

УДК 004.896

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.4.06

Е.А. Муравьева, Э.Х. АтангуловаФилиал Уфимского государственного нефтяного технического университета
в Стерлитамаке, Стерлитамак, Россия

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РЕКТИФИКАЦИИ ВОЗВРАТНОГО РАСТВОРИТЕЛЯ

Современный технологический процесс невозможно представить без автоматических систем управления. При правильном использовании таких систем можно получить оптимальные параметры эксплуатации как определенного узла, так и технологического процесса в целом. В условиях современных рыночных отношений и жесткой конкуренции особенно актуальной становится проблема высокого качества производимой продукции при минимальных производственных затратах. Это и обуславливает необходимость создания высокоточного, быстрого и надежного управления процессами и аппаратами. **Цель:** разработка системы адаптивного нечеткого управления процессом ректификации возвратного растворителя (изопрен-изопентан-толуольной фракции) с применением пакета расширения Fuzzy Logic Toolbox при различных критических ситуациях работы. К основным критическим параметрам относятся: высокая или низкая температура, высокое или низкое давление, а также высокий или низкий уровень углеводородов в кубовой части колонны. **Методы:** для решения задачи о выборе критической ситуации был разработан нечеткий регулятор оценки ситуаций. На выходе данного регулятора имеются 2 вывода о возможных критических ситуациях. Первый вывод указывает на необходимость использовать в качестве теплоносителя горячую воду. Второй вывод указывает на необходимость использовать в качестве теплоносителя пар. **Результаты:** в зависимости от вывода нечеткого регулятора оценки ситуации включается один из двух последующих регуляторов, которые, в свою очередь, настроены под определенные значения показателей входных переменных. **Значимость:** предложенный метод управления процессом непрерывной ректификации изопрен-изопентан-толуольной фракции в колонне тарельчатого типа позволит своевременно обнаруживать критические ситуации при работе системы и принимать необходимые меры по их нейтрализации, что в конечном итоге позволит улучшить качество продукта, увеличить производительность установки, сэкономить энергоресурсы.

Ключевые слова: нечеткое управление, ректификация, критическая ситуация, MatLab, моделирование, Simulink, температура.

E.A. Muravyova, E.H. Atangulova

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

DEVELOPMENT OF AN ADAPTIVE FUZZY CONTROL SYSTEM FOR RECTIFICATION OF THE RETURN SOLVENT

Modern technological process is impossible to imagine without automatic control systems. With proper use of such systems, it is possible to obtain optimal operating parameters, both for a particular node and for the technological process as a whole. In the conditions of modern market relations and fierce competition, the problem of high quality of products with minimal production costs becomes especially urgent. This makes it necessary to create high-precision, fast and reliable control of processes and devices. **Purpose:** development of an adaptive fuzzy control system for the rectification process of a recycled solvent (isoprene-isopentane-toluene fraction) using the Fuzzy Logic Toolbox expansion package for various critical operating situations. The main critical parameters included are the following: high or low temperature, high or low pressure, and high or low hydrocarbon level in the column bottom. **Methods:** to solve the problem of choosing a critical situation, a fuzzy controller for condition assessment was developed. This controller has two resulting outputs regarding the possible critical situations. The first output requires the need to use hot water as a heating agent. The second output requires the need to use steam as a heating agent. **Results:** depending on the output of the fuzzy controller for condition assessment, one of the two subsequent controllers is switched on. These were in advance set to certain values of input variables. **Practical relevance:** the proposed method for controlling the process of continuous rectification of isoprene-isopentane-toluene fraction in a tray-type column will allow to timely detect the critical situations during system operation and take necessary measures to remove them, which ultimately will improve the product quality, increase plant capacity and save energy.

Keywords: fuzzy control, rectification, critical situation, MatLab, modeling, Simulink, temperature.

Введение. Очистка от примесей изопрен-изопентан-толуольной фракции в производстве синтетического каучука производится в ректификационной колонне тарельчатого типа. Основная проблема при осуществлении данного процесса – многосвязанность объекта и, как следствие, взаимное влияние параметров, что может вызвать нарушение режима работы ректификационной колонны. Повышение давления в колонне увеличивает температуру остатка, отбираемого из низа колонны. Это приводит к необходимости увеличения поверхности кипятильника или к необходимости применения более высокотемпературного и более дорогого теплоносителя. Уменьшение температуры в кубе колонны ведет к снижению интенсивности испарения кубового остатка, падает давление сначала в кубе, а потом и в его верхней части. Для повышения температуры в кубе колонны можно увеличить подачу теплоносителя в выносные кипятильники, но следует учитывать, что и повышенная температура в колонне приводит к нежелательному результату, так как влечет за собой увеличение содержания высококипящего

компонента в дистилляте. Высокий уровень углеводородов в кубовой части колонны ведет к повышению давления, поэтому регулирование уровня углеводородов в кубовой части колонны необходимо для обеспечения нормальной работы выносного кипятильника и колонны в целом [1, 2].

Для решения задачи управления необходимо разработать такую систему управления, которая в отличие от уже имеющихся средств автоматизации справляется с описанными задачами [3]. Опираясь лингвистическими переменными, возможно описать желаемое управление сложной динамической системой на основе экспертных знаний. При этом система имеет несколько входных и выходных значений, вследствие чего целесообразно для управления использовать регуляторы, основанные на нечеткой логике.

1. Описание технологического процесса и технологической схемы производственного объекта. В ректификационную колонну К1 поступает исходная смесь изопентан-изопрен-толуольная фракция с концентрацией толуола 0,5–3 мас. %.

Обогрев кубовой части колонны К1 производится посредством подачи различных теплоносителей в теплообменники Т1 и Т2. В межтрубное пространство выносного теплообменника Т1 подается вторичный пар 0,15 МПа (1,5 кгс/см²), а в межтрубное пространство теплообменника Т2 подается горячая вода.

Температура для осуществления процесса ректификации не должна превышать 95 °С, а давление низа колонны поддерживается не более 0,18 МПа (1,8 кгс/см²).

Пары изопентан-изопреновой фракции с верха колонны К1 поступают в межтрубное пространство дефлегматора Д1 на конденсацию. В трубное пространство дефлегматора Д1 подается обратная вода. Углеводородный конденсат из дефлегматора Д1 стекает в ёмкость Е1, откуда часть продукта подаётся в колонну К1 в виде флегмы, а избыток откачивается в отделение И-1а. Флегмовое число в колонне К1 выдерживается не менее 0,2. Давление верха колонны выдерживается не более 0,15 МПа (1,5 кгс/см²) (табл. 1). Определение примесей в возвратном растворителе осуществляется методом газожидкостной хроматографии.

