

DOI: 10.15593/2224-9400/2021.2.14

УДК 681.5.015.3

Е.А. Муравьева, Р.Ф. Габитов, Р.Ф. Имаев

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

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВОЗМУЩЕНИЙ ПО ТРЕНДАМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И СИНТЕЗА НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

Описана суть метода определения возмущений в системах автоматического управления по трендам на примере рассольного цикла, а именно подогрева очищенного рассола, идущего на электролиз. Цель исследования – разработка системы идентификации и количественной оценки возмущений по трендам. Используются методы математического моделирования и нечеткая логика. Получена математическая модель процессов, протекающих в цикле подогрева рассола на электролиз. Построены структурные схемы идентификации возмущений. Разработаны нечеткие регуляторы в виде функции от его входных переменных. Предложенный метод может внедряться в системах управления по возмущению для формирования управляющих воздействий, а также для диагностических целей.

Ключевые слова: нечеткость, возмущение, управление, тренд, моделирование.

E.A. Muravyova, R.F. Gabitov, R.F. Imaev

Ufa State Petroleum Technological University,
Branch in Sterlitamak, Russian Federation

IDENTIFICATION AND QUANTITATIVE ESTIMATION OF PERTURBATIONS BY TRENDS USING THE METHOD OF MATHEMATICAL MODELING AND FUZZY CONTROLLER SYNTHESIS

This article describes the essence of the method for determining disturbances in automatic control systems by trends on the example of the brine cycle, namely, heating of purified brine going to electrolysis. Objective: to develop a system for identifying and quantifying disturbances by trends. Methods of mathematical modeling and fuzzy logic are used. A mathematical model of the processes occurring in the cycle of brine heating for electrolysis is obtained; structural schemes for identifying disturbances are constructed; fuzzy parameters are developed as a function of its input variables. The proposed method can be implemented in perturbation control systems for the formation of control actions, as well as for diagnostic purposes.

Keywords: fuzziness, perturbation, control, trend, modeling.

Введение. Идентификация и количественная оценка возмущений по трендам прежде всего нужна для диагностических целей (определение параметров системы в каждый момент времени) в различного рода автоматизированных системах управления. Полученные данные могут быть использованы для более плавного регулирования параметров процесса (например, различные параметры производства), а также для предотвращения аварийных ситуаций, возникающих в результате колебаний регулируемого параметра в недопустимую зону.

Задача реализации синтеза системы идентификации и количественной оценки возмущений решается с помощью следующих основных этапов: описание объекта управления с указанием констант, описание математических моделей процессов, протекающих в цикле подогрева рассола, построение структурной схемы реализации задачи, синтез нечеткого регулятора (НР) для определения искомых возмущений, включающий все необходимые этапы (синтез продукционных правил, фаззификация, агрегирование, активизация, аккумуляция, дефаззификация методом центра тяжести).

Информация о возмущениях была использована для построения системы управления по возмущениям. Результатом работы системы является поддержание параметра на заданном уровне, а также обеспечение более плавного регулирования.

В работах, в которых производится оценка возмущений [1, 2], предложены различные принципы синтеза оптимального управления, например, метод последовательного синтеза оптимального по быстродействию управления линейной системой с неизвестным возмущением. Это позволяет получить систему линейных алгебраических уравнений, связывающую отклонения фазовых координат с отклонениями начальных условий нормированной сопряженной системы и отклонением конечного момента. Но в рассматриваемых источниках не используют принципов нечеткой логики для их идентификации, их количественное определение не всегда точно. Заметим, что алгоритм синтеза, изложенный в работе [6], позволяет формировать выходные значения НР с требуемой статической характеристикой и минимальной погрешностью, тем самым позволит строго оценивать возмущающие воздействия на систему.

Описание объекта управления. Для начала опишем объект управления, математические модели которого использованы при разработке системы идентификации возмущений. Рассматриваемый уча-

сток (рис. 1), расположенный в цикле подготовки рассола, находящемся на производстве АО «БСК» в цехе № 4, предназначен для подогрева готового и очищенного рассола NaCl (хлорида натрия), идущего на электролиз.

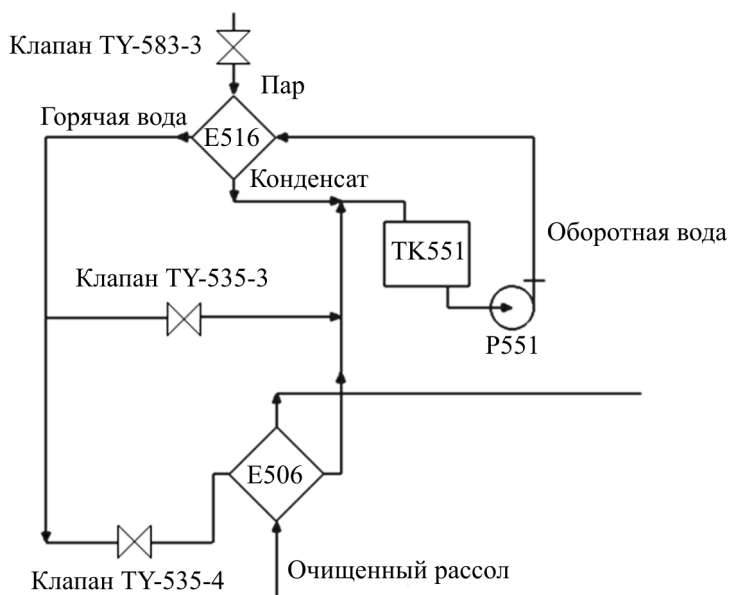


Рис. 1. Технологическая схема компрессорной установки

Участок включает в себя два кожухотрубчатых теплообменника (E-516 и E-506), центробежный насос (P-551) и емкость с оборотной водой (TK-551). Расход пара на подогрев воды в теплообменник E-516 поддерживается регулирующим клапаном TY-583-3. Также в схеме присутствуют еще два аналогичных клапана: TY-535-3 (для регулирования расхода подогретой воды через байпас в емкость с оборотной водой TK-551) и TY-535-4 (для регулирования расхода подогретой воды в теплообменник E-506).

Математическая модель процессов, протекающих в цикле подогрева рассола на электролиз. Рассмотрим следующие основные процессы:

1. Подогрев воды в теплообменнике E-516 – 40–100 °С.
2. Изменение температуры в емкости TK-551 в результате цикличности процесса 40–100 °С.
3. Подогрев рассола в теплообменнике E-506 – 40–100 °С (теоретическое значение), 70–85 °С (поддерживаемое оптимальное значение).

