{Ч}_{\text{х2}}$ в диапазоне от 30 до 70 %.

Правило управления для НР4. Если давление пара $P_{\text{п}}$ низкое в диапазоне от 200 до 240 кПа и расход поступающей жидкости $F_{\text{х}}$ высокий в диапазоне от 65 до 100 % и расход нагретой жидкости $F_{\text{г}}$ высокий в диапазоне от 65 до 100 % и температура выходящей из теплообменника жидкости низкая у первого теплообменника и давление пара $P_{\text{п2}}$ низкое в диапазоне от 200 до 240 кПа и расход поступающей жидкости $F_{\text{х2}}$ высокий в диапазоне от 65 до 100 % и расход нагретой жидкости $F_{\text{г2}}$ высокий в диапазоне от 65 до 100 % и температура выходящей из теплообменника жидкости низкая у второго теплообменника, и давление пара $P_{\text{п3}}$ низкое в диапазоне от 200 до 24, кПа и расход поступающей жидкости $F_{\text{х3}}$ высокий в диапазоне от 65 до 100 % и расход нагретой жидкости $F_{\text{г3}}$ высокий в диапазоне от 65 до 100 % и температура выходящей из теплообменника жидкости низкая у третьего теплообменника, то клапан пара $V_{\text{п}}$ открыт в диапазоне от 65 до 100 % и клапан нагретой жидкости $V_{\text{г}}$ полузакрыт в диапазоне от 25 до 60 % и скорость частотного преобразователя для двигателя насоса на подачу холодной воды теплообменника ТП1 работает на средней мощности $\text{Ч}_{\text{х}}$ в диапазоне от 30 до 70 % и также клапан пара $V_{\text{п2}}$ открыт в диапазоне от 65 до 100 % и клапан нагретой жидкости $V_{\text{г2}}$ полузакрыт в диапазоне от 25 до 60 % и скорость частотного преобразователя для двигателя на-

соса на подачу холодной воды теплообменника ТП2 работает на средней мощности $Ч_{х2}$ в диапазоне от 30 до 70 % и также клапан пара $V_{п3}$ открыт в диапазоне от 65 до 100 %, и клапан нагретой жидкости $V_{г3}$ полузакрыт в диапазоне от 25 до 60 %, скорость частотного преобразователя для двигателя насоса на подачу холодной воды теплообменника ТП3 работает на средней мощности $Ч_{х3}$ в диапазоне от 30 до 70 %.

Для формирования базы правил нечеткого вывода определены следующие входные лингвистические переменные:

$P_{п}$ – давление греющего пара на входе в теплообменник в диапазоне от 200 до 300 кПа;

$UP_{п}$ – интенсивность подачи пара в теплообменник в диапазоне от 108 000 до 180 000 м/ч;

$F_{х}$ – расход холодной воды, поступающей в теплообменник, в диапазоне от 20 до 60 об/с;

$UF_{х}$ – интенсивность подачи холодной воды, поступающей в теплообменник в диапазоне от 3170 до 5952 м/ч;

$F_{г}$ – расход горячей воды, выходящей из теплообменника, в диапазоне от 20 до 60 об/с;

$UF_{г}$ – интенсивность горячей воды, выходящей из теплообменника, в диапазоне от 3170 до 5952 м/ч;

T – температура жидкости, поступающей в теплообменник, в диапазоне от 60 до 80 °С.

В качестве выходных лингвистических переменных определены следующие:

НР2 – включен или выключен (1/0);

НР3 – включен или выключен (1/0);

НР4 – включен или выключен (1/0).

$Ч_{х}$ – диапазон регулирования скорости частотным преобразователем для двигателя насоса на подачу холодной воды теплообменника в диапазоне от 20 до 60 об/с;

$V_{г}$ – степень открытия клапана горячей воды теплообменника в диапазоне от 0 до 100 %;

$V_{п}$ – степень открытия клапана пара теплообменника в диапазоне от 0 до 100 %;

Определены термы-множества для каждой лингвистической переменной:

$$P_{п} = \{P_{п1}, P_{п2}, P_{п3}\},$$

где $P_{п1}$ – «Давление пара = Низкое», где $200 \leq P_{п1} \leq 240$ кПа;

$P_{п2}$ – «Давление пара = Среднее», где $230 \leq P_{п2} \leq 270$ кПа;

$P_{п3}$ – «Давление пара = Высокое», где $260 \leq P_{п3} \leq 300$ кПа.

$F_x = \{F_{x1}, F_{x2}, F_{x3}\}$,

где F_{x1} – «Расход жидкости = Низкий», где $4 \leq F_{x1} \leq 5,5$ т/ч;

F_{x2} – «Расход жидкости = Средний», где $5 \leq F_{x2} \leq 6,5$ т/ч;

F_{x3} – «Расход жидкости = Высокий», где $6 \leq F_{x3} \leq 7,5$ т/ч.

$F_r = \{F_{r1}, F_{r2}, F_{r3}\}$,

где F_{r1} – «Расход жидкости = Низкий», где $4 \leq F_{r1} \leq 5,5$ т/ч;

F_{r2} – «Расход жидкости = Средний», где $5 \leq F_{r2} \leq 6,5$ т/ч;

F_{r3} – «Расход жидкости = Высокий», где $6 \leq F_{r3} \leq 7,5$ т/ч.