На рис. 1 представлена упрощенная технологическая схема очистки возвратного растворителя в производстве синтетического каучука от примесей. На данной схеме контролю подлежат следующие пара-

метры: TE_1 и TE_2 – температура верха и низа колонны соответственно; PE – давление верха колонны; LE – уровень углеводородов в кубе колонны; AE – концентрация толуола в парах, выходящих из верха колонны. Регулированию подлежат следующие параметры: температура TE_1 и TE_2 с помощью клапанов V_p, V_b ; уровень LE с помощью клапанов V_r и V_k ; давление PE в укрепляющей части колонны $K1$ с помощью клапана V_p , расхода отгона кубовой жидкости FE_4 с помощью клапана V_k и расхода отгона паров FE_5 верха колонны $K1$ с помощью клапана V_d , концентрация толуола AE в парах, выходящих из колонны $K1$ с помощью клапанов V_p, V_ϕ .

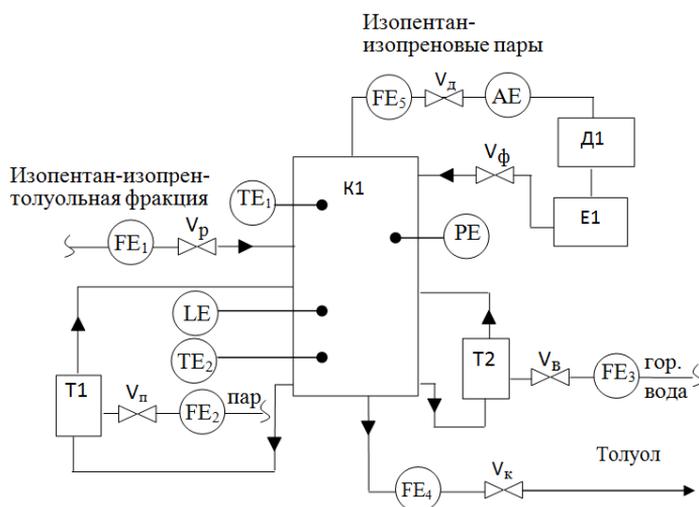


Рис. 1. Упрощенная технологическая схема

Таблица 1

Диапазоны изменения технологических параметров

№ п/п	Технологический параметр	Диапазон изменения
1	Температура верха колонны, °С	20–95
2	Температура низа колонны, °С	20–110
3	Давление верха колонны, кгс/см ²	0,8–1,5
4	Уровень углеводородов в кубе колонны, мм	1,1–1,9
5	Концентрация толуола, %	0–100

2. Определение критических ситуаций работы ректификационной колонны. На исследуемой стадии производства получают изопентан-изопреновые пары (дистиллят) и толуол (кубовая жидкость)

методом непрерывной ректификации в колонне тарельчатого типа. Основными показателями качества являются составы дистиллята и кубового остатка. Цель ректификации заключается в очищении изопренизопентановой фракции от толуола. Чем чище состав изопренизопентановой фракции, тем качественнее сырье получается на выходе. В рассматриваемом процессе товарным продуктом является изопреновая фракция, следовательно, особое внимание необходимо уделить качественному составу дистиллята [4–7]. На чистоту изопренизопентановой фракции влияют такие параметры, как:

- температура верха колонны (TE_1 – датчик измерения температуры верха клоны), диапазон измерений 20–95 °С;
- температура низа колонны (TE_2 – датчик измерения температуры низа клоны), диапазон измерений 20–110 °С;
- давление верха колонны (PE – датчик измерения давления в кубе колонны), диапазон измерений 0,78–1,5 кгс/см²;
- уровень в кубе колонны (LE – датчик измерения уровня углеводородов в кубе колонны), диапазон измерений 1,1–1,9 м.
- состав паров, выходящих из верха колонны (AE – датчик измерения содержания толуола в выходящих из колонны парах), диапазон измерения 0–100 %

К основным управляющим воздействиям отнесем:

- клапан подачи теплоносителя в кипятильник T1 ($V_{п}$ – степень открытия клапана подачи пара, %);
- клапан подачи теплоносителя в кипятильник T2 ($V_{в}$ – степень открытия клапана подачи горячей воды, %);
- клапан подачи исходного сырья ($V_{р}$ – степень открытия клапана подачи исходного раствора, %);
- клапан отгона кубовой жидкости ($V_{к}$ – степень открытия клапана отгона кубовой жидкости, %);
- клапан отгона паров верхней части колонны ($V_{д}$ – степень открытия клапана отгона паров, %);
- клапан подачи флегмы ($V_{ф}$ – степень открытия клапана подачи флегмы, %).

Регулирование температуры необходимо для того, чтобы задать нужный температурный режим в колонне с целью ограничения высококипящих компонентов от попадания в дистиллят, а низкокипящих

компонентов – в кубовой остаток [8]. Температура низа TE_2 ректификационной колонны $K1$ регулируется путем подачи теплоносителя в выносные кипятильники $T1$ и $T2$. Следует отметить, чем больше скорость восходящих паров в колонне, тем интенсивнее идет разделение компонентов. С другой стороны, увеличение скорости восходящих паров в колонне может привести к явлению «захлебывания» колонны, при котором восходящий поток паров начинает препятствовать стеканию жидкости по тарелкам [9–13].

Для обеспечения нормальной работы выносных кипятильников $T1$ и $T2$, а также колонны $K1$ в целом необходимо поддерживать уровень углеводородов LE в кубовой части колонны $K1$. Уровень углеводородов LE в колонне $K1$ регулируется подачей исходного раствора и отгоном кубовой жидкости в технологические емкости.

Значение давления PE в верхней части колонны $K1$ необходимо регулировать не только для поддержания заданного состава целевого продукта, но и для обеспечения нормального гидродинамического режима колонны $K1$. Ректификационная колонна имеет свойство саморавнованивания по данному параметру, поэтому регулирование давления в укрепляющей части колонны приведет к тому, что давление в кубе через некоторое время примет определенное значение.

Правильный выбор теплоносителя играет огромную роль в температурном режиме ректификационной колонны. При высоком давлении PE необходимо использовать горячую воду во избежание дальнейшего его повышения. В том случае, когда давление среднее или низкое, возможно использовать более интенсивный теплоноситель в виде пара [14–20].

Рассмотрим случаи, когда давление PE высокое в укрепляющей части колонны $K1$:

- 1) TE_2 является высокой и PE является высоким, и LE высокий;
- 2) TE_2 является высокой и PE является высоким, и LE средний;
- 3) TE_2 является средней и PE высокое, и LE высокий;
- 4) TE_2 является средней и PE высокое, и LE средний;
- 5) TE_2 является низкой и PE является высоким, и LE высокий.