Протекание и характер этих процессов зависит:

- от расхода пара в теплообменник E-516 – $0\text{--}125 \text{ м}^3/\text{мин}$;
- расхода горячей воды через байпас – $0\text{--}1 \text{ м}^3/\text{мин}$;
- расхода горячей воды в теплообменник E-506 – $0\text{--}1 \text{ м}^3/\text{мин}$.

Моделирование будем проводить в Mathcad – система компьютерной алгебры из класса систем автоматизированного проектирования, ориентированная на подготовку интерактивных документов с вычислениями и визуальным сопровождением, отличается легкостью использования и применения для коллективной работы.

Зададим входные параметры и примем константы с пояснениями (рис. 2). Значения констант были найдены в справочнике [3].

	Степень открытия заслонки, %	$\alpha := 0.2$
Расход воды на теплообменник E-516 насосом P-506, $\text{м}^3/\text{мин}$		$F_{\text{воды}} := 1$
	Плотность пара, $\text{кг}/\text{м}^3$	$\rho_{\text{пара}} := 1$
Расход пара на теплообменник E-516, $\text{м}^3/\text{мин}$		$F_{\text{пара}} := 125$
Температура емкости ТК-551 при пуске, $^{\circ}\text{C}$		$t_{\text{vhv}_0} := 40$
Теплоемкость пара, $\text{кг}/(\text{Дж} \cdot ^{\circ}\text{C})$		$C_{\text{пара}} := 2100$
Температура пара, идущей в теплообменник E-516, $^{\circ}\text{C}$		$t_{\text{пар}} := 115$
Расход, воды через байпас, м^3		$F_{\text{байп}} := 0.3$
Расход, воды на теплообменник E-516, $\text{м}^3/\text{мин}$		$F_{\text{байп2}} := 0.67$
Температура конденсации воды, $^{\circ}\text{C}$		$t_{\text{конд}} := 100$
Удельная теплота конденсации пара, $\text{Дж}/\text{кг}$		$q_{\text{конд}} := 2256000$
Теплоемкость воды, $\text{кг}/(\text{Дж} \cdot ^{\circ}\text{C})$		$C_{\text{воды}} := 4200$
Плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$		$\rho_{\text{воды}} := 1000$
Объем воды емкости ТК-551, м^3		$V := 12$
Теплоемкость очищенного рассола, $\text{кг}/(\text{Дж} \cdot ^{\circ}\text{C})$		$C_{\text{рассол}} := 2700$
Плотность очищенного рассола, $\text{кг}/\text{м}^3$		$\rho_{\text{рассол}} := 1250$
Расход, очищенного рассола в теплообменник E-516, $\text{м}^3/\text{мин}$		$F_{\text{рассол}} := 0.17$
Температура воды на вход в теплообменник поз. E-516 при пуске, $^{\circ}\text{C}$		$t_{\text{vj}_0} := 53.75$
Температура рассола на выходе из теплообменник поз. E-516 при пуске, $^{\circ}\text{C}$		$t_{\text{ri}_0} := 49$
Температура в емкости ТК-551, обозначенная в подпрограмме цикла		Z

Рис. 2. Начальные значения и константы для моделирования процессов
в цикле подогрева очищенного рассола

Представленные на рис. 3, 5, 7 модели получены при решении уравнений теплового баланса (переменные, используемые при построении модели, взяты из рис. 2).

Математическая модель процессов, реализованная в среде MathCad, происходящих в теплообменнике E-516, выглядит следующим образом:

$$tv_i \leftarrow \frac{\alpha_1 \cdot \rho_{\text{пара}} \cdot F_{\text{пара}} \cdot [C_{\text{пара}} \cdot (t_{\text{пара}} - t_{\text{конд}}) + q_{\text{конд}}] + \frac{F_{\text{пара}} \cdot \alpha_1 \cdot t_{\text{конд}} \cdot (C_{\text{воды}} \cdot \rho_{\text{воды}})}{1000} + C_{\text{воды}} \cdot \rho_{\text{воды}} \cdot F_{\text{воды}} \cdot z}{\frac{F_{\text{пара}} \cdot \alpha_1 \cdot (C_{\text{воды}} \cdot \rho_{\text{воды}})}{1000} + C_{\text{воды}} \cdot \rho_{\text{воды}} \cdot F_{\text{воды}}}$$

Рис. 3. Математическая модель процессов, происходящих в теплообменнике Е-516

Модель, представленная на рис. 3, получена в результате решения следующего уравнения теплового баланса:

$$\alpha_1 \cdot \rho_{\text{воды}} \cdot F_{\text{пара}} (C_{\text{пара}} (t_{\text{пара}} - t_{\text{конд}}) + q_{\text{конд}}) + \frac{F_{\text{пара}} \cdot \alpha_1}{1000} \cdot C_{\text{воды}} \cdot (t_{\text{конд}} - tv_i) =$$

$$= C_{\text{воды}} \cdot \rho_{\text{воды}} \cdot F_{\text{воды}} (tv_i - t_{\text{вхводы}}), \quad (1)$$

где tv_i – конечная температура воды, выходящей из теплообменника, которую мы и ищем; число 1000 в формуле (1) показывает, что после того, как пар сконденсировал в теплообменнике, его объем уменьшился в 1000 раз. Формула (1) показывает, как происходит взаимодействие потоков воды из емкости ТК-551 и оборотного пара при температуре 115 °С.

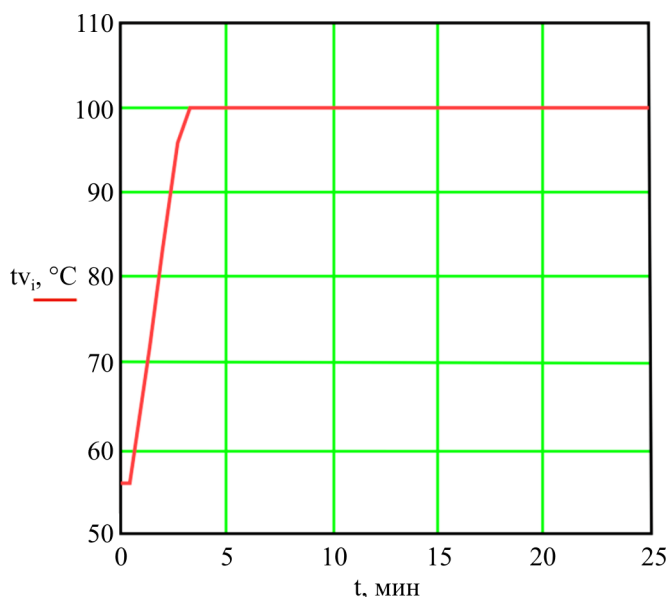


Рис. 4. График (tv_i), иллюстрирующий изменение температуры воды в теплообменнике Е-516 от времени (t , мин)