$T = \{T1, T2, T3\}$,

где $T1$ – «Температура жидкости на входе в ТП1 = Низкая», где $60 \leq T1 \leq 68$ °C;

$T2$ – «Температура жидкости на входе в ТП1 = Средняя», где $66 \leq T2 \leq 74$ °C;

$T3$ – «Температура жидкости на входе в ТП1 = Средняя», где $72 \leq T3 \leq 80$ °C.

$UP_n = \{UP_{п1}, UP_{п2}, UP_{п3}\}$,

где $UP_{п1}$ – «Интенсивность подачи пара = Низкий», где $108\,000 \leq UP_{п1} \leq 135\,000$ т/ч;

$UP_{п2}$ – «Интенсивность подачи пара = Средний», где $131\,000 \leq UP_{п2} \leq 158\,000$ т/ч;

$UP_{п3}$ – «Интенсивность подачи пара = Высокий», где $153\,000 \leq UP_{п3} \leq 180\,000$ т/ч.

$UF_x = \{UF_{x1}, UF_{x2}, UF_{x3}\}$,

где UF_{x1} – «Интенсивность подачи пара = Низкий», где $3170 \leq UF_{x1} \leq 4359$ т/ч;

UF_{x2} – «Интенсивность подачи пара = Средний», где $3961 \leq UF_{x2} \leq 5149$ т/ч;

UF_{x3} – «Интенсивность подачи пара = Высокий», где $4762 \leq UF_{x3} \leq 5952$ т/ч.

$UF_r = \{UF_{r1}, UF_{r2}, UF_{r3}\}$,

где UF_{r1} – «Интенсивность подачи пара = Низкий», где $3170 \leq UF_{r1} \leq 4359$ т/ч;

UF_{r2} – «Интенсивность подачи пара = Средний», где $3961 \leq UF_{r2} \leq 5149$ т/ч;

UF_{r3} – «Интенсивность подачи пара = Высокий», где $4762 \leq UF_{r3} \leq 5952$ т/ч.

$$V_{\text{п}} = \{V_{\text{п1}}, V_{\text{п2}}, V_{\text{п3}}, V_{\text{п4}}\},$$

где $V_{\text{п1}}$ – «Клапан пара = Закрыт», где $0 \leq V_{\text{п1}} \leq 35 \%$;

$V_{\text{п2}}$ – «Клапан пара = Полузакрыт», где $25 \leq V_{\text{п2}} \leq 60 \%$;

$V_{\text{п3}}$ – «Клапан пара = Полуоткрыт», где $50 \leq V_{\text{п3}} \leq 85 \%$;

$V_{\text{п4}}$ – «Клапан пара = Открыт», где $65 \leq V_{\text{п4}} \leq 100 \%$.

$$V_{\text{г}} = \{V_{\text{г1}}, V_{\text{г2}}, V_{\text{г3}}, V_{\text{г4}}\},$$

где $V_{\text{г1}}$ – «Клапан пара = Закрыт», где $0 \leq V_{\text{г1}} \leq 35 \%$;

$V_{\text{г2}}$ – «Клапан пара = Полузакрыт», где $25 \leq V_{\text{г2}} \leq 60 \%$;

$V_{\text{г3}}$ – «Клапан пара = Полуоткрыт», где $50 \leq V_{\text{г3}} \leq 85 \%$;

$V_{\text{г4}}$ – «Клапан пара = Открыт», где $65 \leq V_{\text{г4}} \leq 100 \%$.

$$\text{Ч}_{\text{х}} = \{\text{Ч}_{\text{х1}}, \text{Ч}_{\text{х2}}, \text{Ч}_{\text{х3}}\},$$

где $\text{Ч}_{\text{х1}}$ – «Скорость частотного преобразователя для двигателя насоса = Низкая», где $0 \leq \text{Ч}_{\text{х1}} \leq 40 \%$;

$\text{Ч}_{\text{х2}}$ – «Скорость частотного преобразователя для двигателя насоса = Среднее», где $30 \leq \text{Ч}_{\text{х2}} \leq 70 \%$;

$\text{Ч}_{\text{х3}}$ – «Скорость частотного преобразователя для двигателя насоса = Высокое», где $60 \leq \text{Ч}_{\text{х3}} \leq 100 \%$.

Таким образом, рассмотренные выше в качестве примера эвристические правила будут иметь следующий вид.

Правило управления для НР1:

«ЕСЛИ $P_{\text{п}} = P_{\text{п3}}$ И $UP_{\text{п}} = UP_{\text{п3}}$ И $F_{\text{х}} = F_{\text{х3}}$ И $UF_{\text{х}} = UF_{\text{х3}}$ И $F_{\text{г}} = F_{\text{г1}}$ И $UF_{\text{г}} = UF_{\text{г1}}$ И $T=T3$, ТО НР = НР2».

Правило управления для НР2:

«ЕСЛИ $P_{\text{п}} = P_{\text{п2}}$ И $F_{\text{х}} = F_{\text{х2}}$ И $F_{\text{г}} = F_{\text{г2}}$ И $T=T2$, ТО $V_{\text{п}} = V_{\text{п3}}$ И $\text{Ч}_{\text{х}} = \text{Ч}_{\text{х2}}$ И $V_{\text{г}} = V_{\text{г3}}$ ».