Возможны и ситуации, когда давление PE среднее или низкое, а также есть отклонения по уровню или по температуре:

- 1) TE_2 является высокой и PE является средним, и LE средний, и AE Низкая;

- 2) TE_2 является высокой и PE является средним, и LE средний, и AE высокая;
- 3) TE_2 является высокой и PE является низким, и LE низкий, и AE низкая;
- 4) TE_2 является высокой и PE является низким, и LE низкий, и AE высокая;
- 5) TE_2 является средней и PE среднее, и LE низкий;
- 6) TE_2 является низкой и PE является средним, и LE средний;
- 7) TE_2 является низкой и PE является низким, и LE низкий.

Система управления, показанная на рис. 2, функционирует следующим образом. Исходная смесь изопентан-изопрен-толуольная фракция подается в середину ректификационной колонны К1. В зависимости от значения давления в верху колонны выбирается определенный теплоноситель: горячая вода или пар.

Для осуществления процесса регулирования технологических параметров (температура низа колонны, давление верха колонны и уровень углеводородов в колонне) в ректификационной колонне разработана система адаптивного управления с тремя нечеткими регуляторами FC1, FC2 и FC3, концептуальные модели которых изображены на рис. 3–5.

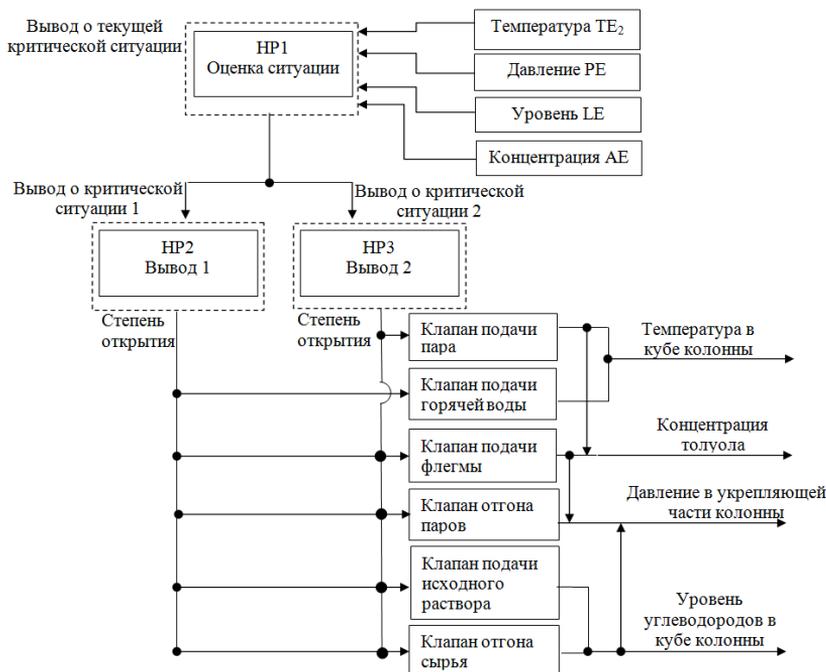


Рис. 2. Структурная схема адаптивной системы управления

Задача регулятора FC1 заключается в оценке технологической ситуации, которую он осуществляет на основании значений давления в вер-ху ректификационной колонны К1. Результатом такой оценки является вывод о том, какой из нечетких регуляторов FC2 или FC3 необходимо включить для эффективного управления ректификационной колонной.

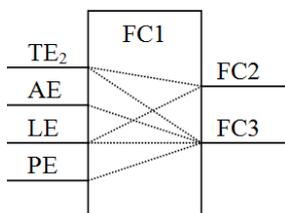


Рис. 3. Концептуальная модель нечеткого регулятора оценки ситуаций FC1

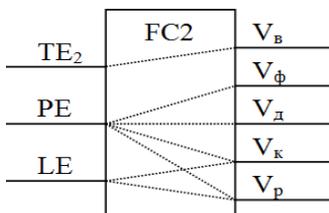


Рис. 4. Концептуальная модель нечеткого регулятора управления параметрами FC2

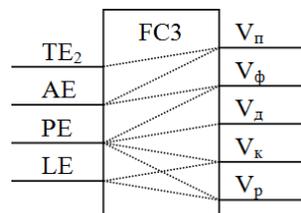


Рис. 5. Концептуальная модель нечеткого регулятора управления параметрами FC3

Регуляторы FC2 и FC3 служат для регулирования технологических параметров. Нечеткий регулятор FC2 имеет 3 входных парамет-ров: TE2 – температура низа колонны; PE – давление в верху колонны, LE – уровень улеводородов в колонне. Нечеткий регулятор FC3 имеет 4 входных параметров: TE2 – температура низа колонны; PE – давлени-е в верху колонны, LE – уровень улеводородов в колонне; AE – кон-центрация толуола в выходящих из колонны парах.

Для регулирования параметров нужна необходимая степень от-крытия клапанов. В рамках данной работы присвоим следующие зна-чения открытию клапанов:

- «0» – степень открытия клапана 0 %;
- «1» – степень открытия 0–30,8 %;
- «2» – степень открытия 23,1–53,9 %;
- «3» – степень открытия 46,2–77 %;
- «4» – степень открытия 69,3–100 %.

Определены терм-множества для каждой лингвистической пе-ременной:

$$TE_2 = \{TE_{21}, TE_{22}, TE_{23}\},$$

где TE_{21} – «Температура низа колонны = низкая», ($20 \leq TE_{21} \leq 50$ °C);
 TE_{22} – «Температура низа колонны = средняя», ($42,5 \leq TE_{22} \leq 72,5$ °C);
 TE_{23} – «Температура низа колонны = высокая», ($65 \leq TE_{23} \leq 95$ °C).

$$PE = \{PE1, PE2, PE3\},$$

где PE1 – «Давление верха колонны = низкое», ($0,78 \leq PE1 \leq 1,08$ кг/см²);

PE2 – «Давление верха колонны = среднее», ($1 \leq PE2 \leq 1,3$ кг/см²);

PE3 – «Давление верха колонны = высокое», ($1,23 \leq PE3 \leq 1,5$ кг/см²).

$$LE = \{LE1, LE2, LE3\},$$

где LE1 – «Уровень углеводородов в колонне = низкий», ($1,1 \leq LE1 \leq 1,42$ м);

LE2 – «Уровень углеводородов в колонне = средний», ($1,34 \leq LE2 \leq 1,66$ м);

LE3 – «Уровень углеводородов в колонне = высокий», ($1,58 \leq LE3 \leq 1,9$ м).

