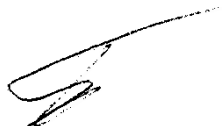


*На правах рукописи*

**Гоголь Иван Владимирович**



**СИНТЕЗ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
ОБЪЕКТАМИ НЕФТЕХИМИИ С НЕОПРЕДЕЛЕННЫМ  
ЗАПАЗДЫВАНИЕМ**

*Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление техно-  
логическими процессами и производствами*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2024

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)»

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук, доцент

*Ремизова Ольга Александровна*

**Официальные оппоненты:**

*Уткин Лев Владимирович*

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», научно-исследовательская лаборатория «Суперкомпьютерные технологии и машинное обучение», ведущий научный сотрудник;

*Горобченко Станислав Львович*

кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», кафедра автоматизации технологических процессов и производств, доцент.

**Ведущая организация** – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **27 июня 2024 г. в 10:00** на заседании диссертационного совета ГУ.12 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. № 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 27 апреля 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



ВАСИЛЬЕВА  
Наталья Васильевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Обеспечение высоких технико-экономических показателей на нефтехимических производствах играет одно из важных значений в химической технологии.

Крупнотоннажные производства нефтехимического комплекса, использующие в качестве сырья и топливно-энергетических ресурсов большие объемы нефти и природного газа, а также попутного нефтяного газа представляют собой сложные непрерывные энерго- и ресурсоемкие химико-технологические системы. Для подготовки исходных данных для проектирования указанных производств требуется применение специальных подходов, а также процедур и алгоритмов компьютерного моделирования.

Тенденции современного развития нефтехимического производства неотъемлемо связаны не только с совершенствованием технологии производства, но и с уровнем автоматизации в целом. В основе промышленной автоматизации лежат многоуровневые системы управления, основной разновидностью которых является двухуровневая иерархическая структура АСУТП, на нижнем уровне которой располагаются локальные системы регулирования, контроля, сигнализации и блокировки, именно вопросы повышения устойчивости (робастности) работы этих систем рассматриваются в диссертационной работе.

При автоматизации на нижнем уровне в нормальном режиме для компенсации не измеряемых возмущений в основном используются традиционные ПИД законы регулирования. Для их настройки на современном этапе используют робастный подход. Это позволяет увеличить время функционирования между двумя смежными перенастройками и увеличить надежность систем стабилизации. Важной причиной, препятствующей получению хорошего качества регулирования, является наличие запаздываний по управлению, определяемых с высокой степенью неопределенности.

### **Степень разработанности темы исследования:**

Развитием отрасли нефтехимии занимались такие выдающиеся ученые, как Менделеев Д.И., Бейльштейн Ф.Ф., Марковников В.В., Энглер К., в настоящее время данный вопрос нашел отражения в научных работах Павлова С.Ю, Gates В. С., Тюреева И. Я.

Наличие запаздывания всегда ведет к ухудшению качественных показателей системы (устойчивости, быстродействия, грубости) Этой особо

важной проблеме было посвящено множество работ таких известных авторов в теории управления, как Х. Гурецкий, З. Арштейн, М. Крстич, А.А. Пыркин, Б.Н. Розенвассер, О. Смит, А.М. Цыкунов, Я.З. Цыпкин, А. Манитиус, А. Олброт, В. Квон, А. Пирсон, Ж.П. Ришар, А.Б. Филимонов и другие.

При решении задачи управления для объекта с запаздыванием на входе наилучшие результаты получаются, когда используется структурная схема с предиктором. Кроме того, возникают дополнительные трудности из-за параметрической неопределенности инерционных членов модели и величин запаздываний. Несмотря на большое количество публикаций (А.А. Бобцов, Р. Марино, В.О. Никифоров, П. Томей, М. Хоу, Л. Хсу, К. Ксиа, А.Г. Александров, А.Р. Гайдук и другие) открытым остается вопрос синтеза робастных ПИД законов в этих условиях. Эти проблемы усложняются для многомерных систем.

Анализируя процессы нефтехимического производства, можно выделить ряд общих свойств, затрудняющих качественное управление, а именно: высокая инерционность процессов, параметрическая неопределенность, наличие запаздывания в каналах управления. Использование предиктора в таких системах с неопределенностью запаздывания по управлению становится невозможным.

**Цель работы.** Разработать метод и методики синтеза локальных систем управления технологическими процессами нефтехимии при наличии неопределенного запаздывания на входе объекта.

**Идея.** Было сделано предположение, на основе критерия Найквиста, используя частотную характеристику увеличить устойчивость АСР к неопределенности запаздывания, используя дополнительный параметр грубость системы.

**Задачи.** В соответствии с указанной целью в работе поставлены, обоснованы и решены следующие задачи:

1. Анализ технологических процессов нефтехимии как объектов управления.
2. Разработка методики синтеза систем управления объектами с неопределенностью запаздывания, в рамках одноконтурной системы для процессов нефтепереработки.
3. Разработка методики обеспечения селективной инвариантности к возмущениям для систем с неопределенным запаздыванием на основе ме-

тод компенсации возмущений при помощи одноконтурной и комбинированной систем управления объектом нефтехимии.

4. Разработка методики синтеза системы управления процессами многомерного многосвязного технологического объекта с неопределенным запаздыванием.

#### **Объект исследования.**

Объектом исследования диссертационной работы является стадия процесса нефтепереработки с точки зрения улучшения количественных показателей качества готовой продукции.

#### **Предмет исследования.**

Методика синтеза систем регулирования для объектов с неопределенным запаздыванием нефтехимического производства.

#### **Научная новизна:**

1. Предложена методика синтеза регуляторов, обеспечивающая компромисс между требованием быстродействия и грубости системы при наличии запаздывания в объекте, которая позволяет обеспечить качественные показатели системы, лучшие, чем обеспечивают стандартные ПИ и ПИД алгоритмы.

2. Предложена методика обеспечивающая селективность инвариантности к возмущениям при помощи одноконтурной и комбинированной систем управления объектом нефтехимии.

3. Обоснована структура построения комбинированной многосвязной системы, отличающаяся от существующих наличием следящей системы в контуре управления по возмущению, оцениваемому на основании внутренней модели, и обеспечивающая грубость по отношению к неопределенности задания запаздывания, и для которой всегда выполняются условия физической реализуемости.