Правило управления для НР3:

«ЕСЛИ $P_{\text{п}} = P_{\text{п2}}$ И $F_{\text{х}} = F_{\text{х1}}$ И $F_{\text{г}} = F_{\text{г3}}$ И $T=T1$ И $P_{\text{п2}} = P_{\text{п2}}$ И $F_{\text{х2}} = F_{\text{х1}}$ И $F_{\text{г2}} = F_{\text{г3}}$ И $T=T1$, ТО $V_{\text{п}} = V_{\text{п2}}$ И $\text{Ч}_{\text{х}} = \text{Ч}_{\text{х2}}$ И $V_{\text{г}} = V_{\text{г2}}$ И $V_{\text{п2}} = V_{\text{п2}}$ И $\text{Ч}_{\text{х2}} = \text{Ч}_{\text{х2}}$ И $V_{\text{г2}} = V_{\text{г2}}$ ».

Правило управления для НР4:

«ЕСЛИ $P_{\text{п}} = P_{\text{п1}}$ И $F_{\text{х}} = F_{\text{х3}}$ И $F_{\text{г}} = F_{\text{г3}}$ И $T = T1$ И $P_{\text{п2}} = P_{\text{п1}}$ И $F_{\text{х2}} = F_{\text{х3}}$ И $F_{\text{г2}} = F_{\text{г3}}$ И $T_2=T1$ И $P_{\text{п3}} = P_{\text{п1}}$ И $F_{\text{х3}} = F_{\text{х3}}$ И $F_{\text{г3}} = F_{\text{г3}}$ И $T_3=T1$, ТО $V_{\text{п}} = V_{\text{п4}}$ И $\text{Ч}_{\text{х}} = \text{Ч}_{\text{х2}}$ И $V_{\text{г}} = V_{\text{г2}}$ И $V_{\text{п2}} = V_{\text{п4}}$ И $\text{Ч}_{\text{х2}} = \text{Ч}_{\text{х2}}$ И $V_{\text{г2}} = V_{\text{г2}}$ И $V_{\text{п3}} = V_{\text{п4}}$ И $\text{Ч}_{\text{х3}} = \text{Ч}_{\text{х2}}$ И $V_{\text{г3}} = V_{\text{г2}}$ ».

Моделирование нечетких регуляторов в среде MATLAB. Следующим этапом после составления базы правил является их реализация в составе нечетких регуляторов.

Для моделирования регулятора с использованием нечеткой логики использована среда MATLAB. В качестве примера рассмотрено мо-

делирование нечеткого регулятора НР2. Число входных параметров регулятора НР2 – четыре, выходных – три. Для каждого входного и выходного параметра задан диапазон измерения. В соответствии с диапазонами заданы термы для входных параметров [6–9]. Задание термов для выходных параметров составлено аналогичным образом.

Также созданы модели нечетких регуляторов НР1, НР3 и НР4.

Разработка адаптивной нечеткой системы управления в среде MATLAB Simulink. Для реализации адаптивной системы нечеткого управления использована среда MATLAB Simulink с использованием спроектированного НР fuzzy-logic controller (нечеткий логический регулятор).

На примере приведенных выше правил управления для регуляторов НР1 и НР2 рассмотрена работа системы адаптивного нечеткого управления.

На первом этапе заданы исходные параметры: $P_n = P_{п3}$, $F_n = F_{п3}$, $F_x = F_{x2}$, $F_r = F_{r2}$, $T = T3$.

Структурная схема модели формирования входных параметров регуляторов представлена на рис. 3. В модели использованы следующие типовые блоки: Slider Gain (ползунковый регулятор), Const (задание постоянных величин), Constant (задаются площади поперечных сечений), Mux (соединение сигналов), Display (отображение значения сигнала в виде числа), Subsystem (создание подсистем).