$$AE = \{AE1, AE2\},$$

где AE1 – «Концентрация толуола в парах = допустимая», ($0 \leq AE1 \leq 1$ %);

AE2 – «Концентрация толуола в парах = переизбыток», ($1 \leq AE2 \leq 3$ %);

$$V_B = \{V_{B1}, V_{B2}, V_{B3}, V_{B4}, V_{B5}\},$$

где V_{B1} – «Клапан подачи горячей воды = 0», ($V_{B1} = 0$ %);

V_{B2} – «Клапан подачи горячей воды = 1», ($0 < V_{B2} \leq 30,8$ %);

V_{B3} – «Клапан подачи горячей воды = 2», ($23,1 \leq V_{B3} \leq 53,9$ %);

V_{B4} – «Клапан подачи горячей воды = 3», ($46,2 \leq V_{B4} \leq 77$ %);

V_{B5} – «Клапан подачи горячей воды = 4», ($69,3 \leq V_{B5} \leq 100$ %).

$$V_V = \{V_{V1}, V_{V2}, V_{V3}, V_{V4}, V_{V5}\},$$

где V_{п1} – «Клапан подачи пара = 0», ($V_{п1} = 0$ %);

V_{п2} – «Клапан подачи пара = 1», ($0 < V_{п2} \leq 30,8$ %);

V_{п3} – «Клапан подачи пара = 2», ($23,1 \leq V_{п3} \leq 53,9$ %);

V_{п4} – «Клапан подачи пара = 3», ($46,2 \leq V_{п4} \leq 77$ %);

V_{п5} – «Клапан подачи пара = 4», ($69,3 \leq V_{п5} \leq 100$ %).

$$V_K = \{V_{K1}, V_{K2}, V_{K3}, V_{K4}, V_{K5}\},$$

где V_{к1} – «Клапан отгона кубовой жидкости = 0», ($V_{K1} = 0$ %);

V_{к2} – «Клапан отгона кубовой жидкости = 1», ($0 < V_{K2} \leq 30,8$ %);

V_{к3} – «Клапан отгона кубовой жидкости = 2», ($23,1 \leq V_{K3} \leq 53,9$ %);

V_{к4} – «Клапан отгона кубовой жидкости = 3», ($46,2 \leq V_{K4} \leq 77$ %);

V_{к5} – «Клапан отгона кубовой жидкости = 4», ($69,3 \leq V_{K5} \leq 100$ %).

$$V_p = \{V_{p1}, V_{p2}, V_{p3}, V_{p4}, V_{p5}\},$$

где V_{р1} – «Клапан подачи исходного раствора = 0», ($V_{p1} = 0$ %);

V_{р2} – «Клапан подачи исходного раствора = 1», ($0 < V_{p2} \leq 30,8$ %);

V_{р3} – «Клапан подачи исходного раствора = 2», ($23,1 \leq V_{p3} \leq 53,9$ %);

V_{р4} – «Клапан подачи исходного раствора = 3», ($46,2 \leq V_{p4} \leq 77$ %);

V_{р5} – «Клапан подачи исходного раствора = 4», ($69,3 \leq V_{p5} \leq 100$ %).

$$V_D = \{V_{D1}, V_{D2}, V_{D3}, V_{D4}, V_{D5}\},$$

где V_{д1} – «Клапан отгона паров = 0», ($V_{D1} = 0$ %);

V_{д2} – «Клапан отгона паров = 1», ($0 < V_{D2} \leq 30,8$ %);

$V_{д3}$ – «Клапан отгона паров = 2», ($23,1 \leq V_{д3} \leq 53,9$ %);

$V_{д4}$ – «Клапан отгона паров = 3», ($46,2 \leq V_{д4} \leq 77$ %);

$V_{д5}$ – «Клапан отгона паров = 4», ($69,3 \leq V_{д5} \leq 100$ %).

$$V_{ф1} = \{V_{ф2}, V_{ф3}, V_{ф4}, V_{ф5}\},$$

где $V_{ф1}$ – «Клапан пара = 0», ($V_{ф1} = 0$ %);

$V_{ф2}$ – «Клапан подачи флегмы = 1», ($0 < V_{ф2} \leq 30,8$ %);

$V_{ф3}$ – «Клапан подачи флегмы = 2», ($23,1 \leq V_{ф3} \leq 53,9$ %);

$V_{ф4}$ – «Клапан подачи флегмы = 3», ($46,2 \leq V_{ф4} \leq 77$ %);

$V_{ф5}$ – «Клапан подачи флегмы = 4», ($69,3 \leq V_{ф5} \leq 100$ %).

Для управления ректификационной колонной сигналы от датчиков поступают на FC1, который обрабатывает их и после анализа решает, какой из последующих регуляторов необходимо активизировать, чтобы поддержать заданные значения параметров.

Таким образом, сигнал поступает на один из двух нечетких регуляторов. Если сигнал от FC1 поступает на FC2, то активизируется тот теплообменник, в котором теплоносителем является горячая вода. Если сигнал от FC1 поступает на FC3, то активизируется второй теплообменник, в котором теплоносителем является пар.

Правило, описывающее работу регулятора FC1: температура низа TE_2 в колонне K1 является средней, давление PE в укрепляющей части колонны K1 является высоким и уровень углеводородов LE в колонне K1 высокий, то включается регулятор FC2.

Если температура $TE_2 = TE_{22}$, и давление $PE = PE_3$, и уровень $LE = LE_3$, то FC2.

Правило, описывающее работу регулятора FC2: температура низа TE_2 в колонне K1 является высокой, давление PE в укрепляющей части колонны K1 является высоким и уровень углеводородов LE в колонне K1 средний, то степень открытия клапана подачи горячей воды 3 и степень открытия клапана отгона кубового остатка 1, и степень открытия клапана подачи исходного раствора 1, и степень открытия клапана вывода паров с верха колонны 2, и степень открытия клапана подачи флегмы 1.

Если температура $TE_2 = TE_{23}$ и давление $PE = PE_3$, и уровень $LE = LE_2$, то $V_g = V_{g4}$, и $V_k = V_{k2}$, и $V_p = V_{p2}$, и $V_d = V_{d3}$, и $V_{ф} = V_{ф2}$.

Правило, описывающее работу регулятора FC3: температура низа TE_2 в колонне K1 является высокой, давление PE в укрепляющей части колонны K1 является средним, и уровень углеводородов LE в колонне K1 средний, и концентрация толуола в парах, выходящих из колонны K1, низкая, то степень открытия клапана подачи пара 2 и степень

открытия клапана отгона кубового остатка 2, и степень открытия клапана подачи исходного раствора 2, степень открытия клапана вывода паров с верха колонны 1 и степень открытия клапана подачи флегмы 1.

