

УДК 681.516.52

DOI 10.25205/1818-7900-2020-18-4-86-105

Синтез автоматических систем регулирования технологических процессов газовоздушного тракта установки переработки органических отходов

С. Р. Шакиров^{1,2}, А. Г. Квашнин³, А. В. Писарев¹

¹ *Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий
Новосибирск, Россия*

² *Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия*

³ *Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
Новосибирск, Россия*

Аннотация

Приведены результаты синтеза автоматических регуляторов для технологических параметров, характеризующих режим работы газовоздушного тракта установки переработки органических отходов. Приведен выбор наиболее подходящего метода синтеза регуляторов. Показана работоспособность синтезированных регуляторов и определены их запасы устойчивости по амплитуде и фазе. Представлены результаты математического моделирования работы контуров стабилизации технологических параметров газовоздушного тракта установки для двух случаев: без межканальных связей и с их учетом. Выполнено моделирование связанной работы контуров регулирования ГВТ установки. Разработаны компенсаторы смежных (межканальных) связей газового и воздушного трактов установки. Показано преимущество предлагаемых схем.

Ключевые слова

АСУ ТП, синтез автоматического регулятора, линеаризация, моделирование системы автоматического регулирования, регулятор общего воздуха, регулятор разрежения, робастность, запас устойчивости, установка переработки отходов

Для цитирования

Шакиров С. Р., Квашнин А. Г., Писарев А. В. Синтез автоматических систем регулирования технологических процессов газовоздушного тракта установки переработки органических отходов // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2020. Т. 18, № 4. С. 86–105. DOI 10.25205/1818-7900-2020-18-4-86-105

Synthesis of Automatic Control Systems for Technological Processes of the Gas-Air Path of the Organic Waste Processing Plant

S. R. Shakirov^{1,2}, A. G. Kvashnin³, A. V. Pisarev¹

¹ *Federal Research Center for Information and Computational Technologies
Novosibirsk, Russian Federation*

² *Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russian Federation*

³ *Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation*

Annotation

A research team from ICT SB RAS is actively developing a system to control a pilot plant for processing organic waste automatically. The pilot plant can produce thermal energy and energy carriers (solid products, e.g. bio-coal, liq-

© С. Р. Шакиров, А. Г. Квашнин, А. В. Писарев, 2020

uid products, e.g. bio-oil, and gaseous products, i.e. synthesis gas), for example, from biomass with different chemical composition and physical properties. The equipment can process "complex" types of waste characterized mainly by high moisture and high ash content. During tests of the pilot plant, the complexity of stabilizing the parameters of technological processes and ensuring the stability and reliability of operation of the equipment of the complex as a whole were identified. This is especially important when implementing high-temperature modes of biomass processing. In order to primarily solve these most important tasks, an automatic control system of the plant is being created.

When a system for automatic control of technological parameters of the gas-air path of the pilot-industrial plant is developed, a mathematical model that describes the dynamic characteristics of the gas and air paths under various throughput rates of the plant was used. When determining mathematical models, a two-way relationship between the gas path and air path was identified (interchannel connections).

When technologically complex real objects of control are being automated, in the inaccuracy of a priori information about the object, when the system operates in various uncertain external and internal situations, disturbing influences, a robust control method should be used. PID controllers were selected as corrective devices for stabilizing the technological parameters that characterize the operation mode of the gas-air path of the plant including pressure in the lower part and rarefaction in the upper part of the combustion chamber. The most appropriate method for determining the PID controller settings has been elected.

Synthesis and simulation of the operation of the controllers of the pressure in the lower part and rarefaction in the upper part of the combustion chamber are performed. Basing on the results of mathematical modeling, the efficiency of the controllers of the pressure in the lower part and the rarefaction in the upper part of the combustion chamber for various loads of the plant has been shown, and their stability reserves by amplitude and phase are determined. The results of mathematical modeling of the stabilization contours of the technological parameters of the gas-air path of the plant are presented for two cases: without inter-channel connections and without the account of these connections. A simulation of the joint operation of the control circuits of the gas-air path of the plant is performed. Compensators for adjacent (interchannel) connections of the gas and air paths of the plant have been developed. The advantage of the proposed automation schemes is shown.

Keywords

automated control system, synthesis of an automatic controller, linearization, modeling of automatic control system, controller of general air, controller of rarefaction, robustness, stability factor, the organic waste processing plant.

For citation

Shakirov S. R., Kvashnin A. G., Pisarev A. V. Synthesis of Automatic Control Systems for Technological Processes of the Gas-Air Path of the Organic Waste Processing Plant. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2020, vol. 18, no. 4, p. 86–105. (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2020-18-4-86-105

Введение

В данной работе представлены результаты синтеза регуляторов газовоздушного тракта установки переработки органических отходов: регулятора общего воздуха, регулятора разрежения. Ранее авторами данной работы был выполнен синтез регуляторов тепловой нагрузки установки [1] и производительности вихревой сушилки [2].

Одной из особенностей, выявленной при испытаниях экспериментального образца установки, является большой диапазон изменения свойств сырья (концентрация органики, зольность, влажность, температура) и соответственно, нестационарность рабочих параметров узлов и агрегатов [3]. Для эффективного управления параметрами установки по переработке органических отходов необходима разработка всережимных регуляторов [3].

В работе [4] показана необходимость создания всережимных регуляторов для управления работой газовоздушного тракта установки. Статические характеристики газовоздушного тракта установки [5], как и большинства реальных объектов регулирования, являются нелинейными [6]. Однако в силу того, что решение нелинейных уравнений (при анализе и синтезе контуров автоматического регулирования) значительно сложнее линейных, а иногда и вообще невозможно в аналитической форме, эти уравнения стремятся линеаризовать. При этом реальная нелинейная статическая характеристика объекта регулирования заменяется линейной, а начало координат переносится в рабочую точку [6]. В этом случае объект регулирования рассматривается в окрестности рабочей точки при малых (ограниченных) отклонениях частот вращения дутьевого вентилятора и дымососа. Отказ от линеаризации нелинейных статических характеристик объектов регулирования газовоздушного тракта при синтезе регуля-

торов позволил исследовать их работу во всех режимах работы установки, так как реальная статическая характеристика объекта регулирования рассматривается во всем диапазоне частот вращения дутьевого вентилятора и дымососа.

Математическая модель газовоздушного тракта установки

Условно установка может быть разделена на тракты: топливный и газовоздушный. Газовый тракт установки служит для удаления дымовых газов, образовавшихся в процессе окисления топлива в камере сжигания. Воздушный тракт установки необходим для подачи воздуха в камеру сжигания установки. К оборудованию газового и воздушного тракта относятся воздуховоды, газоходы, камера сгорания, сушилка. Движение воздуха и газов происходит вследствие перепада давлений, которое создается тяго-дутьевыми машинами: вентилятором и дымососом. Вентилятор нагнетает воздух и создает избыточное давление. Дымосос удаляет уходящие газы, создавая разрежение.

Для управления тяго-дутьевым режимом установки необходимо стабилизировать два технологических параметра: давление в нижней части камеры сгорания p_{comb}^{air} и разрежение в верхней части камеры сжигания p_{comb}^{gas} .

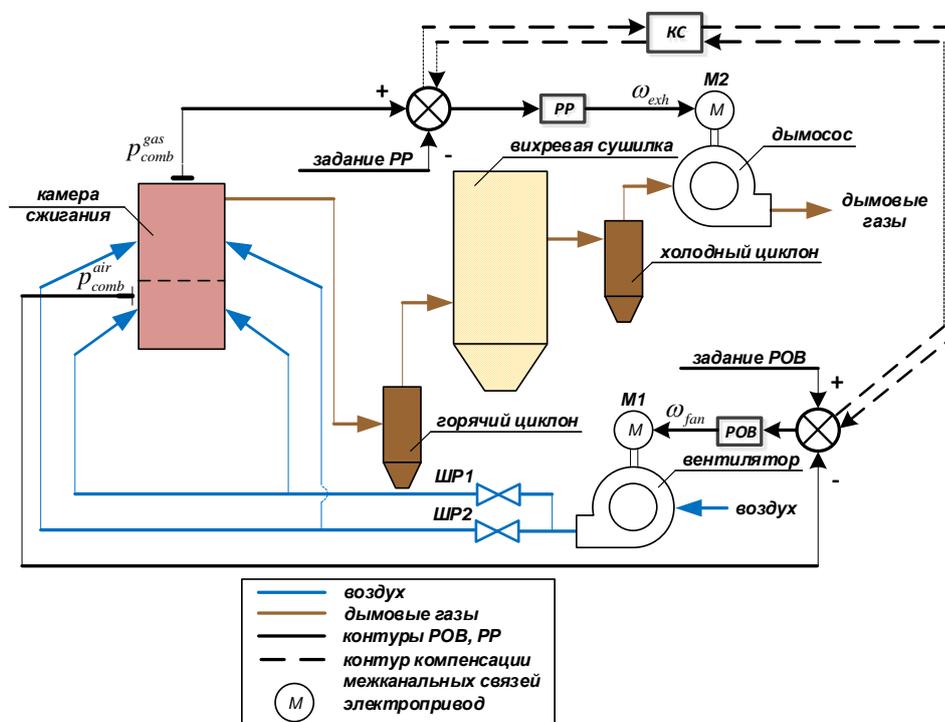


Рис. 1. Схема газовоздушного тракта установки переработки органических отходов

Fig. 1. Flow chart of the gas-air path of the organic waste processing plant

ω_{fan}, c^{-1} – частота вращения дутьевого вентилятора (ДВ); ω_{exh}, c^{-1} – частота вращения дымососа (ДС); ROV – регулятор общего воздуха; PP – регулятор разрежения; KC – компенсатор межканальных связей ROV и PP; M1 – частотно-регулируемый привод (ЧРП) вентилятора; M2 – частотно-регулируемый привод дымососа; ШР1, ШР2 – шиберы регулирующие.

