

*На правах рукописи*



**Цавнин Алексей Владимирович**

**СИНТЕЗ РОБАСТНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ С  
ИНТЕРВАЛЬНО-ОПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ,  
ГАРАНТИРУЮЩИХ НУЛЕВОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПЕРЕРЕГУЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

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

Томск – 2021 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель:

**Замятин Сергей Владимирович**,  
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

**Воевода Александр Александрович**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры Автоматики,  
директор УЦИТ «Информатика».  
Новосибирский государственный  
технический университет

**Иванчура Владимир Иванович**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор научно-учебной  
лаборатории автоматизированных  
систем управления  
технологическими процессами.  
Сибирский федеральный  
университет

Ведущая организация:

**Федеральное государственное  
бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре  
государственный университет»**

Защита состоится «2» декабря 2021 года в 15:30 на заседании диссертационного совета Д 212.268.03 в ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ком. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ТУСУРа по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте ТУСУРа по адресу: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/40cf48zf>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 года.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета



Е.Ю. Костюченко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

При разработке и внедрении систем управления технологическими процессами к ним предъявляются требования, определяющие качество производимой продукции. Одним из таких требований может являться отсутствие перерегулирования в контурах систем управления. Начиная с 70-ых годов XX века, проведены многочисленные исследования в области корневых подходов к синтезу регуляторов в составе систем управления как отечественными, так и зарубежными специалистами. Ряд работ посвящен разработке подходов к синтезу регуляторов, обеспечивающих для систем управления как некоторое минимально допустимое значение перерегулирования, так и его нулевое значение, в основе которых лежат как алгебраические критерии, так и частотные. В дальнейших работах получены правила взаимного расположения нулей и полюсов передаточной функции (ПФ) замкнутой системы (ЗС), гарантирующие монотонный переходный процесс. Несмотря на то, что на основе множества разработанных критериев сформулирован целый ряд методов и подходов к синтезу регуляторов различной структуры и проведен их сравнительный анализ, задача синтеза регуляторов, обеспечивающих нулевое перерегулирование в различных системах управления, остается актуальной и в настоящее время. Кроме того, стоит обратить внимание на тот факт, что методы синтеза регуляторов, в частности, ряд общеизвестных методов, таких как Циглера-Никольса, CHR, Коэна-Куна и др. позволяют получить устойчивые решения, но не дают представления о всей области допустимых значений настроечных коэффициентов регуляторов, что требуется для корректировки значений параметров, обусловленной изменяющимися условиями функционирования. Кроме того, стоит обратить внимание на тот факт, что представленные исследования и разработки представлены для класса линейных стационарных систем управления, но в силу технологических факторов, изменения окружающих условий, износа оборудования, действия возмущений, погрешности измерений параметры объекта управления (ОУ) могут изменяться не только в различных диапазонах, но и с различной динамикой. Несмотря на эти изменения, система управления должна отвечать заданным требованиям функционирования для выполнения технико-экономических показателей, а также для обеспечения безопасности людей и окружающей среды. В частности, для ряда систем управления, таким требованием является нулевое значение перерегулирования в условиях интервально-определенных параметров ОУ.

### **Цель и задачи исследования**

Цель диссертационной работы состоит в разработке методики параметрического синтеза регуляторов в составе систем управления с

интервально-определенными параметрами, обеспечивающих нулевое перерегулирование на всем диапазоне изменения параметров системы.

Поставленная цель предопределяет решение следующих задач:

- в классе линейных стационарных систем управления сформулировать аналитические ограничения на область допустимых значений настроечных коэффициентов регулятора, гарантирующего нулевое перерегулирование ЗС;
- на основе сформулированных ограничения на значения настроечных коэффициентов регулятора для линейных стационарных систем управления произвести масштабирование математического аппарата для систем управления с интервально-определенными параметрами;
- сформулировать параметрическую методику синтеза регуляторов в составе систем управления с интервально-определенными параметрами, обеспечивающих нулевое значение перерегулирования.

**Объектом диссертационного исследования** являются системы управления с интервально-определенными параметрами.

**Предметом диссертационного исследования** является синтез регуляторов для систем управления с интервально-определенными параметрами, обеспечивающих нулевое перерегулирование.

#### **Методы исследования**

Реализация сформулированных задач и достижение поставленной цели диссертационной работы осуществлялись на основе анализа существующих теоретических и практических разработок, имеющих отношение к исследуемой области. Для получения теоретических результатов применялись методы теории автоматического управления, дифференциального исчисления, математическое моделирование в среде Simulink. Для разработки ПО для автоматизации методики параметрического синтеза был использован ППП Matlab 2019b. Отдельные теоретические результаты были подтверждены экспериментально на лабораторной и производственной установках.

#### **Научная новизна**

- Получены математические соотношения значений настроечных коэффициентов регуляторов, гарантирующих нулевое значение перерегулирования для линейных стационарных систем управления, отличающиеся аналитическим построением границ областей значений настроечных коэффициентов регуляторов, обеспечивающих нулевое значение перерегулирования.
- Предложена методика отображения многопараметрического интервального корневого годографа (МИКГ) на плоскости зависимостей значений настроечных коэффициентов регуляторов, отличающаяся аналитическим построением границ областей настроечных коэффициентов регуляторов, за счет использования только двух передаточных функций из интервального

семейства, обеспечивающих отсутствие выхода управляемой величины за величину уставки.

– Разработан алгоритм параметрического синтеза регуляторов для систем управления с интервально-определенными параметрами, отличающийся гарантией обеспечения нулевого значения перерегулирования в системе управления на всем диапазоне значений интервально-определенных параметров объектов управления.

### **Защищаемые положения**

– Математические соотношения значений настроечных коэффициентов регуляторов, которые позволяют аналитически получить ограниченные области значений настроечных коэффициентов регуляторов, гарантирующих нулевое значение перерегулирования в линейных стационарных системах управления.

*Соответствует пункту 1 паспорта специальности: Разработка научных основ создания и исследования общих свойств и принципов функционирования элементов, схем и устройств вычислительной техники и систем управления.*

– Методика отображения МИКГ на плоскости параметров регуляторов, которая позволяет построить области настроечных коэффициентов регуляторов, за счет использования только двух передаточных функций из интервального семейства, обеспечивающих отсутствие выхода управляемой величины за величину уставки. *Соответствует пункту 1 паспорта специальности: Разработка научных основ создания и исследования общих свойств и принципов функционирования элементов, схем и устройств вычислительной техники и систем управления.*

– Алгоритм параметрического синтеза регуляторов для систем управления с интервально-определенными параметрами, позволяющих обеспечить нулевое значение перерегулирования в системе управления при изменении значений параметров ОУ в пределах определенных интервалов. *Соответствует пункту 2 паспорта специальности: Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления в нормальных и специальных условиях с целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик.*

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность результатов и выводов работы обеспечивается строгостью используемых математических методов, непротиворечивостью результатов и выводов с ранее полученными данными исследований, а также результатами натурального эксперимента на лабораторной и производственной установках.