Если температура $TE_2 = TE_23$ и давление $PE = PE2$, и уровень $LE = LE2$, и $AE = AE1$, то $V_e = V_e3$, и $V_k = V_k3$, и $V_p = V_p3$, и $V_d = V_d2$, и $V_\phi = V_\phi2$.

3. Создание нечетких регуляторов в Fuzzy Logic Toolbox. В зависимости от вывода регулятора включается один из последующих регуляторов управления параметрами FC2 и FC3. FC2 включается при необходимости подачи горячей воды в качестве теплоносителя, в то время как FC3 – при необходимости подачи пара в качестве теплоносителя.

Таким образом, через пакет расширения Fuzzy Logic Toolbox в среде MatLab были созданы 3 регулятора. Входными переменными для регуляторов являются: температура, давление, уровень и концентрация. Выходными переменными для первого регулятора FC1 являются вывод о сложившейся критической ситуации и выбор одного из двух регуляторов для последующего управления, а для FC2 и FC3 – клапан подачи пара в теплообменник T1, клапан подачи горячей воды в теплообменник T2, клапан отгона кубовой жидкости, клапан подачи флегмы, клапан подачи исходного сырья и клапан вывода паров из верха колонны.

4. Моделирование схемы процесса в среде Simulink. Для построения схемы (рис. 6) была использована среда динамического междисциплинарного моделирования сложных технических систем Simulink.

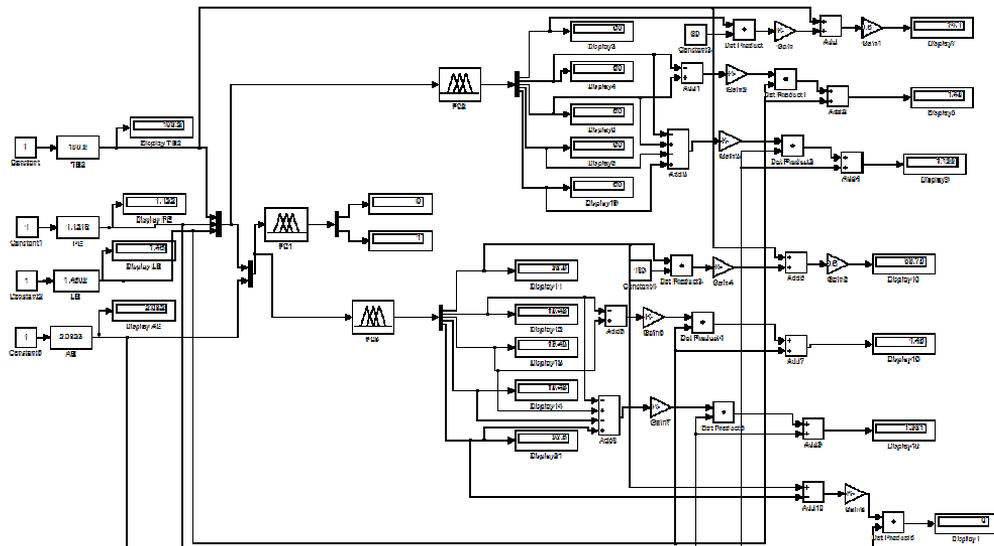


Рис. 6. Общая схема управления основными регулируемыми параметрами

Задание начальных значений проводилось путем вынесения в рабочую область блока Constant (постоянная величина, которая задает постоянный сигнал), объединенного для более удобного изменения параметра с блоком Slider Gain (блок настраивает значения параметров в процессе моделирования). Для наглядности промежуточных параметров используется блок Display (отображение текущих значений). Объединение входных параметров производится с помощью блока Mux (блок объединения входных сигналов).

Создание нечеткого регулятора проводилось с помощью блока Fuzzy Logic Controller with Ruleviewer (блок предназначен для симуляции нечеткой системы вывода). Привязка того или иного блока к определенному нечеткому регулятору производилась путем задания имени в графе FIS matrix (отображение нечеткого процесса вывода в средстве просмотра правил во время симуляции). Но прежде чем начать привязку, необходимо поместить нечеткий регулятор в рабочую область Workspace (рабочая область сохранения данных). На выходах нечетких регуляторов для вывода значений также установлены блоки Display.

Готовая модель позволяет управлять основными параметрами ректификации возвратного растворителя. На вход нечеткого регулятора RC1 подаются текущие значения температуры низа TE₂ колонны K1, давления PE в укрепляющей части колонны K1, уровня углеводородов в колонне K1 и концентрации толуола AE в парах, выходящих из колонны K1. Дальнейшая работа схемы заключается в выборе теплоносителя в теплообменники T1 и T2. Например, при высоком давлении PE включается нечеткий регулятор RC2, который в качестве теплоносителя использует горячую воду. При отклонениях работы колонны K1, не связанных с давлением PE, включается регулятор RC3, который для создания требуемого температурного режима использует пар.

Рассмотрим общую схему более детально. Для этого условно разделим ее на 4 участка: задание начальных значений; регулятор анализа ситуаций (FC1); регуляторы управления параметрами (FC2, FC3). На рис. 7 изображены показания начальных значений температуры низа колонны, давления в укрепляющей части колонны, уровня углеводородов в кубе колонны и концентрации толуола в парах, выходящих из колонны K1.

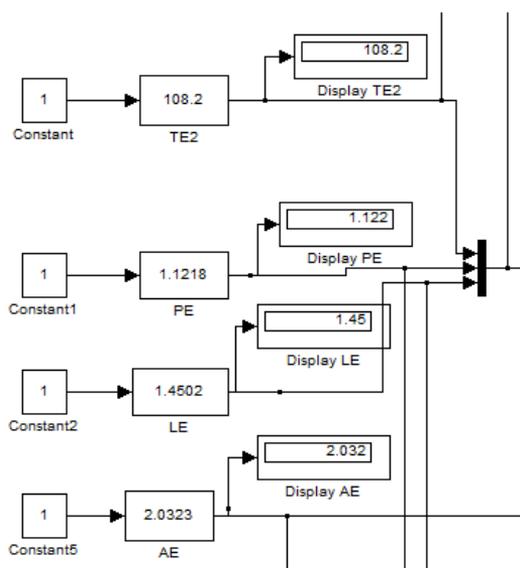


Рис. 7. Задание исходных параметров

Рис. 8. Нечеткий регулятор анализа ситуаций FC1

На рис. 8 изображен нечеткий регулятор анализа ситуаций FC1. Исходя из исходных значений, регулятор делает вывод о возможных ситуациях. На рис. 7 видно, что исходные параметры выходят за допустимую норму значений (высокая температура TE_2 и высокая концентрация толуола AE). Давление PE не является высоким, следовательно, включается регулятор RC3, в результате чего на нижем табло отображается единица. На рис. 9 показан нечеткий регулятор управления параметрами FC2