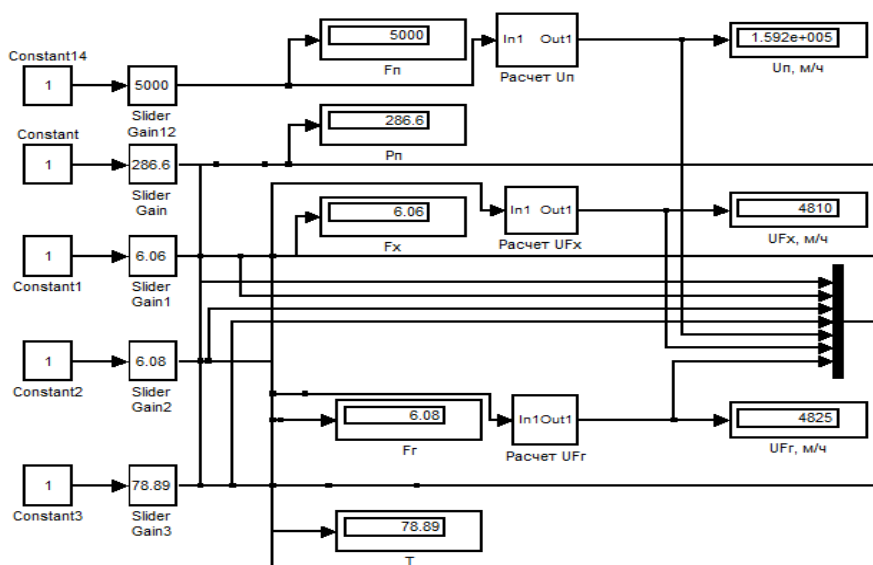


Рис. 3. Структура модели формирования исходных параметров

Сформированные моделью сигналы объединяются в блоке Мух и поступают на НР1, выходным сигналом является число теплообменников, которые необходимо включить. На его вход подаются следующие параметры: $F_n = F_{n3} = 5000$, $F_x = F_{x2} = 6.06$, $F_r = F_{r2} = 6.08$, $T = T3 = 78.89$. На дисплее ТП1 отображена «1». Это означает, что теплообменник ТП1 включен, остальные теплообменники выключены. Данная работа регулятора соответствует правилу «ЕСЛИ $P_n = P_{n3}$ И $UP_n = UP_{n3}$ И $F_x = F_{x2}$ И $UF_x = UF_{x2}$ И $F_r = F_{r2}$ И $UF_r = UF_{r2}$ И $T=T3$, ТО НР = НР2». Результат такой работы регулятора НР1, полученный на модели, представлен на рис. 4.

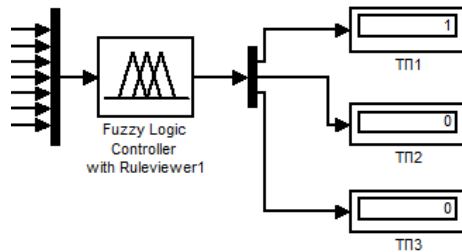


Рис. 4. Структура модели блока вывода НР1

Следующим этапом моделирования работы системы является подача входных параметров на блок НР2, которые совпадают с входными параметрами для НР1. Нечеткий регулятор определяет, каким диапазонам и каким правилам соответствуют входные значения, и выдает значения степени открытия клапанов V_n , V_r , V_x и частоту преобразования для работы насосов $Ч_x$ [10–14]. Значения, полученные в процессе моделирования работы регулятора НР2, представлены на рис. 4. Полученные значения управляющих сигналов означают следующее: $V_n = 42,5$ – полузакрыт, $Ч_x = 50$ – средняя частота, $V_r = 42,5$ – полузакрыт. Полученные значения управляющих параметров находятся в диапазонах, обозначенных в следующем правиле для НР2: «ЕСЛИ $P_n = P_{n3}$ И $F_x = F_{x2}$ И $F_r = F_{r2}$ И $T=T3$, ТО $V_n = V_{n1}$ И $Ч_x = Ч_{x2}$ И $V_r = V_{r2}$ » (рис. 5).

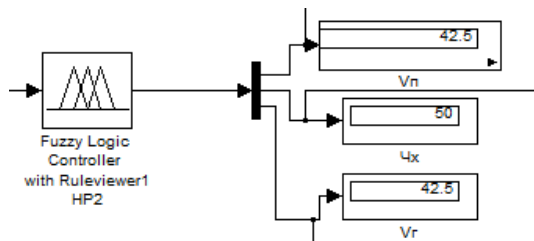


Рис. 5. Структура модели блока вывода НР2

По значениям входных и выходных параметров для НР2 выполняется расчет температуры жидкости на выходе из теплообменников. Алгоритм расчета содержит следующие шаги:

1. Расчет давления пара на выходе из теплообменников:

$$P_{\text{пк}} = \frac{(P_{\text{п2}} - P_{\text{п1}}) \cdot V_{\text{п}}}{100} + P_{\text{п1}} = \frac{(300 - 200) \cdot 42.5}{100} + 200 = 242,5, \quad (2)$$

где $P_{\text{пк}}$ – конечное давление пара; $P_{\text{п2}}$, $P_{\text{п1}}$ – конечное и начальное значения диапазона изменения давления, подаваемого в систему теплообменников пара, соответственно; $V_{\text{п}}$ – степень открытия клапана в линии подвода пара.

2. Расчет отношения конечного давления пара к заданному:

$$\Delta P = \frac{P_{\text{пк}}}{P_{\text{п}}} = \frac{242,5}{286,6} = 0,846, \quad (3)$$

где ΔP – отношение конечного давления пара к заданному; $P_{\text{пк}}$ – конечное давление пара; $P_{\text{п}}$ – начальное давление пара.

По аналогичным формулам рассчитываются значения отношений конечного расхода пара к заданному значению ΔF_{x} и $\Delta F_{\text{г}}$.

3. Расчет расхода холодной жидкости на выходе из теплообменников:

$$F_{\text{хк}} = \frac{(F_{\text{х2}} - F_{\text{х1}}) \cdot \text{Ч}_{\text{x}}}{100} + F_{\text{х1}} = \frac{(7,5 - 4) \cdot 50}{100} + 4 = 5,75, \quad (4)$$

где $F_{\text{хк}}$ – конечное значение расхода холодной жидкости; $F_{\text{х2}}$, $F_{\text{х1}}$ – конечное и начальное значения диапазона изменения расхода холодной жидкости, подаваемого в систему теплообменников, соответственно; Ч_{x} – скорость частотного преобразователя на линии подачи холодной жидкости.