На рис. 1 изображены контуры РОВ и РР. Контуры РОВ и РР получают сигналы обратной связи по давлению воздуха в нижней части камеры сжигания и разрежения в верхней части камеры сжигания и воздействуют на частоту вращения электродвигателя (ЭД) ДВ и ДС.

Для разработки систем автоматического регулирования используются математические модели, которые описывают динамические характеристики газового и воздушного трактов (ГВТ) при разных нагрузках [1] и различных режимах работы установки [7]. Для воздушного тракта установки по каналу «давление на напоре дутьевого вентилятора – давление воздуха в нижней части камеры сжигания» передаточная функция будет иметь вид [7]

$$W_{air}(s) = \frac{p_{comb}^{air}}{p_{fan}} = \frac{k_{air}}{T_{air}s + 1}, \quad (1)$$

где

k_{air} – коэффициент усиления передаточной функции (1);

T_{air} , с – постоянная времени передаточной функции (1);

p_{comb}^{air} , Па – давление воздуха в нижней части камеры сжигания;

p_{fan} , Па – давление на напоре дутьевого вентилятора;

s – оператор Лапласа.

Для газового тракта установки по каналу «разрежение на всасе дымососа – разрежение в верхней части камеры сжигания» передаточная функция будет иметь вид [7]

$$W_{gas}(s) = \frac{p_{comb}^{gas}}{p_{exh}} = \frac{-k_{gas.1}k_{gas.2}k_{gas.3}}{(T_{gas.1}s + 1)(T_{gas.2}s + 1)(T_{gas.3}s + 1)}, \quad (2)$$

где

$k_{gas.1}$, $T_{gas.1}$, с – коэффициент усиления, постоянная времени 1-го участка газового тракта установки (камера сжигания – сушилка);

$k_{gas.2}$, $T_{gas.2}$, с – коэффициент усиления, постоянная времени 2-го участка газового тракта установки (сушилка);

$k_{gas.3}$, $T_{gas.3}$, с – коэффициент усиления, постоянная времени 3-го участка газового тракта установки (сушилка – дымосос);

p_{comb}^{gas} , Па – разрежение в верхней части камеры сжигания;

p_{exh} , Па – разрежение на всасе дымососа.

Величины p_{fan} и p_{exh} в выражениях (1) и (2) определяется по формуле [5]

$$p_{fan/exh} = k_{fan/exh}^p \omega_{fan/exh}^2, \quad (3)$$

где

$k_{fan/exh}^p$ – коэффициент взаимосвязи параметров дутьевого вентилятора (дымососа) по каналу «частота вращения – давление (разрежение) на стороне нагнетания (всаса)»;

$\omega_{fan/exh}$, с⁻¹ – частота вращения дутьевого вентилятора / дымососа.

Частотно-регулируемые приводы ДВ и ДС по каналам «задание ЧРП частоты вращения – текущая частота вращения электродвигателя ДВ/ДС» описываются передаточными функциями вида [8]:

$$W_{VFD}^{rov/rr}(s) = \frac{\omega_{motor\ fan/exh}^{VFD\ rov/rr}}{\omega_{set\ fan/exh}^{VFD\ rov/rr}} = \frac{k_{VFD}^{rov/rr}}{T_{VFD}^{rov/rr}s + 1}, \quad (4)$$

где

$k_{VFD}^{rov/rr}$ – коэффициент усиления ЧРП РОВ/РР;

$T_{VFD}^{rov/rr}$, с – постоянная времени ЧРП РОВ/РР.

Принимаем типовое значение времени разгона для частотных преобразователей электродвигателей $T_{VFD}^{rov} = T_{VFD}^{rr} = 2$ с [8]. Коэффициент усиления ЧРП РОВ/РР равен $k_{VFD}^{rov} = k_{VFD}^{rr} = 1$.

Параметры передаточной функции (1) зависят от нагрузки и режима работы установки [7] и определяются частотой вращения ДВ ω_{fan} , а для (2) – частотой вращения ДС ω_{exh} [7]. Произведение $k_{gas.1}k_{gas.2}k_{gas.3}$ в расчетах принято равным $-0,97$, так как определено для нагрузки, при которой установка работает наибольшее количество времени [7].

Передаточные функции объектов регулирования (1) и (2) определены для случая, когда воздушный и газовый тракты установки рассматриваются отдельно и использовались для синтеза корректирующих устройств.

При определении математических моделей была выявлена двухсторонняя взаимосвязь газового и воздушного трактов [7]. Передаточные функции, описывающие межканальные связи воздушного и газового трактов установки имеют вид [7]:

– по каналу «давление воздуха в нижней части камеры сжигания – разрежение в верхней части камеры сжигания»:

$$W_p^{air-gas}(s) = \frac{P_{comb}^{air}}{P_{comb}^{gas}} = \frac{k_p^{air-gas}}{T_p^{air-gas}s + 1}, \quad (5)$$

где $k_p^{air-gas}$, $T_p^{air-gas}$, с – коэффициент усиления, постоянная времени передаточной функции $W_p^{air-gas}(s)$;

– по каналу «разрежение в верхней части камеры сжигания – давление воздуха в нижней части камеры сжигания»:

$$W_p^{gas-air}(s) = \frac{P_{comb}^{gas}}{P_{comb}^{air}} = \frac{k_p^{gas-air}}{T_p^{gas-air}s + 1}, \quad (6)$$

где $k_p^{gas-air}$, $T_p^{gas-air}$, с – коэффициент усиления, постоянная времени передаточной функции $W_p^{gas-air}(s)$.

Для передаточной функции (5) $k_p^{air-gas} = 1$, а $T_p^{air-gas}$ изменяется в диапазоне [7] от 8,2 до 1,6 с при частотах вращения ДС от 62,8 с⁻¹ до 314 с⁻¹. Для передаточной функции (6) $k_p^{gas-air} = -1$, а $T_p^{gas-air}$ изменяется в диапазоне [7] от 9,32 до 1,56 с при частотах вращения ДВ от 52,6 с⁻¹ до 314 с⁻¹.

Синтез АСР газовоздушного тракта установки

При моделировании и автоматизации технологически сложных реальных объектов автоматического управления в условиях отсутствия, неопределенности или неточности априорной информации об объекте, когда система функционирует в условиях возникновения различных неопределенных внешних и внутренних ситуаций применяются робастные алгоритмы управления. Неопределенность обуславливается наличием не только неизвестных постоянных параметров и может быть вызвана множеством других факторов, например:

- неточностью используемой модели объекта;
- наличием шума измерения;
- внешними возмущающими воздействиями;
- ошибками округления, возникающими при использовании цифровых устройств;
- изменениями параметров во времени.

Все неучтенные факторы, обуславливающие неопределенность, могут рассматриваться как возмущения. Любая система функционирует в условиях действия всех или части указанных выше возмущающих факторов. Поэтому пригодные на практике системы управления должны обладать свойством робастности (грубости), т. е. их свойства не должны качественно изменяться при наличии не очень больших возмущений [9].

Технологии синтеза робастных регуляторов представлены в [9–11]. В работах [12; 13] выполняется синтез регуляторов заданной структуры 1–2 порядка (ПИ-, ПИД-, ИД-регуляторов) с оптимизацией настроек по H^∞ -критерию или по критерию максимальной робастности. Эти задачи не имеют аналитического решения, и предлагается применять численные методы. В [12; 13] обсуждаются недостатки методов синтеза регуляторов на основе H^∞ -теории (высокий порядок оптимального регулятора, отсутствие робастности по отношению к отклонениям коэффициентов регулятора). В работах [12; 13] показана робастность регуляторов заданной структуры. Кроме того, вид объекта регулирования РОВ (передаточная функция (1) и уравнение (3)) и РР (передаточная функция (2) и уравнение (3)) предполагает использование ПИД-регуляторов в качестве корректирующих устройств в контурах обратной связи [2].

В работах [14] представлен метод синтеза робастного ПИД-регулятора путем определения оптимальных значений коэффициентов характеристического уравнения замкнутого контура АСР, в монографии [15] с использованием корневого годографа.

