

Федеральный исследовательский центр
информационных и вычислительных технологий

**Разработка и оптимизация
алгоритмов работы установки по
переработке органических отходов**

Специальность: 1.2.2 – Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

Соискатель: Писарев А.В.

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Шакиров С.Р.

Цель работы

Целью работы является:

1. модернизация существующих алгоритмов (законов) регулирования термохимических процессов, рассматриваемых на примере реализации управления режимами работы установки переработки органических отходов;
2. создание нечетких динамических математических моделей, которые позволят оптимизировать переходные процессы в камере сжигания и реакторе установки;
3. разработка универсального метода определения нечетких динамических математических моделей термохимических процессов.

Цель работы

Модернизация алгоритмов (законов) регулирования позволяет:

1. повысить быстродействие и точность систем автоматического регулирования;
2. обеспечить устойчивость систем управления и заданное качество переходных процессов при изменениях химического состава и физических свойств топлива;
3. оптимизировать работу установки (целевой функцией является максимальная производительность по топливу).

Задачи исследования

1. Разработать математические модели технологических процессов, протекающих в узлах и агрегатах установки переработки органических отходов при различных режимах работы оборудования с привлечением математических методов теории нечетких множеств.
2. Разработать алгоритмы и методики управления процессами тепломассопереноса в узлах и агрегатах установки, позволяющие с помощью математических методов теории нечетких множеств корректировать режимы переработки отходов с целью повышения производительности и точности реализации термохимических режимов.

Задачи исследования

3. Выполнить анализ возмущающих воздействий, влияющих на точность реализации режимов работы установки, с целью их компенсации.
4. Выполнить синтез регуляторов технологических параметров установки.
5. Выполнить моделирование работы установки с учетом контуров регулирования технологических параметров.
6. Разработать алгоритмы управления для программно-аппаратного комплекса установки.

Научная новизна

1. Определены математические модели узлов, агрегатов и трактов установки переработки органических отходов. К ним относятся модели динамики газовой воздушной среды тракта установки, камеры сжигания, сушилки и реактора.
2. Математические модели технологических процессов, протекающих в камере сжигания и реакторе, выполнены с привлечением математических методов теории нечетких множеств.
3. Используя математические модели узлов, агрегатов и трактов установки выполнены: синтез и моделирование автоматических контуров регулирования.

Научная новизна

4. По результатам моделирования работы установки с учетом контуров регулирования технологических параметров созданы адаптивные алгоритмы для аппаратно-программного комплекса установки.
5. Разработан новый метод настройки ПИД-регуляторов.

Практическая значимость

1. Разработаны алгоритмы и методика управления процессами установки утилизации отходов, позволяющие с помощью математических методов теории нечетких множеств корректировать режимы тепломассопереноса с целью повышения точности реализации термохимических реакций и производительности оборудования.
2. Разработанные математические модели универсальные и могут описывать множества аналогичных узлов и агрегатов реальных технологических установок с различными техническими характеристиками.
3. Применение методов настройки и алгоритмов (законов) регулирования, приведенных в работе, также возможно для множества аналогичных объектов регулирования.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Универсальные математические модели термохимических процессов с использованием математических методов теории нечетких множеств.
2. Алгоритмы управления термохимическими процессами, на примере установки по переработке органических отходов, выполненные на основе математических методов теории нечетких множеств, обеспечивающие оптимизацию и повышение точности реализации процессов тепломассопереноса.
3. Метод настройки ПИД-регуляторов.

Проблема переработки биомассы

Разнообразие
биомассы

Сезонность
биомассы

Распределенность
по большой
территории



Много стадий
переработки

Сложность
оборудования



**Энергия из биомассы дороже,
чем из ископаемых топлив**



Образец опытно-промышленной установки переработки орг. отходов

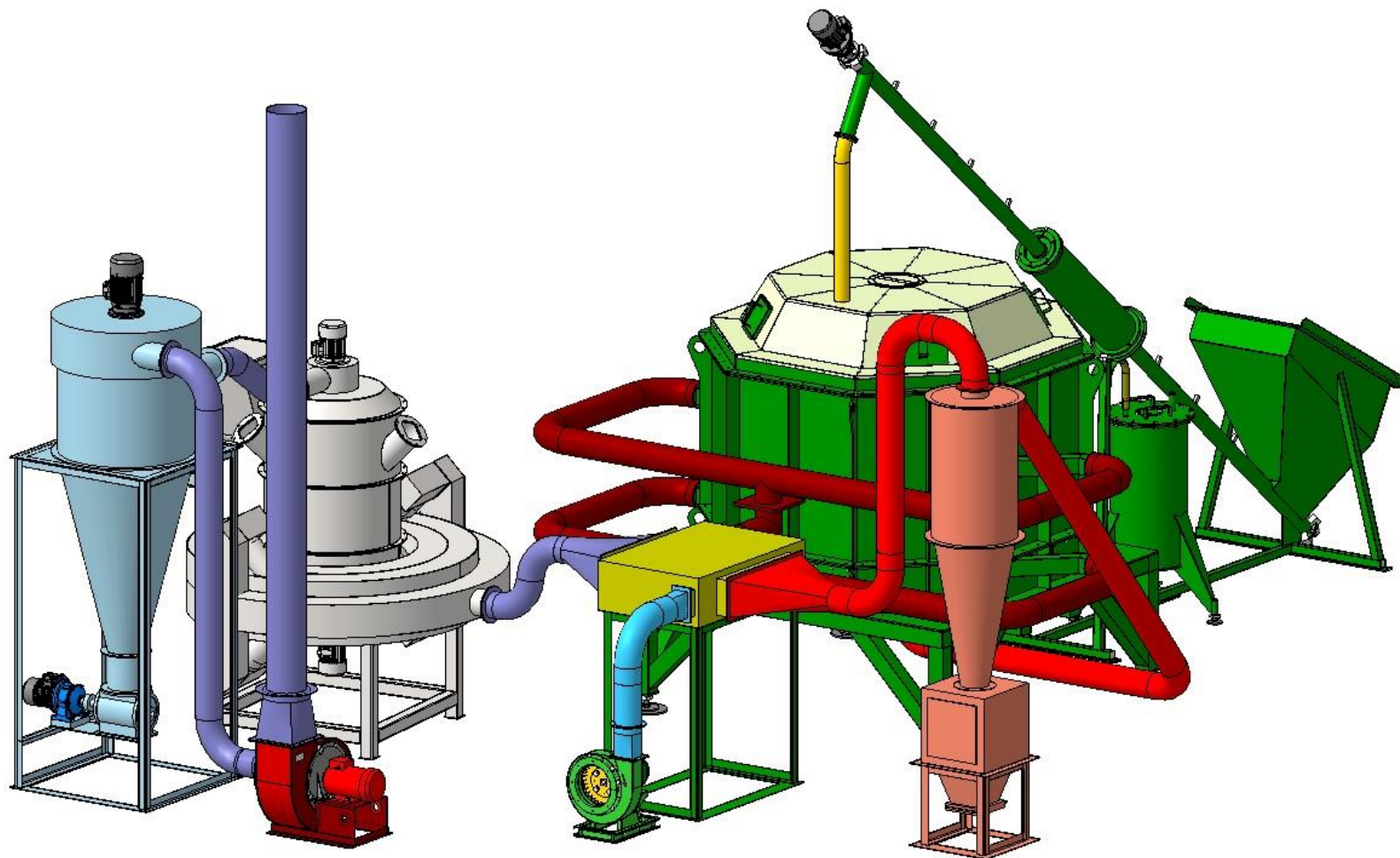
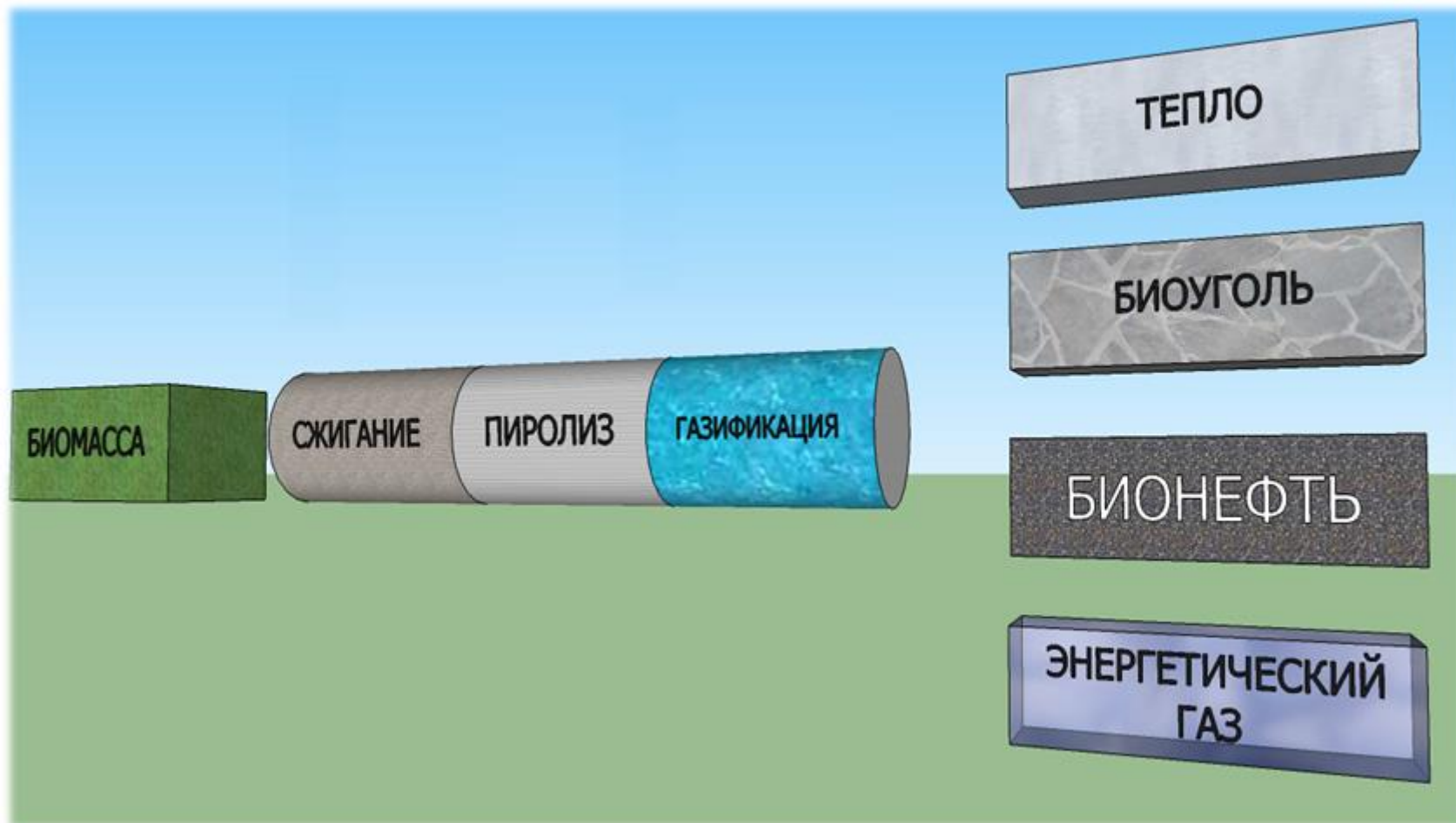
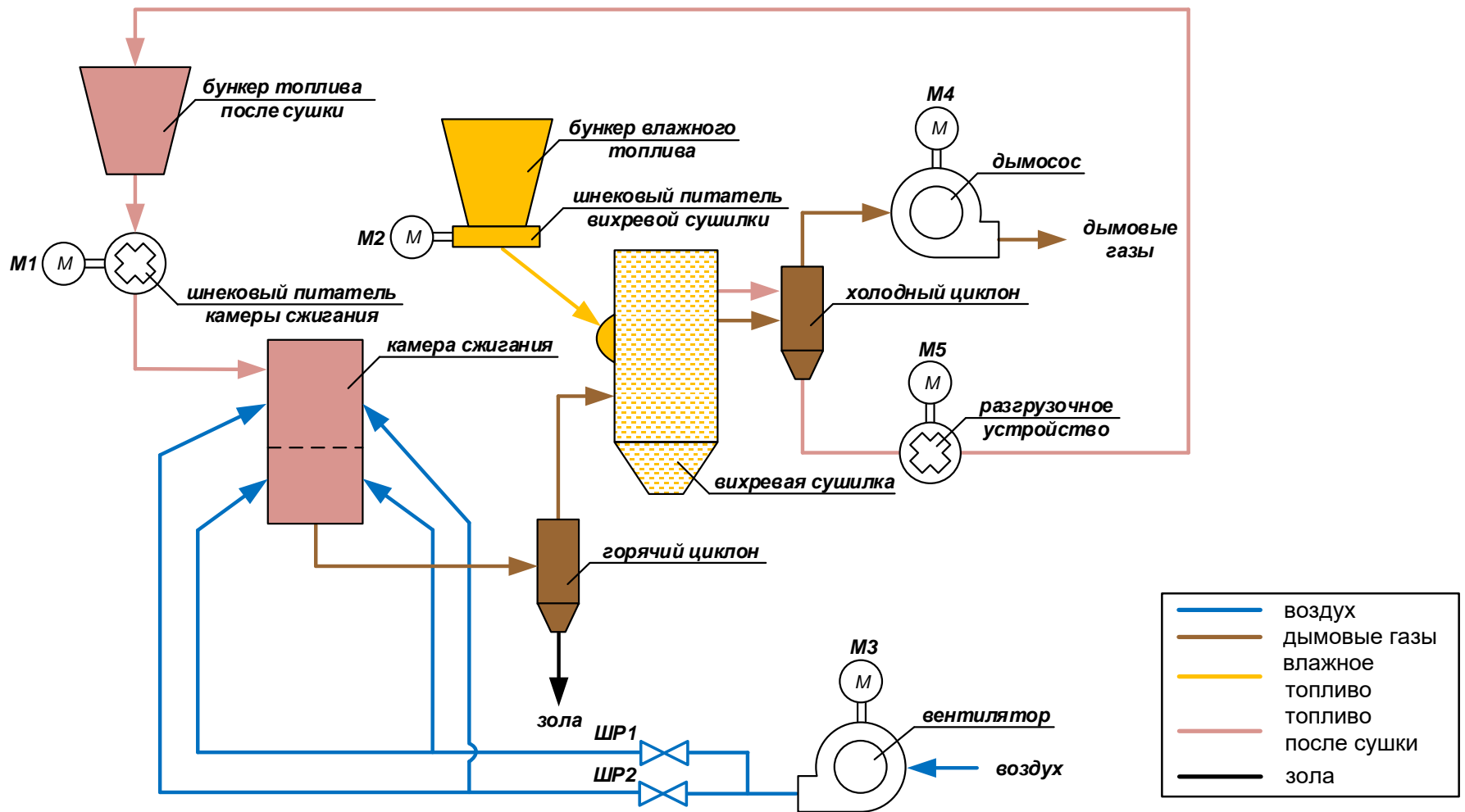