#### **Теоретическая значимость**

1. Предложена новая методика синтеза оптимальных настроек регуляторов, обеспечивающая устойчивость к внешним возмущающим воздействиям на объектах, обладающих неопределенностью.

2. Теоретически обосновано введение параметра грубости системы для определения построения автоматических систем регулирования на основе ПИ и ПИД законов регулирования.

3. Обосновано определение компенсационной структуры для регулирования многосвязным объектом.

### **Практическая значимость**

1. Разработаны методики синтеза регуляторов, построенных на основе ПИ и ПИД законов регулирования, обеспечивающих высокое качество робастного управления и не требующих сложной настройки, что в свою очередь приводит к улучшению качественных показателей локальных систем и экономии энергетических затрат и затрат на перенастройку ПИ-, ПИД- законов регулирования.

2. Предложен подход, позволяющий при наличии существенной неопределенности запаздывания на входе объекта парировать ограниченные возмущения на конечном и бесконечном интервалах времени.

3. Получен акт внедрения от «ООО ОКА» от 14 августа 2023 года.

**Методология и методы исследования.** Для достижения поставленных задач использовались методы системного анализа, теории нечетких множеств, математической статистики, имитационного моделирования. При программной реализации применялись методы объектно-ориентированного программирования.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Улучшение количественных показателей одноконтурной системы управления при наличии неопределенности объекта в виде переходного запаздывания, достигается за счет разработанной методики синтеза регуляторов, обеспечивающей компромисс между требованием быстродействия и грубости системы, что позволит обеспечить преимущество перед стандартными методиками расчета ПИ и ПИД регуляторов.

2. Обеспечение физической реализуемости компенсатора в сложных системах регулирования (такие как комбинированная и система связного регулирования) за счет алгоритма определения параметров компенсатора, представляющего собой замкнутую систему, состоящую из регулятора и объекта исходной одноконтурной АСР по рассогласованию между моделью и реальным объектом, что является преимуществом перед аналитическим традиционным способом расчета компенсатора.

**Достоверность полученных результатов** подтверждена проведенным имитационным моделированием и экспериментальными исследованиями и подкреплена апробацией основных теоретических положений в статьях и докладах на научных конференциях. Полученные в диссертационной работе результаты не противоречат данным, представленным в литературе и полученным ранее другими авторами.

**Апробация работы.** Апробация диссертационного исследования проведена на научно-практических мероприятиях с докладами:

1. Международная научная конференция «Математические Методы в Технике и Технологиях ММТТ». Минск, 26 – 30 октября 2020 года (3 доклада).

2. Международная научная конференция «Математические Методы в Технике и Технологиях ММТТ». Санкт-Петербург, 31 мая – 04 июня 2021 года (1 доклад).

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, разработке теоретических моделей, получении основных теоретических и практических результатов в области синтеза систем регулирования для объектов с неопределенным запаздыванием нефтехимического производства.

**Публикации.** Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 31 печатной работе, в том числе в 9 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 6 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получены две заявки на патент.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и библиографического списка, содержит 104 страницы машинописного текста, 42 рисунка, 5 таблиц, список литературы из 106 наименований и 3 приложения на 3 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследований, проводимых в рамках настоящей диссертационной работы, сформулированы цель, задачи, научная новизна и практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен анализ современных систем управления типовым нефтехимическим комплексом при наличии запаздывания, а также проанализированы методики управления объектами, обладающими запаздыванием на входе объекта. Представлен анализ процессов как объектов

автоматизации. Приведены основные группы входных и выходных переменных и возможных контролируемых и не контролируемых возмущений.

На основании результатов анализа сформулированы задачи для разработки робастных систем автоматического управления. Для аппроксимации использовано математическое описание типовых динамических звеньев с запаздыванием.

**Во второй главе** предлагаются два подхода к построению робастного управления: оптимальное управление по критерию апериодической устойчивости и использование робастного критерия Найквиста.

**В третьей главе** на примере процесса нефтехимического производства доказывается, что разработанная по предложенной методике многосвязная система управления с не измеряемым возмущающим воздействием, в отличие от традиционной всегда физически реализуема; а в некоторых случаях позволяет получить лучшие качественные показатели переходного процесса и обеспечивает робастность по отношению к изменениям величин запаздываний и коэффициентов модели объекта.

**Основные результаты** отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. Улучшение количественных показателей одноконтурной системы управления при наличии неопределенности объекта в виде переходного запаздывания, достигается за счет разработанной методики синтеза регуляторов, обеспечивающей компромисс между требованием быстродействия и робастности системы, что позволит обеспечить преимущество перед стандартными методиками расчета ПИ и ПИД регуляторов.**

В качестве модели типового объекта с неопределенностью представлена передаточная функция вида (1):

$$W_0(p) = k_0 \frac{\beta_m(p)}{\alpha_n(p)} \exp(-\tau p), \quad (1)$$

где  $\alpha_n(p)$ ,  $\beta_m(p)$  – полиномы порядков  $n$  и  $m$ ,  $\alpha_n(0) = \beta_m(0) = 1$ ,  $k_0$  – коэффициент передачи,  $\underline{k}_0 \leq k_0 \leq \overline{k}_0$ ,  $\tau$  - запаздывание  $\underline{\tau} \leq \tau \leq \overline{\tau}$ , коэффициенты полиномов могут изменяться в заданных интервалах, в частном случае полином  $\alpha_n(p)$  может иметь корни в точке ноль.

Синтез регулятора осуществляется на основании номинальной передаточной функции объекта вида (2):

$$W_0^0(p) = k_0^0 \frac{\beta_m^0(p)}{\alpha_n^0(p)} \cdot \exp(-\tau_0^0 p), \quad (2)$$



где  $k_0^0, \tau_0$  — номинальные значения коэффициента передачи и запаздывания,  $\beta_m^0(p), \alpha_n^0(p)$  — номинальные полиномы числителя и знаменателя, ( $m \leq n, \beta_m^0(0) = \alpha_n^0(0) = 1$ ),  $\underline{k_0} \leq k_0^0 \leq \overline{k_0}, \underline{\tau} \leq \tau_0 \leq \overline{\tau}$ .