Способ итерационного поиска оптимальных по степени устойчивости настроек ПИД-регуляторов представлен в работе [15]. Способ основан на методе D-разбиения. Выделяется область, которой соответствуют характеристические полиномы замкнутой системы управления, не имеющие корней в правой полуплоскости комплексной плоскости. С помощью итерационных процедур эта область сжимается в точку и для неё определяются значения максимальной степени устойчивости и параметры настройки ПИД-регулятора.

В работе [16] приведен 1731 метод настройки ПИД-регуляторов. Большинство методов настройки ПИД-регуляторов разработано для объектов регулирования, описываемых передаточной функцией, состоящей из двух апериодических звеньев со звеном транспортного запаздывания или без него [17–19].

Для синтеза корректирующих устройств РОВ, РР был выбран метод, представленный в [14], который позволяет определять с помощью аналитических выражений параметры настройки робастного ПИД-регулятора для объектов регулирования, описываемых 3-мя последовательно соединенными апериодическими звеньями. Для объектов регулирования РОВ и РР это позволяет более точно определять параметры настройки ПИД-регулятора. Поскольку алгоритмы определения параметров настройки ПИД-регулятора, приведенные в [14], разработаны для передаточной функцией, описываемой 3-мя апериодическими звеньями, то при синтезе РР выполнялось понижение порядка передаточной функции ОР с использованием алгоритмов, приведенных в [15].

Для компенсации нелинейности объекта регулирования (уравнение (3)) в состав регулятора вводится нелинейный элемент (НЭ) со статической характеристикой, описываемой уравнением вида

$$y = \sqrt{x}, \quad x \geq 0, \quad (7)$$

где x – вход НЭ; y – выход НЭ.

Это позволяет отказаться от линеаризации в окрестности рабочей точки объекта регулирования [20]. В этом случае при моделировании контуров АСР общего воздуха и разрежения установки:

– коэффициент усиления объекта регулирования по каналу «частота вращения ДВ/ДС – давление/разрежение на стороне нагнетания/всаса ДВ/ДС» будет равен:

$$k'_{fan/exh} = \frac{P_{fan/exh}}{\omega_{fan/exh}};$$

– ЧРП описывается передаточной функцией вида:

$$W_{VFD}^{rov/rr}(s) = \frac{\omega_{motor\ fan/exh}^{VFD\ rov/rr}}{\omega_{set\ fan/exh}^{VFD\ rov/rr}} = \left(\frac{k_{VFD}^{rov/rr}}{T_{VFD}^{rov/rr} s + 1} \right)^2. \quad (8)$$

Числовые значения коэффициентов составили: $k_{fan}^{I\ P} = 9,24$, $k_{exh}^{I\ P} = 6,687$.

Для РР при понижении порядка передаточной функции ОР два апериодических звена (8), описывающие ЧРП РР, заменялись одним с удвоенной постоянной времени [21].

На рис. 2 представлены контуры АСР общего воздуха и разрежения установки (изображены на одном рисунке, т.к. являются идентичными) и показаны: регуляторы (корректирующие устройства), регулируемые параметры, исполнительные механизмы (управляющие воздействия).

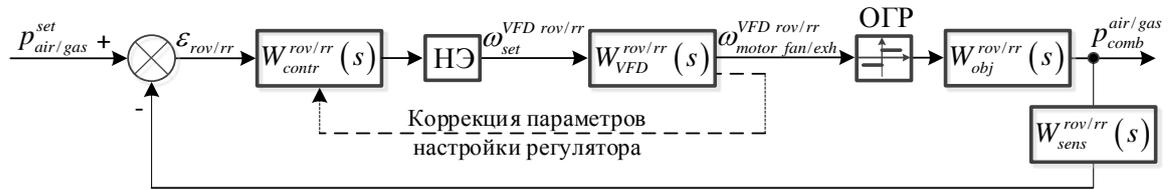


Рис. 2. Структурные схемы АСР общего воздуха / разрежения установки переработки органических отходов
Fig. 2. Flow chart of the ACS of the general air / rarefaction of the organic waste processing plant

$P_{air/gas}^{set}$, Па – сигнал задающего воздействия РОВ/РР; $\epsilon_{rov/rr}$, Па – сигнал рассогласования РОВ/РР; $\omega_{set}^{VFD\ rov/rr}$, c^{-1} – частота вращения дутьевого вентилятора/дымососа – выход регулятора; $\omega_{motor\ fan/exh}^{VFD\ rov/rr}$, c^{-1} – частота вращения дутьевого вентилятора/дымососа – выход ЧРП; $P_{comb}^{air/gas}$, Па – «давление в нижней части камеры сжигания (КС)»/«разрежение в КС»; ОГР – звено ограничения сигнала; $W_{contr}^{rov/rr}(s)$ – передаточная функция корректирующего устройства РОВ/РР; $W_{VFD}^{rov/rr}(s)$ – передаточная функция ЧРП; $W_{obj}^{rov/rr}(s)$ – передаточная функция ОР РОВ/РР; $W_{sens}^{rov/rr}(s)$ – передаточная функция датчика давления, НЭ – нелинейный элемент, описываемый уравнением (7).

Передаточная функция объекта регулирования для воздушного тракта установки $W_{obj}^{rov}(s)$ представляет собой последовательное соединение уравнения (3) и передаточных функций (1) и (8), а для газового $W_{obj}^{rr}(s)$ – уравнения (3) и передаточных функций (2) и (8).

Датчик давления РОВ/РР описывается передаточной функцией: $W_{sens}^{rov/rr}(s) \approx 1$.

В качестве корректирующего устройства РОВ/РР используется ПИД-регулятор, который описывается передаточной функцией вида [14]:

$$W_{contr}^{rov/rr}(s) = W_{PID}^{rov/rr}(s) = k_P^{rov/rr} + \frac{k_I^{rov/rr}}{s} + \frac{k_D^{rov/rr} T_D^{rov/rr} s}{T_f^{rov/rr} s + 1},$$

где $k_P^{rov/rr}$, $k_I^{rov/rr}$, $k_D^{rov/rr}$ – коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих (соответственно);

$T_f^{rov/rr}$, $T_D^{rov/rr}$, с – для дифференциальной составляющей: постоянные времени фильтра и дифференцирования (соответственно).

При расчетах и моделировании были приняты: $T_f^{rov/rr} = 0,1$ с, $T_D^{rov/rr} = 1$ с.

Параметры настройки ПИД-регуляторов РОВ/РР $k_p^{rov/rr}$, $k_i^{rov/rr}$, $k_D^{rov/rr}$ были определены методом, приведенным в [14]. Выполняется корректировка параметров настройки в зависимости от частоты вращения ДВ/ДС (соответственно) $\omega_{motor\ fan/exh}^{VFD\ rov/rr}$, что соответствует разным нагрузкам установки (рис. 2).

Моделирование работы РОВ, РР без взаимного влияния друг на друга

Выполнено моделирование работы замкнутых контуров РОВ, РР в предположении, что воздушный и газовый тракты установки рассматриваются отдельно и с отключенными межканальными связями. Данные режимы работы ГВТ установки являются теоретическими (не возникают при работе реальной установки) [7] и рассматриваются только при моделировании работы замкнутых контуров РОВ, РР. Это сделано для того, чтобы исследовать работу замкнутых контуров РОВ, РР без взаимного влияния друг на друга.

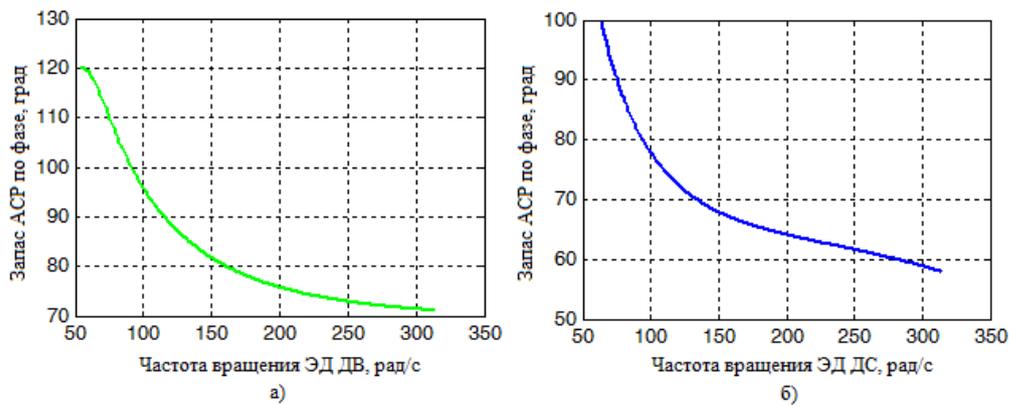


Рис. 3. График изменения запаса устойчивости АСР по фазе:
а – для РОВ; б – для РР

Fig. 3. Chart of changes of stability margin by phase of the ACS:
a – controller of general air; b – controller of rarefaction