Рисунок предоставлен А.Г. Квашниным

Способы и результаты утилизации биомассы

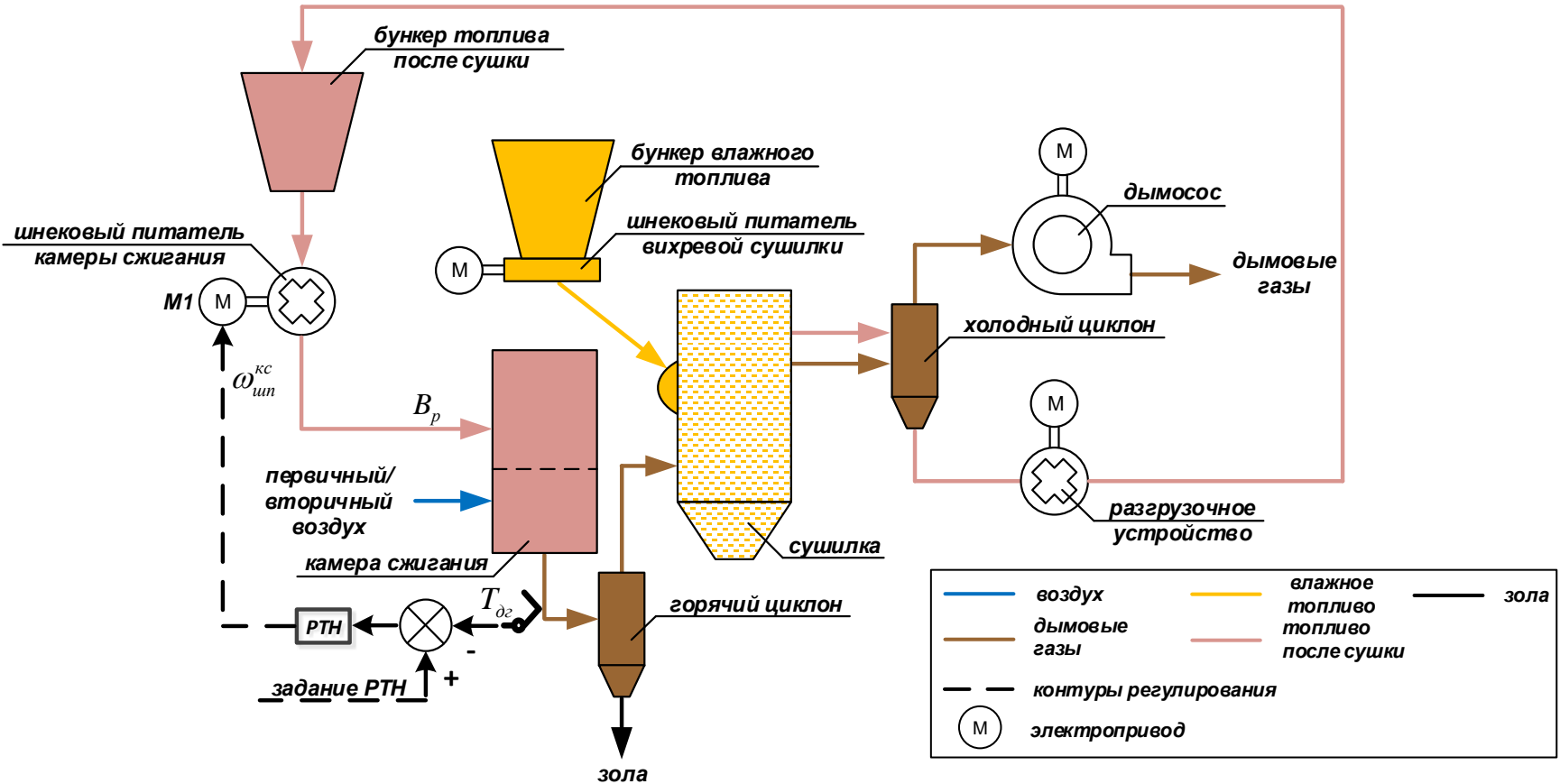


Принципиальная тепловая схема установки для режима сжигания



M1 – электропривод шнекового питателя камеры сжигания (с частотно-регулируемым приводом (ЧРП)); M2 – электропривод шнекового питателя вихревой сушилки (ЧРП); M3 – электропривод вентилятора (с ЧРП); M4 – электропривод дымососа (с ЧРП); M5 – электропривод разгрузочного устройства (с ЧРП); ШР1, ШР2 – шиберы воздуха регулирующие 1,2.

Принципиальная тепловая схема топливного тракта установки



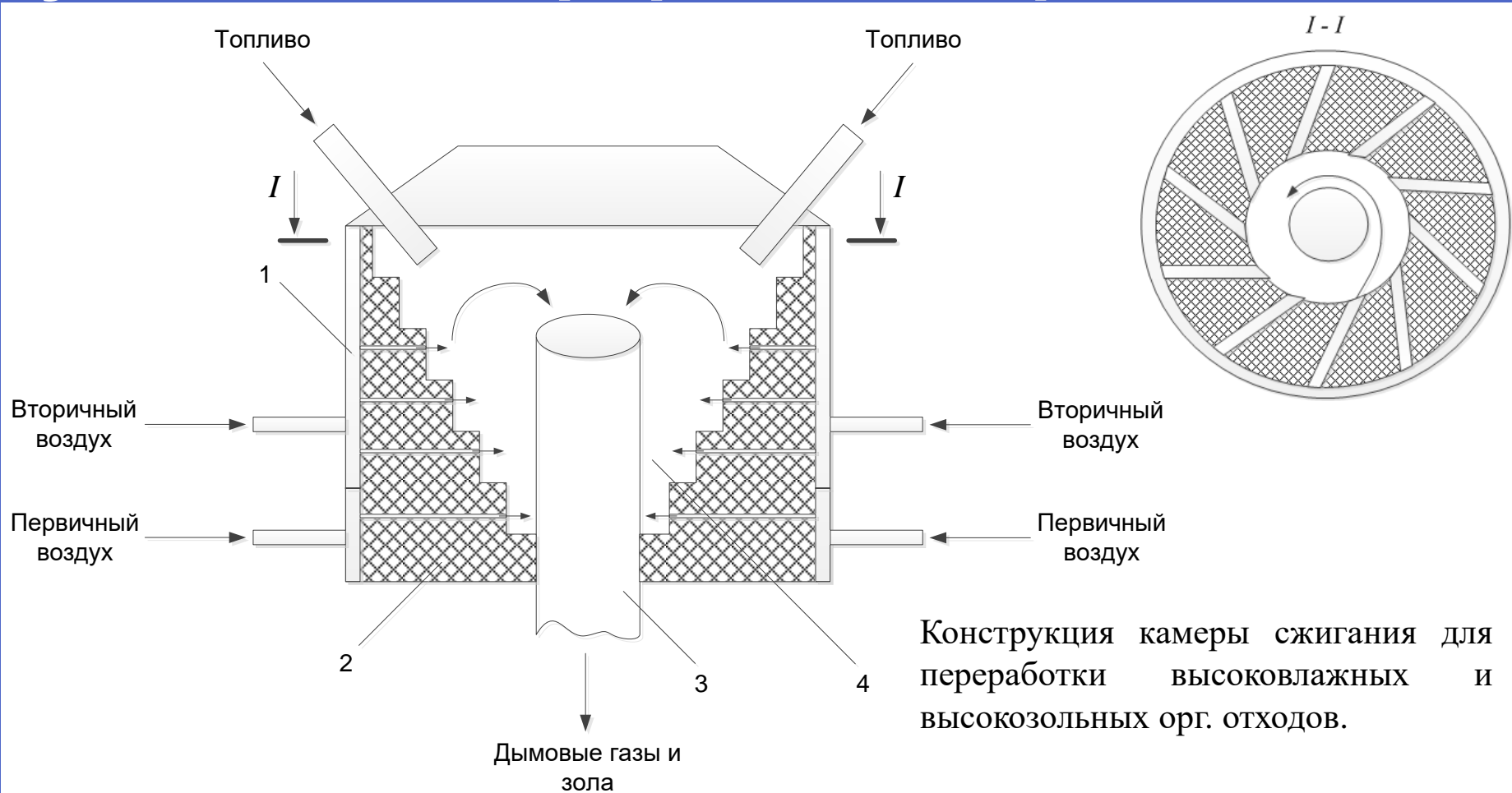
$t_{дг}, ^\circ C$ – температура дымовых газов в камере сжигания;

$B_p, кг / с$ – расход топлива в камеру сжигания;

$\omega_{шп}^{kc}, с^{-1}$ – частота вращения шнекового питателя камеры сжигания.

M1 – электропривод шнекового питателя камеры сжигания (с ЧРП); РТН – регулятор тепловой нагрузки.

Вихревая камера сжигания установки переработки орг. отходов



Конструкция камеры сжигания для переработки высоковлажных и высокозольных орг. отходов.

1 – кольцевой канал; 2 – кирпичная кладка; 3 – дымоход; 4 – топочное пространство камеры сжигания.

Вихревая камера сжигания установки разработана ООО «Биологические источники энергии»

Модель температуры дымовых газов в камере сжигания

Модель камеры сжигания по каналу «задание частоты вращения шнекового питателя камеры сжигания – температура дымовых газов в камере сжигания» представлена в виде передаточной функции:

$$W_{op}^{kc}(s) = \frac{3,2 \cdot 10^{-4} k_{B_p \rightarrow T_{\partial z}} k_{шн}^{kc}}{(5s + 1)(2s + 1)(0,3s + 1)(T_{T_a \rightarrow T_{\partial z}} s + 1)}$$

где $k_{B_p \rightarrow T_{\partial z}}$ - коэффициент усиления модели камеры сжигания по каналу «расход топлива после сушки - температура дымовых газов в камере сжигания»;

$k_{шн}^{kc}$ - коэффициент усиления модели шнекового питателя камеры сжигания по каналу «частота вращения - расход топлива после сушки в камеру сжигания»;

$T_{T_a \rightarrow T_{\partial z}}$ - постоянная времени передаточной функции камеры сжигания по каналу «адиабатическая температура горения – температура дымовых газов на выходе камеры сжигания»;

Числовые значения нестационарных параметров математической модели камеры сжигания:

$$1,27 \cdot 10^4 \leq k_{B_p \rightarrow T_{\partial z}} \leq 1,42 \cdot 10^5;$$

$$2,2 \leq k_{шн}^{kc} \leq 4,9;$$

$$1,15 \leq T_{T_a \rightarrow T_{\partial z}} \leq 10,3.$$

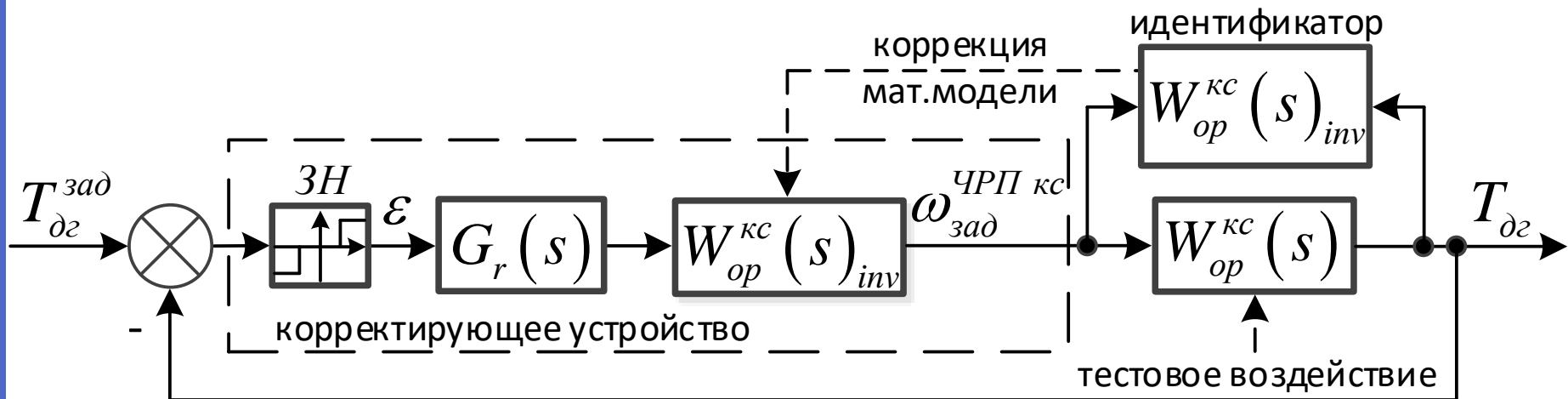
Выводы по результатам определения модели камеры сжигания

При моделировании динамических характеристик камеры сжигания по каналу «задание частоты вращения шнекового питателя камеры сжигания – температура дымовых газов в камере сжигания» определено, что они:

- являются нестационарными;
- зависят от режима работы установки;
- зависят от физических характеристик сжигаемого топлива;
- различны для разных видов топлива.

Физические характеристики сжигаемого топлива могут изменяться в процессе работы установки также и для одного вида топлива. Эти изменения, в большинстве случаев, являются неконтролируемыми.