В случае, когда передаточная функция объекта имеет полюса в точке ноль, при синтезе регулятора для обеспечения гурвицевости полинома  $\alpha_n^0(p)$  используется аппроксимация вида (3):

$$\frac{1}{p} \approx \frac{1}{p+\varepsilon} = \frac{\gamma}{\gamma p+1}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon \ll 1, \gamma = \varepsilon^{-1} \gg 1$ .

В работе использована двухэтапная процедура синтеза регулятора. **На первом этапе** по переходной характеристике происходит аппроксимация инерционной части передаточной функции номинальной модели объекта с дополнительным запаздыванием  $\tau_1$  так, что вместо (2) получим (4):

$$W_0^0(p) \approx \frac{k_0^0 \exp(-\tau_0 p)}{\chi_l(p)}, \quad (4)$$

где  $\tau_0 = \tau_0^0 + \tau_1, \chi_l(p)$  — гурвицев полином пониженного  $l$  — го порядка,  $l = 0, 1, 2, 3, \tau_1$  — дополнительное запаздывание.

Наличие этого этапа определяется тем, что способствует уменьшению порядка регулятора, и числа малых постоянных времени для физической реализуемости, также это обеспечивает отсутствие полюсов передаточной функции (2) в свободном движении замкнутой системы, так как на втором этапе предполагается применение метода динамической компенсации на основе аппроксимации (4).

В этом случае с точностью до малых постоянных времени динамика (4) полностью или частично будет скомпенсирована динамикой регулятора с передаточной функцией вида (5):

$$W_P(p) = W_{PB}(p) \frac{\chi_l(p)}{(T_0 p+1)^l}, \quad (5)$$

где  $W_{PB}(p)$  — передаточная функция регулятора для базовой модели, которая рассматривается в двух формах — (6) и (7):

$$W_{BO}^0(p) = k_0^0 \exp(-\tau p) \quad (6)$$

$$W_{BO}^0(p) = \frac{k_0^0 \exp(-\tau p)}{T_0^0 p+1} \quad (7)$$

где  $T_0$  — номинальное значение доминирующей постоянной времени.

Во втором случае происходит не полная, а частичная компенсация динамики в (4) и для улучшения качества выделяется доминирующая постоянная времени, если она имеет место.

Этот подход позволяет получить наилучшее управление для моделей (6), (7) выбором передаточной функции  $W_{РВ}(p)$  в (5) и расширить этот результат для исходной модели (2). В данном случае оптимальность рассматривается в аспекте грубости системы и как компромисс между грубостью и быстродействием.

Для оптимизации по грубости используется критерий апериодической устойчивости. Преимуществом этого подхода является простота построения передаточной функции регулятора  $W_{РВ}(p)$  непосредственно по передаточной функции объекта (4), а недостатком – пониженное быстродействие. Для увеличения быстродействия при заданной величине грубости для обеспечения необходимого и достаточного условия устойчивости применяется робастный критерий Найквиста (рисунок 1) для аддитивной неопределенности вида:  $|W(j\omega) - W^0(j\omega)| \leq \gamma$ , где  $W(j\omega) = W_p(j\omega)W_0(j\omega)$ ,  $W^0(j\omega) = W_p(j\omega)W_0^0(j\omega)$  – частотные передаточные функции реальной и номинальной разомкнутых систем соответственно,  $W_p(j\omega)$  – частотная передаточная функция регулятора,  $\gamma > 0$  – положительное число, которое в этой постановке задачи может быть использовано в качестве меры грубости.

При заданном значении грубости  $\gamma$  синтез осуществляется итерационным методом: задается значение запаса устойчивости по амплитуде  $h$ , затем из множества параметров регулятора, обеспечивающих постоянство  $h$ , выбираются такие, которые обеспечивают наибольшее быстродействие. В этом классе систем при 5%-ой погрешности для получения быстродействия требуется обеспечить перерегулирование не превышающие 5%. После проверки полученное значение  $\gamma$ , и если оно не соответствует заданию, то изменяется величина  $h$ .

Для асимптотической устойчивости необходимо и достаточно  $\tau_0 > 0.218 \frac{k_0}{k_0^0} \tau$ .

Если использовать аппроксимацию Паде для звена запаздывания, то замкнутая номинальная система имеет полюс кратности два в точке  $p_1 = p_2 = -0.828/\tau_0$ , что обеспечивает максимальную степень устойчивости и оптимальность по апериодическому критерию устойчивости.

При ошибке в задании номинального значения запаздывания в сторону уменьшения - граничное значение  $\tau_0 = 0.218\tau$ , что показывает, что система имеет практически неограниченный запас возможных вариаций

при задании величины запаздывания. Аналогично при точном знании величины запаздывания  $\tau_0 = \tau$  относительное увеличение коэффициента передачи ограничено сверху величиной  $k_0/k_0^0 \leq 1/0.218 = 4.587$ , что показывает большую грубость системы к вариациям коэффициента передачи.

Кроме перечисленного и с учетом ЛАХ и ФЧХ полученная номинальная система независимо от величины запаздывания  $\tau_0$  имеет запас устойчивости по фазе, равный примерно  $71^\circ$  и запас устойчивости по амплитуде, равный примерно 13дБ, что свидетельствует о достаточно хорошем демпфировании системы.

В результате двухэтапной процедуры синтеза (рисунок 2) получается регулятор в виде агрегата из ПИ или ПИД законов, настроенных на основании базовых моделей, и ПД законов, которые связаны с применением метода динамической компенсации.

При выполнении критерия аperiodической устойчивости регуляторы  $W_{p1}(p)$

для базовой модели (6) могут быть получены законы вида (8):

$$\text{И-закон: } W_{p1}(p) = \frac{\omega_c}{k_0^0 p} \quad \text{и ПИ-закон } W_1(p) = \frac{\omega_c \cdot 1.58 \left(\frac{\tau_0}{4}\right)^{p+1}}{k_0^0 p} \quad (8)$$

где  $\omega_c = 0.343/\tau_0$  – частота среза.