Математическая модель процессов, происходящих в емкости ТК-551, представленная на рис. 5.

$$tv_{hv_i} \leftarrow \frac{F_{пара} \cdot t \cdot \frac{tv_{i_1}}{1000} + V \cdot t_{вхводы} + F_{байп} \cdot t \cdot tv_{i_1} + F_{воды2} \cdot t \cdot tr_i}{F_{пара} \cdot t \cdot \frac{1}{1000} + V + F_{байп} \cdot t + F_{воды2} \cdot t}$$

Рис. 5. Математическая модель процессов, происходящих в емкости ТК-551

Эта модель получена в результате решения следующего уравнения теплового баланса:

$$C_{воды} \cdot \rho_{воды} \cdot \frac{F_{пара}}{1000} \cdot t \cdot (t_{конд} - tv_{hv_i}) + V \cdot (t_{вхводы} - tv_{hv_i}) + F_{байп} \cdot t \cdot (tv_i - tv_{hv_i}) + F_{воды2} \cdot t \cdot (tr_i - tv_{hv_i}) = 0, \quad (2)$$

где tv_i – температура воды, описанная моделью на рис. 3; tr_i – температура воды (рассола), описанная моделью на рис. 6, tv_{hv_i} – конечная температура воды, которую необходимо найти, t – время в минутах. Число 1000 в формуле (2) показывает, что после того, как пар сконденсировал в теплообменнике, его объем уменьшился в 1000 раз.

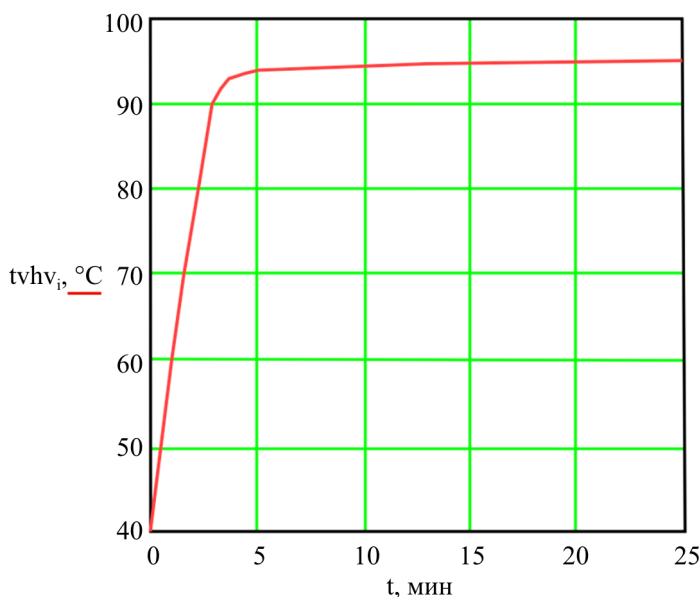


Рис. 6. График (tv_{hv_i}) , иллюстрирующий изменение температуры воды в емкости ТК-551 от времени $(t, \text{мин})$

Формула (2) показывает, как происходит взаимодействие потоков воды из теплообменника Е-516, проходящего через байпас ТУ-535-3, и остывшей воды из теплообменника Е-506.

Математическая модель процессов, происходящих в теплообменнике Е-506 представлена на рис. 7.

$$tr_1 \leftarrow \frac{C_{\text{рассол}} \cdot \rho_{\text{рассол}} \cdot F_{\text{рассол}} \cdot t_{\text{вхрассол}} + C_{\text{воды}} \cdot F_{\text{воды}} \cdot \alpha_2 \cdot \rho_{\text{воды}} \cdot tv1_1}{C_{\text{рассол}} \cdot \rho_{\text{рассол}} \cdot F_{\text{рассол}} + C_{\text{воды}} \cdot F_{\text{воды}} \cdot \alpha_2 \cdot \rho_{\text{воды}}}$$

Рис. 7. Математическая модель процессов, происходящих в теплообменнике Е-506

Модель получена в результате решения следующего уравнения теплового баланса:

$$C_{\text{воды}} \cdot F_{\text{рассол}} \cdot \rho_{\text{рассол}} (t_{\text{вхрассол}} - tr_1) - C_{\text{воды}} \cdot F_{\text{воды}2} \cdot \rho_{\text{воды}} (tv1_1 - tr_1) \cdot \alpha_2 = 0, \quad (3)$$

где $tv1_1$ – температура воды, описанная моделью на рис. 3 (tv_i); tr_1 – конечная температура воды, которую необходимо найти.

Формула (3) показывает, как происходит взаимодействие потоков воды из теплообменника Е-516 и очищенного холодного рассола.

Идентификация и количественная оценка возмущений по трендам. Всего в цикле подогрева воды существуют два возмущения: изменение температуры очищенного рассола (пределы изменения $[-5;5]$ °C), входящего в теплообменник Е-506, изменение температуры воды в емкости ТК-551 (пределы изменения $[-4,6;4,6]$ °C). Соответственно для количественного и качественного определения данных возмущений (направление и степень отклонения от нормы, предусмотренной моделью, не включающей данные возмущения) в рамках данного проекта использовалась модель процессов, происходящих в теплообменнике Е-506 (рис. 8), а именно подогрев очищенного рассола (изменение температуры рассола с течением времени). На рис. 9, 10 представлены графики изменения температуры очищенного рассола на выходе из теплообменника с возмущениями и без (сплошная линия – без возмущений (tr_{i1}), пунктирная – с возмущениями (tr_{i2})). Возмущения, описанные в проекте, представляют собой величину отклонения параметров температуры рассола на входе в теплообменник Е-506, а также температуры в емкости ТК-551 от нормы (при условном отсутствии этих возмущений), изменяющуюся с течением времени. Для простоты определения каждого возмущения будем пользоваться следующим допущением: будем исключать одно из возможных возмущений при условном наличии другого [4, 5].