Структурная схема АСР тепловой нагрузки установки



$W_{op}^{kc}(s), W_{op}^{kc}(s)_{inv}$ - объект регулирования, инверсная нечеткая модель камеры сжигания по каналу «задание частоты вращения шнекового питателя – температура дымовых газов в камере сжигания»;

$G_r(s)$ - передаточная функция пре-регулятора;

$T_{\Delta g}, ^\circ C$ - температура дымовых газов в камере сжигания;

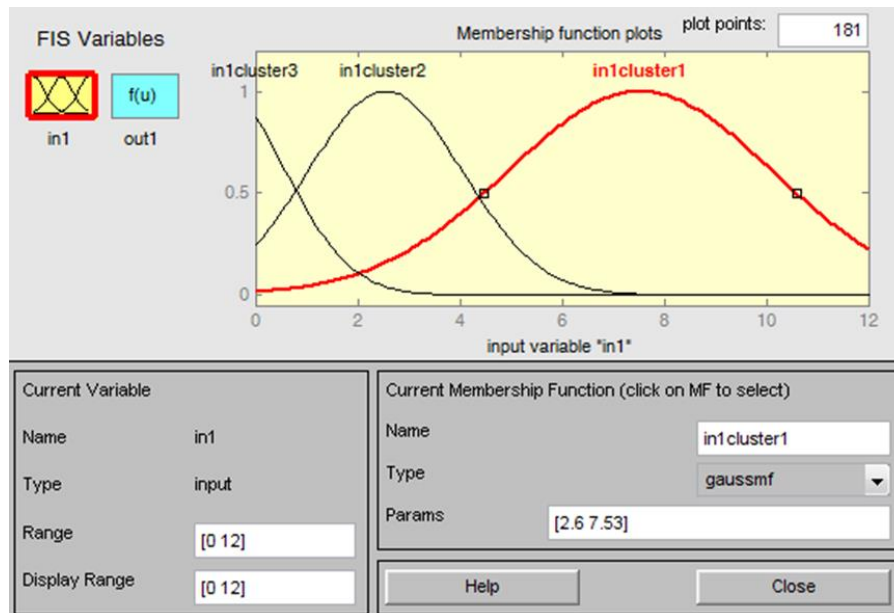
$T_{\Delta g}^{зад}, ^\circ C$ - задание регулятору тепловой нагрузки установки;

$\epsilon, ^\circ C$ - рассогласование на входе регулятора тепловой нагрузки;

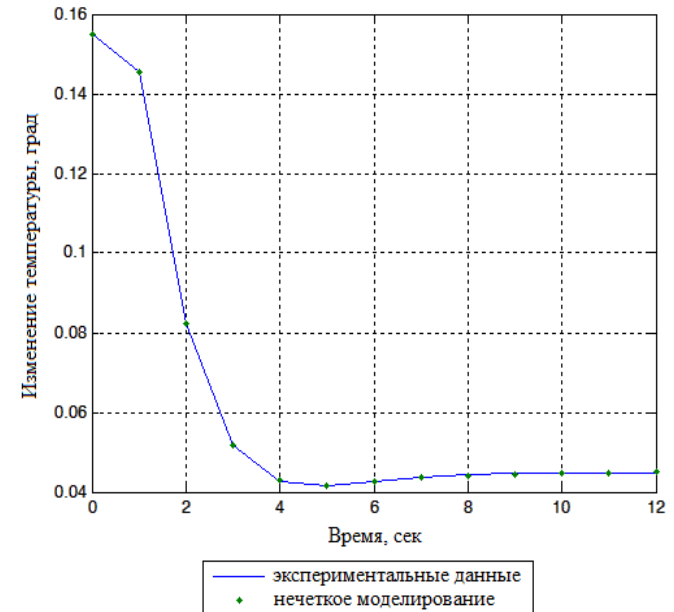
$\omega_{зад}^{ЧРП kc}, c^{-1}$ - задание частоты вращения ЧРП шнекового питателя камеры сжигания;

$ЗН$ – зона нечувствительности корректирующего устройства.

Нечеткая идентификация инверсного объекта регулирования



Окно редактора функций принадлежности



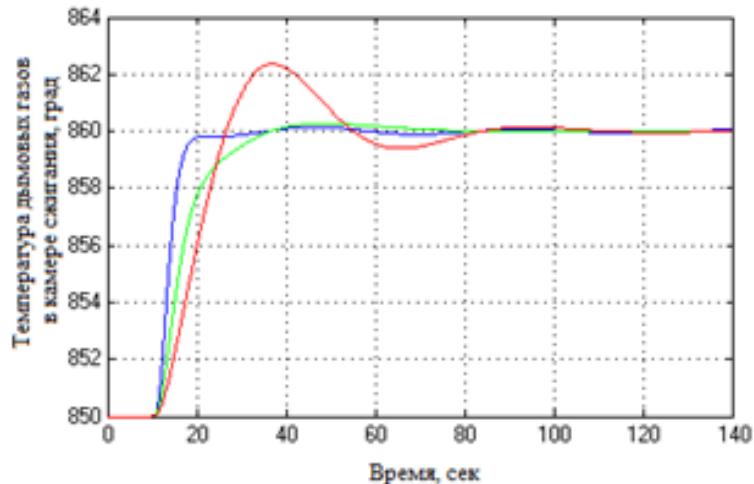
Тестирование идентификации нечеткой инверсной модели объекта

Для модели инверсного объекта регулирования генерация системы нечеткого вывода осуществлена со следующими параметрами:

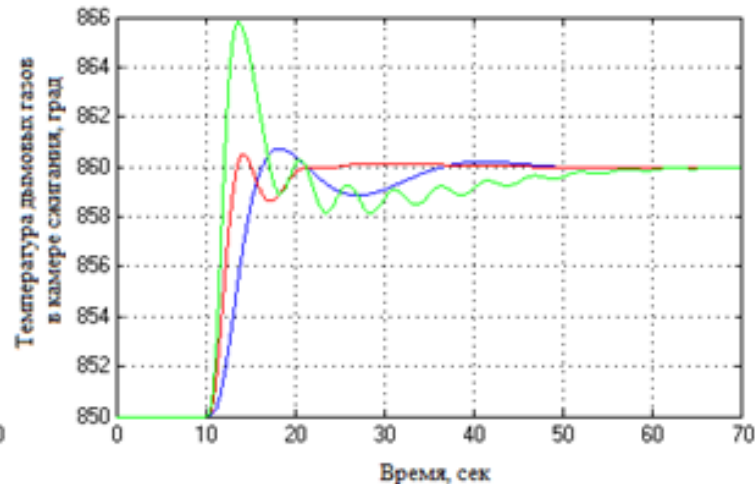
- количество входных переменных – одна;
- количество выходных переменных – одна;
- тип функции принадлежности – гауссова;
- количество функций принадлежности равно 3 – для максимальной и минимальной нагрузок установки и 4 – для средней нагрузки установки, что соответствует количеству правил, генерируемых системой нечеткого вывода;
- заданное значение итераций (эпох) – 1000; (снижение СКО наблюдается до 820 шага);
- метод дефаззификации: взвешенное среднее;
- реализация логической операции «И»: умножение;
- реализация логической операции «ИЛИ»: вероятностное «ИЛИ»;
- алгоритм нечеткого вывода типа Сугено с применением субтрактивной кластирезации.

Переходные процессы в замкнутом контуре АСР тепловой нагрузки

Изменение задания на 10 град (850 до 860 град)

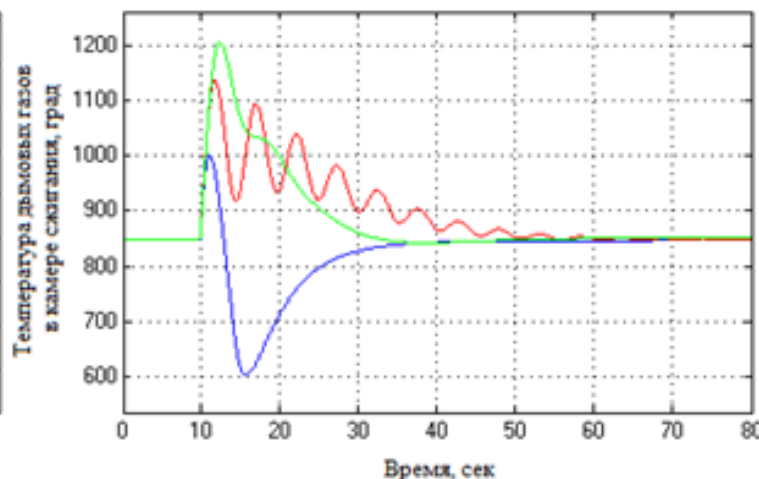
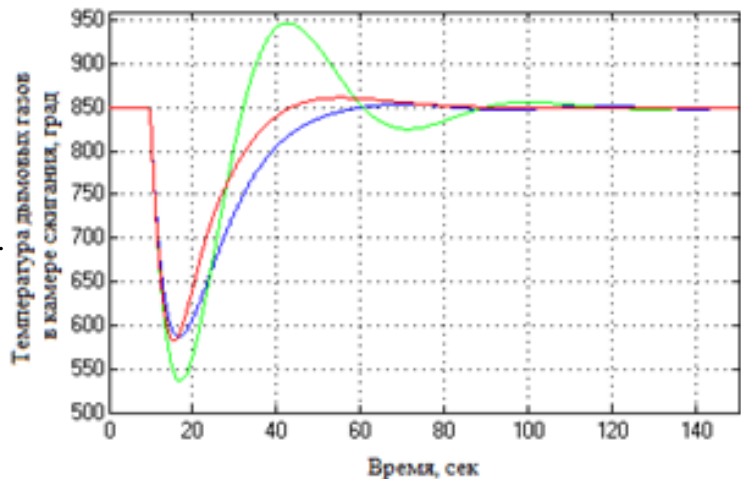


Мин. нагрузка установки



Макс. нагрузка установки

Скачкообразное изменение динамических хар. объекта регулир.



$$k_{B_p \rightarrow T_{dc}}^{\max}, k_{un}^{ке \max}, T_{T_a \rightarrow T_{dc}}^{\max} \rightarrow k_{B_p \rightarrow T_{dc}}^{\min}, k_{un}^{ке \min}, T_{T_a \rightarrow T_{dc}}^{\min}$$

$$k_{B_p \rightarrow T_{dc}}^{\min}, k_{un}^{ке \min}, T_{T_a \rightarrow T_{dc}}^{\min} \rightarrow k_{B_p \rightarrow T_{dc}}^{\max}, k_{un}^{ке \max}, T_{T_a \rightarrow T_{dc}}^{\max}$$

— адаптивный нейро-нечеткий регулятор

— ПИД-регулятор с настройками, определенными при минимальной нагрузке установки

— ПИД-регулятор с настройками, определенными при максимальной нагрузке установки

Анализ переходных процессов АСР тепловой нагрузки при изменении задания

Тип регулятора	Параметры настройки		Показатели качества переходного процесса	
	минимальная нагрузка	максимальная нагрузка	минимальная нагрузка	максимальная нагрузка
ПИД	$k_p = 0,21$ $T_u = 13 \text{ с}$ $T_\delta = 5 \text{ с}$ $k'_\delta = 10$	-	$t_n = 70 \text{ с}$ $\sigma = 2,7 \%$	$t_n = 50 \text{ с}$ $\sigma = 60 \%$
	-	$k_p = 0,14$ $T_u = 7 \text{ с}$ $T_\delta = 3 \text{ с}$ $k'_\delta = 10$	$t_n = 80 \text{ с}$ $\sigma = 20 \%$	$t_n = 12 \text{ с}$ $\sigma = 5 \%$
Нейро-нечеткий	$k_p = 0,96$ $T_u = 4 \text{ с}$ $T_\delta = 0 \text{ с}$		$t_n = 70 \text{ с}$ $\sigma = 1,6 \%$	$t_n = 40 \text{ с}$ $\sigma = 8 \%$

σ , % – перерегулирование;

t_n , с – время переходного процесса.

Анализ переходных процессов АСР тепловой нагрузки при возмущениях

Тип регулятора	Параметры настройки		Показатели качества переходного процесса	
	минимальная нагрузка	максимальная нагрузка	минимальная нагрузка	максимальная нагрузка
ПИД	$k_p = 0,21$ $T_u = 13 \text{ с}$ $T_d = 5 \text{ с}$ $k'_d = 10$	-	$t_n = 110 \text{ с}$ $\Delta_{\text{дин}} = 97 \text{ }^\circ\text{C}$ $\psi = 0,89$	$t_n = 25 \text{ с}$ $\Delta_{\text{дин}} = 360 \text{ }^\circ\text{C}$ $\psi = 1$
	-	$k_p = 0,14$ $T_u = 7 \text{ с}$ $T_d = 3 \text{ с}$ $k'_d = 10$	$t_n = 70 \text{ с}$ $\Delta_{\text{дин}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ $\psi = 1$	$t_n = 50 \text{ с}$ $\Delta_{\text{дин}} = 290 \text{ }^\circ\text{C}$ $\psi = 1$
Нейро-нечеткий	$k_p = 0,96$ $T_u = 4 \text{ с}$ $T_d = 0 \text{ с}$		$t_n = 70 \text{ с}$ $\Delta_{\text{дин}} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ $\psi = 1$	$t_n = 25 \text{ с}$ $\Delta_{\text{дин}} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ $\psi = 1$

$t_n, \text{ с}$ – время переходного процесса; $\Delta_{\text{дин}}, \text{ }^\circ\text{C}$ – динамическая ошибка; ψ – степень затухания.

Выводы по результатам моделирования АСР тепловой нагр.