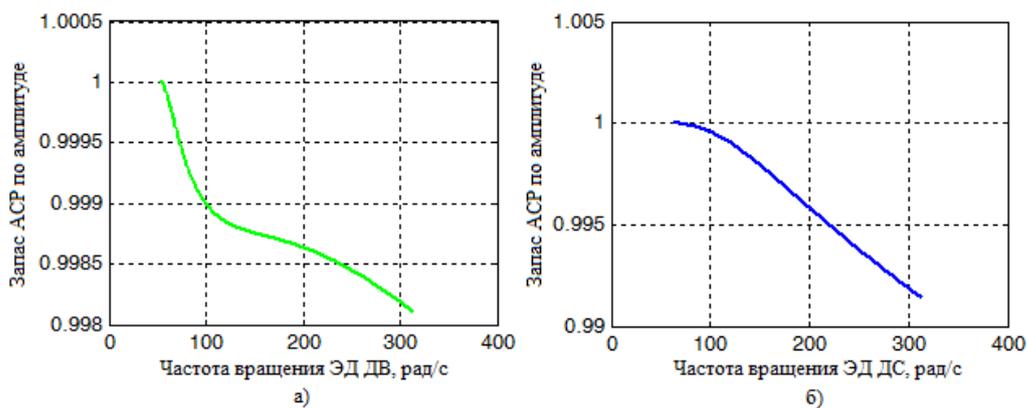


Рис. 4. График изменения запаса устойчивости АСР по амплитуде:
а – для РОВ; б – для РР

Fig. 4. Chart of changes of stability margin by amplitude of the ACS:
a – controller of general air; b – controller of rarefaction

При проектировании систем управления принимаются запасы устойчивости:

- по фазе не менее: $\varphi_{res} = 30 \div 60^\circ$ [22];
- по усилению (амплитуде) не менее: $\gamma_{res} = 0,5 \div 0,9$ [23].

Приведенные на рис. 3, 4, графики изменения запаса устойчивости для РОВ и РР по фазе и амплитуде удовлетворяют требованиям, предъявляемым к системам управления. Диапазон частот вращения выбран для ДВ, ДС от пусковых [3] до максимальных. Для ЭД ДВ – от 52,6 до 314 с⁻¹, для ДС – от 62,8 до 314 с⁻¹.

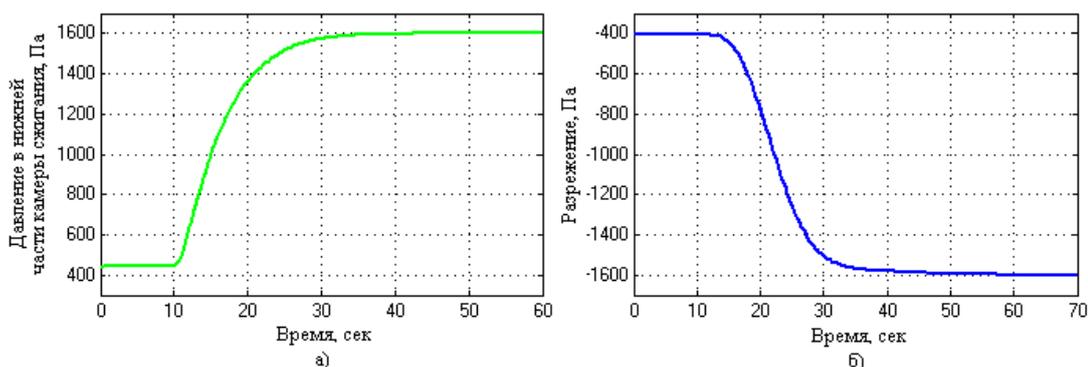


Рис. 5. Переходные процессы в замкнутом контуре:
а – для РОВ; б – для РР

Fig. 5. Transient processes in a closed loop:
a – controller of general air; b – controller of rarefaction

В момент времени 10 секунд задание регулятору общего воздуха (рис. 5) было изменено с 438,52 Па до 1600 Па, регулятору разрежения (рис. 5) – с –407,4 до –1600 Па. Частота вращения ЭД ДВ изменилась с 52,6 до 182,3 с⁻¹, для ДС – с 62,8 до 246,7 с⁻¹.

Параметры переходных процессов (см. рис. 5), приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры качества переходных процессов
в замкнутых контурах РОВ, РР

Table 1

Quality parameters of transients in closed loop of controller
of general air or controller of rarefaction

	Показатели качества переходного процесса	
	σ , %	t_{tr} , с
РОВ	0	20
РР	0	25

Обозначения в табл. 1: σ – величина перерегулирования переходного процесса, t_{tr} – время переходного процесса.

Показатели качества переходных процессов, полученные для РОВ и РР, при частотах вращения ЭД ДВ от 52,6 до 182,3 с⁻¹ и ЭД ДС – от 62,8 до 246,7 с⁻¹, приведенные на рис. 5, удовлетворяют требованиям, предъявляемым к переходным процессам: получение гранично-

го апериодического [24] или колебательного переходного процесса с величиной перерегулирования $\sigma \leq 20\%$ [25].

Моделирование работы связанных АСР газовоздушного тракта установки

Передаточные функции объектов регулирования $W_{12}(s)$, $W_{21}(s)$, определяющие влияние регулирующего воздействия ω_{exh} на регулируемую величину p_{comb}^{air} и влияние регулирующего воздействия ω_{fan} на регулируемую величину p_{comb}^{gas} определяются как последовательное соединение передаточных функций:

- для $W_{12}(s)$: уравнения (3) и передаточных функций (1), (5);
- для $W_{21}(s)$: уравнения (3) и передаточных функций (2), (6).

Структурная схема при двухстороннем влиянии регулирующих воздействий газового и воздушного трактов установки показана на рис. 6. Отрицательное влияние большого числа замкнутых контуров в многомерных системах на их устойчивость и связанная с этим сложность проектирования, наладки и эксплуатации заставляют искать способы устранения взаимного влияния (развязывания) контуров друг на друга, или сведения этого влияния к возможному минимуму [26; 27].

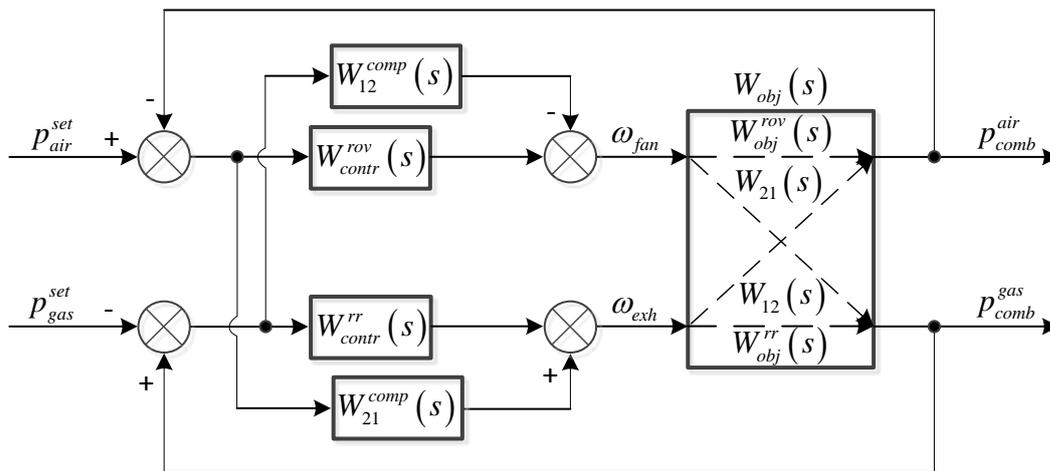


Рис. 6. Структурная схема регулирования объекта с двумя регулируемыми величинами при двухстороннем влиянии регулирующих воздействий

Fig. 6. Flow chart of the control of an object with two adjustable values under the two-way influence of regulatory actions

$W_{obj}(s)$ – газовоздушный тракт установки, как объект регулирования;

$W_{12}^{comp}(s)$, $W_{21}^{comp}(s)$ – передаточные функции компенсаторов взаимного влияния каналов $W_{obj}^{rov}(s)$ и $W_{obj}^{rr}(s)$ через объект регулирования.

В работе [28] приведены условия обеспечения статической и динамической автономности замкнутых контуров регулирования. Статическая автономность обеспечивается применением астатических законов регулирования и равенством постоянных времени ЧРП: $T_{VFD}^{rov} = T_{VFD}^{rr}$.

Динамическая автономность обеспечивается применением компенсаторов взаимного влияния каналов, которые описываются передаточными функциями:

$$W_{21}^{comp}(s) = \frac{W_{contr}^{rov}(s)W_{21}(s)}{W_{obj}^{rov}(s)}, \quad (9)$$

$$W_{12}^{comp}(s) = \frac{W_{contr}^{rr}(s)W_{12}(s)}{W_{obj}^{rr}(s)}. \quad (10)$$

Выполним моделирование совместной работы замкнутых контуров регулирования разрежения и общего воздуха установки.