4. Расчет отношения конечного расхода холодной воды к заданному:

$$\Delta F_{\text{x}} = \frac{F_{\text{хк}}}{F_{\text{x}}} = \frac{5,75}{6,06} = 0,9488, \quad (5)$$

где ΔF_{x} – отношение конечного значения расхода холодной жидкости к заданному; $F_{\text{хк}}$ – конечный расход холодной жидкости; F_{x} – начальный расход холодной жидкости.

5. Расчет расхода горячей жидкости на выходе из теплообменников:

$$F_{гк} = \frac{(F_{г2} - F_{г1}) \cdot \Psi_x}{100} + F_{г1} = \frac{(7.5 - 4) \cdot 42.5}{100} + 4 = 5.4875, \quad (6)$$

где $F_{гк}$ – конечное значение расхода горячей жидкости; $F_{г2}$, $F_{г1}$ – конечное и начальное значения диапазона изменения горячей жидкости, выходящей из теплообменника, соответственно; Ψ_x – степень открытия клапана выходящей из теплообменника горячей жидкости.

6. Расчет отношения конечного расхода холодной жидкости к заданному:

$$\Delta F_r = \frac{F_{гк}}{F_r} = \frac{5.4875}{6.08} = 0.902, \quad (7)$$

где ΔF_r – отношение конечного значения расхода горячей воды к заданному; $F_{гк}$ – конечный расход горячей воды; F_r – начальный расход горячей воды.

Таким образом, получены следующие значения $\Delta P = 0.846$, $\Delta F_x = 0.9488$, $\Delta F_r = 0.902$.

7. Определение среднего арифметического найденных значений:

$$\text{Ср.арифм}(\Delta P, \Delta F_r, \Delta F_x) = \frac{\Delta P + \Delta F_r + \Delta F_x}{n} = \frac{2.695}{3} = 0.899, \quad (8)$$

где n – число параметров, значения которых определяются в процессе работы системы адаптивного нечеткого управления.

Расчет конечной температуры горячей жидкости на выходе из теплообменников осуществляется согласно выражению

$$T_{\text{выход}} = \text{Ср.арифм}(\Delta P, \Delta F_r, \Delta F_x) \cdot T = 0.899 \cdot 78.89 = 70.9, \quad (9)$$

где T – это заданная температура холодной жидкости на входе в теплообменник.

Полученное значение температуры 70,9 °С входит в необходимый диапазон технологических параметров, представленный в начале статьи.

На рис. 6 приведен фрагмент схемы модели нахождения значения конечной температуры горячей жидкости на выходе из теплообменника ТПЗ, реализующий формулу (9). Данная схема реализуется в блоке Subsystem, результат работы которого представлен на рис. 7.

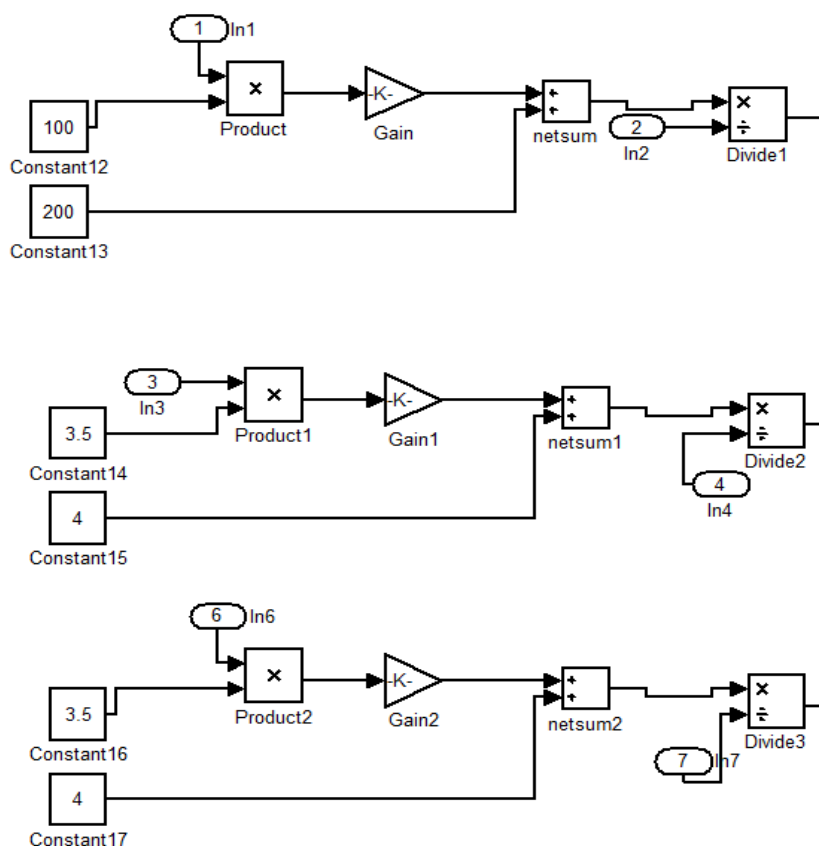


Рис. 6. Фрагмент схемы модели для расчета конечной температуры горячей жидкости на выходе из теплообменника ТПЗ