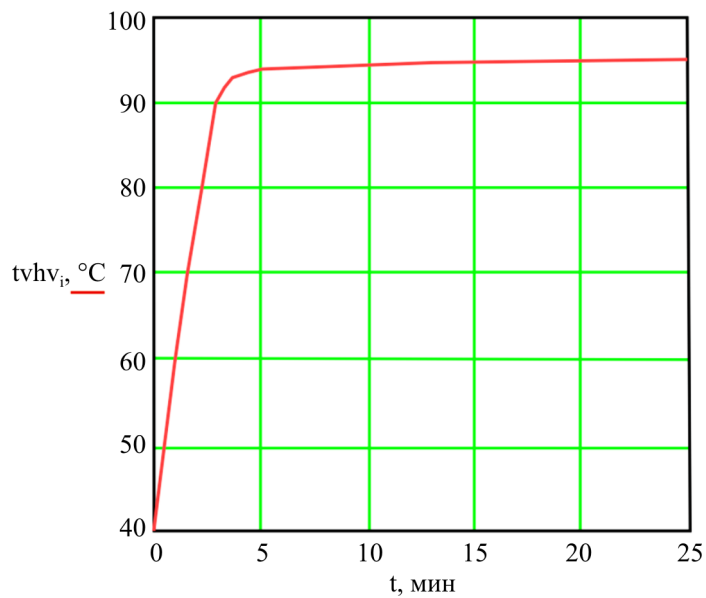


Рис. 8. График (tr_i), иллюстрирующий изменение температуры воды в теплообменнике E-506 от времени (t , мин)

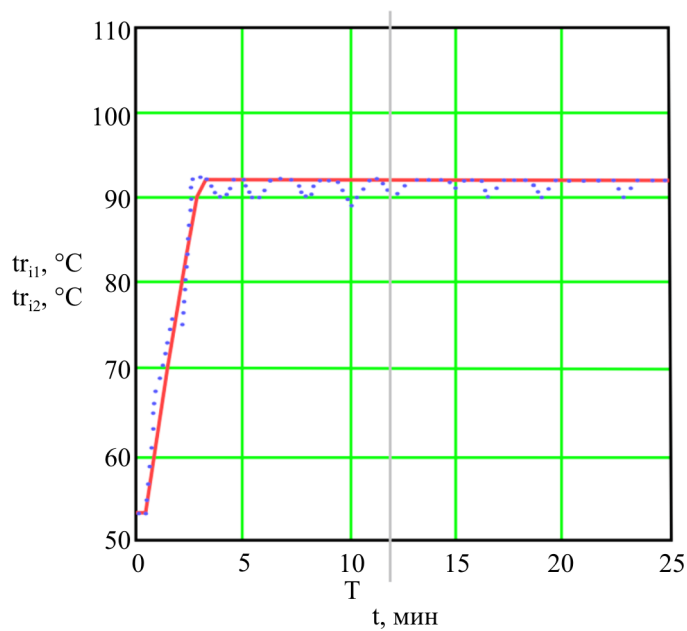


Рис. 9. Температура рассола на выходе из теплообменника с учетом отсутствия возмущений параметра температуры воды емкости ТК-551

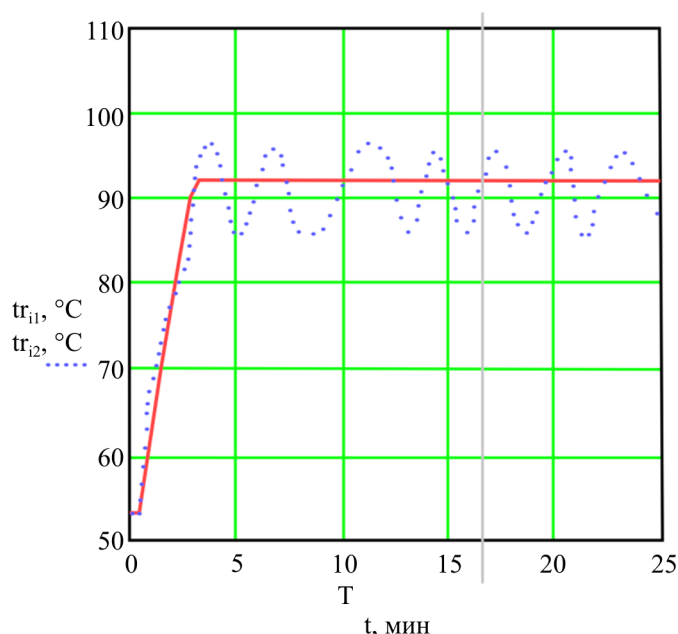


Рис. 10. Температура рассола на выходе из теплообменника с учетом отсутствия возмущений параметра температуры рассола на входе в теплообменник

На рис. 11, 12 показана система идентификации и количественной оценки возмущений по трендам. Элементом, определяющим возмущения в каждой из систем, является нечеткий регулятор [7–9]. На вход каждого из нечетких регуляторов подаем тренд динамической модели (пунктирная линия на рис. 9, 10) изменения температуры рассола на выходе из теплообменника Е-506 $T_{г}$ в $^{\circ}\text{C}$, которая учитывает возмущения (отклонение температуры рассола, входящего в теплообменник Е-506, отклонение температуры воды в емкости ТК-551 от заданных норм), тренд отклонения модели, представляющий собой разность параметра (температуры рассола на выходе из теплообменника Е-506) модели реальной (пунктирная линия на рис. 9, 10) и параметра модели идеальной (сплошная линия на рис. 9, 10), не учитывающей возмущения, $T_{г\text{откл}}$ в $^{\circ}\text{C}$. Причем на регулятор, считающий возмущения температуры воды в емкости ТК-551 (см. рис. 11), подается модель (пунктирная линия на рис. 9) с учетом того, что температура рассола, входящего в теплообменник, является постоянной и не имеет возмущений, а на регулятор, определяющий возмущения температуры очищенного рассола, входящего в теплообменник (см. рис. 12), подается

все та же модель, но с учетом того, что теперь температура воды в емкости не имеет возмущений (пунктирная линия на рис. 10).

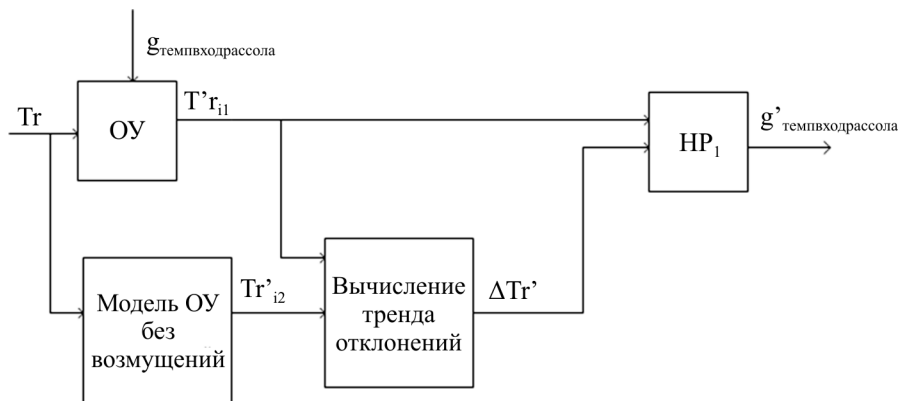


Рис. 11. Структурная схема идентификации возмущений с учетом того, что температура рассола, входящего в теплообменник, является постоянной и не имеет возмущений