для базовой модели (7) ПИД – закон имеет вид (9):

$$W_{p2}(p) = \frac{k_{p2}}{\tau_0 k_0^0} \cdot \frac{T_1 p + 1}{p} \cdot \frac{T_2 p + 1}{T_E p + 1} \quad (9)$$

В качестве примера (рисунок 3) рассмотрен объект управления колонна К-1, предназначенная для уменьшения количества газообразных и легкокипящих компонентов в сырье основной атмосферной колонны К-2. Для создания потоков паров и снижения температуры низа колонны в отгонную часть подается перегретый пар. Боковые погоны К-2 выводятся через стрипинги К-3, К-4 и К-5, в которых происходит отпарка легких компонентов. Подачей пара в низ стрипингов частично регулируется точка начала кипения соответствующих продуктов и температура их вспышки.

Низ колонны с номинальной передаточной функцией вида (10):

$$W_0^0(p) = \frac{\exp(-2p)}{(7p+1)^4} \quad (10)$$

Базовая модель получена в результате анализа переходного процесса в рамках первого этапа синтеза, на основе аппроксимации передаточной функции объекта вида (11):

$$W_0^0(p) = \frac{\exp(-13p)}{15p+1}. \quad (11)$$

В соответствии с (8), (9) и (5) без промежуточной настройки получаем следующие реальные передаточные функции ПИ (12) и ПИД (13) регуляторов

$$W_{PB}(p) = \frac{0.343}{13} \cdot \frac{15p+1}{p}, \quad (12)$$

$$W_{PB}(p) = \frac{0.343}{13} \cdot 1.58 \frac{(13/4)p+1}{p} \cdot \frac{15p+1}{0.1p+1}. \quad (13)$$

Так как передаточные функции получены для базовой, а не для исходной модели, то в коэффициент передачи возможно введение дополнительного множителя, это иногда улучшает переходную характеристику системы, для функции (13) он равен 0.8. Сравнение с результатами моделирования системы со стандартными настройками ПИД – регулятора в пакете MATLAB (рисунок 4) показывают преимущество по показателю грубости при одинаковом быстродействии.

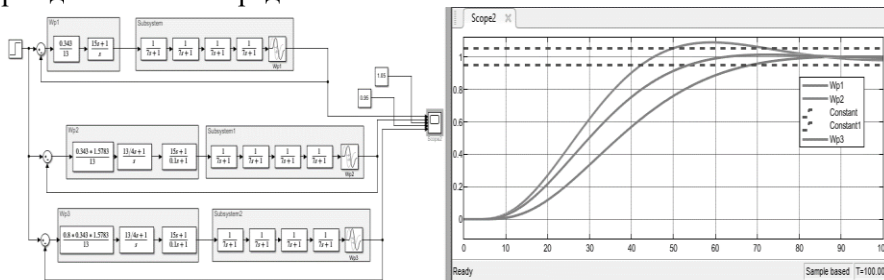


Рисунок 4 – Переходная характеристика для регуляторов  $W_{P1}(p)$ ,  $W_{P2}(p)$  и с поправочным коэффициентом  $q = 0,8$

В качестве примера объекта с доминирующей постоянной времени рассмотрена номинальная передаточная функция вида (14):

$$W_0^0(p) = \frac{\exp(-8p)}{(30p+1)(5p+1)^3}. \quad (14)$$

и соответствующие аппроксимирующие передаточные функции (15) и (16):

$$W_0^0(p) = \frac{\exp(-14p)}{(30p+1)(9p+1)} \quad (15)$$

$$W_0^0(p) = \frac{\exp(-14p)}{(30p+1)} \quad (16)$$

В соответствии с предложенной методикой получены регуляторы вида (17) и (18):

$$W_P(p) = \frac{0.74}{14} \frac{29p+1}{p} \frac{6.38p+1}{0.1p+1} \frac{9p+1}{0.1p+1} \quad (17)$$

$$W_P(p) = \frac{0.63}{14} \frac{26p+1}{p} \frac{3.96p+1}{0.1p+1} \frac{9p+1}{0.1p+1} \quad (18)$$

Для системы с вышеописанным регулятором получим следующие показатели:

$$t_p = 40.8c, 0 < \frac{k_o}{1} < 3.42, 0 < \frac{\tau}{8} < \frac{33.2c}{8}.$$

Для метода MATLAB:

$$t_p = 40.6c, 0 < \frac{k_o}{1} < 2.61, 0 < \frac{\tau}{8} < \frac{34.6c}{8}.$$

В данном случае, как видно из рисунка, было выбрано примерно одинаковое время переходного процесса. Грубость данной системы с регулятором по  $k_o$  увеличилась на 23.7%, но по  $\tau$  она меньше на 4.2%.

При синтезе регулятора для объекта, имеющего интегратор с соответствующей номинальной и аппроксимирующей (19) передаточными функциями:

$$W_o^0(p) = \frac{\exp(-9p)}{z(10p+1)(2p+1)^4}, W_o(p) = \frac{\exp(-14p)}{p(11p+1)} \quad (19)$$

$$W_P(p) = \frac{0.64}{14} \frac{8.1p+1}{p} \frac{11.8p+1}{0.1p+1} \frac{1000p+1}{1000(0.1p+1)} \quad (20)$$

Сравнительный анализ регулятора (20) и встроенного регулятора в пакете MatLab показал преимущество первого.

**2. Обеспечение физической реализуемости компенсатора в сложных системах регулирования (такие как комбинированная и система связного регулирования) за счет алгоритма определения параметров компенсатора, представляющего собой замкнутую систему, состоящую из регулятора и объекта исходной одноконтурной АСР по рассогласованию между моделью и реальным объектом, что является преимуществом перед аналитическим традиционным способом расчета компенсатора.**

В работе предложена альтернативная структура комбинированной системы управления для возмущения на входе или на выходе объекта, показанная на рисунке 5

Здесь внутренняя модель использована для построения оценки реакции на выходе системы  $\hat{f}$ , вызванной действием возмущения  $f$ . Поскольку для оценивания использована номинальная передаточная функция объекта,

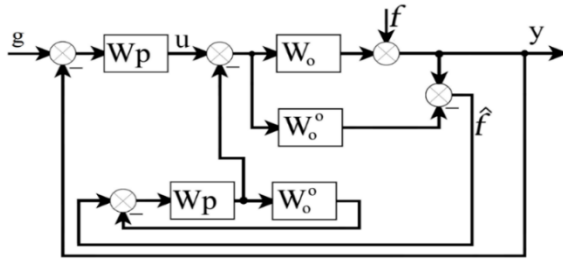


Рисунок 5 – Структурная схема комбинированного управления  
 то полученная оценка является обобщенной, так как дополнительно содержит информацию о параметрической неопределенности передаточной функции реального объекта.