### **Практическая значимость диссертационного исследования**

Полученные в ходе исследования результаты позволяют устранить перерегулирование в различных системах управления с интервально-определенными параметрами технологическими процессами. Разработанная методика синтеза регуляторов реализована в виде зарегистрированного программного приложения, позволяющего инженерам осуществлять необходимые расчеты.

Полученные результаты применены в задаче устранения перерегулирования в системе управления уровнем жидкости в установке неразрушающего контроля (АО НИИЭФА, г. Санкт-Петербург). Кроме того, результаты внедрены в учебный процесс Отделения автоматизации и робототехники Томского политехнического университета (ОАР ТПУ) в рамках дисциплины «Моделирование систем управления» для изучения и апробации различных методов и подходов к синтезу регуляторов в составе систем управления. Кроме того, результаты диссертации использованы в ФГБОУ ВО «ТУСУР» при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, проект FEWM-2020-0036 «Методическое и инструментальное обеспечение принятия решений в задачах управления социально-экономическими системами и процессами в гетерогенной информационной среде».

### **Внедрение**

Полученные результаты внедрены в АО НИИЭФА им. Д.В. Ефремова (г. Санкт-Петербург), а также в учебный процесс Национального исследовательского Томского политехнического университета. Представленные внедрения подтверждаются соответствующими актами.

### **Апробация**

Научные результаты докладывались на следующих российских и международных научно-практических конференциях: XIX Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям (Кемерово 2018), Всероссийская научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Х Камские чтения» (Набережные Челны 2018), Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (Томск 2018), XVI Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодежь и современные информационные технологии», 3-7 декабря 2018 (Томск 2018), 14th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2019), October 14-17 2019 (Tomsk, Russia), The 11th International Congress On Ultra Modern Telecommunications And Control Systems 2019 October 28-30 2019, (Dublin, Ireland).

### **Публикации.**

Основные результаты по теме диссертации изложены в 11 печатных публикациях. 3 публикации изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 4 тезиса докладов на русском языке, 3 публикации, проиндексированные в базе Scopus, в том числе статья в журнале второго квартиля (Q2), а также свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Личный вклад автора**

Автором сформулированы аналитические ограничения на значения настроечных коэффициентов регуляторов в составе линейных стационарных систем управления для ОУ с ПФ второго порядка, гарантирующие вещественные значения полюсов ПФ ЗС, а также аналитические ограничения на значения настроечных коэффициентов регуляторов, обеспечивающие отсутствие перерегулирования. Полученные результаты в общем виде расширены на класс систем управления с интервально-определенными параметрами, сформулированы дополнительные ограничения, обусловленные интервальным характером параметров ОУ. С учетом полученных результатов разработана методика расчета настроечных коэффициентов регуляторов, обеспечивающего нулевое перерегулирование для систем управления с интервально-определенными параметрами. Автором разработано ПО для автоматизации сформулированной методики.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** раскрыта актуальность диссертационного исследования, приведен аналитический обзор научных публикаций по представленной тематике, сформулированы ключевые задачи и проблематика.

**В первой главе** проведен литературный обзор предметной области. Показана критическая значимость значения перерегулирования для ряда технологических процессов, а также необходимость его устранения во избежание нарушения производственной технологии и возникновения аварийных ситуаций. Рассмотрены различные методы и подходы к синтезу регуляторов различной структуры, представлены их недостатки.

Показано, что важным фактором, усложняющим процедуру синтеза регулятора и снижающим эффективность существующих методов и подходов к синтезу регуляторов в составе систем управления, является интервальный характер параметров ОУ, который обусловлен погрешностью измерений, переменными факторами окружающей среды, физическим износом и прочими аспектами функционирования. Представлено обоснование использования именно робастного подхода к синтезу автоматизированных систем управления.

Рассмотрены методы и подходы к синтезу робастных регуляторов для систем управления, в частности для систем с интервально-определенными параметрами.

**Во второй главе** для класса линейных стационарных систем управления рассмотрены условия взаимного расположения нулей и полюсов ПФ, обеспечивающие нулевое перерегулирование. Сформулированы аналитические выражения, ограничивающие область значений настроечных коэффициентов ПИД-регулятора, гарантирующие вещественные значения полюсов ПФ ЗС, как одного из необходимых условия обеспечения нулевого перерегулирования. Представлены аналитические соотношения, на основе необходимых и достаточных условий нулевого перерегулирования, для расчета коэффициентов ПИД-регулятора. Сформулировано аналитическое обоснование выбора коэффициента пропорциональности ПИД-регулятора, рассмотрен числовой пример.

Одним из необходимых условий нулевого перерегулирования является вещественность полюсов ПФ. Для объекта с ПФ вида

$$W(s) = \frac{K_P}{s^2 + 2\alpha s + \alpha^2 + \omega^2}$$

замкнутая система управления с ПИД-регулятором будет описываться ПФ вида

$$W_{CL}(s) = \frac{DK_P s^2 + KK_P s + IK_P}{s^3 + (2\alpha + DK_P)s^2 + (\alpha^2 + \omega^2 + KK_P)s + IK_P}. \quad (1)$$

Дискриминант характеристического уравнения (1), с учетом введения в рассмотрение приведенных настроечных коэффициентов ПИД-регулятора, полученных путем замены вида  $DK_P = D'$ ,  $KK_P = K'$  и  $IK_P = I'$ , будет принимать положительные значения при выборе настроечных коэффициентов из области  $\Omega$ , ограниченной кривыми, которые описываются функциями вида

$$I'_1(\alpha, \omega, K', D') = \frac{18\alpha K' + 9D'K'}{27} + \frac{2\sqrt{(\alpha^2 - 3\omega^2 + 4\alpha D' + D'^2 - 3K')^3}}{27} +$$

$$+ \frac{18\omega^2\alpha + 9\omega^2 D' - 12\alpha D'^2}{27} - \frac{15\alpha^2 D' + 2\alpha^3 - 2D'}{27}; \quad (2)$$

$$I'_2(\alpha, \omega, K', D') = \frac{18\alpha K' + 9D'K'}{27} - \frac{2\sqrt{(\alpha^2 - 3\omega^2 + 4\alpha D' + D'^2 - 3K')^3}}{27} +$$



$$+\frac{18\omega^2\alpha+9\omega^2D'-12\alpha D'^2}{27}-\frac{15\alpha^2D'+2\alpha^3-2D'}{27}.$$

Графики функций (2) с некоторыми известными  $\alpha$ ,  $\omega$  и  $K'$ , представлена на рисунке 1.