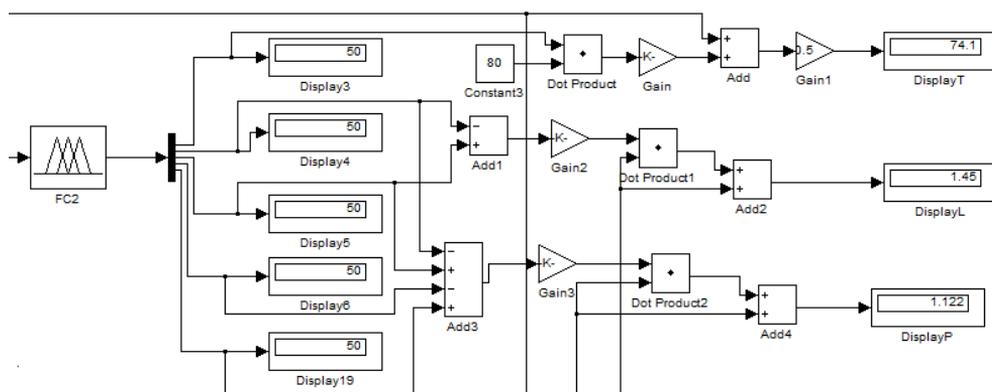


Рис. 9. Нечеткий регулятор управления параметрами FC2

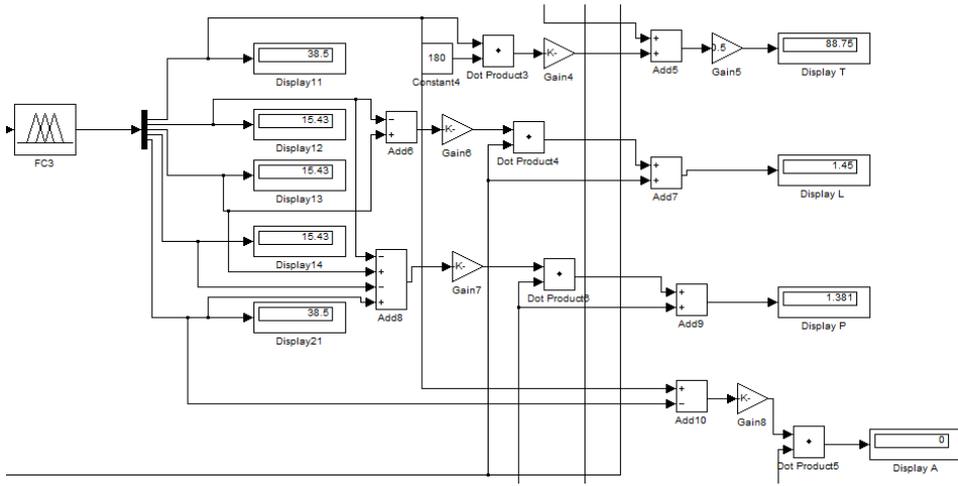


Рис. 10. Нечеткий регулятор управления параметрами FC3

На рис. 10 изображен нечеткий регулятор FC3 управления параметрами. Вывод регулятора анализа ситуаций FC1 направил сигнал для работы на регулятор управлениями параметрами FC3. Исходя из определенных значений, клапаны меняют свою степень открытия. Подобным образом устроен регулятор управления параметрами FC2.

5. Моделирование первой критической ситуации. Для создания критической ситуации 1 используем правило, которое гласит, что температура низа TE_2 в колонне K1 является высокой и давление PE в укрепляющей части колонны K1 является высоким, и уровень углеводородов LE в колонне K1 высокий, то степень открытия клапана подачи горячей воды 3 и степень открытия клапана отгона кубового остатка 2, и степень открытия клапана подачи исходного раствора 1, и степень открытия клапана вывода паров с верха колонны 2, и степень открытия клапана подачи флегмы 2.

Если температура $TE_2 = TE_{23}$ и давление $PE = PE_3$, и уровень $LE = LE_3$, то $V_8 = V_{84}$, и $V_k = V_{k3}$, и $V_p = V_{p2}$, и $V_d = V_{d3}$, и $V_\phi = V_{\phi3}$.

Зависимость температуры низа колонны от степени открытия клапанов выглядит следующим образом:

$$T = \frac{T_{исх} + 80V_v}{2} = \frac{108,2 + 80 \cdot 0,6157}{2} = 78,73^\circ\text{C}. \quad (1)$$

Зависимость уровня углеводородов в колонне от степени открытия клапанов выглядит следующим образом:

$$L = L_{исх} + L_{исх}(-V_k + V_p) = 1,8631 + 1,8631(-0,385 + 0,1542) = 1,433 \text{ м}. \quad (2)$$

Зависимость давления углеводородов от степени открытия клапанов выглядит следующим образом:

$$P = P_{исх} + P_{исх} (-V_k + V_k - V_d + V_\phi) = 1,47 + 1,47(-0,385 + 0,1542 - 0,1542) = 1,13 \text{ кгс/см}^2. \quad (3)$$

Таблица 2

Результаты адаптации параметров

До адаптации	После адаптации
Температура, °С	
108,2	78,73
Давление, кгс/см ²	
1,47	1,13
Уровень, м	
1,863	1,433

Проанализировав табл. 2, можно сделать вывод, что произошло снижение значения показания температуры в кубе колонны путем приоткрытого клапана подачи горячей воды. Уменьшение температуры влечет за собой уменьшение давления. Значение высокого показателя уровня уменьшилось до среднего.

6. Моделирование второй критической ситуации. В ходе эксперимента были получены значения, не превышающие допустимого предела. Проанализировав результат, можно сделать вывод, что произошло снижение температуры в нижней части колонны за счет приоткрытого клапана подачи пара. Снижение температуры приводит к снижению концентрации. Значение среднего уровня осталось неизменным. Концентрация толуола в дистилляте при таком тепловом режиме приемлема.

Выводы. Благодаря моделированию схемы процесса в среде Simulink удалось получить данные, которые свидетельствуют о том, что данный метод справляется с поставленной задачей и может быть рассмотрен для дальнейшей разработки. Подробно рассмотрен пример при высоком показателе температуры, давления и уровня. Результаты показали, что система стремится к уменьшению температуры, при этом уменьшается и давление, полученные значения входят в допустимый диапазон.