Переменная  $\hat{f}$ , поступает на вход следящей системы, которая структурно совпадает с одноконтурной системой и имеет одинаковый с ней регулятор, только вместо передаточной функции объекта здесь использована номинальная передаточная функция объекта  $W_0^0(p)$ . Если в идеале предположить, что выход следящей системы точно совпадает с  $\hat{f}$ , и  $W_0^0(p) = W_0(p)$ , то тогда следящая система является точной моделью, по которой можно проследить, как действует возмущение в любой точке структурной схемы одноконтурной исходной системы. Полученная таким образом переменная используется в системе для компенсации возмущения  $f$ .

Система обладает астатизмом по отношению к возмущению типа ступенчатое воздействие, а также к возмущению синусоидального вида, как будет показано далее. Если ограниченная по модулю помеха на бесконечно большом интервале времени изменяется по произвольному закону, то в установившемся режиме она отрабатывается с погрешностью, которая зависит от максимальной частоты спектра возмущения. С 5% точностью отрабатываются медленно изменяющиеся возмущения, которые имеют ограничения не только по амплитуде сигнала, но и по его производным.

Для примера сравним работу одноконтурной и комбинированной систем при действии гармонического возмущения при наличии номинальной передаточной функции (21) объекта блока предварительного испарения стадии ЭЛОУ

$$W_0^0(p) = \frac{2 \exp(-10p)}{15p+1}. \quad (21)$$

Рассмотрим робастный регулятор на основе базового И закона регулирования (8). Он имеет вид (22):

$$W_p(p) = \frac{0.343 (15p+1)}{2 \cdot 10^p}. \quad (22)$$

Переходные процессы при действии синусоидального возмущения с единичной амплитудой для одноконтурной и комбинированной системы показал, что в установившемся режиме временная характеристика комбинированной системы укладывается в зону с 5%-й погрешностью, а одноконтурная система неработоспособна.

В работе доказано, что грубость предложенной двухконтурной комбинированной системы такая же, как грубость основного контура, если для оценки грубости использовать  $H^\infty$  — норму функции чувствительности номинальной системы к возмущению синусоидального вида. Это вытекает из того факта, что номинальная система компенсации возмущения  $f$  описывается передаточной функцией, совпадающей с передаточной функцией замкнутой номинальной системы основного контура, и дополнительно это делает актуальными алгоритмы робастного управления.

Для рассмотренного выше примера (21), (22) в среде MatLab был смоделирован переходный процесс при ошибке в задании величины запаздывания в сторону увеличения на 50%. В результате чего перерегулирование составило 30%, а в установившемся режиме погрешность не превосходит 5%, то есть предложенная комбинированная система работоспособна.

Кроме этого, показано, что введение системы компенсации в виде следящей системы не влияет на динамику основного контура. Это значит, что если вместе с рассматриваемым медленно изменяющимся возмущением действует случайное возмущение или функция из  $L_2$ , которые традиционно рассматриваются в теории управления и устраняются за счет действия основного контура, то введение системы компенсации не влияет на компенсацию этих возмущений.

Рассмотрен пример управления концентрацией кислорода в отходящих газах печи П-1 для нагрева куба отпарной колонны К-1 отделения стабилизации при гидроочистке нефтяных фракций за счет изменения положения шибера, установленного в выходной трубе. Упрощенная схема автоматизации с регулятором (R), сумматором ( $\Sigma$ ) и модулем динамической компенсации ( $R_k$ ) показана на рисунке 6.

В работе получена номинальная модель объекта в виде передаточной функции с запаздыванием вида (23)

$$y(t) = \frac{0.05 \exp(-30p)}{(50p + 1)(7p + 1)(9p + 1)(30p + 1)} u(t) \quad (23)$$

Для этой модели справедлива эквивалентная преобразованная модель, которая будет использована для синтеза регулятора, она имеет вид (24)

$$y(t) = \frac{0.05 \exp(-60p)}{75p + 1} u(t) \quad (24)$$

В соответствии с синтезом по аperiodическому критерию устойчивости получены две передаточные функции регулятора вида (5) с базовыми алгоритмами (8), (9)

$$W_{P1}(p) = \frac{0.343}{0.05 \cdot 60} \frac{75p + 1}{p} \quad (25)$$

$$W_{P2}(p) = \frac{0.343}{0.05 \cdot 60} 1.58 \frac{(60/4)p + 1}{0.1p + 1} \frac{75p + 1}{p} \quad (26)$$

Передаточная функция (25) представляет собой ПИ закон регулирования, а функция (26) – ПИД закон. Во втором случае получаем большее быстродействие. Эти алгоритмы хорошо обрабатывают возмущения из  $L_2$  в динамике. При наличии возмущений в стационарном режиме могут возникнуть колебания выходной величины. Возмущение возникает, в частности, из-за колебаний теплотворной способности природного топливного газа, поступающего в горелки, в диапазоне: 5430 – 17175 ккал/нм<sup>3</sup>.

При применение вышеописанной методики для автономного управления многосвязным объектом влияние перекрестных связей порождает сигнал, который может находиться в другой области частот, и поэтому компенсация будет несовершенной, поэтому в компенсационной схеме был введен сглаживающий фильтр  $\dot{x} = -2x + \sin x$ .

В результате реализации данного фильтра в компенсационной структуре. АФХ сглаживающего звена  $W(p) = \frac{1}{p+2}$  находится внутри запретной области, представляющий собой окружность единичного радиуса с центром в точке 0 (поскольку  $-1 \leq \frac{\sin x}{x} \leq 1$ , а tg угла 45° равен 1), что является достаточным условием абсолютной устойчивости, которое не выполняется экспоненциальная устойчивость – это более сильное условие, чем асимметрическая устойчивость, а следовательно, для нее достаточное условие тем более не выполнены.

Переходная характеристика 2-го канала и альтернативного регулятора показана на рисунке 7.



