

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи



Хожаев Иван Валерьевич

**СИНТЕЗ АДАПТИВНОГО И РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ
МОДАЛЬНОГО ДВУХРЕЖИМНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ
НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика

Томск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

Гайворонский Сергей Анатольевич

кандидат технических наук, доцент,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, доцент Отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники

Официальные оппоненты:

Сырямкин Владимир Иванович

доктор технических наук, профессор,
Национальный исследовательский Томский государственный университет, профессор кафедры управления качеством Факультета инновационных технологий

Шеленок Евгений Анатольевич

доктор технических наук, доцент, Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск), профессор высшей школы кибернетики и цифровых технологий Политехнического института

Защита состоится 06 декабря 2023 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.15 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" по адресу: Россия, 634034, г. Томск, ул. Советская, 84/3, ауд. 214.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета ДС.ТПУ.15
доктор технических наук

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized loops and strokes, representing the signature of Alexander Yakovlevich Pak.

Пак Александр Яковлевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Условия выполнения подводных работ часто не позволяют производить их людям и требуют применения необитаемых подводных аппаратов (НПА). Актуальность развития подводной робототехники в России закреплена в Морской доктрине Российской Федерации и Стратегии научно-технического развития Российской Федерации. В свою очередь эффективная работа НПА невозможна без качественного управления его движением.

Практика применения НПА и проблемы управления его движением, описаны в работах отечественных и зарубежных ученых, в том числе в работах (Инзарцев А.В., Илларионов Г.Ю., Киселев Л.В., Щербатюк А.Ф., Пантов Е.Н., Лукомский Ю.А., Пшихопов В.Х., Юхимец Д.А., Филаретов В.Ф., Костенко В.В.) и (Joo M.G., Abdullah A.M., Mohan S., He B., Watson S.A., Li Z., Du X., Jeong S.K., Valeriano-Medina Y., García-Valdovinos L.G.). Их анализ показывает, что управление движением НПА осложняется особенностями самого НПА и окружающей его водной среды. Авторы отмечают, что движители, составляющие движительно-рулевой комплекс (ДРК) НПА, характеризуются нелинейностью, описываемой квадратичной зависимостью упора гребного винта от частоты его вращения, а также нестационарностью передаточного коэффициента в этой зависимости. Также нелинейны зависимости гидродинамических сил и моментов от скорости движения НПА в вязкой жидкости; коэффициенты в этих зависимостях нестационарны. Таким образом, актуальна задача синтеза системы управления движением НПА, учитывающей особенности НПА как объекта управления. Обязательным элементом такой системы является исполнительный уровень – уровень, осуществляющий непосредственное управление ДРК НПА и обеспечивающий необходимые значения параметров движения НПА. На решение задачи синтеза исполнительного уровня системы управления движением НПА (далее – *система управления движением*) и направлена данная работа.

В зависимости от сложности используемой модели системы управления движением для синтеза ее регуляторов применяются несколько подходов: адаптивное управление, управление на основе нечеткой логики и управление на основе нейронных сетей. Перечисленные подходы позволяют обеспечить желаемые показатели качества системы с учетом ее особенностей, однако ее синтез и реализация являются сложными задачами, требующими большого объема экспериментальных данных. В свою очередь системы на основе типовых линейных регуляторов просты в синтезе и реализации, однако не позволяют учесть нестационарность параметров и нелинейность НПА, а также связность каналов управления движением в различных степенях свободы. Известно, что качество траекторного и группового управления движением НПА может зависеть от стабильности значений корневых показателей качества системы, что делает логичным применение модального подхода к управлению.