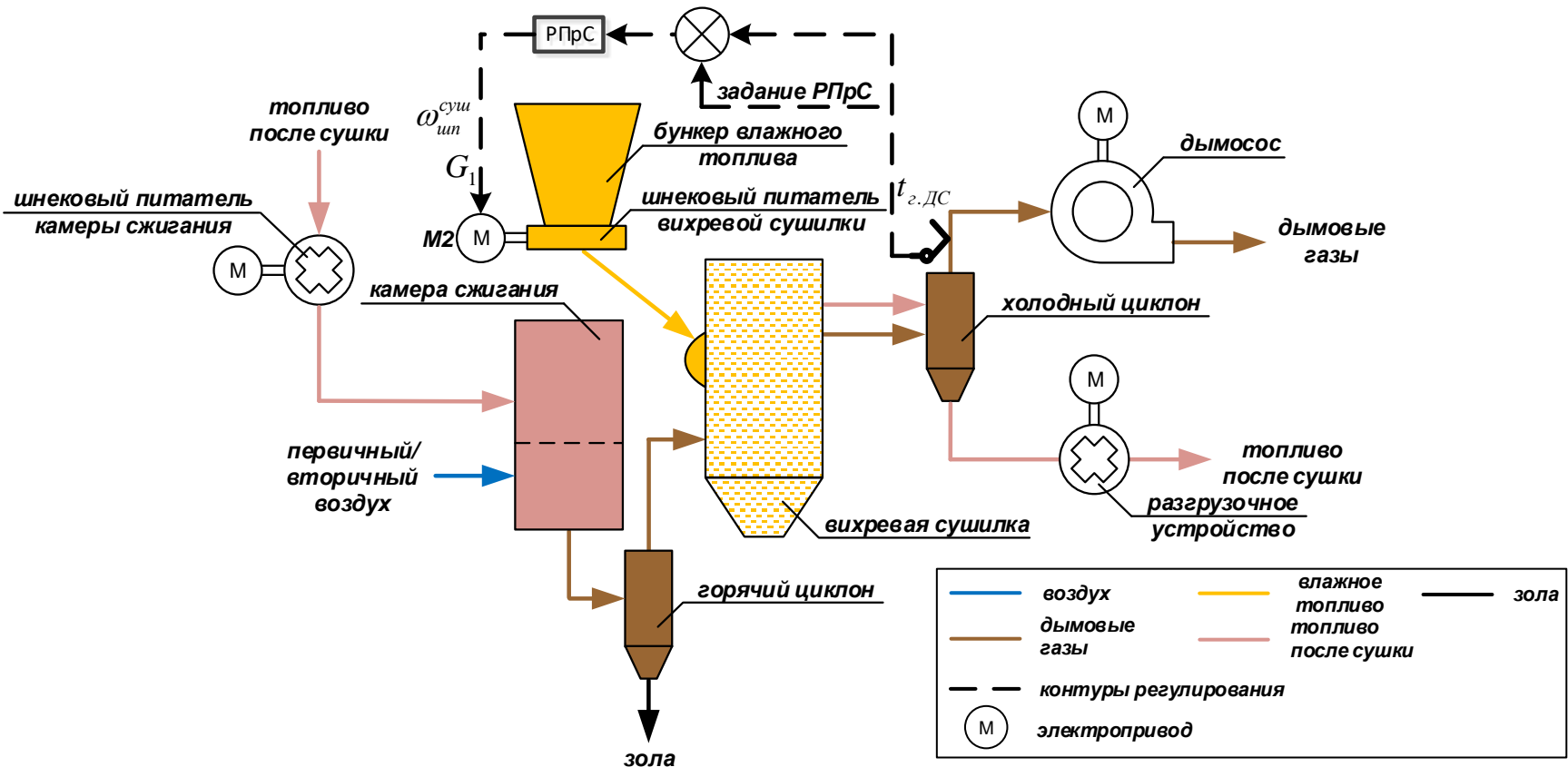
По результатам моделирования АСР тепловой нагрузки установки при работе в режиме сжигания определено:

1. качество переходных процессов во всем диапазоне нагрузок установки соответствует заданным критериям;
2. применение адаптивного нейро-нечеткого алгоритма управления с моделью в контуре обратной связи регулятора тепловой нагрузки позволяет поддерживать температуру дымовых газов в камере сжигания установки, способствуя её снижению при аварийном повышении из-за изменения динамических характеристик объекта регулирования;
3. применение нейро-нечеткого регулятора позволяет в среднем снизить среднеквадратичное отклонение регулируемого параметра на 17%, что в свою очередь позволяет увеличить производительность установки по топливу на 0,2 кг/час, КПД установки - на 7%;

Выводы по результатам моделирования АСР тепловой нагр.

4. физические характеристики сжигаемого топлива могут изменяться в процессе работы установки также и для одного вида топлива. Эти изменения, в большинстве случаев, являются неконтролируемыми, что приводит к изменению динамических характеристик сжигаемого топлива. В каждом из этих случаев требуется выполнять идентификацию динамических характеристик объекта регулирования и выполнять коррекцию настроек регулятора. В нашем случае, это классический ПИД-регулятор, который сравнивался с предлагаемым нейро-нечеткий регулятором тепловой нагрузки камеры сжигания установки. Предлагаемый алгоритм построен по другому принципу - выполняет в режиме реального времени идентификацию динамических характеристик объекта регулирования и коррекцию модели объекта регулирования в контуре обратной связи.

Разработка регулятора тепловой производительности сушилки



$t_{г.дс}$, °C – температура дымовых газов перед дымососом (за сушилкой);

G_1 , кг/с – расход влажного топлива в сушилку;

$\omega_{ин}^{суш}$, с⁻¹ – частота вращения шнекового питателя сушилки.

M2 – электропривод шнекового питателя вихревой сушилки (с ЧРП); РПрС – регулятор производительности вихревой сушилки.

Модель вихревой сушилки установки

Модель вихревой сушилки установки по каналу «задание частоты вращения шнекового питателя вихревой сушилки установки – температура дымовых газов за сушилкой» представлена в виде передаточной функции:

$$W_{op}^{kc}(s) = \frac{0,033k_{G_1 \rightarrow t_{2.ДС}} k_{шн}^{суш}}{0,6T_{G_1 \rightarrow t_{2.ДС}} s^3 + (0,6 + 2,3T_{G_1 \rightarrow t_{2.ДС}}) s^2 + (2,3 + T_{G_1 \rightarrow t_{2.ДС}}) s + 1},$$

где $k_{G_1 \rightarrow t_{2.ДС}}$, $^{\circ}C / кг$ - коэффициент усиления модели вихревой сушилки по каналу «расход топлива на сушку - температура дымовых газов перед дымососом»;

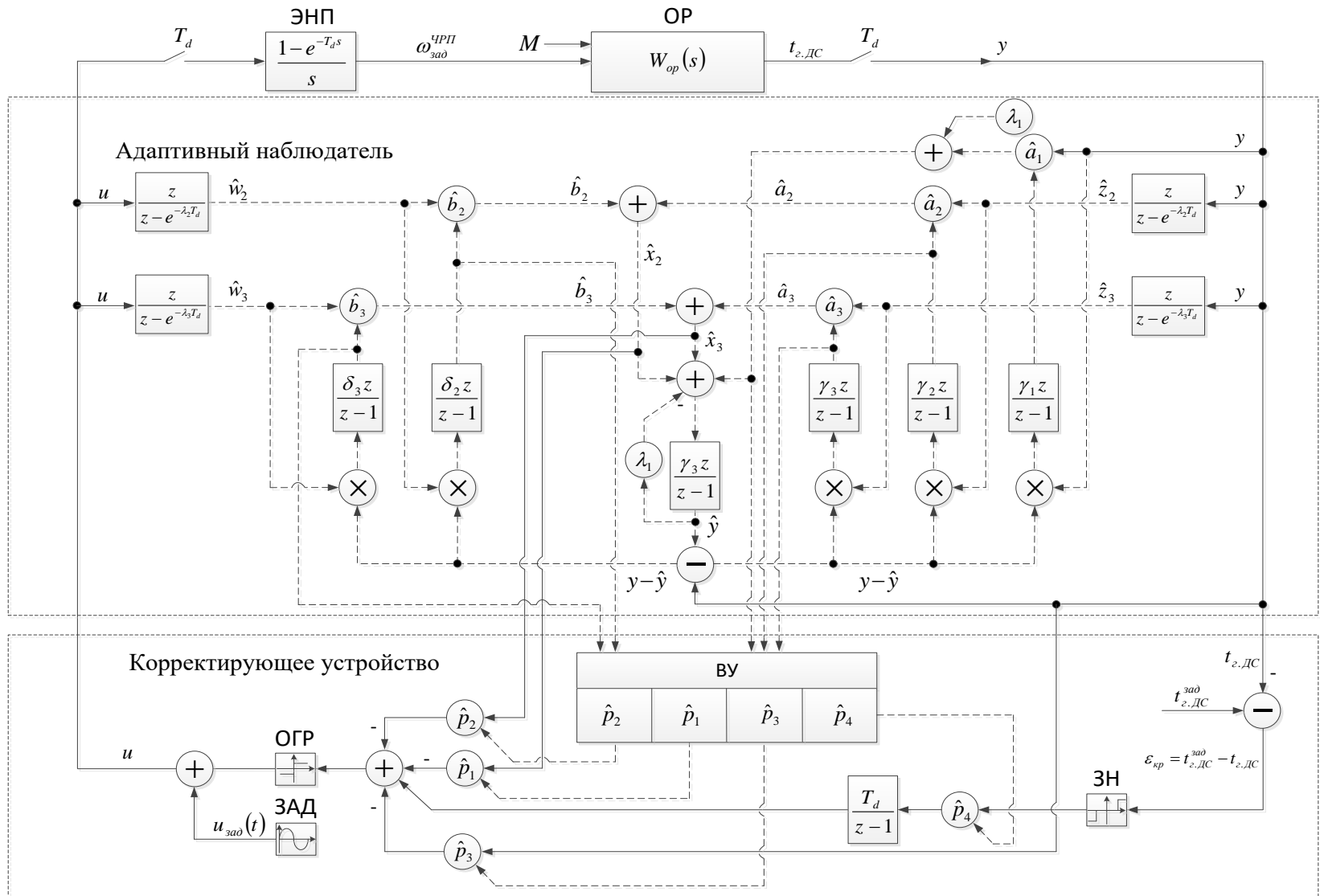
$k_{шн}^{суш}$, $кг$ - коэффициент усиления модели шнекового питателя вихревой сушилки установки по каналу «частота вращения - расход топлива на сушку»;

$T_{G_1 \rightarrow t_{2.ДС}}$, $с$ - постоянная времени передаточной функции вихревой сушилки установки по каналу «расход топлива на сушку – температура дымовых газов перед дымососом».

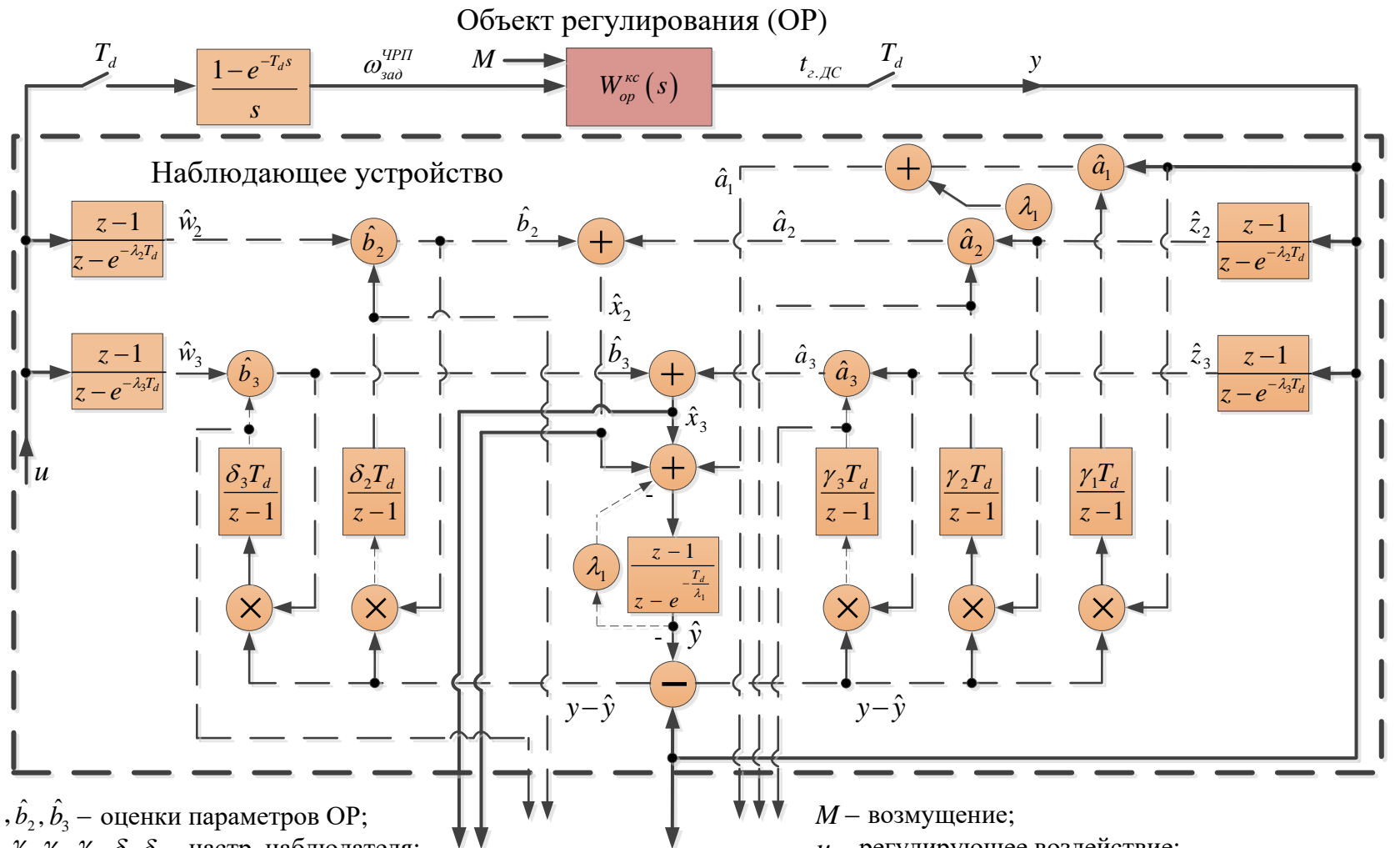
Числовые значения параметров математической модели вихревой сушилки установки:

$$800 = k_{G_1 \rightarrow t_{2.ДС}}^{\min} k_{шн}^{суш \min} \leq k_{G_1 \rightarrow t_{2.ДС}} k_{шн}^{суш} \leq k_{G_1 \rightarrow t_{2.ДС}}^{\max} k_{шн}^{суш \max} = 2,52 \cdot 10^4 \text{ } ^{\circ}C / кг$$
$$4 = T_{G_1 \rightarrow t_{2.ДС}}^{\min} \leq T_{G_1 \rightarrow t_{2.ДС}} \leq T_{G_1 \rightarrow t_{2.ДС}}^{\max} = 12 \text{ } с$$