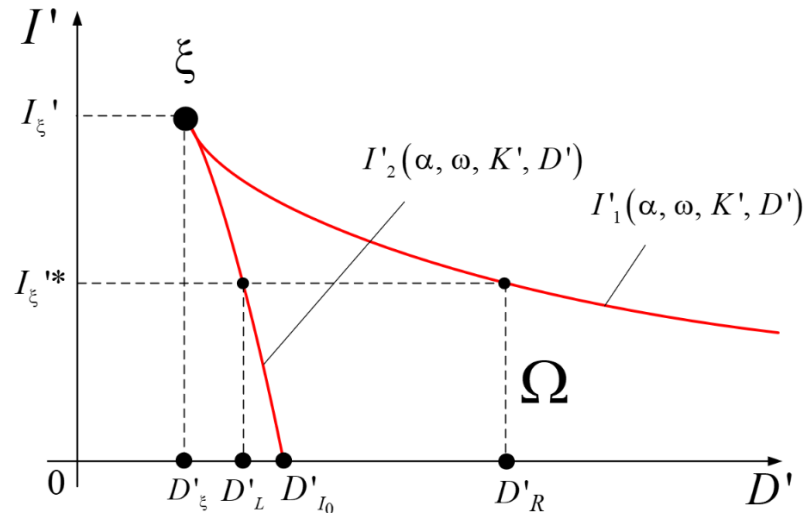


Рис. 1 – Область допустимых значений настроечных параметров  $\Omega$ , обеспечивающих вещественные значения полюсов ПФ ЗС

Из рис. 1 видно, что  $\exists(\cdot)\xi \in \Omega$ , координатами которой являются максимально допустимое значение коэффициента интегрирования и минимально допустимое значение коэффициента дифференцирования при фиксированном коэффициенте пропорциональности для данного объекта управления. Смысл данного значения  $\xi$  состоит в том, что для того, чтобы обеспечить вещественные значения для полюсов замкнутой системы, интегральная составляющая не должна превышать некоторого значения  $I'_\xi$ , а дифференциальная составляющая должна быть больше некоторого значения  $D'_\xi$ . На основе (2) получим, что координаты точки  $\xi$  будут определяться как

$$I'_\xi(\alpha, \omega, K') = \frac{\sqrt{3(\alpha^2 + \omega^2 + K')^3}}{9}$$

$$D'_\xi = -2\alpha + \sqrt{3(\alpha^2 + \omega^2 + K')}$$

Стоит заметить, что каждому значению коэффициента интегрирования из диапазона  $(0, I'_\xi)$  соответствует множество допустимых значений коэффициента дифференцирования. Необходимо найти аналитические выражения, которые позволят однозначно определить границы интервала

допустимых значений параметра  $D'$ . Найдем обратную функцию от (2), чтобы определить значения коэффициента  $D'$  при выбранном значении  $I'$  и определять значения левой и правой границ  $D'_L$  и  $D'_R$  множества допустимых значений параметра  $D'$  при заданном значении  $I'$ .

Затем для дальнейшего аналитического описания условий и ограничений, с помощью формулы Кардано, получены аналитические выражения для полюсов ПФ третьего порядка, описываемые выражениями вида

$$s_{1,2,3}(a_3, a_2, a_1, a_0) = \begin{cases} \left( u(a_3, a_2, a_1, a_0) + v(a_3, a_2, a_1, a_0) \right) - \frac{a_2}{3a_3}; \\ \left( u(a_3, a_2, a_1, a_0)e_2 + v(a_3, a_2, a_1, a_0)e_1 \right) - \frac{a_2}{3a_3}; \\ \left( u(a_3, a_2, a_1, a_0)e_1 + v(a_3, a_2, a_1, a_0)e_2 \right) - \frac{a_2}{3a_3}, \end{cases}$$

где

$$u(a_3, a_2, a_1, a_0) = \sqrt[3]{\left( \frac{9a_3a_2a_1 - 27a_0a_3^2 - 2a_2^3 + r(a_0, a_1, a_2, a_3)}{54a_3^3} \right)},$$

$$v(a_3, a_2, a_1, a_0) = \sqrt[3]{\left( \frac{9a_3a_2a_1 - 27a_0a_3^2 - 2a_2^3 - r(a_0, a_1, a_2, a_3)}{54a_3^3} \right)},$$

$$r(a_0, a_1, a_2, a_3) = \sqrt{\left( 27a_0a_3^2 - 9a_3a_2a_1 + 2a_2^3 \right)^2 + 4\left( 3a_1 - a_2^2 \right)^3},$$

$$e_1 = -\frac{1}{2} + i\frac{\sqrt{3}}{2},$$

$$e_2 = -\frac{1}{2} - i\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Пользуясь свойством  $e_1^2 = e_2$  и  $e_2^2 = e_1$ , выражение для корней уравнения можно переписать как

$$s(a_3, a_2, a_1, a_0) = \left( u(a_3, a_2, a_1, a_0)e_1^k + v(a_3, a_2, a_1, a_0)e_2^k \right) - \frac{a_2}{3a_3}, k = \{0, 1, 2\}.$$

Рассмотрев значения в точке  $\xi$ , получено, что при выборе настроечных коэффициентов интегрирования и дифференцирования равных  $I'_\xi$  и  $D'_\xi$ ,

замкнутая система имеет полюс тройной кратности и достигается максимальная степень устойчивости, определяемая выражением вида

$$\eta_{\xi_{MAX}}(\alpha, \omega, K') = \frac{\sqrt{3(\alpha^2 + \omega^2 + K')}}{3}.$$

Далее, на основании известных необходимых и достаточных условий нулевого перерегулирования для системы с передаточной функцией третьего порядка и вещественными полюсами, получено, что для обеспечения нулевого перерегулирования необходимо и достаточно, что выполнялось по крайней мере одно из условий вида

$$\begin{cases} T^2 \left( \frac{K'}{I'} - T \right) - T \frac{D'}{I'} \leq 0, \\ T \left( \frac{D'}{I'} - T^2 \right) \leq 0. \end{cases}$$

$$\begin{cases} T^2 \left( \frac{K'}{I'} - T \right) - T \frac{D'}{I'} \leq 0, \\ T^3 \left( 2T^2 \left( \frac{K'}{I'} - \frac{5}{2}T \right) \right) + \left( T \left( \frac{D'}{I'} - 2T^2 \right) \right)^2 \leq 0. \end{cases}$$

где  $T$  – постоянная времени, соответствующие полюсу тройной кратности для ПФ ЗС. С помощью аналитических выражений для расчета значений полюсов передаточной функций, получено, что при значении коэффициента пропорциональности регулятора, удовлетворяющему неравенству вида

$$K \leq \frac{2\alpha^2 + 6\alpha\omega + 2\omega^2}{K_p}$$

условие нулевого перерегулирования будет выполняться во всех точках области, ограниченной кривыми (2).

По аналогии с результатами для полного ПИД-регулятора представлены результаты для регулятора ПИ-структуры. Сформулировано правила выбора между ПИ- и ПИД-регулятором в составе системы управления на основе полюсов ПФ ОУ.

Таким образом, в главе 2 сформулирован обобщенный подход к синтезу ПИД-регулятора в составе линейных стационарных систем управления для обеспечения нулевого перерегулирования. В рамках формирования подхода были получены следующие основные результаты:

– сформированы аналитические ограничения на область значений настроечных коэффициентов регулятора, обеспечивающие вещественность полюсов ПФ ЗС, как необходимого условия обеспечения нулевого перерегулирования;

– на основе условий нулевого перерегулирования были наложены дополнительные аналитические ограничения на выбор настроечных коэффициентов, в частности на коэффициент пропорциональности регулятора для обеспечения нулевого перерегулирования во всех точках области для последующих задач робастного синтеза в классе систем с интервально-определенными параметрами;

– с учетом представленных аналитических результатов, предложен выбор структуры регулятора в составе систем управления в зависимости от конфигурации полюсов ПФ ОУ.