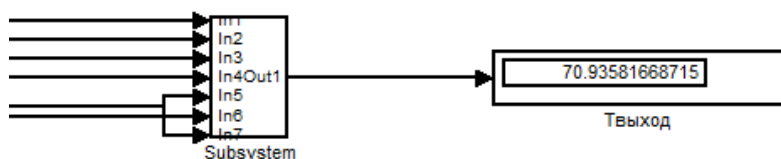


Рис. 7. Вывод конечной температуры горячей жидкости на выходе из теплообменника ТПЗ на дисплее

Результаты проведения исследования для НР1 и НР2. После сбора следующих данных: входных значений ($P_{\text{п}}$, $UP_{\text{п}}$, $F_{\text{х}}$, $UF_{\text{х}}$, $F_{\text{г}}$, $UF_{\text{г}}$, T) и выходных значений ($V_{\text{п}}$, $V_{\text{г}}$, $\text{Ч}_{\text{х}}$, $T_{\text{выход}}$) в MATLAB Simulink, получены графики термов в правилах нечеткого вывода для каждого НР [15–20]. В качестве примера на рис. 8 представлены графики термов для регулятора НР1.



Рис. 8. График термов для НР1

Обработка результатов исследования. Для определения зависимости выходного значения температуры на выходе из теплообменников $T_{\text{выход}}$ от входной на входе в первый теплообменник ТП1 T произведено девять измерений. В ходе эксперимента давление греющего пара, расход холодной воды и расход горячей воды оставались неизменными; изменялись только значения входной температуры холодной воды, поступающей в первый теплообменник ТП1, в пределах от 72 до 80 °С. Результаты измерений представлены в таблице. Зависимость выходной температуры от входной представлена на рис. 9.

Результаты измерения температуры для НР2

Номер измерения	НР2	
	T	$T_{\text{выход}}$
1	72,8	65,46
2	73,46	66,05
3	74,38	66,87
4	75,94	68,29
5	76,87	69,1
6	77,79	69,94
7	78,34	70,44
8	79,08	71,1
9	79,9	71,84

На рис. 9 видно, что полученная зависимость линейная. Таким образом, при увеличении входной температуры пропорционально увеличивается температура на выходе, при этом значения выходной температуры находятся в заданном диапазоне. Зависимости выходных

температур от входных, получаемые при использовании остальных правил нечеткого вывода для НР2, НР3, НР4, аналогичны и также имеют линейный характер.

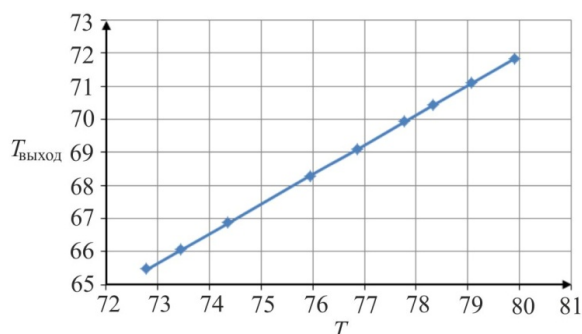


Рис. 9. Зависимости выходной температуры от входной

Заключение. В ходе исследования была разработана система адаптивного управления теплообменными аппаратами на базе нечетких регуляторов, с помощью которой производилось регулирование температуры нагреваемой жидкости – воды.

Созданы базы правил нечеткого управления для четырех регуляторов. Проведено моделирование системы адаптивного управления нечеткими регуляторами температуры в среде MATLAB и получены графики термов входных параметров для НР1: давления пара P_p , расхода холодной воды F_x , расхода горячей воды F_r , температуры на входе T , интенсивности подачи пара UP_p , интенсивности подачи холодной воды UF_x , интенсивности подачи горячей воды UF_r для каждого из трех теплообменников.

В результате моделирования системы адаптивного нечеткого управления теплообменными аппаратами в среде MATLAB Simulink установлено, что полученные в ходе работы системы значения температуры удовлетворяют заданным. Это свидетельствует о корректной работе разработанной системы.

Таким образом, можно сделать вывод, что разработанная адаптивная нечеткая система управления системой из трех теплообменных аппаратов является эффективной для производств, использующих теплообменники, так как повышается эффективность использования энергоресурсов за счет управления каждым теплообменником в составе общей системы.