Структурная схема АСР производительности сушилки



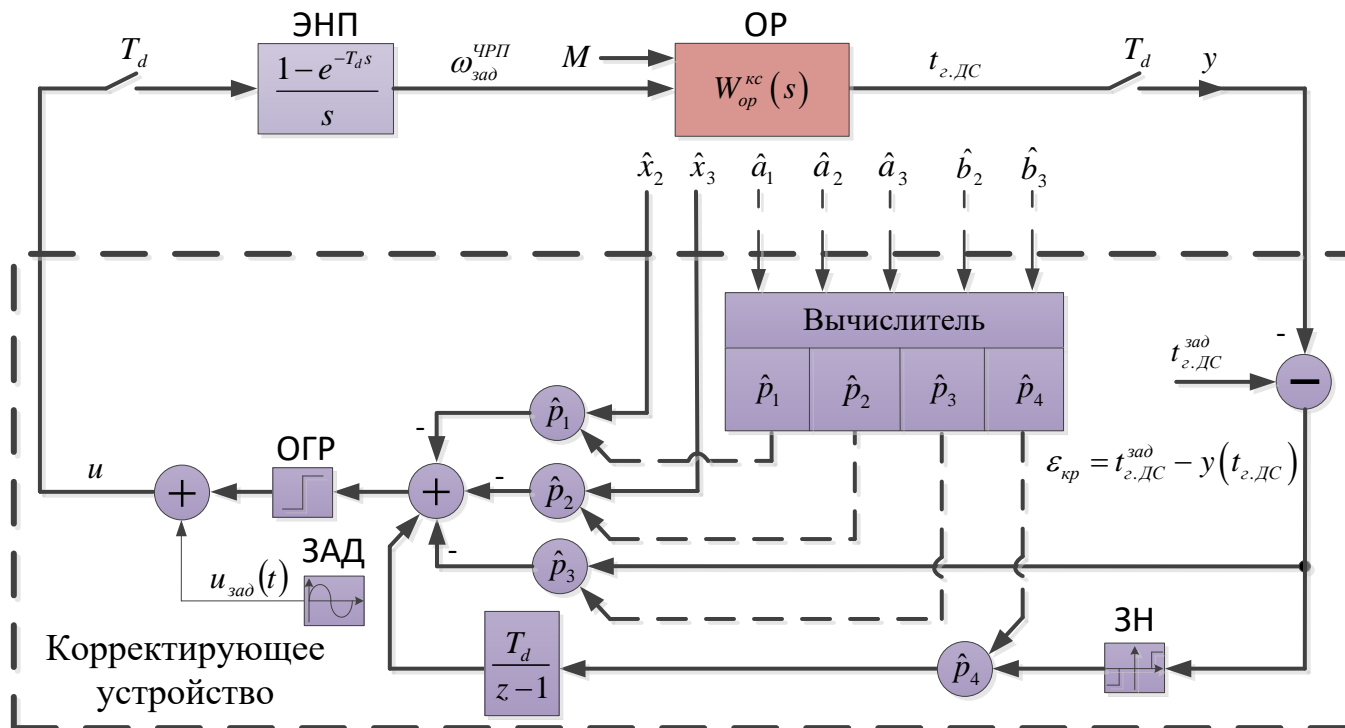
Структурная схема АСР производительности сушилки



$\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \hat{b}_2, \hat{b}_3$ – оценки параметров ОР;
 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \delta_2, \delta_3$ – настр. наблюдателя;
 $\hat{z}_2, \hat{z}_3, \hat{w}_2, \hat{w}_3, \hat{y}$ – сигналы наблюдателя;
 T_d – период дискретизации;

M – возмущение;
 u – регулирующее воздействие;
 $\omega_{\text{зад}}^{\text{ЧРП}}$ – задание (сигнал управления) ЧРП;
 $t_{\text{д.ДС}}$ – температура дымовых газов; y – после дискр.

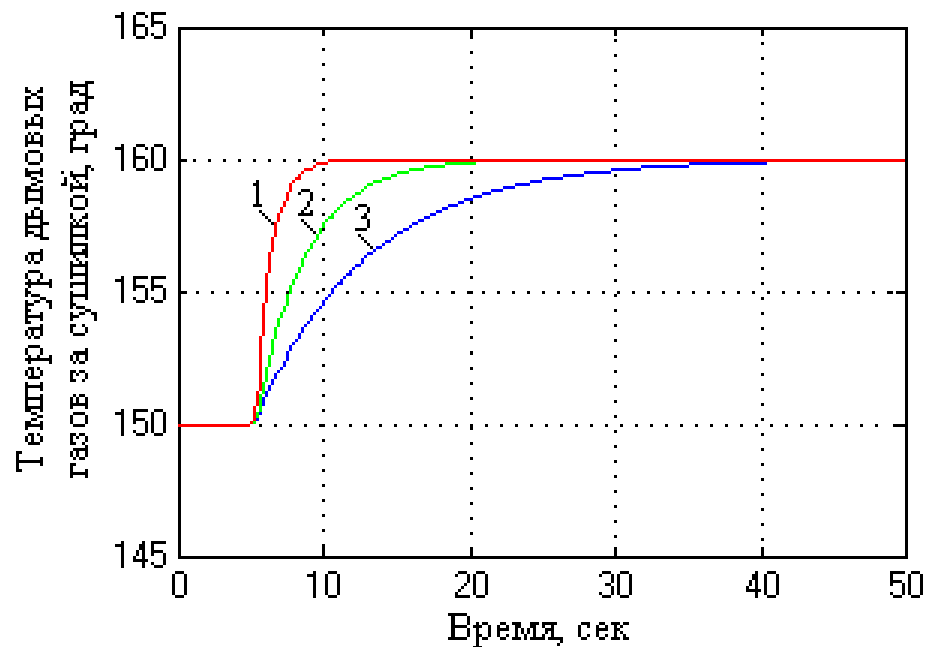
Структурная схема АСР производительности сушилки



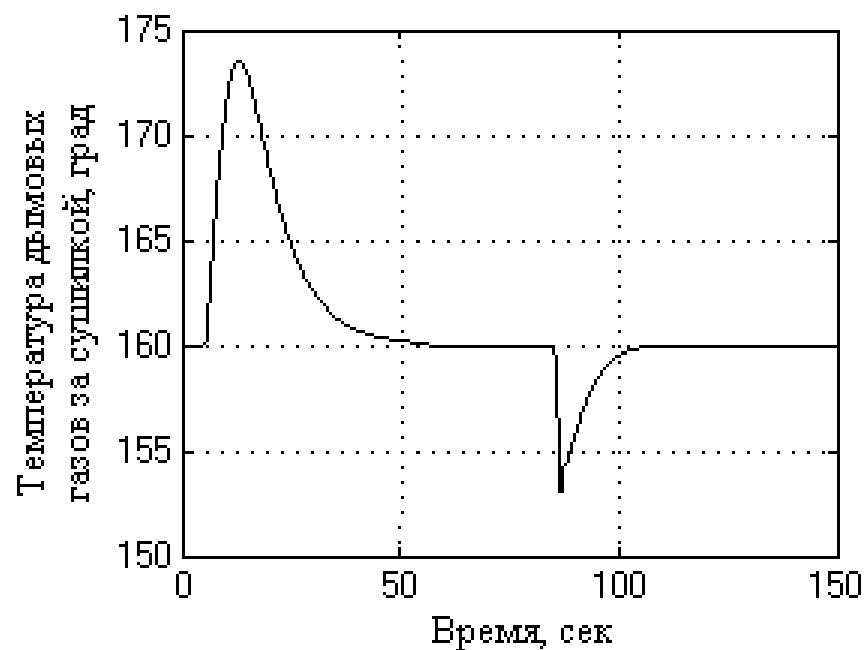
$\omega^{ЧРП}$ – задание (сигнал управления) ЧРП;
 $t_{\epsilon, дс}$ – температура дымовых газов; y – после дискр.
 $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \hat{b}_2, \hat{b}_3$ – оценки параметров ОР;
 \hat{x}_2, \hat{x}_3 – оценки координат ОР;
 ЗН – зона нечувствительности регулятора;
 ОГР – модель ограничения управляющего воздействия;
 ОР – объект регулирования;

$\hat{p}_1, \hat{p}_2, \hat{p}_3, \hat{p}_4$ – настройки регулятора (КУ);
 T_d – период дискретизации;
 M – возмущение;
 $t_{\epsilon, дс}^{зад}$ – задание регулятору;
 u – регулирующее воздействие;
 ЭНП – экстраполятор нулевого порядка;
 ЗАД – сигнал задающего воздействия для протекания процесса идентификации.

Переходный процесс в АСР производительности сушилки



а)



б)

Переходные процессы:

а) при изменении задания регулятору со 150 до 160 град для параметров объекта регулирования $k_{G_1 \rightarrow t_{z.дс}}$, $T_{G_1 \rightarrow t_{z.дс}}$, $k_{ин}$:

1 – минимальных, 2 – средних, 3 – максимальных;

б) при ступенчатом изменении параметров объекта регулирования:

– в момент времени 5 сек – с минимальных значений на максимальные;

– в момент времени 80 сек – с максимальных значений на минимальные.

Анализ переходных процессов в АСР производительности сушилки

Вид переходного процесса	Параметры объекта регулирования	Параметры переходного процесса
при изменении задания со 150 до 160 °C	минимальные	$t_n = 8 \text{ с}; \sigma = 0 \%$
	средние	$t_n = 20 \text{ с}; \sigma = 0 \%$
	максимальные	$t_n = 35 \text{ с}; \sigma = 0 \%$
при параметрическом возмущении	изменение минимальных максимальных	с на $t_n = 50 \text{ с};$ $\Delta_{\text{дин}} = 1,3\varepsilon_{\text{хр}};$ $\psi = 1$
	изменение максимальных минимальных	с на $t_n = 20 \text{ с};$ $\Delta_{\text{дин}} = -0,7\varepsilon_{\text{хр}};$ $\psi = 1$

$\varepsilon_{\text{хр}}, ^\circ\text{C}$ – рассогласование на входе корректирующего устройства (графики показаны для $\varepsilon_{\text{хр}} = 10^\circ\text{C}$).

$t_n, \text{с}$ – время переходного процесса; $\sigma, \%$ – перерегулирование; $\Delta_{\text{дин}}, ^\circ\text{C}$ – динамическая ошибка; ψ – степень затухания.

Выводы по результатам определения модели сушилки

При моделировании динамических характеристик вихревой сушилки по каналу «задание частоты вращения шнекового питателя сушилки – температура дымовых газов за сушилкой» определено, что они:

- существенно зависят от режима её работы;
- недостаточно точно известны (априорно определены по результатам моделирования);
- не стационарны;
- учет их изменений затруднителен (требует лабораторных исследований физических свойств топлива).

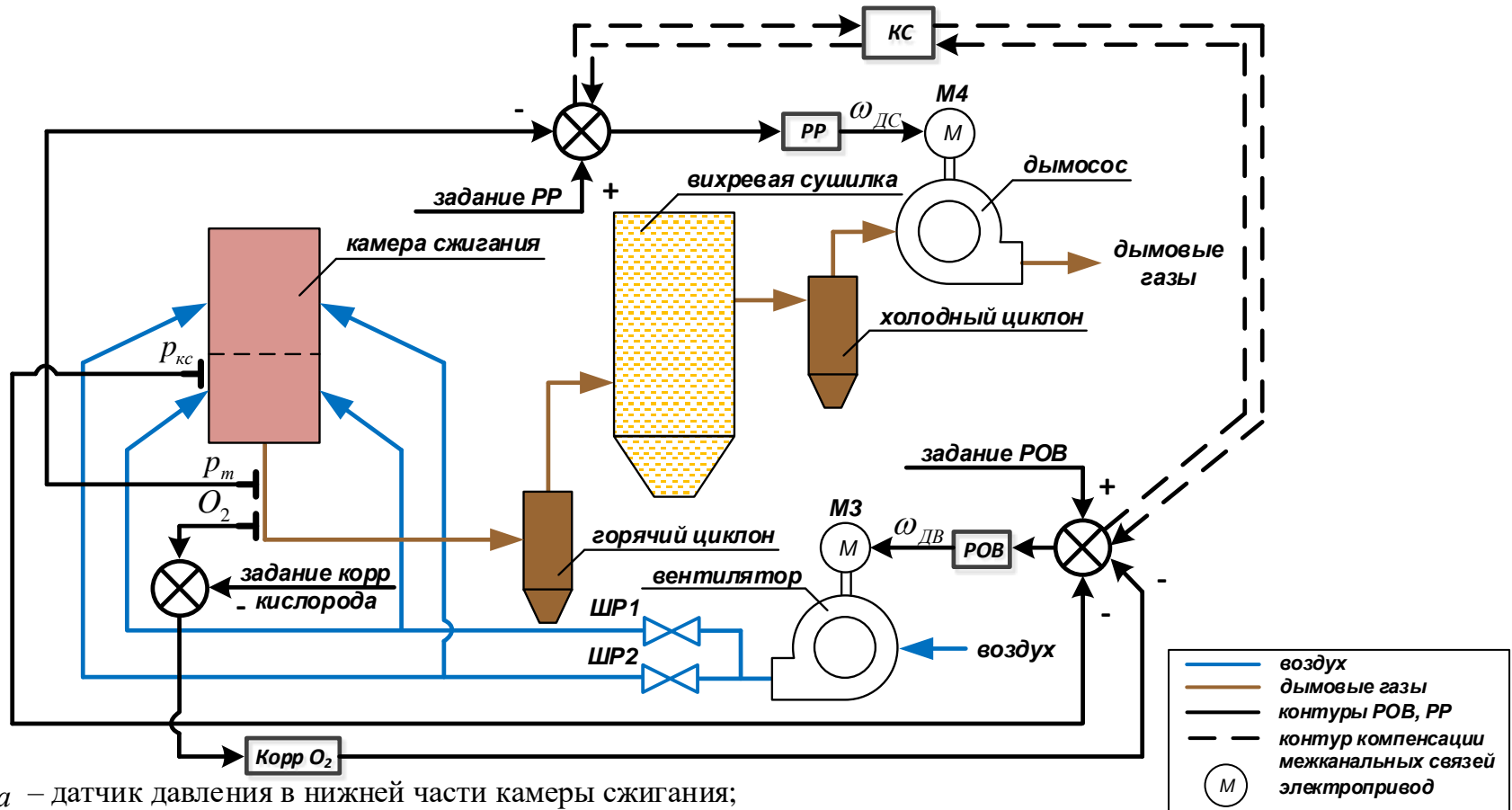
Это обуславливает применение адаптивных алгоритмов для регулирования производительности сушилки (температуры дымовых газов за сушилкой).