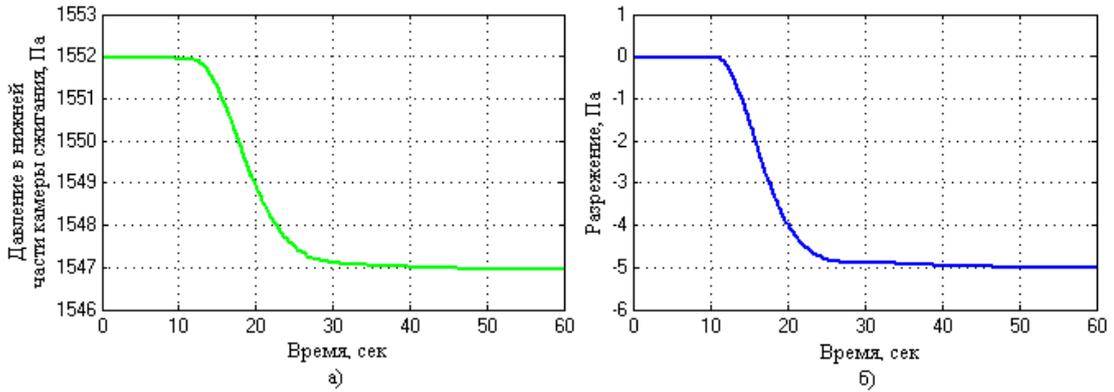


Рис. 7. Переходные процессы при двухсторонних связях между p_{comb}^{air} и p_{comb}^{gas} и отключенных компенсаторах взаимного влияния каналов (9), (10):
 а – для РОВ в режиме «дистанция» (с отключенной обратной связью);
 б – для РР при изменении задания с 0 до –5 Па

Fig. 7. Transients by two-way relationships between p_{comb}^{air} and p_{comb}^{gas} and the disabled compensators for the mutual influence of channels (9), (10):
 а – for controller of general air in the “distance” mode (with feedback disabled);
 б – for controller of rarefaction when changing the setpoint from 0 to –5 Pa

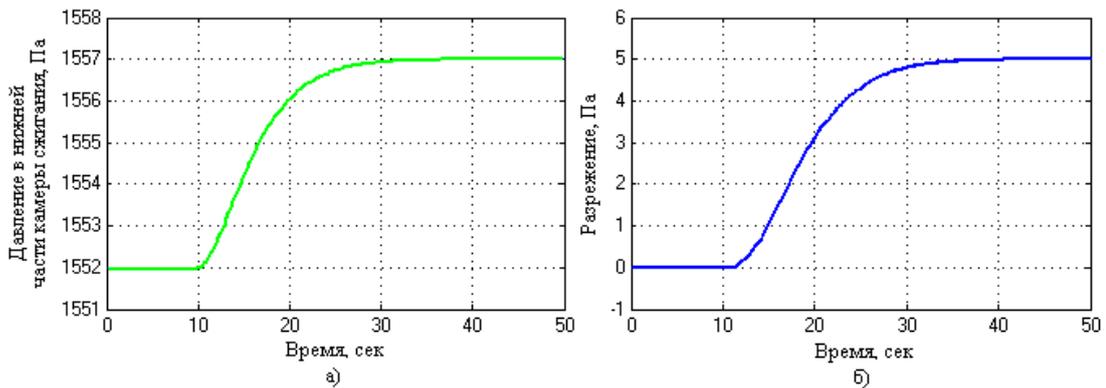


Рис. 8. Переходные процессы при двухсторонних связях между p_{comb}^{air} и p_{comb}^{gas} и отключенных компенсаторах взаимного влияния каналов (9), (10):
 а – для РОВ при изменении задания с 1552 до 1557 Па;
 б – для РР в режиме «дистанция» (с отключенной обратной связью)

Fig. 8. Transients by two-way relationships between p_{comb}^{air} and p_{comb}^{gas} and the disabled compensators for the mutual influence of channels (9), (10):
 а – for controller of general air when changing the setpoint from 1552 to 1557 Pa;
 б – for controller of rarefaction in the “distance” mode (with feedback disabled)

На рис. 7 и 8 показано двухстороннее влияние между p_{comb}^{air} и p_{comb}^{gas} . Величина влияния на основной параметр равна изменению смежного.

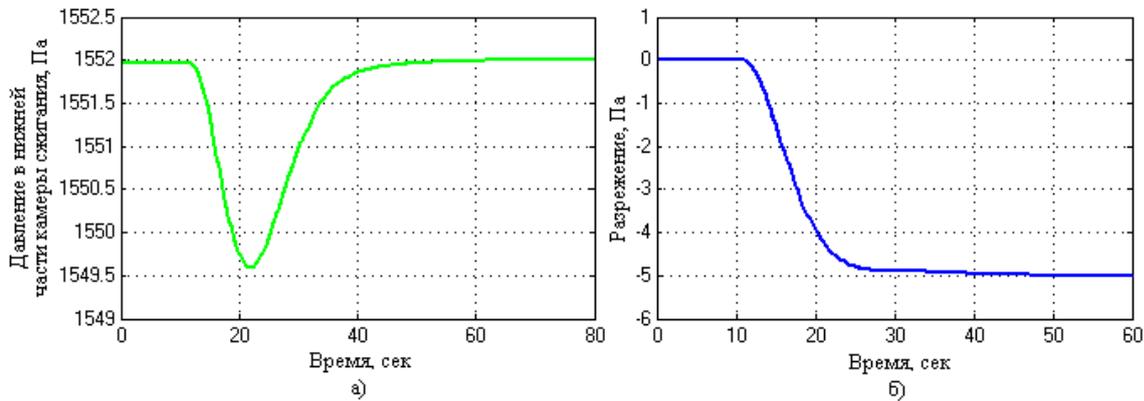


Рис. 9. Переходные процессы при двухсторонних связях между p_{comb}^{air} и p_{comb}^{gas}

и отключенных компенсаторах взаимного влияния каналов (9), (10):

a – для РОВ в режиме «автомат» (с включенной обратной связью) и неизменным заданием (1552 Па);

b – для РР при изменении задания с 0 до –5 Па

Fig. 9. Transients by two-way relationships between p_{comb}^{air} and p_{comb}^{gas}

and the disabled compensators for the mutual influence of channels (9), (10):

a – for controller of general air in the “automatic” mode (with feedback enabled)

and with an unchanged setpoint (1552 Pa); *b* – for controller of rarefaction

when changing the setpoint from 0 to –5 Pa

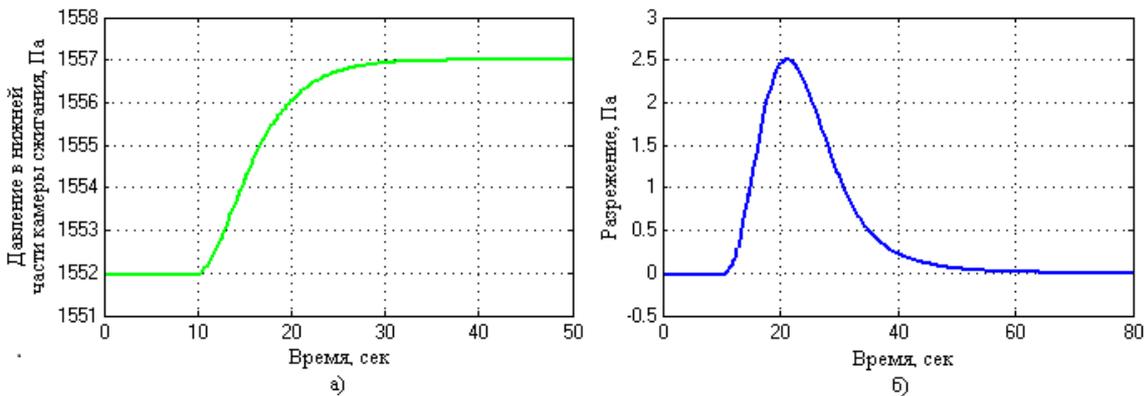


Рис. 10. Переходные процессы при двухсторонних связях между p_{comb}^{air} и p_{comb}^{gas}

и отключенных компенсаторах взаимного влияния каналов (9), (10):

a – для РОВ при изменении задания с 1552 до 1557 Па;

b – для РР в режиме «автомат» (с включенной обратной связью) и неизменным заданием (0 Па)

Fig. 10. Transients by two-way relationships between p_{comb}^{air} and p_{comb}^{gas}

and the disabled compensators for the mutual influence of channels (9), (10):

a – for controller of general air when changing the setpoint from 1552 to 1557 Pa;

b – for controller of rarefaction in the “automatic” mode (with feedback enabled)

and with an unchanged setpoint (0 Pa)