Полученные результаты работы были проверены на математических моделях, которые подтверждают достоверность представленных результатов исследования.

**В третьей главе** подход к синтезу ПИД-регулятора для объекта выбранного порядка, представленный в Главе 2, был масштабирован на класс систем управления с интервально-определенными параметрами с учетом аналитических выражений и зависимостей. Описан способ выбора членов интервального семейства, определяющих ограничения на область допустимых значений настроечных параметров регулятора, обеспечивающих нулевое перерегулирование для всего интервального семейства ПФ. Получен метод расчета краевого набора коэффициентов ПИД-регулятора, обеспечивающего нулевое перерегулирование для систем управления с интервально-определенными параметрами. Рассмотрен численный пример.

В силу того, что каждая ветвь корневого годографа представляет собой траекторию движения полюса ПФ объекта управления при изменении одного из интервально-определенных параметров при фиксированных в предельных значениях остальных параметров, то каждая точка  $p(\alpha, \omega)$ , принадлежащая данной кривой, соответствует полюсу ПФ при некотором значении варьируемого параметра. Следовательно, для совокупности точек внешней границы МИКГ может быть сформировано отображение в плоскости  $D'-I'$ .

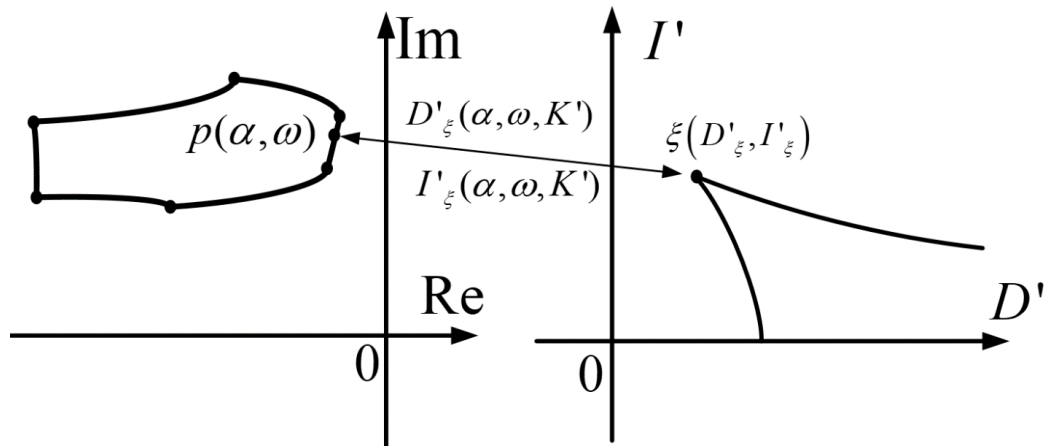


Рис. 2 – Отображение точки МИКГ на плоскость  $D'-I'$

Каждая точка, принадлежащая отображению  $M(K_P)$  образует область в плоскости  $D'-I'$ , содержащую приведенные настроечные параметры регулятора, которые гарантируют вещественные значения полюсов ПФ ЗС. Соответственно, рассматривая всё множество точек, которое принадлежит отображению  $M$  при всех возможных значениях коэффициента усиления объекта управления  $K_P$ , будем иметь множество таких областей, соответствующее всему интервальному семейству объектов управления. Пересечение полученных областей даст некоторую подобласть в плоскости  $D'-I'$  такую, что значения  $D'$  и  $I'$  при выбранном  $K' = KK_P$  обеспечат вещественные значения полюсов ПФ ЗС для всего множества объектов управления с интервально-заданными параметрами.

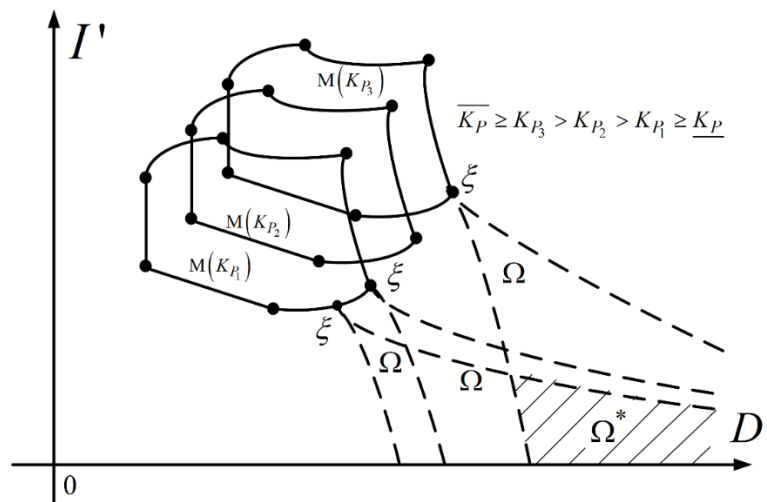


Рис. 3 – Пересечение областей  $\Omega$ , образующих общую область  $\Omega^*$

Стоит обратить внимание, что несмотря на тот факт, что множество точек  $M(K_P)$  образует множество областей, итоговая область  $\Omega^*$  определяется частями двух кривыми (1), каждая из которых соответствует

определенному члену интервального семейства ОУ (см. рис. 3). На основе выражений, полученных в главе 2, на известной области определения, сформированной значениями интервальных параметров, определены два члена интервального семейства, которые формируют ограничения на область  $\Omega^*$  для систем управления с интервально-определенными параметрами.

Аналогичным образом, используя аналитические результаты для ПИ-регулятора, полученные в главе 2, представлен

Основными результатами, полученными в главе 3, являются:

- Способ отображения МИКГ в плоскость приведенных настроечных коэффициентов ПИД-регулятора.
- Формулировка выбора особых членов интервального семейства, обеспечение нулевого перерегулирования для которых обеспечит нулевое перерегулирование для всего интервального семейства ПФ.
- Общая формулировка метода настройки ПИД-регулятора в составе систем управления с интервально-заданными параметрами для задачи устранения перерегулирования.

**В четвертой главе** диссертационного исследования приведена практическая апробация разработанной методики синтеза регулятора в составе системы управления уровнем жидкости в иммерсионной ванне роботизированной установки ультразвукового контроля. В рамках разработки представленной установки одной из задач, согласно техническому заданию, являлось наполнение резервуара до заданного значения без перелива, т.е. в контуре управления уровнем должно отсутствовать перерегулирование. Общий вид установки и принципиальная схема системы водоподготовки приведена на рисунках 4 и 5.