Выводы по результатам моделирования АСР производительности сушилки

По результатам моделирования контура регулирования производительности сушилки:

1. Определены нестационарность, существенная зависимость от режима работы установки, априорная неопределенность и невозможность учета изменения динамических характеристик объекта регулирования. В процессе работы установки это обуславливает необходимость применения адаптивного алгоритма управления. Для этой цели используется класс беспоисковых самонастраивающихся систем.
2. Определено, что изменение параметров объекта регулирования приводит к незначительному отклонению значения регулируемого параметра от задания. На одном из предыдущих слайдов представлен переходный процесс для случая ступенчатого максимального изменения параметров объекта регулирования. В действительности, по результатам испытаний определено, что изменения этих параметров происходят с меньшей скоростью и на меньшую величину.
3. Предложенный адаптивный алгоритм функционирования регулятора производительности обеспечивает работоспособность сушилки во всех режимах работы установки и во всем диапазоне нагрузок.

Принципиальная тепловая схема ГВТ установки



p_{kc} , Па – датчик давления в нижней части камеры сжигания;

p_m , Па – датчик разрежения в камере сжигания;

$\omega_{ДС}$, c^{-1} – частота вращения дымососа

$\omega_{ДВ}$, c^{-1} – частота вращения дутьевого вентилятора.

М3 – электропривод дутьевого вентилятора (с ЧРП); М4 – электропривод дымососа (с ЧРП); ШР1, ШР2 – шиберы воздуха регулирующие 1,2; POB – регулятор общего воздуха; PP – регулятор разрежения; КС – компенсатор межканальных связей.

Модель газовоздушного тракта установки

1. Модель установки по каналу «частота вращения дутьевого вентилятора – давление в нижней части камеры сжигания» во всем диапазоне работы установки имеет вид:

$$W_{\text{возд.тракт}}(s) = \frac{p_{\text{кв}}}{p_{\text{ДВ}}} = \frac{k_{\text{возд.тракт}}}{T_{\text{возд.тракт}}s + 1},$$

$$0,95 = k_{\text{возд.тракт}}^{\text{пуск}} \leq k_{\text{возд.тракт}} \leq k_{\text{возд.тракт}}^{\text{раб}} = 0,96, \quad 7,3 \text{ с} = T_{\text{возд.тракт}}^{\text{пуск}} \leq T_{\text{возд.тракт}} \leq T_{\text{возд.тракт}}^{\text{раб}} = 1,5 \text{ с}.$$

2. Модель установки по каналу «частота вращения дымососа – разрежение в камере сжигания» во всем диапазоне работы установки имеет вид:

$$W_{\text{газ.тракт}}(s) = \frac{p_m}{p_{\text{ДС}}} = \frac{-k_{1_газ.тракт} k_{2_газ.тракт} k_{3_газ.тракт}}{(T_{1_газ.тракт}s + 1)(T_{2_газ.тракт}s + 1)(T_{3_газ.тракт}s + 1)},$$

$$0,93 \leq k_{1_газ.тракт} k_{2_газ.тракт} k_{3_газ.тракт} \leq 0,97$$

$$5,7 \text{ с} = T_{1_газ.тракт}^{\text{пуск}} \leq T_{1_газ.тракт} \leq T_{1_газ.тракт}^{\text{раб}} = 1,2 \text{ с},$$

$$6,1 \text{ с} = T_{2_газ.тракт}^{\text{пуск}} \leq T_{2_газ.тракт} \leq T_{2_газ.тракт}^{\text{раб}} = 1,3 \text{ с},$$

$$1,1 \text{ с} = T_{3_газ.тракт}^{\text{пуск}} \leq T_{3_газ.тракт} \leq T_{3_газ.тракт}^{\text{раб}} = 0,24 \text{ с}.$$

Несвязное регулирование параметров газовой воздушного тракта

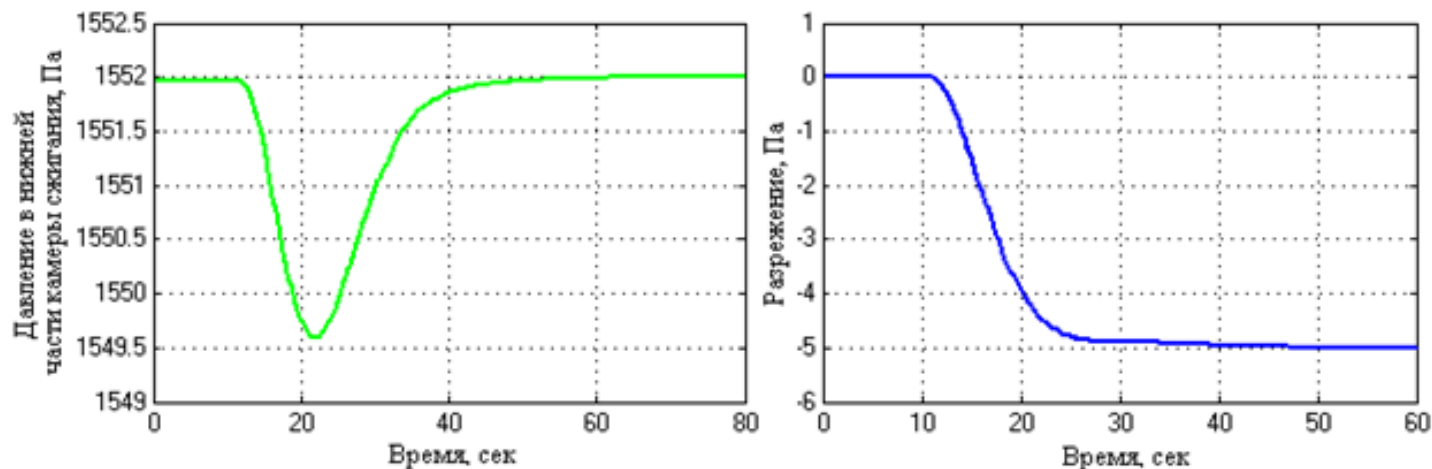


Рис. 1. Несвязное регулирование параметров газовой воздушного тракта. Изменение задания регулятору разрежения.

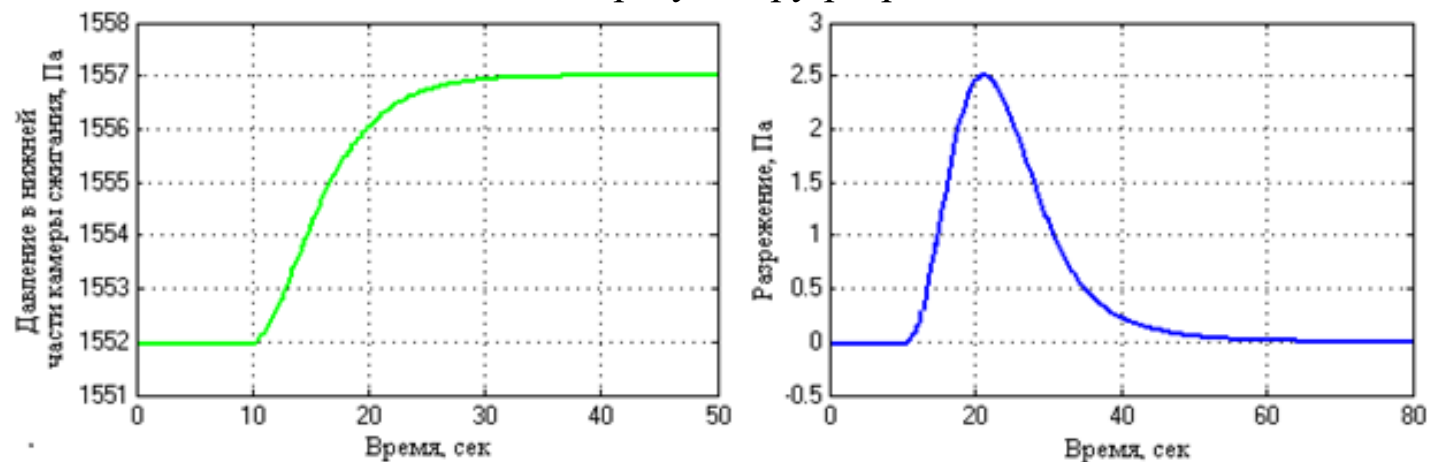


Рис. 2. Несвязное регулирование параметров газовой воздушного тракта. Изменение задания регулятору общего воздуха.

Сравнение схем регулирования параметров газоздушного тракта

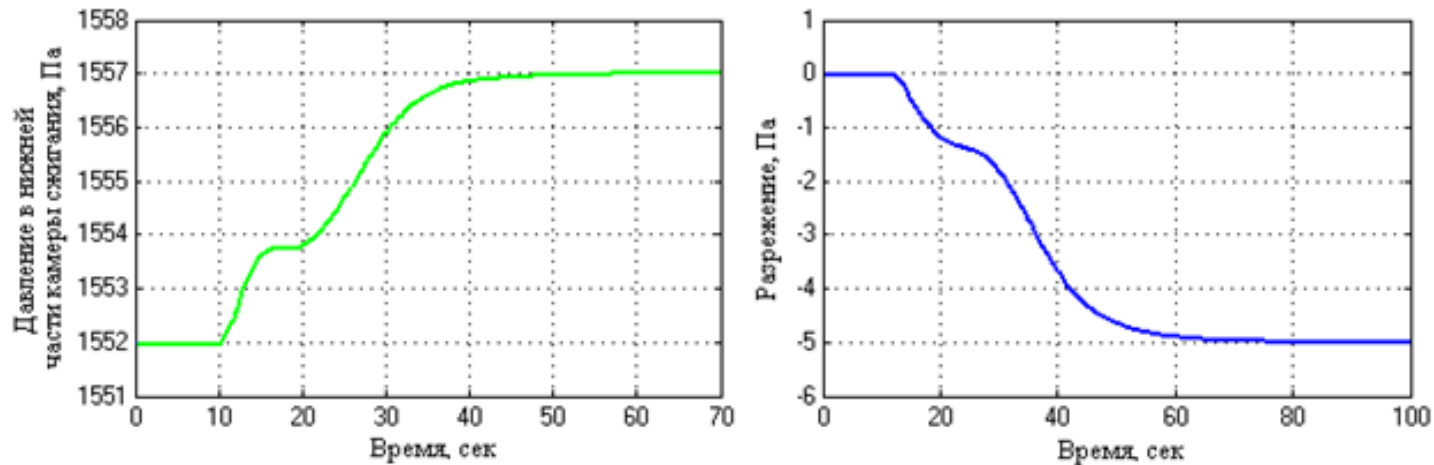


Рис. 3. Несвязное регулирование параметров газоздушного тракта

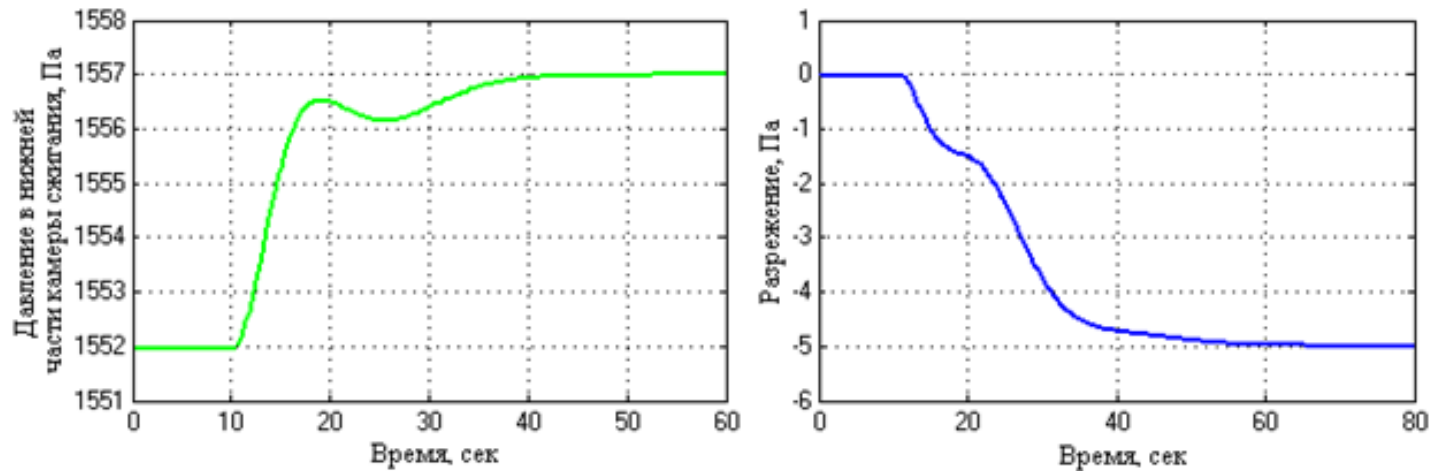


Рис. 4. Связное регулирование параметров газоздушного тракта

Анализ переходных процессов в АСР газоводушного тракта установки

График переходного процесса	РОВ (давление общего воздуха в нижней части камеры сжигания)		РР (разрежение)	
	воздействие	реакция	воздействие	реакция
рис. 1 (несвязное регулирование)	РР (межканальная связь)	переходный процесс: $t_n = 38 \text{ с};$ $\Delta_{дин} = 2,4 \text{ Па};$ $\psi = 1$	изменение задания с 0 Па до -5 Па	переходный процесс: $t_n = 25 \text{ с}$ и $\sigma = 0 \%$
рис. 2 (несвязное регулирование)	изменение задания с 1552 Па до 1557 Па	переходный процесс: $t_n = 20 \text{ с}$ и $\sigma = 0 \%$	РОВ (межканальная связь)	переходный процесс: $t_n = 50 \text{ с};$ $\Delta_{дин} = 2,5 \text{ Па};$ $\psi = 1$
рис. 3 (несвязное регулирование)	изменение задания с 1552 Па до 1557 Па	переходный процесс: $t_n = 40 \text{ с}$ и $\sigma = 0 \%$	изменение задания с 0 Па до -5 Па	переходный процесс: $t_n = 60 \text{ с}$ и $\sigma = 0 \%$
рис. 4 (связное регулирование)	изменение задания с 1552 Па до 1557 Па	переходный процесс: $t_n = 30 \text{ с}$ и $\sigma = 0 \%$	изменение задания с 0 Па до -5 Па	переходный процесс: $t_n = 45 \text{ с}$ и $\sigma = 0 \%$

$t_n, \text{ с}$ – время переходного процесса; $\sigma, \%$ – перерегулирование; $\Delta_{дин}, \text{ Па}$ – динамическая ошибка; ψ – степень затухания.