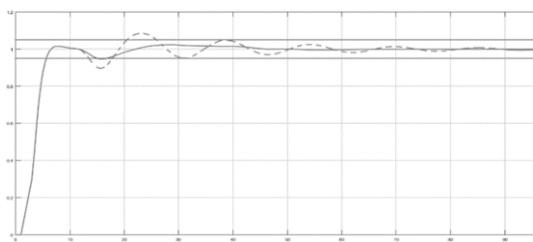


Рисунок 7 – Переходная характеристика по каналу 2 в традиционной системе (пунктир) и альтернативной (сплошная)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнен анализ типовой технологической схемы нефтеперерабатывающего производства, как объект управления, на основании которого представлена типовая информационная схема и обоснованы внутренние связи входных и выходных параметров.

Изучена проблема синтеза систем регулирования объектов с неопределенным запаздыванием. Выполнен анализ существующих традиционных подходов к решению этой задачи, основанных, в основном, на использовании классических ПИД – законов регулирования. Автором предложен подход к синтезу систем регулирования и расчет настроек регуляторов.

Сформулирована процедура проектирования робастного регулятора, основанная на двухэтапной декомпозиции задачи синтеза. На первом этапе редуцируется инерционная часть передаточной функции номинальной модели объекта. На втором этапе используя метод динамической компенсации для балансировки динамики полученной модели объекта динамикой регулятора.

В качестве критерия оптимальности, при котором ищется решение в классе традиционных законов регулирования для синтеза робастных систем регулирования, используется критерий апериодической устойчивости.

Поскольку одним из основных критериев является экономический показатель, то для увеличения быстродействия используется аппроксимация Паде 1-го порядка, которая в свою очередь уменьшает и грубость системы. Балансовое соотношение между грубостью системы и быстродействием решается предложенным структурным синтезом систем управления.

В работе рассмотрены различные структуры систем управления для процессов нефтепереработки.

Рассмотрена структура комбинированной системы без предиктора,

которая обеспечивает достаточную грубость по отношению к неопределенности величины запаздывания такую же, как грубость основного контура. Показано, что система обеспечивает качественную компенсацию возмущений из функционального пространства  $L_2$ , а также ограниченных возмущений. Последнее означает возможность устранения медленных колебаний технологических переменных в установившемся режиме. Для обеспечения 5%-й точности существует ограничение сверху для частоты возмущения, которое зависит от передаточной функции объекта.

Рассмотрена модификация структурной схемы робастного комбинированного управления для случая, когда передаточная функция регулятора имеет нулевое характеристическое число.

Предложена схема компенсации перекрестных связей многосвязного объекта управления с запаздываниями по управлению, которая отличается от традиционной тем, что: она всегда физически реализуема, в некоторых случаях позволяет получить лучшие качественные показатели переходного процесса, обеспечивает грубость по отношению к изменениям величин запаздываний и коэффициентов модели объекта.

Преимуществом данных подходов к синтезу регулятора является простота его применения на практике.

В дальнейшем планируется продолжение работы в рамках НИР, связанной с развитием этой методики и ее применения для более широкого класса технологических объектов.

#### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Повышение показателей экологической безопасности конвекционной печи в условиях минимизации энергозатрат / **Гоголь И.В.**, Ремизова О.А., Сыроквашин В.В., Фокин А.Л. // Известия Санкт-Петербургского Государственного Технологического Института (Технического Университета). – 2022. – №61(87). – С. 80-84.

2. Адаптивное управление технологическими процессами с запаздыванием по управлению / **Гоголь И.В.**, Ремизова О.А., Сыроквашин В.В., Фокин А.Л. // Известия Санкт-Петербургского Государственного Технологического Института (Технического Университета). – 2020. – №57(83). – С. 90-97.

3. Робастное управление многосвязным технологическим объектом с

запаздываниями по входу / **Гоголь И.В.**, Ремизова О.А., Сыроквашин В.В., Фокин А.Л. // Известия Санкт-Петербургского Государственного Технологического Института (Технического Университета). – 2019. – №51(77). – С. 90-96.

4. Синтез робастных регуляторов для управления технологическими процессами в классе традиционных законов регулирования / **Гоголь И.В.**, Ремизова О.А., Сыроквашин В.В., Фокин А.Л. // Известия Санкт-Петербургского Государственного Технологического Института (Технического Университета). – 2018. – №44(70). – С. 98-106.

5. Управление техническими системами с запаздыванием при помощи типовых регуляторов с компенсацией возмущений / **Гоголь И.В.**, Ремизова О.А., Сыроквашин В.В., Фокин А.Л. // Известия Высших Учебных Заведений. Приборостроение. – 2017. – №60. – С. 882-890.

6. Управление технологическим объектом с запаздыванием по управлению с компенсацией возмущений / **Гоголь И.В.**, Ремизова О.А., Сыроквашин В.В., Фокин А.Л. // Известия Санкт-Петербургского Государственного Технологического Института (Технического Университета). – 2017. – №39(65). – С. 116-121.

7. Оперативное управление по статистическим моделям процессом плавки в печи Ванюкова / **Гоголь И.В.**, Кадыров Э.Д., Ремизова О.А., Фокин А.Л. // Известия Санкт-Петербургского Государственного Технологического Института (Технического Университета). – 2017. – №41(67). – С. 128-132.

8. Оперативное управление технологическим процессом висбрекинга по статистическим моделям в нормальном режиме / **Гоголь И.В.**, Бахри А., Фокин А.Л., Харазов В.Г. // Известия Санкт-Петербургского Государственного Технологического Института (Технического Университета). – 2016. – №35(61). – С. 79-84.

9. Оперативное управление технологическими процессами по статистическим моделям в нормальном режиме / **Гоголь И.В.**, Кадыров Э.Д., Фокин А.Л. // Известия Санкт-Петербургского Государственного Технологического Института (Технического Университета). – 2015. – №29(55). – С. 94-99.

*Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:*

1. **Gogol I.V.**, Kalashnikov N.A., Remizova O.A., Syrokvashin V.V., Fokin

A.L. Operational Model Predictive Control on the Example of the Stabilization Process for Hydro Treatment of Oil Fractions. // Studies in Systems, Decision and Control. – 2022. – Vol. 417. P. 145-156 // DOI 10.1007/978-3-030-95116-0\_12

2. **Gogol I.V.**, Remizova O.A., Syrokvashin V.V., Fokin A.L. Combined Control of Technological Processes with Delay. // Studies in Systems, Decision and Control. – 2022. – Vol. 418. P. 177-188 // DOI 10.1007/978-3-030-95120-7\_16

3. **Gogol I.V.**, Remizova O.A., Zhukov I.V., Fokin A.L. Robust control objects with delayed admission by the extended model. // Studies in Systems, Decision and Control. – 2022. – Vol. 418. P. 189-197 // DOI 10.1007/978-3-030-95120-7\_17

4. **Gogol I.V.**, Remizova O.A., Syrokvashin V.V., Fokin A.L. Robust autonomous control of a multiply connected technological object with input delays. // Cyber-Physical Systems: Modelling and Intelligent Control. – 2021. – Vol. 338. P. 153-166 // DOI 10.1007/978-3-030-66077-2\_12

5. **Gogol I.V.**, Remizova O.A., Syrokvashin V.V., Fokin A.L. Adaptive-robust control of technological processes with delay on control. // Studies in Systems, Decision and Control. – 2020. – Vol. 260. P. 133-147 // DOI 10.1007/978-3-030-32648-7\_11

6. **Gogol I.V.**, Remizova O.A., Syrokvashin V.V., Fokin A.L. Robust control system based on traditional pid control laws. // Studies in Systems, Decision and Control. – 2020. – Vol. 260. P. 149-157 // DOI: 10.1007/978-3-030-32648-7\_12

*Заявки на патенты, подтверждающих научные результаты и защищаемые положения диссертации:*

1. Способ синтеза настроек ПИД-регулятора робастной системы, заявка на изобретение № 2023127890: заявл. 27.10.2023: опубл. 18.12.2020 / **Гоголь И.В.**, Ремизова О.А.; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)». – 1 с.

2. Робастная система автоматического управления для объектов с запаздыванием, заявка на изобретение № 2023127891: заявл. 27.10.2023: опубл. 18.12.2020 / **Гоголь И.В.**, Ремизова О.А.; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)». – 1 с.

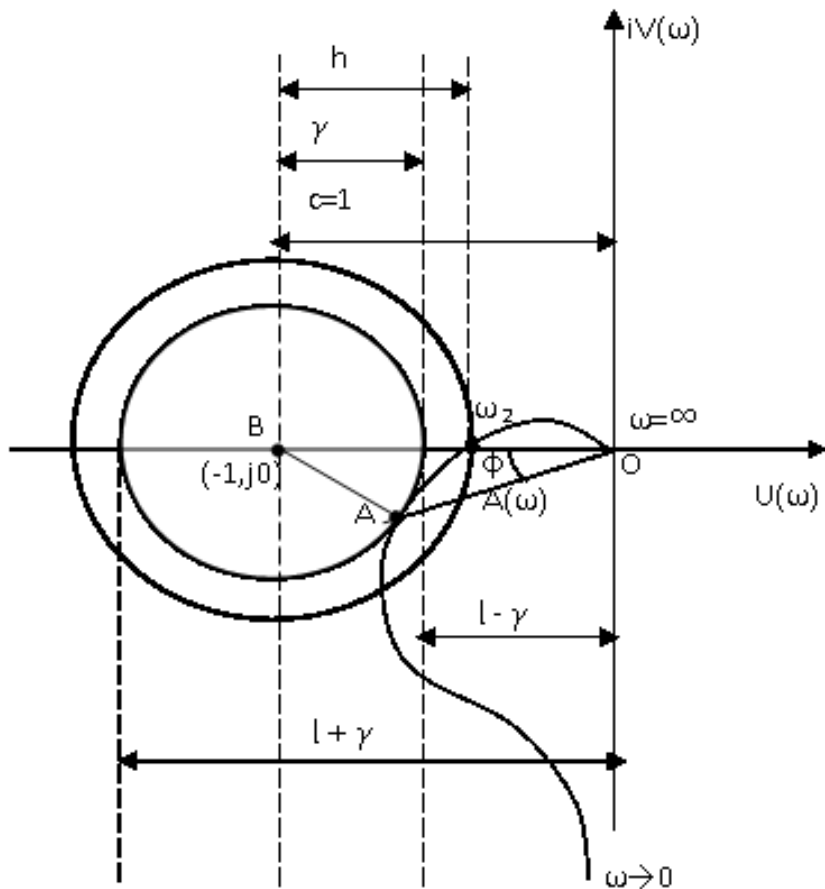


Рисунок 1 – Амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы с астатизмом I порядка