Описание системы управления движением с помощью интервальных параметров позволило бы учесть перечисленные ранее особенности НПА и организовать управление их движением с помощью типовых регуляторов

пониженного порядка, количество настроечных параметров которых меньше, чем количество коэффициентов характеристического полинома системы. Известные подходы к модальному управлению системами с интервальными параметрами либо предназначены для синтеза систем низкого порядка, либо не обеспечивают достаточной стабильности степени робастной устойчивости и степени робастной колебательности. Предлагается разработать на основе принципа доминирования полюсов методики синтеза робастных регуляторов, обеспечивающих желаемые квазипостоянные значения корневых показателей робастного качества путем расположения соответствующим образом областей локализации доминирующих полюсов, и адаптивно-робастных регуляторов, обеспечивающих постоянные значения корневых показателей робастного качества путем стабилизации доминирующих полюсов в заданных точках комплексной плоскости. Таким образом, в число корневых показателей робастного качества будем включать степень робастной устойчивости, степень робастной колебательности и степень доминирования. С учетом того, что измерительная информация, необходимая для подстройки коэффициентов адаптивно-робастного регулятора, может быть недоступна, логично организовать в системе управления движением два режима, соответствующих типам регуляторов: адаптивно-робастный с подстройкой параметров и робастный с постоянными параметрами.

Целью диссертационной работы является разработка и экспериментальное исследование математического аппарата для синтеза двухрежимной системы управления движением, имеющей желаемые значения корневых показателей робастного качества в условиях интервальности параметров НПА и окружающей его водной среды.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд **задач**:

- сформулировать требования к системе по результатам анализа проблем применения НПА и их особенностей как объекта управления;
- разработать математическую модель системы с интервальными параметрами, включающую в себя передаточные функции каналов управления движением НПА в отдельных степенях свободы;
- определить набор вершин многогранника коэффициентов интервального характеристического полинома, определяющих положение доминирующих и свободных полюсов в различных вариантах их расположения на комплексной плоскости;
- разработать методики синтеза типовых робастных или адаптивно-робастных регуляторов пониженного порядка, обеспечивающих желаемые квазипостоянные или постоянные значения корневых показателей робастного качества за счет расположения областей локализации полюсов системы в соответствии с принципом доминирования;
- синтезировать двухрежимную систему управления движением в вертикальной плоскости, применив разработанные методики синтеза и математическую модель, и исследовать работоспособность синтезированной системы на моделях разной сложности.

Научная новизна

1. Предложена интервально-линеаризованная математическая модель нестационарной системы управления движением НПА в шести степенях свободы, декомпозированная заменой кинематических параметров движения в перекрестных связях на интервалы их значений.

2. Разработано правило поиска наборов вершин многогранника коэффициентов интервальных характеристических полиномов различных порядков, включающих в себя прообразы заданных комплексно-сопряженных доминирующих полюсов и граничных свободных полюсов систем управления.

3. Предложена и экспериментально проверена методика параметрического синтеза робастных модальных регуляторов пониженного порядка с постоянными параметрами, гарантирующих желаемые квазипостоянные значения корневых показателей робастного качества систем управления на основе известных принципа доминирования полюсов и метода вершинного D-разбиения.

4. Предложена и экспериментально проверена методика параметрического синтеза адаптивно-робастных модальных регуляторов пониженного порядка, гарантирующих желаемые постоянные значения корневых показателей робастного качества систем управления на основе известных принципа доминирования полюсов и метода вершинного D-разбиения.

Практическая значимость работы. Результаты работы позволяют синтезировать систему управления движением НПА с квазипостоянными или постоянными показателями робастного качества на основе типовых ПИ-регуляторов и ПИД-регуляторов. Такой подход требует меньшего объема экспериментальных исследований НПА при идентификации, что упрощает разработку таких систем. Также применение разработанных методик синтеза регуляторов снимает необходимость учитывать параметрическую неопределенность НПА на вышестоящих уровнях системы и, соответственно, упрощает постановку задачи их синтеза. Предлагаемый подход может быть использован для синтеза систем управления движением мобильных роботов различных типов.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты работы использованы при выполнении НИР по грантам Госзадание «Наука» (проектная часть) №4.1751.ГЗП.2017 «Программно-измерительный комплекс для управления движением необитаемых подводных аппаратов в условиях нестационарности параметров» и РНФ №18-79-00264 «Разработка многорежимной системы управления движением необитаемого подводного аппарата с нестационарными параметрами на основе анализа взаимовлияния каналов регулирования».