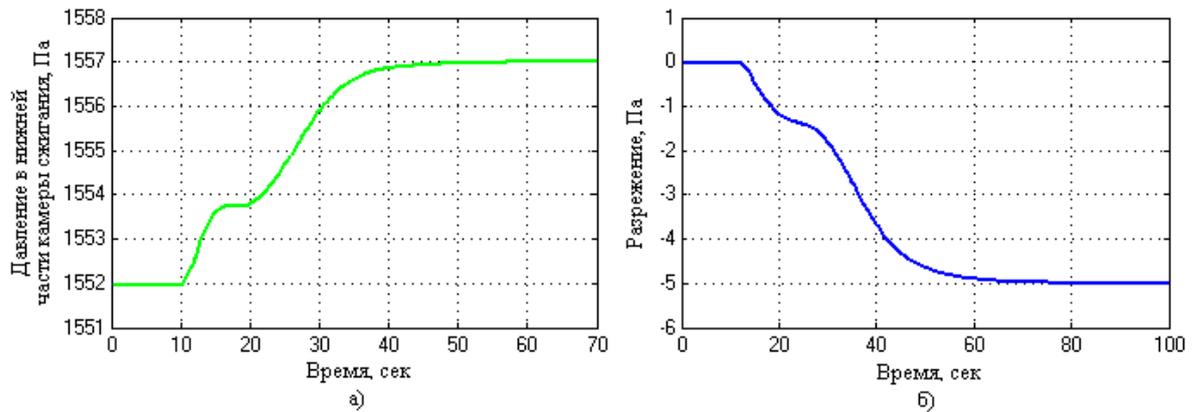


Рис. 11. Переходные процессы при двухсторонних связях между p_{comb}^{air} и p_{comb}^{gas}

и отключенных компенсаторах взаимного влияния каналов (9), (10):

a – для РОВ при изменении задания с 1552 до 1557 Па;

b – для РР при изменении задания с 0 до –5 Па

Fig. 11. Transients by two-way relationships between p_{comb}^{air} and p_{comb}^{gas}

and the disabled compensators for the mutual influence of channels (9), (10):

a – for controller of general air when changing the setpoint from 1552 to 1557 Pa;

b – for controller of rarefaction when changing the setpoint from 0 to –5 Pa

На рис. 9–11 показано, что при отключенных компенсаторах взаимного влияния каналов (9), (10) воздействия по смежным каналам воспринимаются как возмущения, которые отрабатываются контуром обратной связи РОВ, РР.

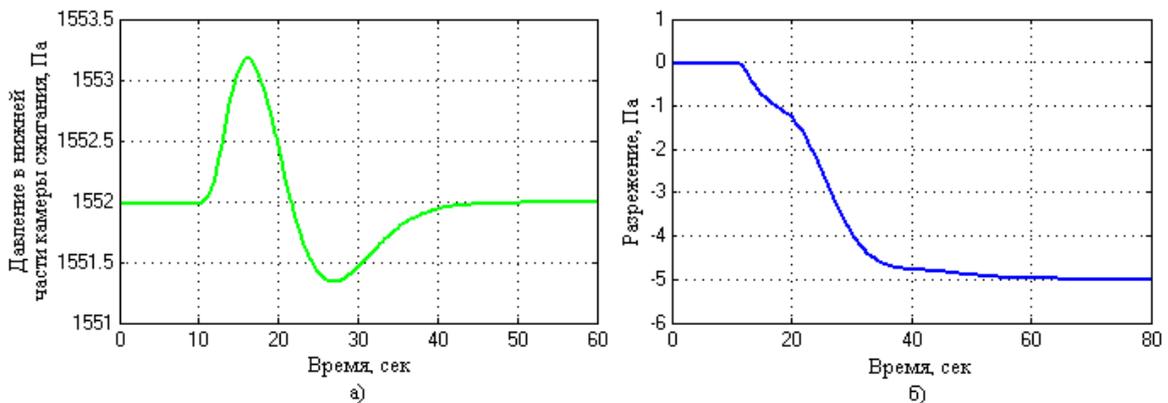


Рис. 12. Переходные процессы при двухсторонних связях между p_{comb}^{air} и p_{comb}^{gas}

и включенных компенсаторах взаимного влияния каналов (9), (10):

a – для РОВ в режиме «автомат» (с включенной обратной связью) и неизменным заданием (1552 Па);

b – для РР при изменении задания с 0 до –5 Па

Fig. 12. Transients by two-way relationships between p_{comb}^{air} and p_{comb}^{gas}

and the enabled compensators for the mutual influence of channels (9), (10):

a – for controller of general air in the “automatic” mode (with feedback enabled)

and with an unchanged setpoint (1552 Pa); *b* – for controller of rarefaction

when changing the setpoint from 0 to –5 Pa

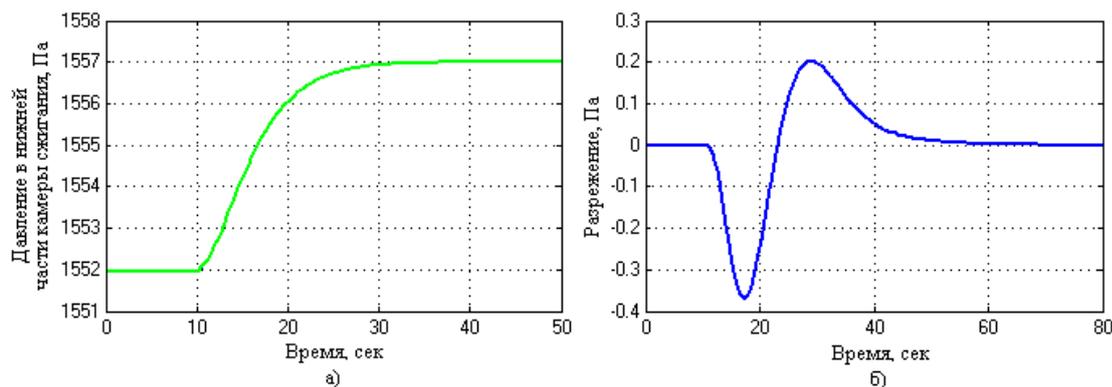


Рис. 13. Переходные процессы при двухсторонних связях между p_{comb}^{air} и p_{comb}^{gas} и включенных компенсаторах взаимного влияния каналов (9), (10):
 а – для РОВ при изменении задания с 1552 до 1557 Па;
 б – для РР в режиме «автомат» (с включенной обратной связью) и неизменным заданием (0 Па)

Fig. 13. Transients by two-way relationships between p_{comb}^{air} and p_{comb}^{gas} and the enabled compensators for the mutual influence of channels (9), (10):
 а – for controller of general air when changing the setpoint from 1552 to 1557 Pa;
 б – for controller of rarefaction in the “automatic” mode (with feedback enabled) and with an unchanged setpoint (0 Pa)

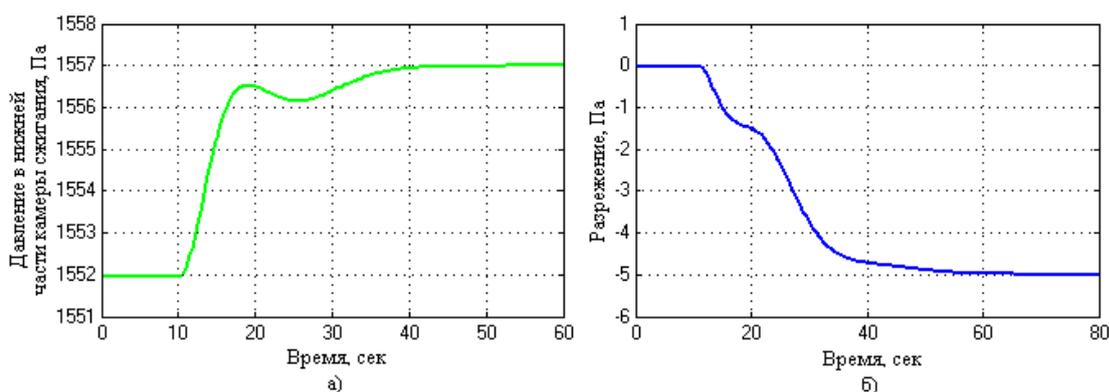


Рис. 14. Переходные процессы при двухсторонних связях между p_{comb}^{air} и p_{comb}^{gas} и включенных компенсаторах взаимного влияния каналов (9), (10):
 а – для РОВ при изменении задания с 1552 до 1557 Па;
 б – для РР при изменении задания с 0 до -5 Па

Fig. 14. Transients by two-way relationships between p_{comb}^{air} and p_{comb}^{gas} and the enabled compensators for the mutual influence of channels (9), (10):
 а – for controller of general air when changing the setpoint from 1552 to 1557 Pa;
 б – for controller of rarefaction when changing the setpoint from 0 to -5 Pa

На рис. 12–14 показано, что при включенных компенсаторах взаимного влияния каналов (9), (10) воздействия по смежным каналам воспринимаются РР, РОВ с предварением, опережая реакцию обратной связи основного контура. Нарушение инвариантности в динамических режимах вызвано неточностью инверсной математической модели в (9), (10) при реализации форсирующих звеньев.