Выводы по результатам моделирования регуляторов ГВТ

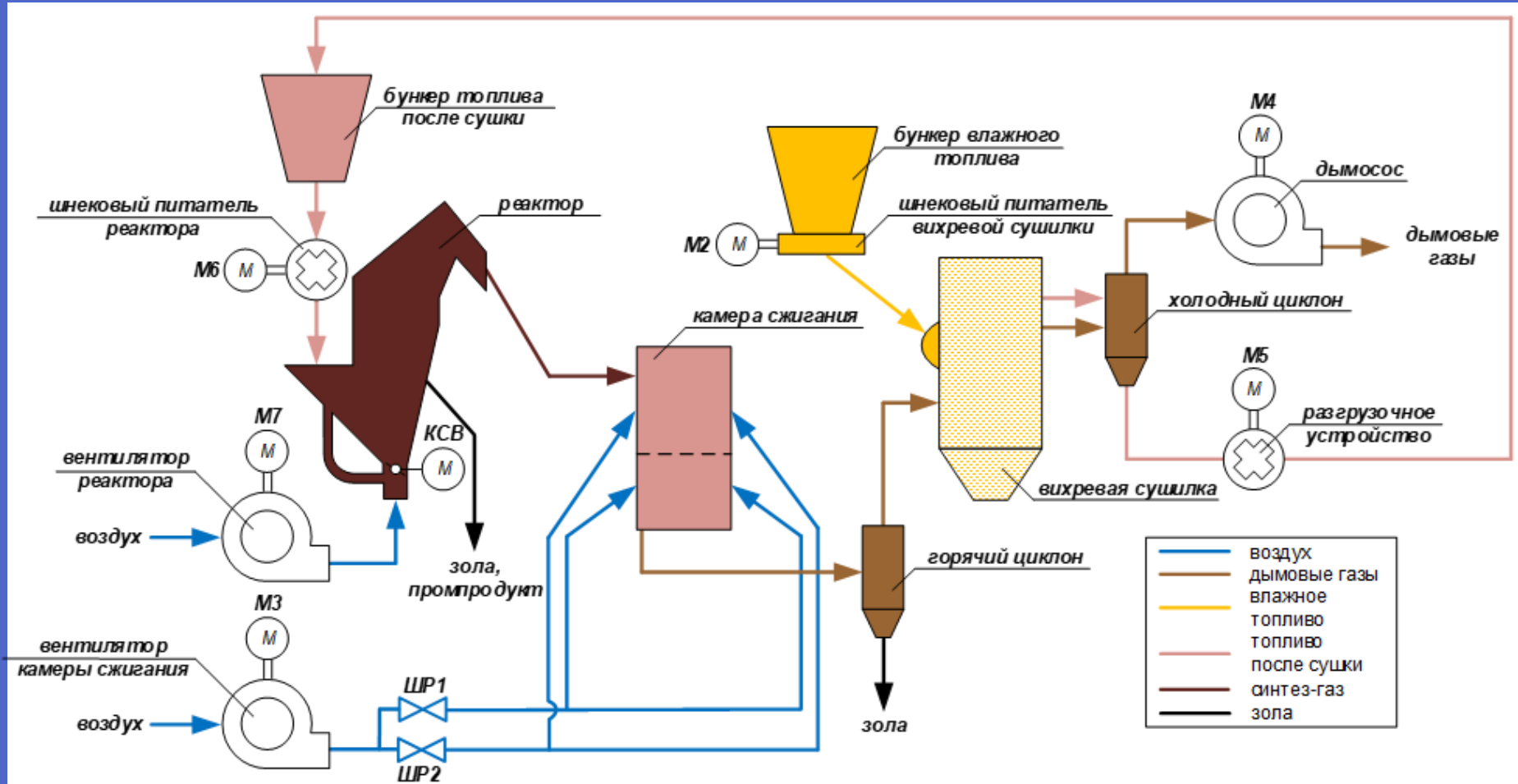
По результатам моделирования контуров регулирования ГВТ было определено, что:

1. Газо-воздушный тракт (ГВТ) установки представляет собой два объекта регулирования: 1 – канал «частота вращения дымососа - разрежение в камере сжигания», 2 – канал «частота вращения дутьевого вентилятора – давление воздуха в нижней части камеры сжигания». Эти объекты управления имеют между собой перекрёстные связи от управляющих воздействий на управляемые величины.
2. Динамические характеристики ГВТ нестационарны и меняются в зависимости от режима работы установки и её нагрузки.
3. Выполнен синтез робастных корректирующих устройств и моделирование работы регуляторов разрежения и общего воздуха газовоздушного тракта установки.

Выводы по результатам моделирования регуляторов ГВТ

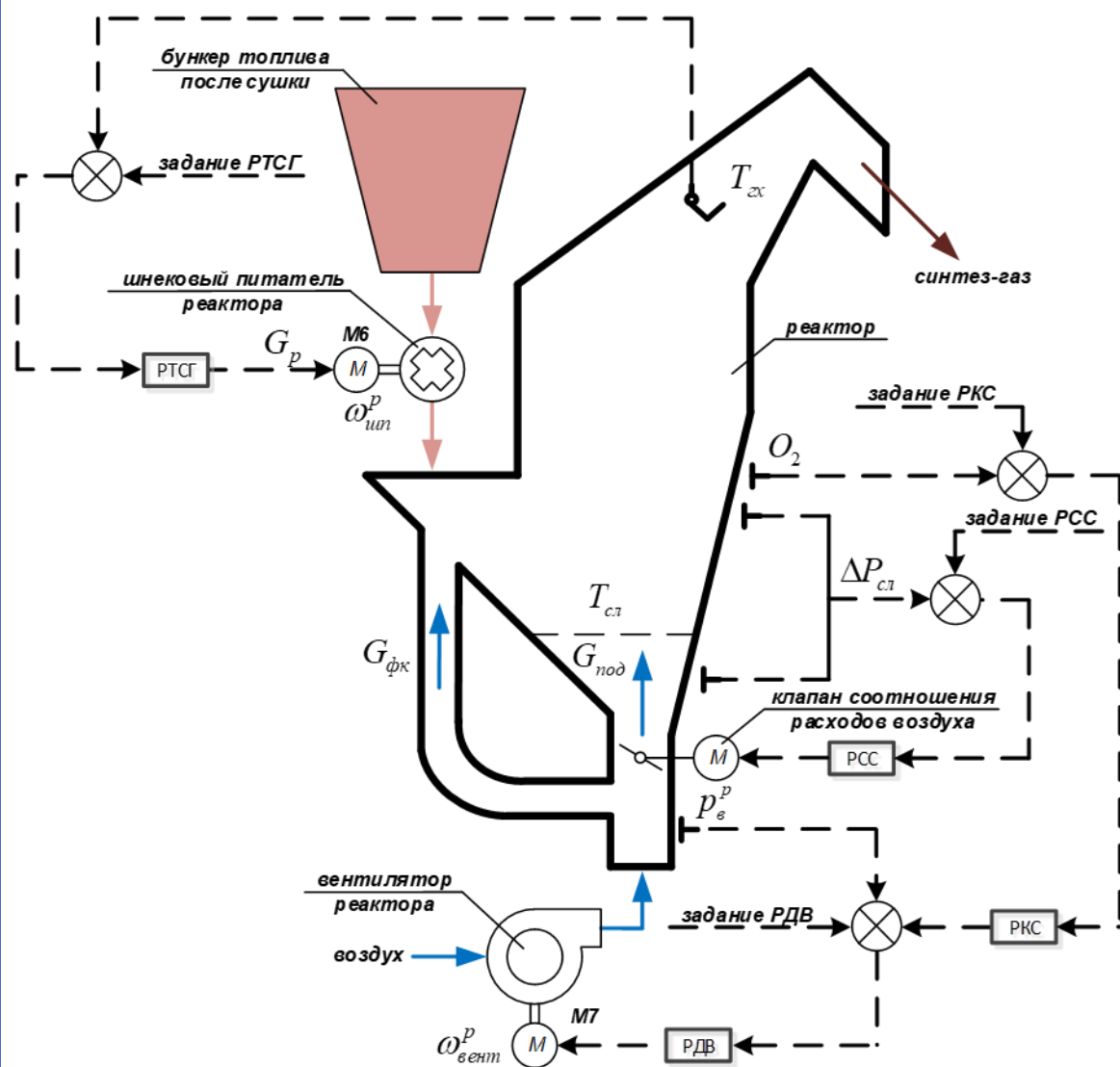
4. Параметры настройки (коэффициенты) корректирующих устройств контуров стабилизации давления воздуха, разрежения корректируются в зависимости от частоты вращения дутьевого вентилятор и дымососа, соответственно.
5. Выполнено моделирование несвязной и связной работы регуляторов ГВТ установки. Разработаны компенсаторы смежных (межканальных) связей газового и воздушного трактов установки (для того, чтобы обеспечить динамическую автономность контуров регулирования). Показано преимущество предлагаемых схем РОВ, РР.
6. Для обеспечения полноты сжигания топлива выполнен регулятор-корректор кислорода в камере сжигания, корректирующий давление воздуха в её нижней части в зависимости от содержания кислорода в дымовых газах.

Схема установки переработки орг. отходов в режиме пиролиза/газификации



М2 – электропривод шнекового питателя вихревой сушилки; М3 – электропривод вентилятора; М4 – электропривод дымососа; М5 – электропривод разгрузочного устройства; М6 – электропривод шнекового питателя реактора; М7 – электропривод вентилятора реактора; КСВ – клапан соотношения расходов воздуха; ШР1, ШР2 – шиберы воздуха регулирующие 1,2.

Структурная схема контуров регулирования реактора



РСС - регулятор сопротивления слоя; РДВ - регулятор давления воздуха; РКС - регулятор содержания кислорода в кипящем слое; РТСГ - регулятор температуры синтез-газа.

$\omega_{шт}^p, \omega_{вент}^p, c^{-1}$ - частота вращения шнекового питателя, вентилятора реактора;

p_e^p, Pa - общее давление воздуха на входе в реактор;

α_f - соотношение расходов воздуха в подину реактора;

$O_2, \%$ - концентрация кислорода в кипящем слое;

$\Delta P_{сл}, Pa$ - сопротивление кипящего слоя;

$G_p, кг / с$ - расход топлива в реактор;

$G_{под}, G_{фк}, кг / с$ - расход воздуха в подину, на фор-камеру реактора;

$T_{сл}, T_{ex}, ^\circ C$ - температура в зоне кипящего слоя, газохода;

Модель реактора как объекта управления

Модель реактора по каналу «расход высушенного топлива в реактор – температура синтез-газа в газоходе реактора» во всем диапазоне нагрузок установки имеет вид:

$$W_{B_p \rightarrow T_{ex}}(s) = \frac{k_p^m}{(T_1^m + T_2^m)s + 1}$$

где k_p^m – коэффициент усиления, представляющий собой изменение температуры слоя (продуктов сгорания) при изменении расхода топлива на 1 кг/с;

T_1^m , с – постоянная времени, характеризующая соотношение между расходом высушенного топлива в реактор и затратами тепла на нагрев слоя и продуктов сгорания;

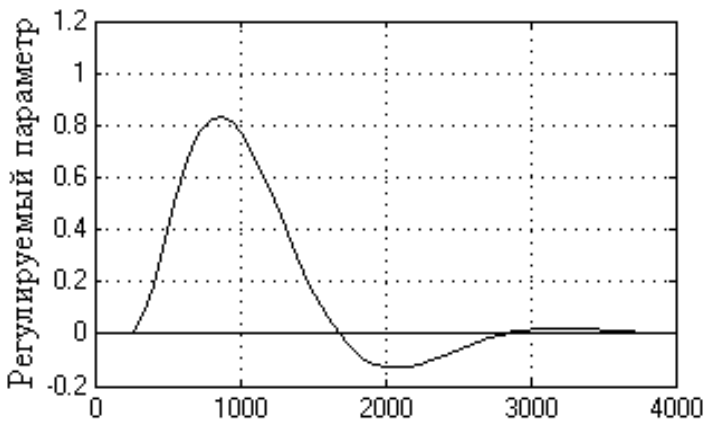
T_2^m , с – постоянная времени, характеризующая соотношение между расходом топлива и находящимся в слое количеством углерода.