Результаты работы используются в научно-исследовательской лаборатории телекоммуникаций, приборостроения и морской геологии Инженерной школы информационных технологий и робототехники ТПУ при разработке систем автоматического управления движением необитаемых подводных аппаратов.

Также результаты работы внедрены в учебный процесс Отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных

технологий и робототехники ТПУ и используются при проведении лабораторных работ по дисциплинам «Теория автоматического управления» и «Моделирование систем управления» для студентов направлений 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» и 15.03.06 «Мехатроника и робототехника». Кроме того, результаты работы использованы в научно-исследовательской деятельности ООО «50ом Тех.» для оценки устойчивости радиоэлектронных схем к технологическому разбросу параметров в условиях неустойчивости номиналов ее элементов в пределах известных допусков.

Методы исследования. Применялись методы математического анализа, теории автоматического управления, основы интервального анализа, метод корневого годографа и его интервальное расширение. Для автоматизации расчетов по разработанным методикам параметрического синтеза регуляторов и для имитационного моделирования движения НПА под управлением синтезированной системы применялись пакеты Mathcad и Matlab.

Положения, выносимые на защиту.

1. Декомпозированная и линеаризованная математическая модель системы управления движением НПА, учитывающая параметрическую неопределенность элементов системы за счет ввода интервальных параметров, обеспечивает возможность синтеза системы с типовыми регуляторами пониженного порядка при сохранении работоспособности при имитационном моделировании работы в условиях нелинейности, многосвязности и нестационарности.

2. Выведенное на основе интервального расширения метода корневого годографа правило поиска координат проверочных вершин многогранника коэффициентов интервального характеристического полинома определяет вершины, образы которых составляют правые границы областей локализации пары комплексно-сопряженных доминирующих полюсов и свободных полюсов с учетом желаемой степени робастной колебательности системы.

3. Разработанная методика параметрического синтеза робастного ПИД-регулятора позволяет за счет расположения областей локализации одного вещественного или пары комплексно-сопряженных доминирующих полюсов и размещения свободных полюсов в соответствии принципом доминирования обеспечить желаемые значения корневых показателей робастного качества систем с интервальными параметрами.

4. Разработанная методика параметрического синтеза адаптивно-робастных регуляторов позволяет за счет расположения в желаемых точках комплексной плоскости одного вещественного (ПИ-регулятором) или пары комплексно-сопряженных (ПИД-регулятором) доминирующих полюсов и размещения свободных полюсов в соответствии с принципом доминирования обеспечить желаемые постоянные значения корневых показателей робастного качества систем с интервальными параметрами.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным применением перечисленных ранее теоретических методов, а также подтверждается данными вычислительных экспериментов.

Апробация результатов работы. Результаты исследований обсуждались в ходе следующих конференций: Технические проблемы освоения Мирового океана, 2017, Владивосток (Россия); International Conference on Mechanical, System and Control Engineering, 2017, Санкт-Петербург (Россия); 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 2017, Мадрид (Испания); International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering, 2018, Пекин (Китай); Системный анализ, управление и навигация, 2019, Евпатория (Россия); 8th International Conference on Mechatronics and Control Engineering, 2019, Париж (Франция); 12th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Robotics, and Vehicles, 2019, Тэджон (Республика Корея); International Russian Automation Conference, 2019, Сочи (Россия); International Automatic Control Conference, 2019, Цзилун (Тайвань); IEEE International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, 2020, Сочи (Россия).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования отражены в 19 работах: 8 статей в ведущих научных журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК, все проиндексированы в базах Scopus и (или) Web of Science; 11 статей в сборниках трудов международных и российских конференций, 9 из которых проиндексированы в базе данных Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 111 наименований; содержит 201 страницу машинописного текста, 84 рисунка, 7 таблиц и 1 приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведено обоснование актуальности темы, цель и задачи исследования. Сформулированы элементы научной новизны и положения, выносимые на защиту. Описана теоретическая и практическая значимость работы.