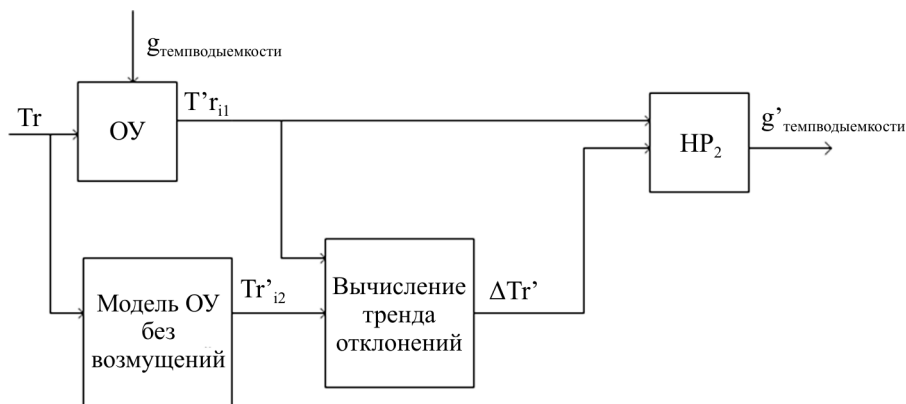


Рис. 12. Структурная схема идентификации возмущений с учетом того, что температура воды в емкости не имеет возмущений

На рис. 11, 12: Tr – задающий сигнал (уставка температуры рассола); $g_{\text{темповходрассола}}$, $g_{\text{темповъемкости}}$ – искомые возмущения; Tr'_{i1} , Tr'_{i2} – значение трендов температуры рассола с учетом возмущений и без них соответственно; $\Delta Tr'$ – тренд отклонений (разность Tr'_{i1} , и Tr'_{i2}), $g'_{\text{темповходрассола}}$, $g'_{\text{темповъемкости}}$ – полученные значения возмущений.

Задача состоит в том, чтобы определить характер возмущений. Для этой цели необходимо разработать нечеткий регулятор в виде функции от его входных переменных [10]. Эту задачу реализуем в математическом пакете Mathcad.

Поскольку алгоритмы для регуляторов имеют идентичную структуру представим синтез одного регулятора, а базу правил – для двух (см. рис. 17).

$$\begin{array}{ll}
 aL_{1,1} \leftarrow 40 & aP_{1,1} \leftarrow -5 \\
 aL_{1,2} \leftarrow 55 & aP_{1,2} \leftarrow -2.5 \\
 aL_{1,3} \leftarrow 70 & aP_{1,3} \leftarrow 0 \\
 aL_{1,4} \leftarrow 85 & aP_{1,4} \leftarrow 2.5 \\
 aL_{1,5} \leftarrow 100 & aP_{1,5} \leftarrow 5
 \end{array}$$

Рис. 13. Описание входных параметров термами НР

На рис. 13 представлено задание входных параметров нечеткого регулятора термами:

– aL – температура рассола на выходе из теплообменника;

– aP – тренд отклонения.

На рис. 14, 15 описана процедура фаззификации. Ее результатом будет одномерная матрица ma для температуры рассола на выходе из теплообменника, maL для тренда отклонений.

$$\begin{array}{l}
 \text{if } T > -5 \wedge T \leq -2.5 \\
 \begin{array}{l}
 \text{if } T \leq -5 \\
 \begin{array}{l}
 maL_{1,1} \leftarrow 1 \\
 maL_{1,2} \leftarrow 0 \\
 maL_{1,3} \leftarrow 0 \\
 maL_{1,4} \leftarrow 0 \\
 maL_{1,5} \leftarrow 0
 \end{array}
 \end{array}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{l}
 maL_{1,1} \leftarrow 1 - \frac{T - aL_{1,1}}{aL_{1,2} - aL_{1,1}} \\
 maL_{1,2} \leftarrow \frac{T - aL_{1,1}}{aL_{1,2} - aL_{1,1}} \\
 maL_{1,3} \leftarrow 0 \\
 maL_{1,4} \leftarrow 0 \\
 maL_{1,5} \leftarrow 0
 \end{array}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{if } T > -2.5 \wedge T \leq 0 \\
 \begin{array}{l}
 maL_{1,1} \leftarrow 0 \\
 maL_{1,2} \leftarrow 1 - \frac{T - aL_{1,2}}{aL_{1,3} - aL_{1,2}} \\
 maL_{1,3} \leftarrow \frac{T - aL_{1,2}}{aL_{1,3} - aL_{1,2}} \\
 maL_{1,4} \leftarrow 0 \\
 maL_{1,5} \leftarrow 0
 \end{array}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{if } T > 0 \wedge T \leq 2.5 \\
 \begin{array}{l}
 maL_{1,1} \leftarrow 0 \\
 maL_{1,2} \leftarrow 0 \\
 maL_{1,3} \leftarrow 1 - \frac{T - aL_{1,3}}{aL_{1,4} - aL_{1,3}} \\
 maL_{1,4} \leftarrow \frac{T - aL_{1,3}}{aL_{1,4} - aL_{1,3}} \\
 maL_{1,5} \leftarrow 0
 \end{array}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{if } T > 2.5 \wedge T \leq 5 \\
 \begin{array}{l}
 maL_{1,1} \leftarrow 0 \\
 maL_{1,2} \leftarrow 0 \\
 maL_{1,3} \leftarrow 0 \\
 maL_{1,4} \leftarrow 1 - \frac{T - aL_{1,4}}{aL_{1,5} - aL_{1,4}} \\
 maL_{1,5} \leftarrow \frac{T - aL_{1,4}}{aL_{1,5} - aL_{1,4}}
 \end{array}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{if } T > 5 \\
 \begin{array}{l}
 maL_{1,1} \leftarrow 0 \\
 maL_{1,2} \leftarrow 0 \\
 maL_{1,3} \leftarrow 0 \\
 maL_{1,4} \leftarrow 0 \\
 maL_{1,5} \leftarrow 1
 \end{array}
 \end{array}$$

Рис. 14. Фаззификация переменных для тренда отклонений

На рис. 14 реализована задача поиска значения функции принадлежности в зависимости от входных параметров регулятора. Переменная i обозначает номер терма функции принадлежности, maL – функ-

ция принадлежности, T – величина входного параметра (отклонение от нормы температуры рассола, выходящего из теплообменника).