Режим	k_p^m	T_1^m	T_2^m
Газификация	1436÷1475	0,54÷0,64	4,4÷6,5
Пиролиз	1171÷1656	1,26÷1,75	3,2÷7,8

Выводы по результатам моделирования АСР реактора

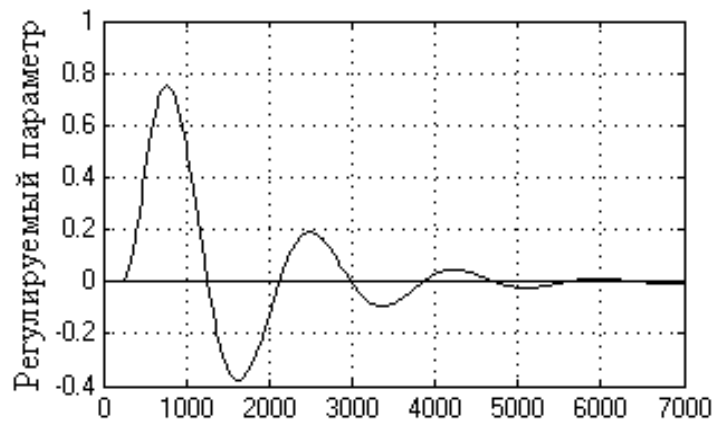
1. Т.к. объекты регулирования давления воздуха в камере сжигания и реакторе и идентичны по структуре, то для регулирования общего давления воздуха на входе в реактор целесообразно использовать структуру регулятора аналогичную регулятору общего воздуха камеры сжигания.
2. Структура регулятора содержания кислорода в кипящем слое реактора аналогична структуре регулятора для камеры сжигания.
3. Аналогичные динамические характеристики объектов регулирования по каналам «задание частоты вращения ЧРП шнекового питателя – температура газа» для камеры сжигания и реактора позволяют использовать для регулирования температуры синтез-газа в газоходе реактора структуру регулятора аналогичную регулятору тепловой нагрузки камеры сжигания.
4. Для реактора предусмотрены технологические защиты предотвращающие шлакование кипящего слоя и логика обеспечивающая условия его существования.

Новый метод настройки ПИД-регуляторов



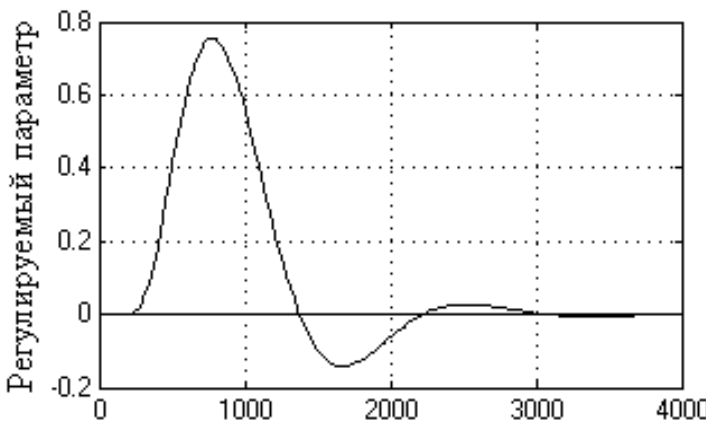
Время, сек

шаг 1



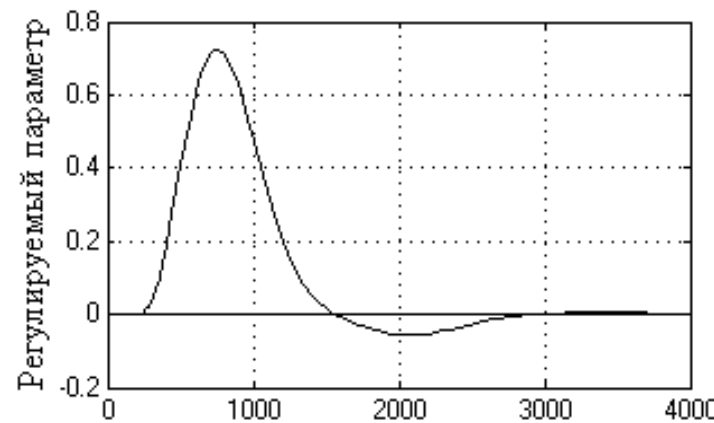
Время, сек

шаг 2



Время, сек

шаг 3, а



Время, сек

шаг 3, б

Преимущества разработанного метода настройки ПИД-регуляторов

1. Отсутствует необходимость вывода регулятора на границу устойчивости или получения колебательного переходного процесса с небольшим затуханием.
2. Область применения метода не ограничена объектами регулирования, описываемыми апериодическим звеном первого порядка с транспортным запаздыванием (как для большого числа других методов настройки).
3. Можно применять для настройки ПИД-регуляторов для объектов регулирования с транспортным запаздыванием и без него.
4. Меньшее количество итераций параметров настройки регулятора (чем у большинства других методов настройки).

Преимущества разработанного метода настройки ПИД-регуляторов

5. Не требует изменения структуры регулятора – как для некоторых методов настройки (дополнительного дифференцирования регулируемого параметра, отключения выхода регулятора, обнуления его задания и пр).
6. Наличие вербального описания процедур настройки.
7. Описаны требования к качеству переходного процесса на каждом шаге методики.
8. Всегда удаётся достичь требуемого качества переходного процесса.
9. Даны рекомендации по оптимизации полученного переходного процесса. Увеличение веса производной в законе функционирования ПИД-регулятора позволяет улучшить оптимизируемые показатели качества переходных процессов.

Выводы по результатам работы

1. Оригинальная конструкция установки, позволяющей перерабатывать высокозольные и высоковлажные отходы, потребовала выполнения математического моделирования работы узлов и агрегатов установки переработки органических отходов, работающей в тестовом режиме, при разных нагрузках и в различных режимах работы: сжигание, пиролиз, газификация.
2. По результатам математического моделирования и на основе экспериментальных данных разработаны алгоритмы управления установкой во всех режимах: пуск, останов, стационарная работа (сжигание, пиролиз, газификация) и при переработке различных видов топлива.
3. Выполнен синтез автоматических контуров регулирования технологических параметров установки.

Выводы по результатам работы

4. Полученные в работе результаты (математические модели, алгоритмы управления, метод настройки ПИД-регуляторов) являются универсальными могут быть использованы для решения аналогичных задач.
5. Построение автоматизированных систем управления процессами горения позволяет:
 - повысить надежность и экономичность работы энергоустановки;
 - снизить количество вредных выбросов;
 - добиться инвариантности энергетической установки к различным видам топлива;
 - варьировать выход конечных продуктов (тепловая и электрическая энергия, биоуголь, синтез-газ);
 - с учетом технологических ограничений изменять топливную стратегию, а также использовать выгодные предложения на рынке топлива.

Публикации

Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 28 работах:

- 5 входят в перечень рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций;
- 3 статьи в сборниках научных трудов;
- 18 статей в сборниках материалов Всероссийских и международных конференций;
- 2 отчетах о выполнении НИОКР.

В перечень SCOPUS включены 2 журнала:

- Мехатроника, автоматизация, управление.
- Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (переводное издание журнала Автометрия).

Публикации по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Писарев А.В., Шакиров С.Р., Квашнин А.Г. Синтез нейро-нечеткого регулятора тепловой нагрузки установки переработки органических отходов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019. № 9. С. 54-62.
2. Писарев А.В. Экспериментальный пошаговый метод настройки ПИД-регуляторов // Энергетик. 2018. №10. С. 15-17.
3. Писарев А.В., Квашнин А.Г., Шакиров С.Р. Моделирование работы адаптивной системы управления процессом сушки в установке утилизации органических отходов // Автометрия. 2018. № 5. С. 122-128.
4. Писарев А.В., Квашнин А.Г., Шакиров С.Р. Разработка и исследование математических моделей элементов газоздушного тракта для создания АСУ ТП установки по переработке органических отходов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21, №10. С. 575-583.
5. Писарев А.В., Шакиров С.Р., Квашнин А.Г. Синтез автоматических систем регулирования технологических процессов газоздушного тракта установки переработки органических отходов // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2020 Т.18, №4. С. 86-105.

Публикации по теме диссертации

В других журналах и изданиях:

6. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Разработка математической модели газовоздушного тракта установки утилизации органических отходов // Сборник научных трудов X всероссийской конференции «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск, 05-09 декабря 2016 г., Часть 1. – С. 46-48.

7. Вильчек С.Ю., Квашнин А.Г., Писарев А.В., Шакиров С.Р. и др. Разработка опытного образца многофункционального энергетического комплекса для переработки высоковлажных отходов сельского хозяйства в тепло и энергоносители. Отчет о выполнении НИОКР. Рег. номер НИОКР: 01201058597.

8. Квашнин А.Г., Писарев А.В., Шакиров С.Р. И др. Контроль и корректировка работы автоматизированной системы управления технологическими процессами во время высокотемпературных испытаний. Анализ результатов высокотемпературных испытаний. Доработка автоматизированной системы управления технологическими процессами по результатам испытаний // Отчет о выполнении НИОКР. Рег. Номер НИОКР: 115120210006.

Публикации по теме диссертации

9. Новиков С.И., Писарев А.В. Определение параметров настройки промышленных ПИД – регуляторов расчётными методами // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Труды Десятого Всероссийского студенческого научно-технического семинара: в 2-х томах - Томск, 22-25 апреля 2008. - Томск: ТПУ, 2008. - т. 2, Теплоэнергетическое, экологическое и гуманитарное направления. - С. - 157-160.
10. Писарев А.В., Новиков С.И. Сравнительные исследования расчетных методов определения параметров настроек промышленных ПИД-регуляторов. // Энергосистемы, электростанции и их агрегаты: Сб. науч. тр. / Под ред. акад. РАН В.Е. Накорякова. – Выпуск 11. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2007. – С. 191 – 200.
11. Писарев А.В., Новиков С.И. Улучшение методов оптимизации настроек автоматических систем регулирования теплоэнергетических объектов // Восьмой Всероссийский студенческий научно-технический семинар "Энергетика: экология, надежность, безопасность". Труды семинара. Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – С. 179-182.

Публикации по теме диссертации

12. Писарев А.В., Новиков С.И. Сравнительные исследования методов определения параметров настроек ПИД-регуляторов // Дни науки НГТУ-2007. Материалы научной студенческой конференции / под ред. проф. В.А. Батаева. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – С. 63-64.

13. Писарев А.В., Новиков С.И. Исследование методов настройки ПИД-регуляторов // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми частях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. Часть 3. – стр. 177-180.

14. Писарев А.В., Новиков С.И. Исследование методов определения параметров настроек промышленных ПИД-регуляторов // Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития // Доклады Международной научно-практической конференции (ТУСУР), 2007. - Часть 2, - С. 76-79.

15. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Применение нечетких моделей в автоматизированных системах управления технологическими процессами // Тезисы международной конференции «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики – 2019» АМСА - 2019, Новосибирск, 1-5 июля 2019. – С. 145.

Публикации по теме диссертации

16. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Моделирование информационно-управляющей системы установки по утилизации органических отходов // Тезисы международной конференции «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики – 2015» АМСА - 2015, Новосибирск, 19-23 октября 2015. – С. 110-111.

17. Вильчек С.Ю. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Моделирование работы автоматизированной системы управления процессами переработки углеродосодержащих материалов // Сборник тезисов докладов Всероссийской конференции «Индустриальные информационные системы» ИИС -2015, Новосибирск, 20-24 сентября 2015 г. – С. 14-15.

18. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Моделирование автоматической системы управления непрерывным дозированием сыпучих материалов // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. - 2018. - Т.1. - № 3-1. - С.77-90.

Публикации по теме диссертации

19. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Математическое моделирование работы нейро-нечеткого регулятора тепловой нагрузки установки переработки органических отходов // Тезисы XIX Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям. г. Кемерово, Россия, 29 октября – 2 ноября 2018 г. – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2018. – С. 36.

20. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Применение нечетких моделей в автоматизированных системах управления технологическими процессами // Марчуковские научные чтения - 2019: Тезисы Международной конференции "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики" / Ин-т вычислительной математики и матем. геофизики СО РАН. Новосибирск, 1–5 июля 2019 г. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2019. С. 145.

21. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Алгоритм формирования выборки данных для идентификации математической модели объекта регулирования нейро-нечеткого регулятора // Тезисы XX Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям. г. Новосибирск, Россия, 28 октября – 1 ноября 2019 г. – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2019. – С. 73-74.

Публикации по теме диссертации

22. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Построение адаптивного регулятора производительности сушилки установки утилизации органических отходов // Наука. Технологии. Инновации. Сборник научных трудов в 10 ч.. Под ред. Достовалова Д.Н. Новосибирск, 04-08 декабря 2017. – С. 42-44.
23. Писарев А.В., Новиков С.И. Предиктор Смита и его применение для компенсации транспортного запаздывания объектов регулирования автоматических систем // Сборник научных трудов НГТУ «Энергосистемы, электростанции и их агрегаты», вып. 12, 2008, С. 169-196.
24. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Математическое моделирование работы газовоздушного тракта установки переработки органических отходов // Тезисы XIX Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям. г. Кемерово, Россия, 29 октября – 2 ноября 2018 г. – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2018. – С. 36-37.
25. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Разработка автоматического регулятора тепловой нагрузки установки утилизации биоотходов // XVIII Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям. Иркутск 21–25 августа 2017 г. – С. 50.

Публикации по теме диссертации

26. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Разработка алгоритмов автоматического управления для информационно-управляющей системы установки переработки органических отходов // Марчуковские научные чтения 2020: Тезисы Междунар. конф., посв. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука Новосибирск, 19–23 октября 2020 г. / Ин-т вычислит. математики и матем. геофизики СО РАН. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. – С. 150.
27. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Разработка цифровой модели установки по переработке органических отходов // Тезисы XXI Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям. г. Новосибирск, Россия, 7 – 11 декабря 2020 г. – Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2020. – С. 28-29.
28. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Алгоритм определения инверсной модели в нейро-нечетком регуляторе тепловой нагрузки установки переработки органических отходов // Инновационные технологии: Теория, инструменты, практика. Материалы XII Международной интернет-конференции молодых ученых, аспирантов, студентов (16 ноября – 31 декабря 2020 г.). – С. 48-56.

Пункты шифра специальности

1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.
2. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.
3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.
8. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Благодарю за внимание!