При рассмотрении второй ситуации система с высоким показателем температуры, средними показателями давления и уровня, а также

с высокой концентрацией содержание толуола в выходящих из колонны парах понижает высокие показатели, не выходя за рамки допустимого диапазона. Результаты вывода концентрации оказались допустимыми.

Разработанная система адаптивного нечеткого управления процессом ректификации возвратного растворителя (изопрен-изопентан-толуольной фракции) позволяет обнаружить возможные критические ситуации, возникающие при работе колонны, а также регулирует параметры, вышедшие за пределы допустимых значений. Такое регулирование позволяет получить на выходе чистый готовый продукт, а также увеличивает производительность установки.

Библиографический список

1. Холходжаев Б.А., Тошев Ш.Д. Регуляризованный алгоритм адаптивной идентификации объектов управления // Вестник науки и образования. – 2019. – № 7–1(61). – С. 20–24.

2. Билас Д.Э., Чертовской В.Д., Савченко Н.В. Распределенная адаптивная система управления производством // Герценовские чтения: материалы 72-й науч. конф. – СПб.: Изд-во: Рос. гос. пед. ун-та им. А.И. Герцена, – 2019. – С. 234–236.

3. Бурлаков Н.И., Ляхов В.Р., Молоканов Р.О. Обзор существующих систем адаптивного управления и выявление их недостатков // Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации. – Пенза: Изд-во: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2018. – С. 63–66.

4. Muravyova E.A., Sharipov M.I., Gabitov R.F. SCADA-system based on multidimensional precise logic controller for the control of a cement kiln // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. – 2019. – № 8602589.

5. Power consumption analysis of pump station control systems based on fuzzy controllers with discrete terms in itthink software / E.A. Muravyova, M.I. Sharipov, A.I. Kubryak, A.V. Bondarev, G.R. Galiaskarova // IOP Conference Ser. Materials Science and Engineering. – 2018. – № 022072.

6. Lu Y. Adaptive-Fuzzy Control Compensation Design for Direct Adaptive Fuzzy Control // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 2018. – Vol. 26, iss. 6.

7. Hesamian G., Akbari M.G., Yaghoobpoor R. Quality Control Process Based on Fuzzy Random Variables // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 2019. – Vol. 27, iss. 4.

8. Гудкова Н.В. Цифровые адаптивные фильтры в системах управления // DSPA: вопросы применения цифровой обработки сигналов. – 2017. – Т. 7, № 1. – С. 210–213.

9. Воронцов Е.Ю. Система управления температурой муфельной электропечи с адаптивным регулятором температуры // Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Metallургия. – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 80–87.

10. Потапов Н.С., Маслов А.А. Оценка адекватности модели адаптивной системы управления с применением средств математического моделирования // Наука – производству. – 2018. – С. 77–84.

11. Носальчук Р.О. Разработка мобильной системы управления для лабораторного стенда по изучению нечетких и адаптивных позиционных систем управления // Образование, наука, производство. – 2015. – С. 2824–2828.

12. Шаршеналиев Ж.Ш., Джамбоева И.А., Куланбаева Т.Т. Адаптивная стабилизация системы управления с особенностями в динамике // Наука и новые технологии. – 2006. – С. 9–14.

13. Исаева Ю.А. Построение адаптивной двухуровневой имитационной модели управления системой защиты информации автоматизированной системы управления для оценки ее эффективности // МНСК-2018: информационные технологии. – 2018. – С. 107.

14. Селифанов В.В., Исаева Ю.А., Звягинцева П.А. Создание адаптивной двухуровневой модели процессов управления системой защиты информации в автоматизированных системах управления технологическими процессами // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – № 7. – С. 244–249.

15. Мостовой В.Д. Применение интегрирующих звеньев с логическим элементом при создании систем адаптивного управления процессом токарной обработки // Современные технологии и автоматизация в технике, управлении и образовании: сб. тр. I Междунар. науч.-практ. конф. – М.: Изд-во: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2019. – С. 99–104.

16. Ковалева А.А. Использование адаптивных систем для управления качеством поверхностного слоя // Будущее науки-2019: сб. науч. ст. 7-й Междунар. молодеж. науч. конф. – Курск, 2019. – С. 55–58.

17. Капустин А.Г., Терещенко К.В. Адаптивная система с эталонной моделью для управления объектами электропривода // Молодежь

в науке: новые аргументы: IV Междунар. молодеж. сб. науч. ст. – Красноярск, 2019. – С. 35–40.

18. Валько Д.В. Процессная эффективность адаптивного государственного управления региональной социо-эколого-экономической системой // Научные труды Вольного экономического общества России. – 2018. – Т. 212, № 4. – С. 442–458.

19. Загrevский В.И., Загrevский О.И. Аналитическая модель компенсации двигательной ошибки в адаптивном управлении движением биомеханической системы // Человек. Спорт. Медицина. – 2019. – Т. 19. – № 2. – С. 79–85.

20. Модель движения и адаптивного управления телеуправляемого необитаемого подводного аппарата в сложной динамической системе / С.К. Данилова, А.М. Кусков, И.М. Кусков, Н.Н. Тарасов // Морской вестник. – 2019. – № 2(70). – С. 93–97.

References

1. Kholkhodzhaev B.A., Toshev Sh.D. Regularizovannyi algoritm adaptivnoi identifikatsii ob"ektov upravleniia [Regularized algorithm for adaptive identification of control objects]. *Vestnik nauki i obrazovaniia*, 2019, no. 7-1(61), pp. 20-24.

2. Bilas D.E., Chertovskoi V.D., Savchenko N.V. Raspredelennaia adaptivnaia sistema upravleniia proizvodstvom [Distributed adaptive production management system]. *Gertsenovskie chteniia. Materialy 72-i nauchnoi konferentsii*. Saint Petersburg: Rossiiskii gosudarstvennyi pedagogicheskii universitet imeni A.I. Gertsena, 2019, pp. 234-236.

3. Burlakov N.I., Liakhov V.R., Molokanov R.O. Obzor sushchestvuiushchikh sistem adaptivnogo upravleniia i vyivlenie ikh nedostatkov [Review of existing adaptive management systems and identify their shortcomings]. *Sovremennaiia nauka: aktual'nye voprosy, dostizheniia i innovatsii*. Penza: Mezhdunarodnyi tsentr nauchnogo sotrudnichestva “Nauka i prosveshchenie”, 2018, pp. 63-66.

4. Muravyova E.A., Sharipov M.I., Gabitov R.F. SCADA-system based on multidimensional precise logic controller for the control of a cement kiln. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies*, 2019, no. 8602589.