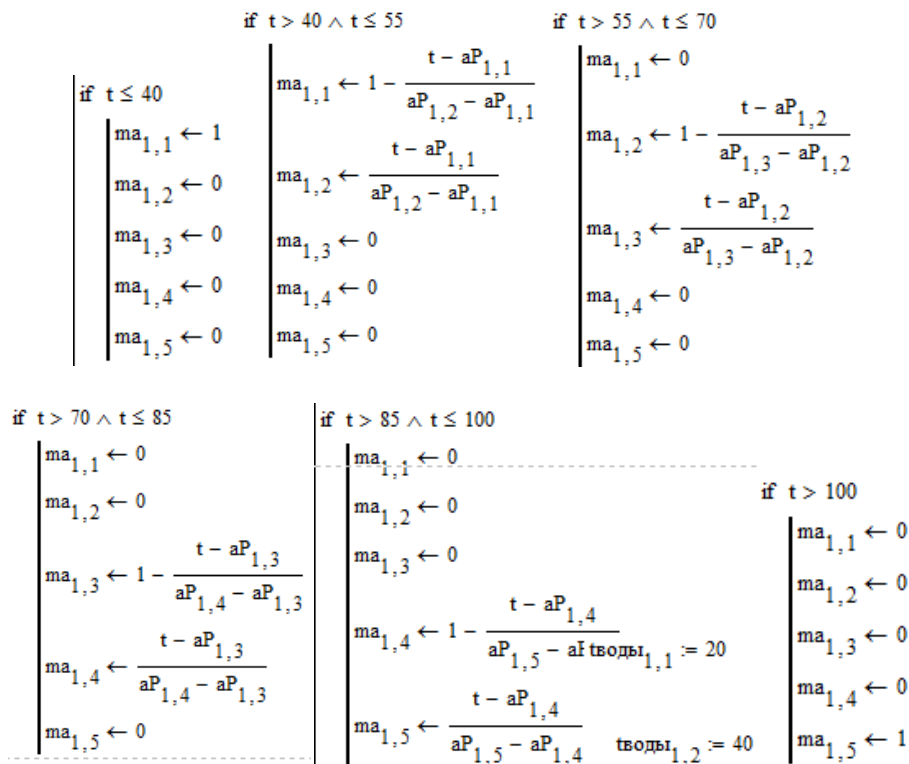


Рис. 15. Фаззификация переменных для температуры рассола на выходе из теплообменника

Пусть тренд отклонений, поступающий на регулятор, $T = 3$ °С, это значение соответствует неравенству $T > aP_4$ и $T \leq aP_5$.

$$maL(maL_1, maL_2, maL_3, maL_4, maL_5) = (0 \ 0 \ 0 \ 0,8 \ 0,2).$$

Следующим шагом является агрегирование. Целью этого этапа является определение степени истинности условий для каждого правила системы нечеткого вывода. Упрощенно говоря, для каждого условия находим минимальное значение истинности всех его подусловий [11]. Агрегирование представлено на рис. 16.

Таким образом, если $L = 60$ °С, $P = 3$ °С тогда $maL = (0 \ 0 \ 0 \ 0,8 \ 0,2)$, $ma = (0 \ 0,6 \ 0,4 \ 0 \ 0)$, и в итоге результатом агрегирования для данного случая могут быть значения 0,4; 0,6; 0,8; 0,2.

$$Z = \begin{pmatrix} \min(ma_{1,1}, maL_{1,1}) & \min(ma_{1,3}, maL_{1,1}) & \min(ma_{1,5}, maL_{1,1}) \\ \min(ma_{1,1}, maL_{1,2}) & \min(ma_{1,3}, maL_{1,2}) & \min(ma_{1,5}, maL_{1,2}) \\ \min(ma_{1,1}, maL_{1,3}) & \min(ma_{1,3}, maL_{1,3}) & \min(ma_{1,5}, maL_{1,3}) \\ \min(ma_{1,1}, maL_{1,4}) & \min(ma_{1,3}, maL_{1,4}) & \min(ma_{1,5}, maL_{1,4}) \\ \min(ma_{1,1}, maL_{1,5}) & \min(ma_{1,3}, maL_{1,5}) & \min(ma_{1,5}, maL_{1,5}) \\ \min(ma_{1,2}, maL_{1,1}) & \min(ma_{1,4}, maL_{1,1}) & \min(ma_{1,5}, maL_{1,1}) \\ \min(ma_{1,2}, maL_{1,2}) & \min(ma_{1,4}, maL_{1,2}) & \min(ma_{1,5}, maL_{1,2}) \\ \min(ma_{1,2}, maL_{1,3}) & \min(ma_{1,4}, maL_{1,3}) & \min(ma_{1,5}, maL_{1,3}) \\ \min(ma_{1,2}, maL_{1,4}) & \min(ma_{1,4}, maL_{1,4}) & \min(ma_{1,5}, maL_{1,4}) \\ \min(ma_{1,2}, maL_{1,5}) & \min(ma_{1,4}, maL_{1,5}) & \min(ma_{1,5}, maL_{1,5}) \end{pmatrix}$$

Рис. 16. Агрегирование переменных

Представим базу правил для синтеза нечетких регуляторов в виде матриц, содержащих в себе 25 столбцов для каждого правила, и 5 строк для каждого термина выходного параметра (рис. 17).

$$B \leftarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0.65 & 0.4 & 0.32 & 0.3 & 0.24 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.6 & 0.5 & 0.4 & 0.42 & 0.31 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.88 & 0.81 & 0.65 & 0.57 & 0.51 & 0.41 & 0.33 & 0.25 & 0.18 & 0.14 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0.71 & 0.5 & 0.4 & 0.32 & 0.23 \end{pmatrix}$$

$$B \leftarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0.73 & 0.51 & 0.42 & 0.31 & 0.25 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.61 & 0.37 & 0.28 & 0.21 & 0.17 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.75 & 0.62 & 0.57 & 0.52 & 0.47 & 0.42 & 0.36 & 0.23 & 0.15 & 0.08 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.65 & 0.34 & 0.23 & 0.15 & 0.05 \end{pmatrix}$$

Рис. 17. Базы правил для синтеза нечетких регуляторов

Далее выполним активацию (рис. 18). Цель этого этапа – это получение совокупности нечетких множеств для каждого из подзаключений в базе правил.

$$c \leftarrow \frac{B \cdot z}{\sum z}$$

$$a \leftarrow c^T$$

Рис. 18. Активация переменных

На рис. 18 – матрицы, представленные на рис. 17, а z – вектор, выражающий результат агрегирования (минимальные степени истинности каждого из подусловий (см. рис. 16)); $\sum z$ – соответственно сумма результатов агрегирования для сработавших правил.