В **первой главе** «Анализ проблем управления движением необитаемых подводных аппаратов» проведен анализ предметной области исследования. По результатам анализа практики применения НПА сформулированы требования к системе управления движением: система должна автоматически управлять движением НПА в шести степенях свободы, обеспечивая в каналах регулирования аperiodические переходные процессы с нулевыми перерегулированием и статической ошибкой регулирования в условиях внешних возмущающих воздействий в виде подводных течений. По результатам анализа проблем управления движением НПА установлено, что элементы исследуемой системы характеризуются нелинейностью, многосвязностью и нестационарностью параметров. На основе результатов анализа подходов к синтезу регуляторов таких систем обоснованы преимущества использования робастного подхода к управлению; сформулированы научная проблема, цель и задачи исследования.

Во **второй главе** «Математическое моделирование исполнительного уровня системы автоматического управления движением необитаемого подводного

аппарата» построена математическая модель исследуемой системы для имитационного моделирования и для синтеза регуляторов в виде передаточных функций и показан пример ее применения для описания трехсвязной системы управления движением НПА в вертикальной плоскости. Инерционностью измерительных устройств, входящих в состав НС НПА, пренебрегли, посчитав соответствующие обратные связи единичными. Далее описаны построенные модели элементов системы: модель движителя с гребным винтом как основного элемента исполнительного устройства исследуемой системы и модель процесса движения НПА в вязкой жидкости под действием подводных течений как объекта управления.

Структурная схема математической модели движителя с гребным винтом показана на рисунке ниже.

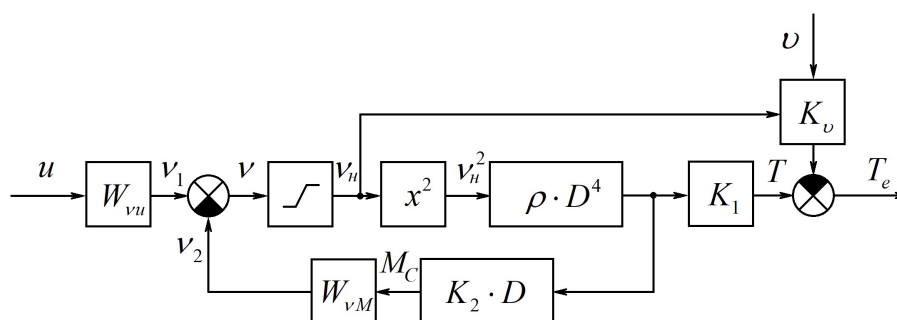


Рисунок 1 – Структурная схема нелинейной модели движителя с гребным винтом

На рисунке 1 использованы следующие обозначения: u – управляющий сигнал; v – частота вращения вала электродвигателя; v_n – частота вращения вала электродвигателя с учетом насыщения; T – упор гребного винта; M_c – момент сопротивления вращению вала электродвигателя со стороны гребного винта; T_e – тяга движителя в целом; ν – проекция скорости набегающего потока жидкости на ось вращения винта; W_{vu} – передаточная функция двигателя постоянного тока по управляющему сигналу; W_{vM} – передаточная функция двигателя постоянного тока по моменту сопротивления вращению; x^2 – блок возведения в квадрат с учетом знака величины; ρ – плотность воды; K_1, K_2 – передаточные коэффициенты гребного винта по упору и моменту соответственно; D – диаметр винта; K_v – коэффициент коррекции тяги движителя по скорости набегающего потока, зависящий от частоты вращения винта. Модель двигателя постоянного тока состоит из передаточных функций по управляющему сигналу и по моменту сопротивления вращению:

$$W_{vu}(s) = \frac{c_m}{(J_{\text{общ}} \cdot L_{\text{я}} \cdot s^2 + J \cdot R_{\text{я}} \cdot s + c_e \cdot c_m) \cdot 2 \cdot \pi};$$

$$W_{vM}(s) = \frac{L_{\text{я}} \cdot s + R_{\text{я}}}{(J_{\text{общ}} \cdot L_{\text{я}} \cdot s^2 + J \cdot R_{\text{я}} \cdot s + c_e \cdot c_m) \cdot 2 \cdot \pi};$$

где $J_{\text{общ}}$ – суммарный момент инерции электродвигателя и нагрузки на валу; $R_{\text{я}}$ – активное сопротивление якоря; $L_{\text{я}}$ – индуктивность якоря; c_e , c_m – передаточные коэффициенты, определяемые конструкцией двигателя.