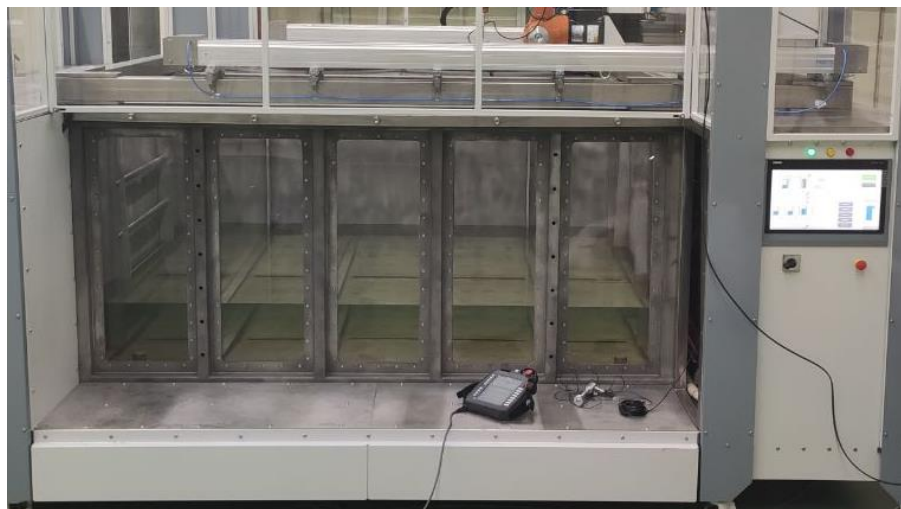


Рис. 4 – Общий вид установки

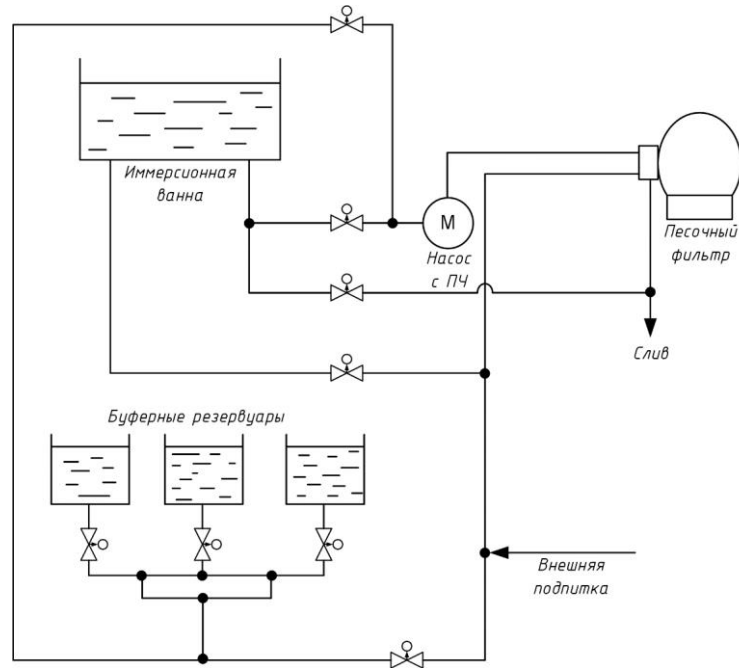


Рис. 5 – Принципиальная схема системы водоподготовки

С целью предварительной апробации методики синтеза регулятора в составе представленной системы управления, а также экспериментального подтверждения применимости разработанного математического аппарата была разработана учебная исследовательская установка по изучению вопросов управления гидравлическими процессами, которая имитирующей процесс перелива в сообщающихся сосудах. Функциональная схема исследовательской установки представлена на рисунке 6.

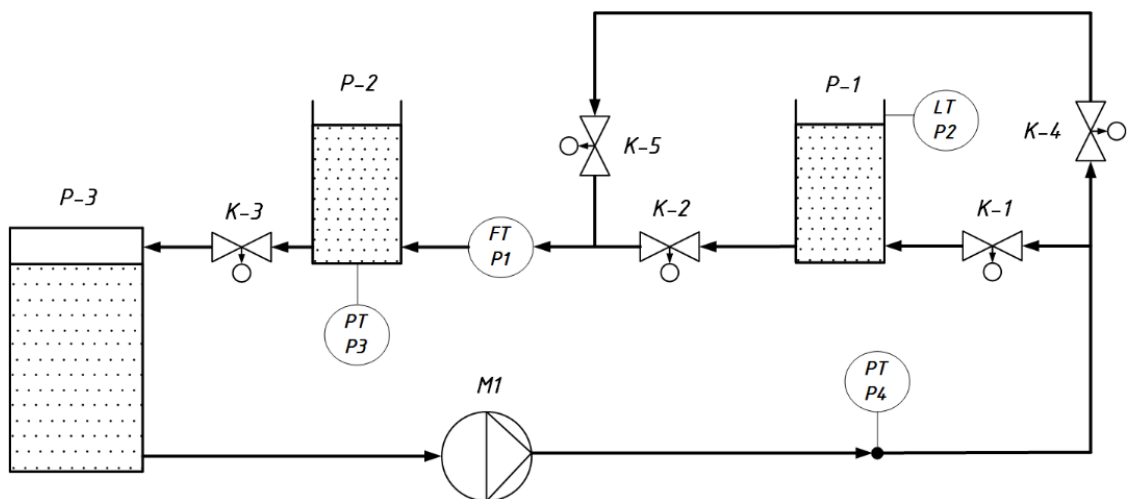


Рис. 6 – Функциональная схема автоматизации гидравлической установки

В состав рассматриваемой установки (рис. 6) входят последовательно соединенные резервуары P-1 и P-2, сливного резервуара P-3, отсечных (K-2, K-3) и регулирующих (K-1, K-4, K-5) клапанов, а также насоса M1 с частотным управлением.

Апробация метода синтеза осуществляется для системы автоматического регулирования уровня в резервуаре Р-1. В данном контуре управляемый регулятором частотный преобразователь регулирует частоту вращения электродвигателя насоса М1, осуществляющий перекачку жидкости из общего резервуара Р-3 в резервуар Р-1. При этом, регулирующие клапаны находится в полностью открытом положении, что обеспечивает отток жидкости из резервуара Р-1 в резервуар Р-2, причем скорость потока жидкости из Р-1 в Р-2 будет нелинейно зависеть от высоты столба жидкости в Р-1, что усложняет процесс регулирования и требует учета при разработке математической модели, на основе которой проводится процедура синтеза.

Технологический процесс наполнения резервуара Р-1 с учетом структуры установки, в общем виде, описывается дифференциальным уравнением вида

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_{ВХ} - Q_{ВЫХ}}{S_{СЕЧ}},$$

где  $Q_{ВХ}$  – входной приток жидкости ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) в резервуар Р-1,  $Q_{ВЫХ}$  – расход потока жидкости из Р-1 в Р-2,  $S_{СЕЧ}$  – площадь поперечного сечения резервуара Р-1 ( $\text{м}^2$ ). В свою очередь, величина расхода  $Q_{ВЫХ}$  будет определяться как

$$Q_{ВЫХ} = v_{ВЫХ} S_{ОТВ},$$

где  $v_{ВЫХ} = \sqrt{2gh}$  – скорость выходного потока ( $\text{м}/\text{с}$ ), определяемая формулой Торричелли,  $g$  – ускорение свободного падения,  $h$  – высота столба жидкости

в резервуаре Р-1. Далее, вводя в рассмотрение переменную  $A = \frac{1}{S_{СЕЧ}}$  ( $\text{м}^{-2}$ ),

структурная схема замкнутой системы примет вид, представленный на рисунке 7.