Заключительным этапом синтеза нечеткого регулятора является дефаззификация (рис. 19) [12, 13]. Методом центра тяжести находится итоговое количественное значение выходной переменной (рис. 20). Причем b ($g'_{\text{Трассолавход}}$ (сплошная линия), $g'_{\text{Тводьемкости}}$ (пунктирная линия)) – искомые возмущения [14].

$$b \leftarrow \frac{\int_{-4.6-(1-a_{1,1}) \cdot 4.6}^{-4.6+(1-a_{1,1}) \cdot 4.6} a_{1,1} \cdot x \, dx + \int_{0-(1-a_{1,2}) \cdot 4.6}^{0+(1-a_{1,2}) \cdot 4.6} a_{1,2} \cdot x \, dx + \int_{4.6-(1-a_{1,3}) \cdot 4.6}^{4.6+(1-a_{1,3}) \cdot 4.6} a_{1,3} \cdot x \, dx}{\int_{-4.6-(1-a_{1,1}) \cdot 4.6}^{-4.6+(1-a_{1,1}) \cdot 4.6} a_{1,1} \, dx + \int_{0-(1-a_{1,2}) \cdot 4.6}^{0+(1-a_{1,2}) \cdot 4.6} a_{1,2} \, dx + \int_{4.6-(1-a_{1,3}) \cdot 4.6}^{4.6+(1-a_{1,3}) \cdot 4.6} a_{1,3} \, dx}$$

Рис. 19. Дефаззификация как этап расчета нечеткого регулятора

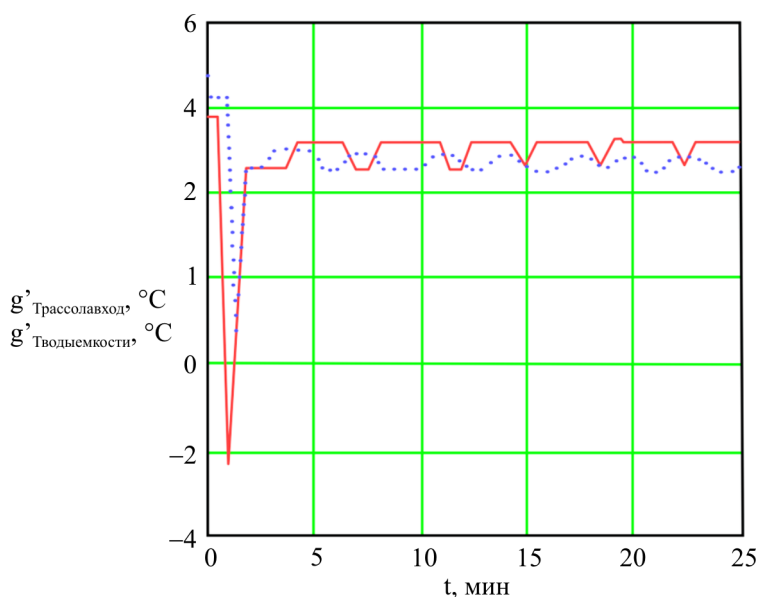


Рис. 20. Возмущения $g'_{\text{Трассолавход}}$ и $g'_{\text{Тводьемкости}}$, рассчитанные регуляторами

Заключение. Таким образом, для цикла подогрева очищенного рассола, состоящего из двух теплообменников (Е-506 и Е-516) и емкости с водой ТК-551, получены два нечетких регулятора каждый, с двумя входами, выводящих значение возмущений $g'_{\text{Трассолавход}}$, $g'_{\text{Тводьемкости}}$. Возмущения, полученные в результате работы регулятора, приведены на рис. 20 (пунктиром указано возмущение $g'_{\text{Трассолавход}}$, а сплошной линией – $g'_{\text{Тводьемкости}}$). Реализована основная задача работы системы

идентификации – вычисление возмущений и определение их направления. Данная информация может оказаться полезной при синтезе автоматизированной системы управления, так как полностью исключить влияние возмущений не представляется возможным из-за того, что это может привести к нежелательным последствиям, таким как колебание регулируемого параметра в недопустимых диапазонах.

Идентификация и количественная оценка возмущений предполагают проведение изучения нежелательных факторов, с которыми сталкиваются промышленные предприятия. Количественный анализ включает два основных шага: получение информации и обработку данных. Такая обработка позволит своевременно обнаружить и исключить повторное возникновение колебаний значений регулируемых параметров.

Результаты данного проекта можно использовать для регулирования различных процессов, а также для уменьшения степени воздействия возмущений на протекание процессов производства, что исключит возможность появления аварийных ситуаций из-за выхода регулируемых параметров за пределы нормы.

Список литературы

1. Динеев В.Г., Ефимов А.А., Мухин А.В. Оптимизация параметров системы управления с адаптивным контуром управления по возмущению // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2007: тез. докл. первой междунар. конф. – М., 2007. – С. 213–214.
2. Александров В.М. Последовательный синтез оптимального по быстродействию управления линейными системами с возмущениями // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2008. – Т. 11, № 3. – С. 251–270.
3. Кипер Р.А. Свойства веществ: справ. – Хабаровск, 2009. – 387 с.
4. Круглов В.В., Дли М.И. Интеллектуальные информационные системы: компьютерная поддержка систем нечеткой логики и нечеткого вывода. – М.: Физматлит, 2002. – 256 с.
5. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
6. Муравьева Е.А., Усанин О.А., Кубряк А.И. Концепция определения возмущений по трендам с применением нечеткого регулятора // Современные технологии в образовании и промышленности: от теории к практике: сб. материалов внутривуз. науч.-практ. конф. – Стерлитамак, 2017. – С. 106–108.
7. Муравьева Е.А., Усанин О.А., Кубряк А.И. Применение нечеткого регулятора с двойной базой правил для управления технологическими параметрами // Современные технологии в образовании и промышленности: от теории

к практике: сб. материалов внутривуз. науч.-практ. конф. – Стерлитамак, 2017. – С. 112–115.

8. Муравьева Е.А., Соловьев К.А., Маннанов И.А. Критерии качества автоматизированной системы управления на базе нечеткого регулятора // Автоматизация, энерго- и ресурсосбережение в промышленном производстве: сб. материалов II Междунар. науч.-техн. конф. – Кумертау, 2017. – С. 153–155.

9. Муравьева Е.А., Соловьев К.А., Григорьев Е.С. Система управления давлением в испарителе фреона по математической модели аппарата // Автоматизация, энерго- и ресурсосбережение в промышленном производстве: сб. материалов II Междунар. науч.-техн. конф. – Кумертау, 2017. – С. 157–159.

10. Solovyov K.A., Muravyova E.A. Synthesis methods for fuzzy controller with double base of rules // CSIT'2016. Proceedings of the 18th International Workshop on Computer Science and Information Technologies. – Ufa, 2016. – С. 83–88.