Анализ переходных процессов при связной работе ГВТ установки, изображенных на рис. 7–14, приведен в табл. 2.

Таблица 2

Анализ переходных процессов при связной работе ГВТ установки

Table 2

Analysis of transients in the connected operation of the gas-air flow path of the plant

График переходного процесса	РОВ		РР	
	воздействие	реакция	воздействие	реакция
Компенсатор взаимного влияния каналов отключен				
Рис. 7	РР (межканальная связь)	отклонение p_{comb}^{air} с 1552 до 1547 Па	изменение задания с 0 до -5 Па	переходный процесс: $t_{tr} = 25$ с и $\sigma = 0$ %
Рис. 8	изменение задания с 1552 до 1557 Па	переходный процесс: $t_{tr} = 20$ с и $\sigma = 0$ %	РОВ (межканальная связь)	отклонение p_{comb}^{gas} с 0 до 5 Па
Рис. 9	РР (межканальная связь)	переходный процесс: $t_{tr} = 38$ с; $\Delta_{din} = 2,4$ Па; $\psi = 1$	изменение задания с 0 до -5 Па	переходный процесс: $t_{tr} = 25$ с и $\sigma = 0$ %
Рис. 10	изменение задания с 1552 до 1557 Па	переходный процесс: $t_{tr} = 20$ с и $\sigma = 0$ %	РОВ (межканальная связь)	переходный процесс: $t_{tr} = 50$ с; $\Delta_{din} = 2,5$ Па; $\psi = 1$
Рис. 11	изменение задания с 1552 до 1557 Па	переходный процесс: $t_{tr} = 40$ с и $\sigma = 0$ %	изменение задания с 0 до -5 Па	переходный процесс: $t_{tr} = 60$ с и $\sigma = 0$ %
Компенсатор взаимного влияния каналов включен				
Рис. 12	РР (межканальная связь)	переходный процесс: $t_{tr} = 30$ с; $\Delta_{din} = 1,2$ Па; $\psi = 1$	изменение задания с 0 Па до -5 Па	переходный процесс: $t_{tr} = 50$ с и $\sigma = 0$ %
Рис. 13	изменение задания с 1552 до 1557 Па	переходный процесс: $t_{tr} = 20$ с и $\sigma = 0$ %	РОВ (межканальная связь)	переходный процесс: $t_{tr} = 35$ с; $\Delta_{din} = -0,37$ Па; $\psi = 1$
Рис. 14	изменение задания с 1552 до 1557 Па	переходный процесс: $t_{tr} = 30$ с и $\sigma = 0$ %	изменение задания с 0 до -5 Па	переходный процесс: $t_{tr} = 45$ с и $\sigma = 0$ %

Обозначения в табл. 2: Δ_{din} – динамическая ошибка, ψ – степень затухания.

Критериями качества переходного процесса в режимах отработки возмущающих воздействий (рис. 9, а, 10, б, 12, а, 13, б) являлись: время переходного процесса t_{tr} ($t_{tr} \rightarrow \min$), динамическая ошибка Δ_{din} ($\Delta_{din} \rightarrow \min$), степень затухания ψ ($\psi = 0,95 \div 1$) [1].

При сравнении показателей переходных процессов, приведенных в Таблице 2, предпочтительным является вариант с включенными компенсаторами взаимного влияния каналов (9), (10) (см. рис. 12–14).

При выполнении условия автономности каждая регулируемая величина в системе реагирует только на «свое» задающее воздействие. Взаимная независимость отдельных управляемых величин максимально приближает работу замкнутых контуров РОВ, РР с имеющимися воздействиями по смежным каналам к теоретически возможным переходным процессам, приведенным на рис. 5 (без взаимного влияния друг на друга).

Заключение

1. Выполнены синтез робастных корректирующих устройств и моделирование работы регуляторов разрежения и общего воздуха газоздушного тракта установки переработки органических отходов для различных нагрузок.

2. По результатам математического моделирования показана работоспособность регуляторов общего воздуха и разрежения установки: сохраняются необходимые запасы устойчивости по амплитуде и фазе, и выполняются требования к качеству переходных процессов.

3. Выполнено моделирование связной работы контуров регулирования ГВТ установки. Разработаны компенсаторы смежных (межканальных) связей газового и воздушного трактов установки. Показано преимущество предлагаемых схем РОВ, РР.

Список литературы

1. Шакиров С. Р., Квашнин А. Г., Писарев А. В. Синтез нейро-нечеткого регулятора тепловой нагрузки установки переработки органических отходов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019. № 9. С. 54–62.
2. Шакиров С. Р., Квашнин А. Г., Писарев А. В. Моделирование работы адаптивной системы управления процессом сушки в установке утилизации органических отходов // Автометрия. 2018. № 5. С. 122–128.
3. Вильчек С. Ю., Квашнин А. Г., Сафронов А. В., Сторожев Ф. Н. Проблемы создания адаптивной системы управления энергетическим комплексом по переработке углеродосодержащих отходов // Индустриальные информационные системы – ИИС-2015. Всероссийская конференция с международным участием: Сб. тез. докл. Новосибирск, КТИ ВТ СО РАН, 2015. С. 15–16.
4. Вильчек С. Ю., Шакиров С. Р., Квашнин А. Г., Писарев А. В. Моделирование работы автоматизированной системы управления процессами переработки углеродосодержащих материалов // Индустриальные информационные системы – ИИС-2015. Всероссийская конференция с международным участием: Сб. тез. докл. Новосибирск, КТИ ВТ СО РАН, 2015. С. 14–15.
5. Ganapathy V. Steam Generators and Waste Heat Boilers: For Process and Plant Engineers. New York, CRC Press., 2014, 540 p.
6. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. СПб., Профессия, 2003. 752 с.
7. Квашнин А. Г., Писарев А. В., Шакиров С. Р. Разработка математической модели газоздушного тракта установки утилизации органических отходов // Наука. Технологии. Инновации: Сб. науч. тр. X Всерос. конф. Новосибирск, 2016. Ч. 1. С. 46–48.
8. Шакиров С. Р., Квашнин А. Г., Писарев А. В. Моделирование автоматической системы управления непрерывным дозированием сыпучих материалов // Вестник Вост.-Казахстан. гос. техн. ун-та им. Д. Серикабаева. 2018. Т. 1, № 3-1. С. 77–90.

9. **Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л.** Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 549 с.
10. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: Учебник / Под ред. Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 744 с.
11. Методы классической и современной теории автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. Т. 5: Методы современной теории автоматического управления. 784 с.
12. **Киселев О. Н., Поляк Б. Т.** Синтез регуляторов низкого порядка по критерию H^∞ и по критерию максимальной робастности // Автоматика и телемеханика. 1999. № 3. С. 119–130.
13. **Поляк Б. Т., Щербаков П. С.** Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002. 303 с.
14. **Ким Д. П.** Алгебраические методы синтеза систем автоматического управления. М.: Физматлит, 2014. 164 с.
15. **Дорф Р., Бишоп Р.** Современные системы управления / Пер. с англ. Б. И. Копылова. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. 832 с.
16. **Бобриков Н. М., Денисов И. К., Кузнецов С. И., Шубладзе А. М.** Автоматический поиск оптимальных по степени устойчивости настроек ПИ- и ПИД-регуляторов // Проблемы управления. 2009. № 2. С. 8–13.
17. **O'Dwyer A.** Handbook of PI and PID controller tuning rules. London, Imperial College Press, 2009, 623 p.
18. **Astrom K. J., Hagglund T.** Advanced PID control. ISA. The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006, 461 p.
19. **Востриков А. С., Французова Г. А.** Особенности синтеза ПИД-регулятора для нелинейного объекта второго порядка // Автометрия. 2019. Т. 55, № 4. С. 57–64.
20. **Прокопьев А. П., Иванчура В. И., Емельянов Р. Т., Скурихин Л. В.** Методика синтеза регуляторов для объектов второго порядка // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 3. С. 618–624.
21. **Пономарев А. А.** Разработка и исследование модернизированного многоканального ПД-регулятора для стабилизации режимов работы теплоэнергетического котла: Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2013. 122 с.
22. **Попов Н. Н.** ПИД-регулятор в системах автоматического регулирования: пособие для курсов. Кемерово: СУНЭТО, 1980. 56 с.
23. **Никулин Е. А.** Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем. СПб.: БХВ-Петербург, 2015. 632 с.
24. **Гайдук А. Р.** Теория автоматического управления. М.: Высш. шк., 2010. 416 с.
25. **Писарев А. В.** Экспериментальный пошаговый метод настройки ПИД-регуляторов // Энергетик. 2018. № 10. С. 15–17.
26. Методы классической и современной теории автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. Т. 1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления. 656 с.
27. **Ротач В. Я.** Теория автоматического управления: Учебник для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: ИД МЭИ, 2008. 396 с.
28. **Иванов В. А.** Развитие теории автономности регулирования энергетических агрегатов // Изв. РАН. Энергетика. 1999. № 3. С. 79–89.
29. **Пегат А.** Нечеткое моделирование и управление: Пер. с англ. 2-е изд. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 798 с.