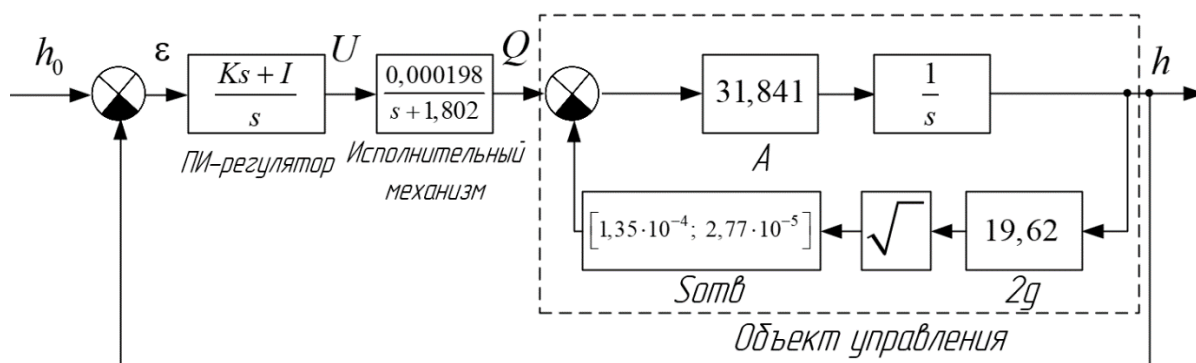


Рис. 7– Структурная схема системы управления



В силу того, что скорость выходного потока нелинейно зависит от высоты столба жидкости в рассматриваемом резервуаре, для применения методики синтеза линеаризуем представленный объект при помощи размещения статической характеристики данной нелинейности между двумя прямыми, описываемых функциями

$$f_1(h) = \overline{K}_L h \quad (3)$$

$$f_2(h) = \underline{K}_L h \quad (4)$$

таким образом, чтобы все точки статической характеристики на выбранном рабочем диапазоне ОУ лежали между прямыми, описываемыми выражениями (3), (4). Статическая характеристика нелинейности ОУ и полученные прямые, ограничивающие рабочую область представлены на рисунке 8.

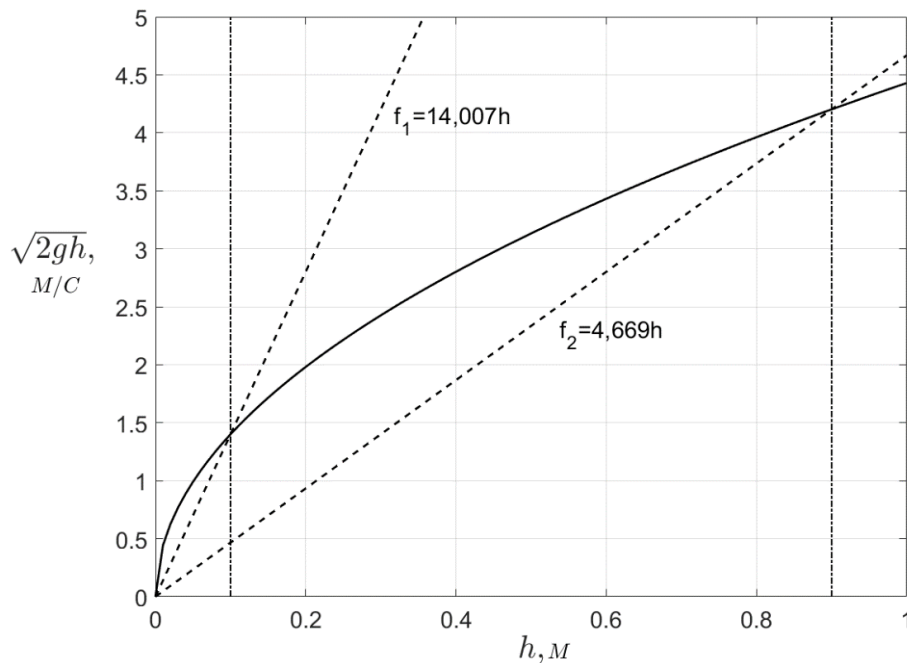


Рис. 8 – Статическая характеристика нелинейности ОУ с прямыми, ограничивающими интервал линеаризации на выбранном рабочем диапазоне

Диапазон линеаризации от 0,1 м до 0,9 м соответствует основному рабочему диапазону функционирования установки, т.к. в виду ее конструктивных особенностей, значения уровня водного столба в резервуаре Р-1 ниже 0,1 м и выше 0,9 м соответствуют критическим режимам работы, близким к аварийным уставкам.

На основе проведенной интервальной линеаризации нелинейный элемент  $\sqrt{2gh}$  преобразовывается в интервальный коэффициент  $K_L = [4,669; 14,007]$ .

Другим существенно изменяемым параметром системы является значение степени открытия регулирующего клапана К-2. Степень открытия регулирующего клапана рассматриваемой установки будет определять значение параметра  $S_{OTB}$ , т.е. площадь сечения пропускного отверстия трубы, соединяющий сообщающиеся резервуары Р-1 и Р-2. С использованием приложения «Parameter Estimator» в ППП Matlab получим, что значения параметра  $S_{OTB}$  будет принадлежать интервалу

$$S_{OTB} = [S_{OTB}; \overline{S_{OTB}}] = [2,77 \cdot 10^{-5}; 1,35 \cdot 10^{-4}],$$

где, значение  $\underline{S_{OTB}}$  соответствует 10%-ной степени открытия регулирующего клапана, а  $\overline{S_{OTB}}$  – 100%. Таким образом, с учетом результатов интервальной линеаризации, а также интервально-определенного значения параметра, характеризующего площадь сечения пропускного отверстия, преобразованная структурная схема системы управления примет вид, представленный на рисунке 9.

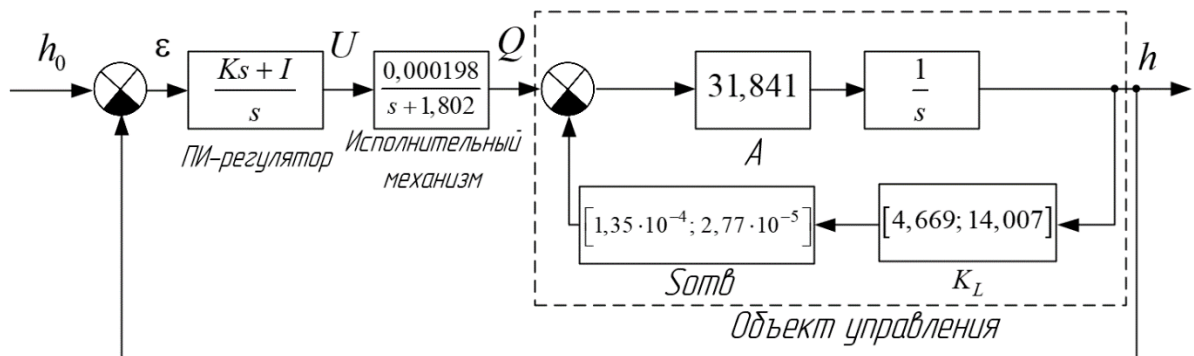


Рис. 9 – Структурная схема линеаризованной системы управления с интервально-определенными параметрами