Список литературы

1. Соловьев К.А., Муравьева Е.А., Султанов Р.Г. Адаптация нечеткого регулятора // Нефтегазовое дело. – 2014. – № 3. – С. 123–128.
2. Прядко П.В., Муравьева Е.А. Система управления сушильной печью для цеолитсодержащих катализаторов на основе 5-мерного нечеткого регулятора с интервальной неопределенностью // 63-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. – Уфа, 2012. – С. 358.
3. Габитов Р.Ф., Каяшев А.И., Муравьева Е.А. Управление печью прокалики цеолитсодержащих катализаторов крекинга нефтепродуктов методом плавающего горизонта с использованием нейросетевой модели // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2010. – № 12. – С. 12–19.
4. Разработка метода адаптации нечеткого регулятора, предназначенного для регулирования технологических параметров / Е.А. Муравьева, Д.С. Радакина, М.И. Шарипов, Э.Р. Еникеева, Э.М. Артыкаева // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 1. – С. 137–145.
5. Jain M., Madeira A., Martins Manuel A. A fuzzy modal logic for fuzzy transition systems // Electronic Notes in Theoretical Computer Science. – 2020. – Vol. 3481. – P. 85–103.
6. Fuzzy controller design of micro-unmanned helicopter relying on improved genetic optimization algorithm / Y. Hu, Y. Yang, S. Li, Y. Zhou // Aerospace Science and Technology. – 2020. – Vol. 98. – № 105685.
7. J An improved genetic algorithm optimization fuzzy controller applied to the wellhead back pressure control system / H. Liang, J. Zou, K. Zuo, M. Khan // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2020. – Vol. 142. – № 106708.
8. Talbi N. Design of Fuzzy Controller rule base using Bat Algorithm // Energy Procedia. – 2019. – Vol. 162. – P. 241–250.
9. Lamamra K., Batat F., Mokhtari F. A new technique with improved control quality of nonlinear systems using an optimized fuzzy logic controller // Expert Systems with Applications. – 2020. – Vol. 145, 1. – № 113148.
10. Alsafadi L.A., Chulin N.A., Mironova I.V. Synthesis of fuzzy controller based on simple PID controller // Procedia Computer Science. – 2019. – Vol. 150. – P. 28–38.
11. Sreedharan D., Paul V., Thottungal R. Mathematical modelling of polymer electrolyte membrane fuel cell and fuzzy-based intelligent controllers for performance enhancement // Computers & Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 77. – P. 354–365.
12. Farajdadian S.M. Hassan Hosseini Design of an optimal fuzzy controller to obtain maximum power in solar power generation system // Solar Energy. – 2019. – Vol. 182. – P. 161–178.

13. Назаров И.С. Математическое моделирование нечеткого регулятора // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине: сб. науч. тр. V Междунар. науч. конф. – Томск, 2018. – С. 113–118.
14. Мефедова Ю.А., Моисеева Ю.Р. Применение нечеткой логики в системах управления // Актуальные проблемы и пути развития энергетики, техники и технологий: сб. тр. IV Междунар. науч.-практ. конф. – СПб., 2018. – С. 94–97.
15. Бузикаева А.В., Черный С.П. Особенности моделирования нечетких регуляторов для систем электропривода переменного тока // Электропривод на транспорте и в промышленности: тр. II Всерос. науч.-практ. конф. – Хабаровск, 2018. – С. 271–275.
16. Каримов И.И. Концептуальная модель нечеткого регулятора для определения возмущений // Современные технологии в нефтегазовом деле – 2019: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. – Октябрьский, 2019. – С. 300–302.
17. Алимова М.М. Нечеткая модель управления технологическими параметрами теплогенерирующих установок // Интернаука. – 2019. – № 8 (90). – С. 34–35.
18. Карабцов Р.Д. Оптимизация нечетких систем управления с использованием генетического алгоритма // Прикладная математика и фундаментальная информатика. – 2018. – Т. 5, № 2. – С. 43–50.
19. Шилкина С.В., Фокина Е.Н. Контроллер нечеткой логики в управлении технологическими процессами // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2018. – Т. 15, № 1 (59). – С. 106–114.
20. Потапов Н.С., Маслов А.А. Оценка адекватности модели адаптивной системы управления с применением средств математического моделирования // Наука – производству: материалы междунар. науч.-практ. конф. / Мурманский гос. техн. ун-т. – Мурманск, 2018. – С. 77–84.

References

1. Solov'ev K.A., Murav'eva E.A., Sultanov R.G. Adaptacija nechetkogo reguljatora [Adaptation of a fuzzy controller]. *Oil and Gas business*, 2014, no 3, pp. 123-128.
2. Prjadko P.V., Murav'eva E.A. Sistema upravljenja sushil'noj pech'ju dlja ceolitsoderzhashhih katalizatorov na osnove 5-mernogo nechetkogo reguljatora s interval'noj neopredelennost'ju [Control system of a drying oven for zeolite-containing catalysts based on a 5-dimensional fuzzy controller with interval uncertainty]. *63rd scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists of USNTU*, 2012, pp. 358.
3. Gabitov R.F., Kajashev A.I., Murav'eva E.A. Upravlenie pech'ju prokalki ceolitsoderzhashhih katalizatorov krekinga nefteproduktov metodom plavajushhego gorizonta s ispol'zovaniem nejrosetevoj modeli [Control of the furnace for calcining zeolite-containing catalysts for cracking petroleum products by the floating horizon method using a neural network model]. *Automation, telemechanization and communication in the oil industry*, 2010, no 12, pp. 12-19.