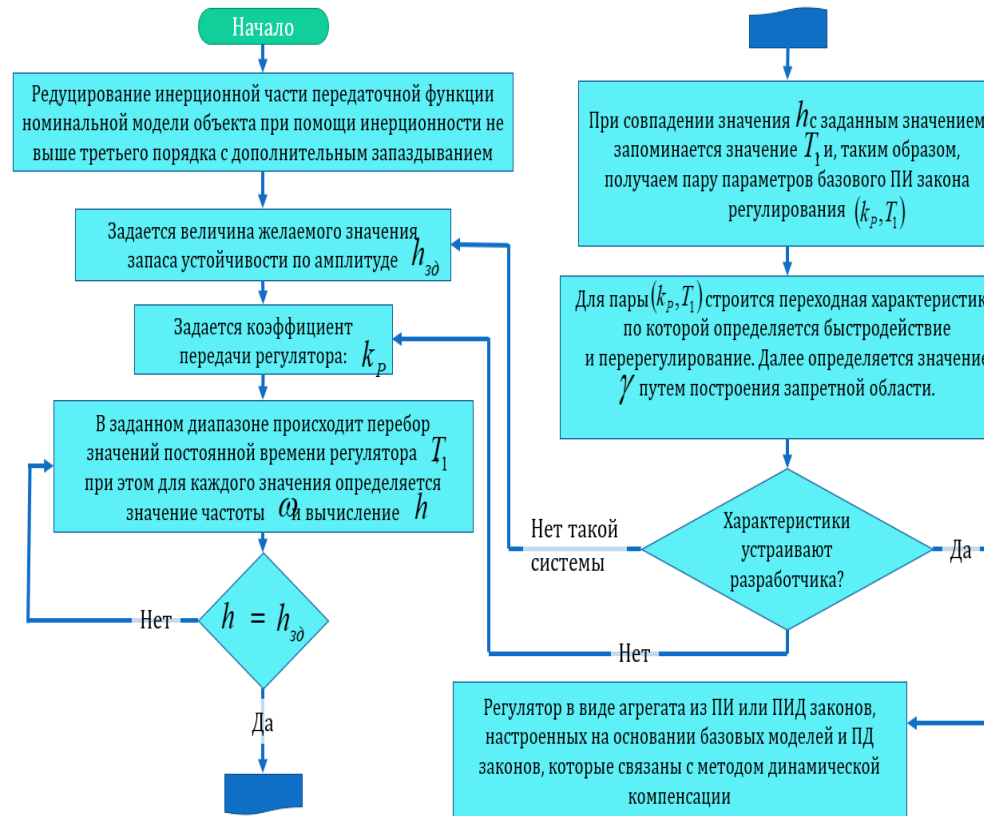


Рисунок 2 – Алгоритм процедуры синтеза

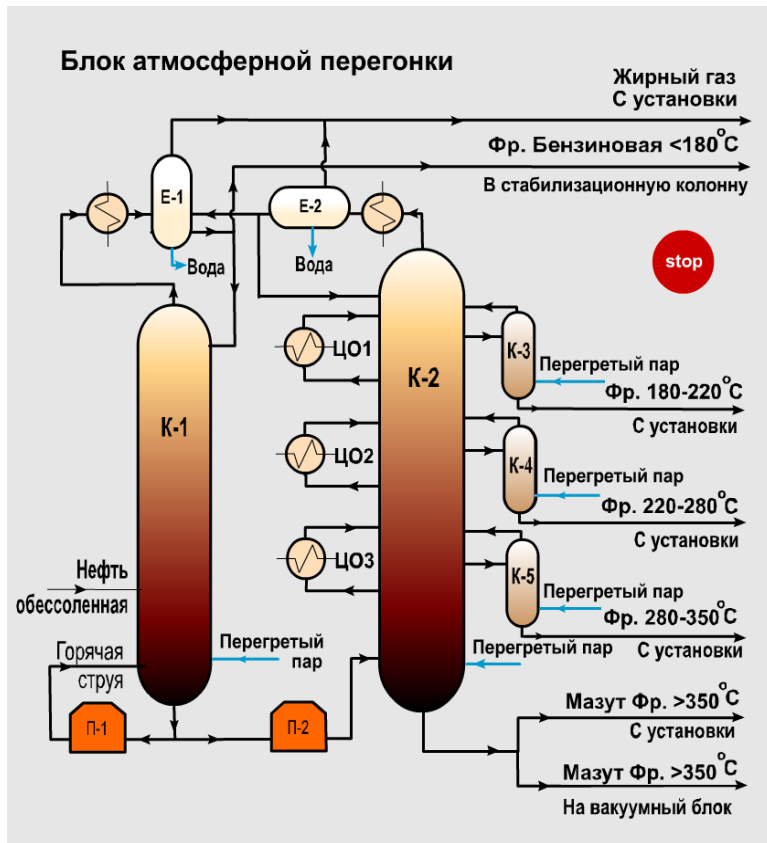


Рисунок 3 – Атмосферный блок

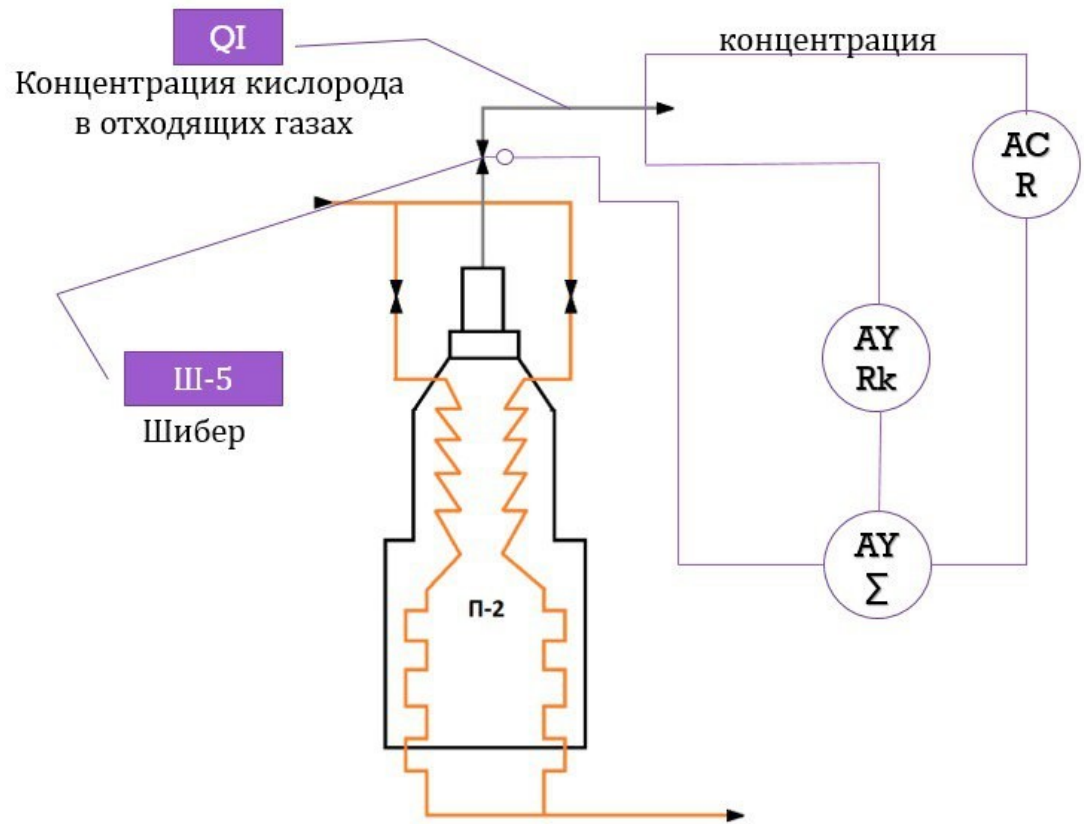


Рисунок 6 – Комбинированная система стабилизация концентрации кислорода в отходящих газах печи.