Таким образом, имеем, что ПФ ОУ с интервально-определенными параметрами примет вид

$$W_{Oy}(s) = \frac{0,006076}{s^2 + [1,806; 1,863]s + [0,007043; 0,1089]}. \quad (5)$$

Для полученной ПФ ОУ (5), действительная и мнимая части ее полюсов будут лежать в интервалах  $\alpha = [0,5; 0,9317]$ ,  $\omega = [0,3757j; 0,9276j]$ . С учетом значений полюсов ПФ ОУ с интервально-определенными параметрами, для решения данной задачи выбран ПИ-регулятор. Далее на основании

вышеизложенных результатов получим, что искомая область  $\Omega^*$  будет ограничиваться кривыми для (2) для следующих членов интервального семейства

$$W_{\xi_1}(s) = \frac{0,006076}{s^2 + 1,806s + 0,1089};$$

$$W_{\xi_2}(s) = \frac{0,006076}{s^2 + 1,863s + 0,007043}.$$

Для каждого из выбранных членов интервального семейства определено множество точек, обеспечивающих нулевое перерегулирование, и, далее, среди множества данных точек, одновременно лежащих внутри области  $\Omega^*$  выбрана одна, координаты которой определяют значения настроечных коэффициентов ПИ-регулятора. Множество точек, удовлетворяющих условиям нулевого перерегулирования в плоскости параметров регулятора представлено на рисунке 10.

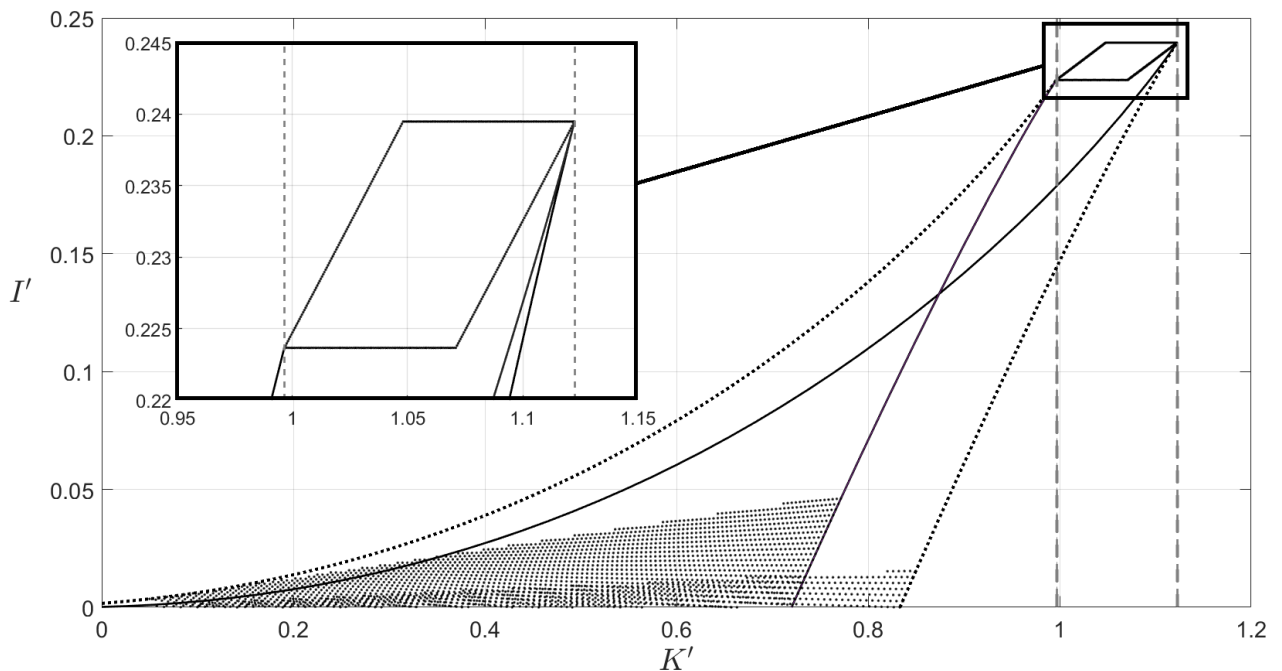


Рис. 10 – Формирование области  $\Omega^*$  относительно отображения МИКГ на плоскость  $K'-I'$

Для данного эксперимента в полученной области  $\Omega^*$  на основе сформулированных результатов будет выбрана точка с координатами  $(0,2316; 0,0054)$ . С учетом замены вида  $K' = KK_p$ ,  $I' = IK_p$  и значения  $K_p = 0,006076$ , непосредственно значения настроечных коэффициентов, которые будут использованы в регуляторе, будут равны, соответственно,  $K = 38,113$  и  $I = 0,882$ . Далее, применив настройки в регулятор, снимем

переходные характеристики системы управления на различных уставках и сравним с модельным экспериментом в среде Matlab на исходной нелинейной модели. Экспериментальные и модельные переходные характеристики представлены на рисунке 11.