4. Murav'eva E.A., Radakina D.S., Sharipov M.I., Enikeeva Je.R., Artykaeva Je.M. Razrabotka metoda adaptacii nechetkogo reguljatora, prednaznachennogo dlja regulirovanija tehnologicheskikh parametrov [Development of a method for adapting a fuzzy controller designed for regulating technological parameters]. *Bulletin of the Chuvash University*, 2018, no 1, pp. 137-145.
5. Jain M., Madeira A., Martins Manuel A. A Fuzzy Modal Logic for Fuzzy Transition Systems. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 2020, vol. 3481, pp. 85-103.
6. Hu Y., Yang Y., Li S., Zhou Y. Fuzzy controller design of micro-unmanned helicopter relying on improved genetic optimization algorithm. *Erospace Science and Technology*, 2020, vol. 98, no 105685.
7. Liang H., Zou J., Zuo K., Khan M. J An improved genetic algorithm optimization fuzzy controller applied to the wellhead back pressure control system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, vol. 142, no 106708.
8. Talbi N. Design of Fuzzy Controller rule base using Bat Algorithm. *Energy Procedia*, 2019, vol. 162, pp. 241-250.
9. Lamamra K., Batat F., Mokhtari F. A new technique with improved control quality of nonlinear systems using an optimized fuzzy logic controller. *Expert Systems with Applications*, 2020, vol. 145, 1. no 113148.
10. Alsafadi L. A., Chulin N. A., Mironova I. V. Synthesis of Fuzzy Controller Based on Simple PID Controller. *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 150, pp. 28-38.
11. Sreedharan D., Paul V., Thottungal R. Mathematical modelling of polymer electrolyte membrane fuel cell and fuzzy-based intelligent controllers for performance enhancement. *Computers & Electrical Engineering*, 2019, vol. 77, pp. 354-365.
12. Farajdadian, S. M. Hassan Hosseini Design of an optimal fuzzy controller to obtain maximum power in solar power generation system. *Solar Energy*, 2019, vol. 182, pp. 161-178.
13. Nazarov I.S. Matematicheskoe modelirovanie nechetkogo reguljatora [Mathematical modeling of a fuzzy controller]. *In the collection of scientific papers of the V International scientific conference: Information technologies in science, management, social sphere and medicine*, 2018, pp. 113-118.
14. Mefedova Ju.A., Moiseeva Ju.R. Primenenie nechetkoj logiki v sistemah upravljenja [Application of fuzzy logic in control systems]. *Proceedings of the IV International scientific and practical conference: Actual problems and ways of development of energy, engineering and technologies*, 2018, pp. 94-97.
15. Buzikaeva A.V., Chernyj S.P. Osobennosti modelirovanija nechetkih reguljatorov dlja sistem jelektroprivoda peremennogo toka [Features of modeling fuzzy controllers for alternating current electric drive systems]. *SB.: electric Drive in transport and industry proceedings of the II all-Russian scientific and practical conference*, 2018, pp. 271-275.
16. Karimov I.I. Konceptual'naja model' nechetkogo reguljatora dlja opredelenija vozmushhenij [Conceptual model of a fuzzy controller for determining perturbations]. *In the collection: Modern technologies in oil and gas business-*

2019 proceedings of the international scientific and technical conference: in 2 volumes, 2019, pp. 300-302.

17. Alimova M.M. Nechetkaja model' upravljenja tehnologicheskimi parametrami teplogenerirujushhih ustanovok [Fuzzy model of control of technological parameters of heat generating plants]. *Internauka*, 2019, no 8 (90), pp. 34-35.

18. Karabcov R.D. Optimizacija nechjotkih sistem upravljenja s ispol'zovaniem geneticheskogo algoritma [Optimization of fuzzy control systems using a genetic algorithm]. *Applied mathematics and fundamental computer science*, 2018, vol. 5, no 2, pp. 43-50.

19. Shilkina S.V., Fokina E.N. Kontroller nechjotkoj logiki v upravlennii tehnologicheskimi processami [Controller of fuzzy logic in process control]. *Bulletin of the Siberian state automobile and road University*, 2018, vol. 15, no 1 (59), pp. 106-114.

20. Potapov N.S., Maslov A.A. Ocenka adekvatnosti modeli adaptivnoj sistemy upravljenja s primeneniem sredstv matematicheskogo modelirovanija [Assessment of the adequacy of the adaptive control system model using mathematical modeling tools], *Nauka – proizvodstvu. Materialy mezhdunarodnoi konferentsii*. Murmansk, 2018, pp. 77–84.

Получено 05.09.2020

Об авторах

Муравьева Елена Александровна (Стерлитамак, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизированные технологические и информационные системы» Уфимского государственного нефтяного технического университета, филиал в г. Стерлитамаке (453118, г. Стерлитамак, пр. Октября, 2, e-mail: muraveva_ea@mail.ru).

Квиринг Маргарита Дмитриевна (Стерлитамак, Россия) – магистрант кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы» Уфимского государственного нефтяного технического университета, филиал в г. Стерлитамаке (453118, г. Стерлитамак, пр. Октября, 2, e-mail: kviringg@yandex.ru).

About the authors

Elena A. Muravyova (Sterlitamak, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department “Automated technological and information systems” of Ufa State oil Technical University, Branch in Sterlitamak (2, October av., Sterlitamak, 453118, e-mail: muraveva_ea@mail.ru).

Margarita D. Kviring (Sterlitamak, Russian Federation) – Undergraduate Student of the Department “Automated technological and information systems” of the Ufa State oil Technical University, Branch in Sterlitamak (2, October av., Sterlitamak, 453118, e-mail: kviringg@yandex.ru).