11. Идентификация параметров математических моделей нелинейных компонентов электротехнических комплексов и систем при их глубоком взаимодействии / В.З. Ковалев, А.Г. Щербаков, О.В. Архипова, С.В. Ланграф, Д.С. Буньков, С.С. Есин // Омский научный вестник. – 2020. – № 6. – С. 33–39.

12. Воевода А.А., Бобобеков К.М. Активная идентификация параметров ПИ-регулятора в системе автоматического управления неустойчивым объектом первого порядка // Доклады ТУСУР. – 2017. – № 4. – С. 100–104.

13. Ломов А.А. Операторно-орторегрессионный метод идентификации коэффициентов линейных дифференциальных уравнений // Сибирский журнал чистой и прикладной математики. – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 73–90.

14. Ломов А.А. Об асимптотической оптимальности орторегрессионных оценок // Сиб. журн. индустр. матем. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 51–60.

References

1. Dineev V.G., Efimov A.A., Muhin A.V. Optimizaciya parametrov sistemy upravleniya s adaptivnym konturom upravleniya po vozmushcheniyu [Optimization of control system parameters with an adaptive control loop in the perturbation]. *upravlenie razvitiem krupnomasshtabnyh sistem MLS'D'2007 tezisy dokladov pervoj mezhdunarodnoj konferencii*, Moscow, 2007, pp. 213–214.

2. Aleksandrov V.M. Posledovatel'nyj sintez optimal'nogo po bystrodejstviyu upravleniy alinejnymi sistemami s vozmushcheniyami [Sequential synthesis of speed-optimal control of linear systems with perturbations]. *Sibirskij zhurnal vychislitel'noj matematiki*. 2008, vol. 11, no 3. pp. 251–270.

3. Kiper R.A. Svoystva veshchestv: Spravochnik [Properties of substances: Handbook]. Habarovsk, 2009. 387 p.

4. Kruglov V.V., Dli M.I. Intellektual'nye informacionnye sistemy: komp'yuternaya podderzhka system nechetkoj logiki i nechetkogo vyvoda [Intelligent information systems: computer support for fuzzy logic and fuzzy inference systems]. Moscow, Fizmatlit. 2002. 256 p.

5. Leonenkov A.V. Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i Fuzzy TECH [Fuzzy modeling in MATLAB and Fuzzy TECH]. SPb.: BHV- Peterburg. 2005. 736 p.

6. Murav'eva E.A., Usanin O.A., Kubryak A.I. Konceptiya opredeleniya vozmushchenij po trendam s primeneniem nechetkogo regul'yatora [The concept of determining disturbances by trends using a fuzzy controller]. V sbornike: *Sovremennye tekhnologii v obrazovanii ipromyshlennosti: ot teorii k praktike. Sbornik materialov Vnutrivuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Sterlitamak, 2017. pp. 106-108.

7. Murav'eva E.A., Usanin O.A., Kubryak A.I. Primenenie nechetkogo regul'yatora s dvojnoj bazoj pravil dlya upravleniya tekhnologicheskimi parametrami [Application of a fuzzy controller with a double rule base for controlling technological parameters]. *Sovremennye tekhnologii v obrazovanii i promyshlennosti: otteorii k praktike. Sbornik materialov Vnutrivuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Sterlitamak, 2017. pp. 112-115.

8. Murav'eva E.A., Solov'ev K.A., Mannanov I.A. Kriterii kachestva avtomatizirovannoj sistemy upravleniya na baze nechetkogo regul'yator [Quality criteria for an automated control system based on a fuzzy controller]. *Avtomatizaciya, energo- i resursosberezhenie v promyshlennom proizvodstve. Sbornik materialov II Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*. Kumertau, 2017. pp. 153-155.

9. Murav'eva E.A., Solov'ev K.A., Grigor'ev E.S. Sistema upravleniya davleniem v isparitele freona po matematicheskoy modeli apparata [Pressure control system in the freon evaporator according to the mathematical model of the device]. *Avtomatizaciya, energo- i resursosberezhenie v promyshlennom proizvodstve. Sbornik materialov II Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*. Kumertau, 2017. pp. 157-159.

10. Solovyov K.A., Muravyova E.A. Synthesis methods for fuzzy controller with double base of rules. *CSIT'2016. Proceedings of the 18th International Workshop on Computer Science and Information Technologies*. Ufa, 2016. pp. 83-88.

11. Kovalyov V.Z., SHCHerbakov A.G., Arhipova O.V., Langraf S.V., Bun'kov D.S., Esin S.S. Identifikaciya parametrov matematicheskikh modelej nelinejnyh komponentov elektrotekhnicheskikh kompleksov i system pri ih glubokom vzaimodejstvii [Identification of parameters of mathematical models of nonlinear components of electrical complexes and systems in their deep interaction]. *Omskij nauchnyj vestnik*. 2020. no 6. pp. 33 – 39.

12. Voevoda A.A., Bobobekov K.M. Aktivnaya identifikaciya parametrov PI-regul'yatora v sisteme avtomaticheskogo upravleniya neustojchivym ob'ektom pervogo poryadka [Active identification of the parameters of the PI controller in the system of automatic control of an unstable object of the first order]. *Doklady TUSUR*, 2017, no 4. pp. 100 – 104.

13. Lomov A.A. Operatorno-ortoregressionnyj metod identifikacii koeficientov linejnyh differencial'nyh uravnenij [Operator-orthoregressive method for identifying coefficients of linear differential equations]. *Sibirskij zhurnal chistoj i prikladnoj matematiki*. 2018, vol. 18, no 1. pp. 73-90.

14. Lomov A.A. Ob asimptoticheskoj optimal'nosti ortoregressionnyh ocenok [On the asymptotic optimality of orthoregressive estimates]. *Sib. zhurn. industr. matem.* 2016. V. 19, no 4. pp. 51-60.

Получено 16.01.2021

Об авторах

Муравьева Елена Александровна (Стерлитамак, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой автоматизированных технологических и информационных систем, Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал в г. Стерлитамаке (453118, г. Стерлитамак, Проспект Октября, 2, e-mail: muraveva_ea@mail.ru).

Габитов Руслан Фаритович (Стерлитамак, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных технологических и информационных систем, Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал в г. Стерлитамаке.

Имаев Радмир Фларитович (Стерлитамак, Россия) – магистрант кафедры автоматизированных технологических и информационных систем, Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал в г. Стерлитамаке.

About the authors

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

Ruslan F. Gabitov (Sterlitamak, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Assistant Professor of the Department «Automated technological and information systems», Ufa State Petroleum Technological University, Branch in Sterlitamak.

Radmir F. Imaev (Sterlitamak, Russian Federation) – Undergraduate Student of the Department «Automated technological and information systems», Ufa State Petroleum Technological University, Branch in Sterlitamak.