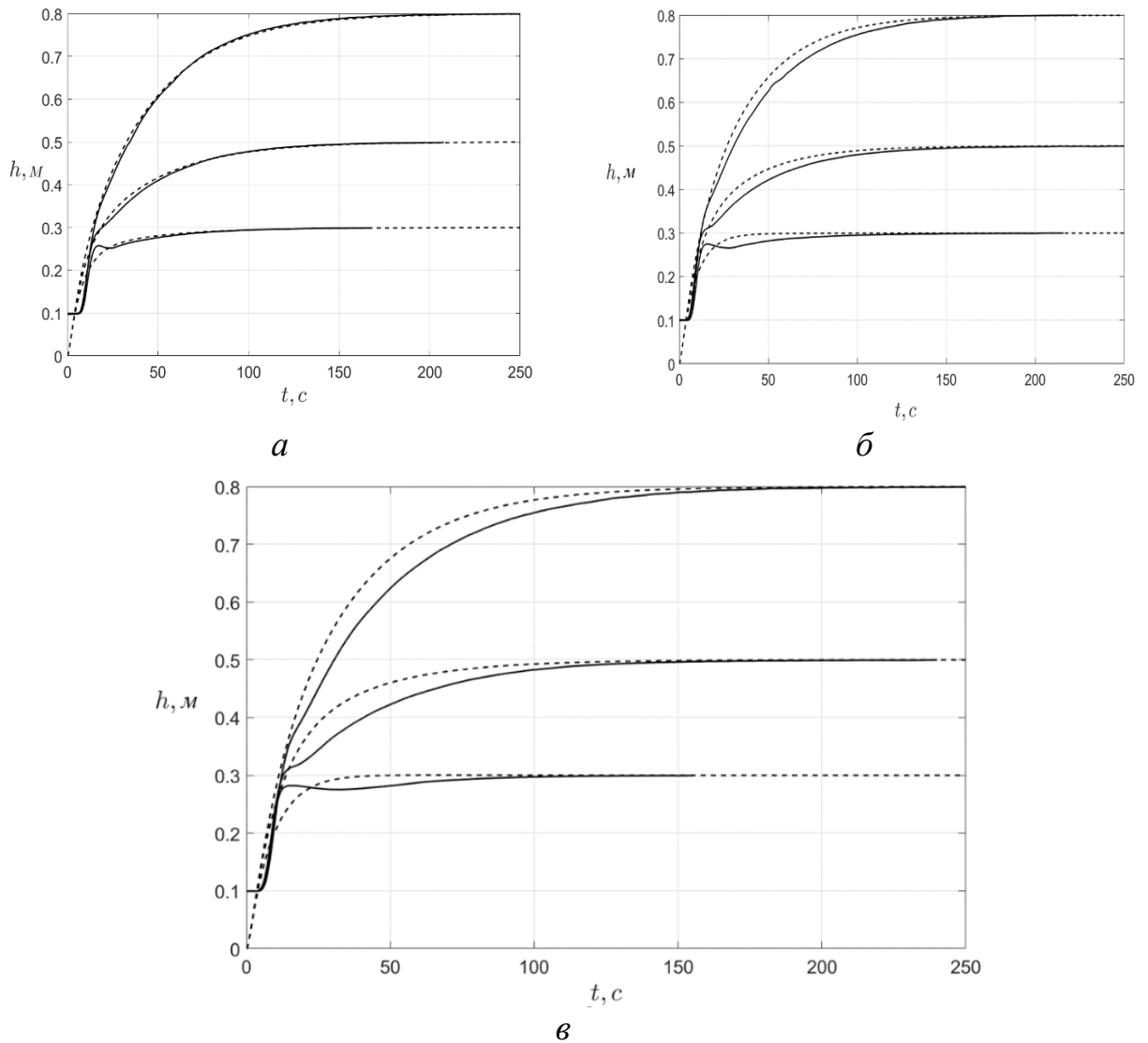


Рис. 11 – Графики переходных характеристик СУ (штриховая линия – для нелинейной модели, сплошные – экспериментальные) при значении степени открытия регулирующего клапана 100% (а), 60% (б) и 30% (в)

Рассматривая переходные характеристики, видно, что заявленное методикой выполнение требования нулевого значения перерегулирования выполняется на всем диапазоне интервально-определенных параметров.

Таким образом, в главе 4 представлена процедура практической апробации разработанной структурно-параметрической методики синтеза регулятора, обеспечивающего нулевое значение перерегулирования на примере контура управления уровнем в резервуаре на исследовательской

установке по вопросам управления гидравлическими процессами. В рамках апробации в математическую модель контура управления введен интервально-определенный коэффициент за счет интервальной линеаризации нелинейности, обусловленной наличием сообщающегося резервуара и, соответственно, наличия постоянного внешнего возмущения, зависящего от величины значения уровня в исследуемом ОУ. С полученным ПИ-регулятором были получены адекватные друг другу модельные и реальные переходные характеристики с нулевым значением перерегулирования, что подтверждает выполнение заявленных результатов и позволяет судить о применимости разработанной методики.

**В заключении** приведены основные результаты диссертационной работы

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Сформулированы аналитические ограничения на область допустимых значений параметров регуляторов, обеспечивающих нулевое перерегулирование, позволяющие выбрать структуру регулятора на основе параметров ОУ
2. Разработана методика отображения многопараметрического интервального корневого годографа на плоскость настроечных коэффициентов регулятора, позволяющая выбрать особые члены интервального семейства ПФ для формирования ограничений на значения настроечных коэффициентов регулятора
3. Разработана методика параметрического синтеза регулятора, обеспечивающего нулевое значение перерегулирования для систем с интервально-определенными параметрами, учитывающая быстродействие системы
4. Разработано и запатентовано ПО для ЭВМ на базе Matlab для синтеза регуляторов на основе разработанных методик и сформулированных ограничений
5. Произведена практическая апробация методики синтеза регулятора в составе систем управления производственными процессами и исследовательских установок физического подобию

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В изданиях, рекомендованных ВАК по специальности диссертации

1. **Цавнин, А.В.** Корневой подход к синтезу параметров ПИД-регулятора, гарантирующий отсутствие перерегулирования в переходной характеристике системы управления / А.В. Цавнин, С.В. Ефимов, С.В. Замятин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2019. – Т. 22 – № 2. – С. 77-82.
2. **Цавнин, А.В.** Метод синтеза регулятора робастного по перерегулированию для АСУ ТП с параметрической неопределенностью / А.В. Цавнин, А.Ю. Зарницын, С.В. Ефимов, И.А. Подковыров, С.В. Замятин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2021. – № 4. – С. 3-11.

### В журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science

3. **Tsavnin, A.** Overshoot Elimination for Control Systems with Parametric Uncertainty via a PID Controller / A. Tsavnin, S. Efimov, S. Zamyatin // Symmetry. – 2020. – Vol. 12.

### Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021613106 Программный пакет для расчета коэффициентов регулятора для систем с параметрической неопределенностью / **Цавнин А.В.**, Ефимов С.В., Замятин С.В. – №2020667539; заявл. 24.12.2020; опубл. 02.03.2021.

### В трудах конференций, индексируемых в Scopus и Web of Science

5. **Tsavnin, A.V.** Providing real closed-loop transfer functions poles for plant with interval-given parameters for overshoot elimination / A.V. Tsavnin, S.V. Efimov, S.V. Zamyatin // Proceedings of 11th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – Dublin, Ireland, 2019. – P. 1-7.

### В изданиях, рекомендованных ВАК по смежной специальности

6. **Цавнин, А.В.** Построение внешней границы области локализации полюсов передаточной функции с интервально-заданными параметрами / А. В. Цавнин, С. В. Ефимов, С. В. Замятин // Сибирский журнал науки и технологий. – 2019. – Т. 20, № 3. – С. 327–332.

**В трудах конференций**

7. **Цавнин, А.В.** Влияние вещественного нуля на прямые показатели качества в системе 3-го порядка при различных вариантах доминирования / А.В. Цавнин // X Камские чтения. сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Набережные Челны, 2018. – С. 166-170.
8. **Цавнин, А.В.** Метод синтеза ПИД-регулятора, обеспечивающий вещественные полюса замкнутой системы для колебательного звена второго порядка / А.В. Цавнин, С.В. Ефимов, С.В. Замятин // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XIV Международной научно-практической конференции. – Томск, 28-30 Ноября 2018. – С. 26-29.
9. **Цавнин, А.В.** Обеспечение вещественных значений полюсов замкнутой системы управления / А. В. Цавнин; науч. рук. С. В. Замятин // Молодежь и современные информационные технологии : сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. –Томск, 2018. –С. 249-250.
10. **Цавнин, А.В.** Обеспечение вещественных значений полюсов замкнутой системы управления для решения задачи устранения перерегулирования / А.В. Цавнин, С.В. Ефимов, С.В. Замятин // Тезисы XIX Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям. – Кемерово 2018. – С. 47-48.