5. Muravyova E.A., Sharipov M.I., Kubryak A.I., Bondarev A.V., Galiaskarova G.R. Power consumption analysis of pump station control systems based on fuzzy controllers with discrete terms in ithink software. *IOP Conference Ser. Materials Science and Engineering*, 2018, no. 022072.

6. Lu Y. Adaptive-Fuzzy Control Compensation Design for Direct Adaptive Fuzzy Control. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018, vol. 26, iss. 6.

7. Hesamian G., Akbari M.G., Yaghoobpoor R. Quality Control Process Based on Fuzzy Random Variables. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2019, vol. 27, iss. 4.

8. Gudkova N.V. Tsifrovye adaptivnye fil'try v sistemakh upravleniia [Digital adaptive filters in control systems]. *DSPA: voprosy primeneniia tsifrovoi obrabotki signalov*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 210-213.

9. Vorontsov E.Iu. Sistema upravleniia temperaturoi mufel'noi elektropechi s adaptivnym reguliatorom temperatury [Muffle electric furnace temperature control system with adaptive temperature controller]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Metallurgii*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 80-87.

10. Potapov N.S., Maslov A.A. Otsenka adekvatnosti modeli adaptivnoi sistemy upravleniia s primeneniem sredstv matematicheskogo modelirovaniia [Assessment of the adequacy of the adaptive control system model using mathematical modeling tools]. *Nauka - proizvodstvu*, 2018, pp. 77-84.

11. Nosal'chuk R.O. Razrabotka mobil'noi sistemy upravleniia dlia laboratornogo stenda po izucheniiu nechetkikh i adaptivnykh pozitsionnykh sistem upravleniia [Development of a mobile control system for a laboratory stand for the study of fuzzy and adaptive positional control systems]. *Obrazovanie, nauka, proizvodstvo*, 2015, pp. 2824-2828.

12. Sharshenaliev Zh.Sh., Dzhamboeva I.A., Kulanbaeva T.T. Adaptivnaia stabilizatsiia sistemy upravleniia s osobennostiami v dinamike [Adaptive stabilization of a control system of "adaptive stabilization of a control system" with features in the dynamics]. *Nauka i novye tekhnologii*, 2006, pp. 9-14.

13. Isaeva Iu.A. Postroenie adaptivnoi dvukhurovnevoi imitatsionnoi modeli upravleniia sistemoi zashchity informatsii avtomatizirovannoi sistemy upravleniia dlia otsenki ee effektivnosti [Building an adaptive two-level simulation model of information security system management of an

automated control system to assess its effectiveness]. *MNSK-2018: informatsionnye tekhnologii*, 2018, 107 p.

14. Selifanov V.V., Isaeva Iu.A., Zviagintseva P.A. Sozdanie adaptivnoi dvukhurovnevoi modeli protsessov upravleniia sistemoi zashchity informatsii v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniia tekhnologicheskimi protsessami [Creating an adaptive two-level model of information security system management processes in automated process control systems]. *Interekspo Geo-Sibir'*, 2018, no. 7, pp. 244-249.

15. Mostovoi V.D. Primenenie integriruiushchikh zven'ev s logicheskim elementom pri sozdanii sistem adaptivnogo upravleniia protsessom tokarnoi obrabotki [Application of integrating links with a logical element in creating systems for adaptive control of the turning process]. *Sovremennye tekhnologii i avtomatizatsiia v tekhnike, upravlenii i obrazovanii. Sbornik trudov I Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Moscow: Natsional'nyi issledovatel'skii iadernyi universitet "MIFI", 2019, pp. 99-104.

16. Kovaleva A.A. Ispol'zovanie adaptivnykh sistem dlia upravleniia kachestvom poverkhnostnogo sloia [The use of adaptive systems to control the quality of the surface layer]. *Budushchee nauki-2019. Sbornik nauchnykh statei 7-i Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii*. Kursk, 2019, pp. 55-58.

17. Kapustin A.G., Tereshchenko K.V. Adaptivnaia sistema s etalonnoi model'iudlia upravleniia ob"ektami elektroprivoda [Adaptive system with a reference model for managing electric drive objects]. *Molodezh' v nauke: novye argumenty. IV Mezhdunarodnyi molodezhnyi sbornik nauchnykh statei*. Krasnoiarsk, 2019, pp. 35-40.

18. Val'ko D.V. Protsessnaia effektivnost' adaptivnogo gosudarstvennogo upravleniia regional'noi sotsio-ekologo-ekonomicheskoi sistemoi [Process efficiency of adaptive state management of the regional socio-ecological and economic system]. *Nauchnye trudy Vol'nogo ekonomicheskogo obshchestva Rossii*. 2018. vol. 212, no. 4, pp. 442-458.

19. Zagrevskii V.I., Zagrevskii O.I. Analiticheskaiia model' kompensatsii dvigatel'noi oshibki v adaptivnom upravlenii dvizheniem biomekhanicheskoi sistemy [Analytical model of motor error compensation in adaptive motion control of a biomechanical system]. *Chelovek. Sport. Meditsina*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 79-85.

20. Danilova S.K., Kuskov A.M., Kuskov I.M., Tarasov N.N. Model' dvizheniia i adaptivnogo upravleniia teleupravliaemogo neobitaemogo podvodnogo apparata v slozhnoi dinamicheskoi sisteme [Model of motion and adaptive control of a remote-controlled uninhabited underwater vehicle in a complex dynamic system]. *Morskoi vestnik*, 2019, no. 2(70), pp. 93-97.

Сведения об авторах

Муравьева Елена Александровна (Стерлитамак, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Автоматизированные технологические и информационные системы» филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета в Стерлитамаке (453118, Республика Башкортостан, Стерлитамак, пр. Октября, 2, e-mail: atangulovaelina@gmail.com).

Атангулова Элина Ханифовна (Стерлитамак, Россия) – студентка филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета в Стерлитамаке (453118, Республика Башкортостан, Стерлитамак, пр. Октября, 2, e-mail: muraveva_ea@mail.ru).

About the authors

Muravyova Elena Alexandrovna (Sterlitamak, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor, head of the Department “Automated technological and information systems” Branch Ufa State Petroleum Technological University in Sterlitamak (453118, Republic of Bashkortostan, Sterlitamak, 2, October ave., e-mail: muraveva_ea@mail.ru).

Atangulova Elina Hanifovna (Sterlitamak, Russian Federation) is a Student of the Department “Automated technological and information systems” Ufa State Petroleum Technological University, Branch in Sterlitamak (453118, Republic of Bashkortostan, Sterlitamak, 2, October ave., e-mail: atangulovaelina@gmail.com).

Получено 07.10.2020