References

1. **Shakirov S. R., Kvashnin A. G., Pisarev A. V.** Sintez nejro-nechetkogo regulatora teplovoj nagruzki ustanovki pererabotki organicheskikh othodov [Synthesis of Neuro-Fuzzy Controller of Thermal Load of Organic Waste Processing Plant]. *Industrial Automatic Control Systems and Controllers*, 2019, no. 9, p. 54–62. (in Russ.)
2. **Shakirov S. R., Kvashnin A. G., Pisarev A. V.** Simulating the Operation of an Adaptive System for Controlling a Drying Process in an Organic Waste Recycling Device. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2018, vol. 54, no. 5, p. 525–530.
3. **Vilchek S. Yu., Kvashnin A. G., Safronov A. V., Storozhev F. N.** Problemy sozdaniya adaptivnoj sistemy upravleniya energeticheskim kompleksom po pererabotke uglerodosoderzhashchih othodov [Problems of creating an adaptive control system for the energy complex for the processing of carbonaceous waste]. In: Industrial information systems – 2015. All-Russian conference with international participation: Collection of abstracts. Novosibirsk, DTICT SB RAS, 2015, p. 15–16. (in Russ.)
4. **Vilchek S. Yu., Shakirov S. R., Kvashnin A. G., Pisarev A. V.** Modelirovanie raboty avtomatizirovannoj sistemy upravleniya processami pererabotki uglerodosoderzhashchikh materialov [Simulation of the automated control system for processing carbon-containing materials]. In: Industrial information systems – 2015. All-Russian conference with international participation: Collection of abstracts. Novosibirsk, DTICT SB RAS, 2015, p. 14–15. (in Russ.)
5. **Ganapathy V.** Steam Generators and Waste Heat Boilers: For Process and Plant Engineers. New York, CRC Press, 2014, 540 p.
6. **Besekersky V. A., Popov E. P.** Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control]. St. Petersburg, Professiya, 2003, 752 p (in Russ.)
7. **Shakirov S. R., Kvashnin A. G., Pisarev A. V.** Razrabotka matematicheskoy modeli gazo-vozdushnogo trakta ustanovki utilizacii organicheskikh othodov [Development of a mathematical model of the gas-air path of the organic waste processing plant]. The science. Technologies. Innovations. Collection of scientific papers of the X all-Russian conference. Novosibirsk, 2016, part 1, p. 46–48. (in Russ.)
8. **Shakirov S. R., Kvashnin A. G., Pisarev A. V.** Modelirovanie avtomaticheskoy sistemy upravleniya nepreryvnym dozirovaniem sypuchih materialov [Modeling automatic control system for continuous dosing of bulk materials]. *Bulletin of the East Kazakhstan State Technical University D. Serikbaeva*, 2018, vol. 1, no. 3-1, p. 77–90. (in Russ.)
9. **Miroshnik I. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L.** Nelinejnoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami [Nonlinear and adaptive control of complex dynamic systems]. St. Petersburg, Nauka, 2000, 549 p. (in Russ.)
10. **Egupov N. D.** Metody robustnogo, nejro-nechetkogo i adaptivnogo upravleniya [Methods of robust, neuro-fuzzy and adaptive control]. Textbook. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2001, 744 p. (in Russ.)
11. **Pupkov K. A., Egupov N. D.** Metody klassicheskoy i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravleniya [Methods of classical and modern automatic control theory]. Moscow, N. Eh. Bauman MSTU Press, 2004, vol. 5: Methods of modern automatic control theory, 784 p. (in Russ.)
12. **Kiselev O. N., Polyak B. T.** Synthesis of low-order controllers by the H^∞ and the maximum robustness criteria. *Automation and Remote Control*, 1999, vol. 60, no. 3, p. 393–402.
13. **Polyak B. T., Shcherbakov P. S.** Robustnaya ustojchivost' i upravlenie [Robust stability and control]. Moscow, Nauka, 2002, 303 p. (in Russ.)
14. **Kim D. P.** Algebraicheskie metody sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya [Algebraic methods of synthesis of automatic control systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2014, 164 p. (in Russ.)
15. **Dorf R., Bishop R.** Sovremennye sistemy upravleniya [Modern systems of control]. Transl. from Engl. by B. I. Kopylov. Moscow, Laboratoriya Bazovykh Znaniy, 2002, 832 p. (in Russ.)

16. **Bobrikov N. M., Denisov I. K., Kyznetsov S. I., Shubladzec A. M.** Avtomaticheskij poisk optimal'nykh po stepeni ustojchivosti nastroek PI- i PID-regulyatorov [Automatic search for settings of PI- and PID-regulators optimal with respect to the degree of stability]. *Probl. Upr.*, 2009, no. 2, p. 8–13. (in Russ.)
17. **O'Dwyer A.** Handbook of PI and PID controller tuning rules. London, Imperial College Press, 2009. 623 p.
18. **Astrom K. J., Hagglund T.** Advanced PID control. ISA. The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006, 461 p.
19. **Frantsuzova G. A., Vostrikov A. S.** PID Controller Design for a Second-Order Nonlinear Plant. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2019, vol. 55, no. 4, p. 364–370.
20. **Prokopev A. P., Ivanchura V. I., Emelyanov R. T., Scurihin L. V.** Metodika sinteza regulyatorov dlya ob"ektov vtorogo poryadka [The technique of synthesis of regulators to control objects of the second order]. *Vestnik SibSAU*, 2016, vol. 17, no. 3, p. 618–624.
21. **Ponomarev A. A.** Razrabotka i issledovanie modernizirovannogo mnogokanal'nogo PD-regulyatora dlya stabilizacii rezhimov raboty teploenergeticheskogo kotla [Development and research of the modernized multichannel PD-regulator for stabilization of operation modes of the thermal-power boiler]. Dis. ... Cand. Tech. Sci. Novosibirsk. 2013, 122 p. (in Russ.)
22. **Popov N. N.** PID-regulyator v sistemakh avtomaticheskogo regulirovaniya: posobie dlya kursov [The PID controller in automatic control systems: the textbook for the courses]. Kemerovo, SUNETO, 1980, 56 p. (in Russ.)
23. **Nikulin E. A.** Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Chastotnye metody analiza i sinteza sistem [Fundamentals of the theory of automatic control. Frequency methods of analysis and synthesis of systems]. St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2015, 632 p. (in Russ.)
24. **Gaiduk A. R.** Teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control]. Moscow, Higher school, 2010, 416 p. (in Russ.)
25. **Pisarev A. V.** Ehksperimental'nyj poshagovyj metod nastrojki PID-regulyatorov [Experimental step-by-step method for setting PID regulators]. *Energetik*, 2018, no. 10, p. 15–17. (in Russ.)
26. **Pupkov K. A., Egupov N. D.** Metody klassicheskoj i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravleniya [Methods of classical and modern automatic control theory]. Moscow, N. Eh. Bauman MSTU Press, 2004, vol. 1: Mathematical models, dynamic characteristics and analysis of automatic control systems, 656 p. (in Russ.)
27. **Rotach V. Ya.** Teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control]. Moscow, MEHI Publ., 2008, 396 p. (in Russ.)
28. **Ivanov V. A.** Razvitie teorii avtonomnosti regulirovaniya ehnergeticheskikh agregatov [Development of the theory of autonomous regulation of energy aggregates]. *Izv. RAN, Ehnergetik*, 1999, no. 3, p. 79–89. (in Russ.)
29. **Pegat A.** Nechetkoe modelirovanie i upravlenie [Fuzzy modeling and control]. 2nd ed. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2013, 798 p. (in Russ.)

Материал поступил в редколлегию
Received
23.06.2020

Сведения об авторах

Шакиров Станислав Рудольфович, кандидат физико-математических наук, заведующий конструкторско-технологическим отделом Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий (Новосибирск, Россия), доцент кафедры лазерных систем, Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск, Россия)

ShakirovSR@ict.nsc.ru

Квашнин Александр Георгиевич, кандидат технических наук, директор Центра трансфера технологий и коммерциализации Новосибирского национального исследовательского государственного университета (Новосибирск, Россия)

a.kvashnin@nsu.ru

Писарев Артем Владимирович, аспирант Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий (Новосибирск, Россия)

pisarev@tecon.ru

Information about the Authors

Stanislav R. Shakirov, PhD, Head of Design and Technology Department, Federal Research Center for Information and Computational Technologies (Novosibirsk, Russian Federation); Assistant professor of Laser systems Department, Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russian Federation)

ShakirovSR@ict.nsc.ru

Alexandr G. Kvashnin, PhD, Director of the Center for Technology Transfer and Commercialization, Novosibirsk National Research State University (Novosibirsk, Russian Federation)

a.kvashnin@nsu.ru

Artem V. Pisarev, Postgraduate Student, Federal Research Center for Information and Computational Technologies (FRC ICT) (Novosibirsk, Russian Federation)

pisarev@tecon.ru