Для подготовки к синтезу регуляторов построенная модель движителя линеаризована, дополнена интервальными параметрами для учета их нестационарности. Квадратичные зависимости в модели заменены на линейные с интервальным коэффициентом. Коэффициент линеаризации $[k_v]$ равен интервалу значений частоты вращения винта. На основе $[k_v]$ оценен интервал $[K_v]$. Модель движителя записана в форме передаточных функций с интервальными параметрами:

$$W_{T_e u}(s) = \frac{K_1 \cdot [k_v] \cdot c_m \cdot \rho \cdot D^4}{J_{\text{общ}} \cdot L_{\text{я}} \cdot s^2 + (J_{\text{общ}} \cdot R_{\text{я}} + D \cdot K_2 \cdot L_{\text{я}}) \cdot s + c_e \cdot c_m + D \cdot K_2 \cdot R_{\text{я}}};$$

$$W_{T_e v}(s) = - \frac{[K_v]}{J_{\text{общ}} \cdot L_{\text{я}} \cdot s^2 + (J_{\text{общ}} \cdot R_{\text{я}} + D \cdot K_2 \cdot L_{\text{я}}) \cdot s + c_e \cdot c_m + D \cdot K_2 \cdot R_{\text{я}}};$$

Нелинейная многосвязная математическая модель процесса движения симметричного относительно продольно-вертикальной плоскости НПА в шести степенях свободы построена на основе известных модели кинематики НПА и выражений гидродинамических и гидростатических сил и моментов. Модель записана в форме системы шести дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} & (m + \lambda_{11}) \cdot \dot{u}_x + \lambda_{12} \cdot \dot{u}_y + (-m \cdot y_C + \lambda_{16}) \cdot \dot{\omega}_z + [(m + \lambda_{33}) \cdot v_z + (m \cdot y_C + \lambda_{34}) \cdot \omega_x + \\ & + \lambda_{35} \cdot \omega_y] \cdot \omega_y - [\lambda_{12} \cdot u_x + (m + \lambda_{22}) \cdot v_y + \lambda_{26} \cdot \omega_z] \cdot \omega_z = T_x - 0.5 \cdot (c_x^\alpha \cdot \alpha + c_x^\beta \cdot \beta) \cdot \\ & \cdot \rho \cdot V^{2/3} \cdot |v_x + v_x^f| \cdot (v_x + v_x^f) + (A - G) \cdot \sin(\psi); \\ & \lambda_{12} \cdot \dot{u}_x + (m + \lambda_{22}) \cdot \dot{u}_y + \lambda_{26} \cdot \dot{\omega}_z + [(m + \lambda_{11}) \cdot v_x + \lambda_{12} \cdot v_y + (-m \cdot y_C + \lambda_{16}) \cdot \omega_z] \cdot \omega_z - \\ & - [(m + \lambda_{33}) \cdot v_z + (m \cdot y_C + \lambda_{34}) \cdot \omega_x + \lambda_{35} \cdot \omega_y] \cdot \omega_x = T_y - 0.5 \cdot (c_y^\alpha \cdot \alpha + c_y^{\omega_z} \cdot V^{1/3} \cdot \omega_z) \cdot \rho \cdot \\ & \cdot V^{2/3} \cdot |v_y + v_y^f| \cdot (v_y + v_y^f) + (A - G) \cdot \cos(\psi) \cdot \cos(\theta); \\ & (m + \lambda_{33}) \cdot \dot{u}_z + (m \cdot y_C + \lambda_{34}) \cdot \dot{\omega}_x + \lambda_{35} \cdot \dot{\omega}_y + [\lambda_{12} \cdot v_x + (m + \lambda_{22}) \cdot v_y + \lambda_{26} \cdot \omega_z] \cdot \omega_x - \\ & - [(m + \lambda_{11}) \cdot v_x + \lambda_{12} \cdot v_y + (-m \cdot y_C + \lambda_{16}) \cdot \omega_z] \cdot \omega_y = T_z - 0.5 \cdot (c_z^\beta \cdot \beta + c_z^{\omega_x} \cdot V^{1/3} \cdot \omega_x + \\ & + c_z^{\omega_y} \cdot V^{1/3} \cdot \omega_y) \cdot \rho \cdot V^{2/3} \cdot |v_z + v_z^f| \cdot (v_z + v_z^f) - (A - G) \cdot \cos(\psi) \cdot \sin(\theta); \\ & (m \cdot y_C + \lambda_{34}) \cdot \dot{u}_z + (J_{xx} + \lambda_{44}) \cdot \dot{\omega}_x + (-J_{xy} + \lambda_{45}) \cdot \dot{\omega}_y + [(-m \cdot y_C + \lambda_{16}) \cdot v_x + \\ & + \lambda_{26} \cdot v_y + (J_{zz} + \lambda_{66}) \cdot \omega_z] \cdot \omega_y - [\lambda_{35} \cdot v_z + (-J_{xy} + \lambda_{45}) \cdot \omega_x + (J_{yy} + \lambda_{55}) \cdot \\ & \cdot \omega_y] \cdot \omega_z + [(m + \lambda_{33}) \cdot v_z + (m \cdot y_C + \lambda_{34}) \cdot \omega_x + \lambda_{35} \cdot \omega_y] \cdot v_y - [\lambda_{12} \cdot v_x + \\ & + (m + \lambda_{22}) \cdot v_y + \lambda_{26} \cdot \omega_z] \cdot v_z = M_x^T - 0.5 \cdot (m_x^\beta \cdot \beta + m_x^{\omega_x} \cdot V^{1/3} \cdot \omega_x + m_x^{\omega_y} \cdot V^{1/3} \cdot \omega_y) \cdot \\ & \cdot \rho \cdot V \cdot |v_x + v_x^f| \cdot (v_x + v_x^f) - A \cdot z_A \cdot \cos(\psi) \cdot \cos(\theta) - A \cdot y_A \cdot \cos(\psi) \cdot \sin(\theta); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \lambda_{35} \cdot \dot{v}_z + (-J_{xy} + \lambda_{45}) \cdot \dot{\omega}_x + (J_{yy} + \lambda_{55}) \cdot \dot{\omega}_y + [(m \cdot y_C + \lambda_{34}) \cdot v_z + (J_{xx} + \lambda_{44}) \cdot \omega_x + \\
& + (-J_{xy} + \lambda_{45}) \cdot \omega_y] \cdot \omega_z - [(-m \cdot y_C + \lambda_{16}) \cdot v_x + \lambda_{26} \cdot v_y + (J_{zz} + \lambda_{66}) \cdot \omega_z] \cdot \omega_x + \\
& + [(m + \lambda_{11}) \cdot v_x + \lambda_{12} \cdot v_y + (-m \cdot y_C + \lambda_{16}) \cdot \omega_z] \cdot v_z - [(m + \lambda_{33}) \cdot v_z + \\
& + (m \cdot y_C + \lambda_{34}) \cdot \omega_x + \lambda_{35} \cdot \omega_y] \cdot v_x = M_y^T - 0.5 \cdot (m_y^\beta \cdot \beta + m_y^{\omega_x} \cdot V^{1/3} \cdot \omega_x + m_y^{\omega_y} \cdot V^{1/3} \cdot \omega_y) \cdot \\
& \cdot \rho \cdot V \cdot |v_y + v_y^f| \cdot (v_y + v_y^f) + A \cdot x_A \cdot \cos(\psi) \cdot \sin(\theta) + A \cdot z_A \cdot \sin(\psi); \\
& (-m \cdot y_C + \lambda_{16}) \cdot \dot{v}_x + \lambda_{26} \cdot \dot{v}_y + (J_{zz} + \lambda_{66}) \cdot \dot{\omega}_z + [\lambda_{35} \cdot v_z + (-J_{xy} + \lambda_{45}) \cdot \omega_x + \\
& + (J_{yy} + \lambda_{55}) \cdot \omega_y] \cdot \omega_x - [(m \cdot y_C + \lambda_{34}) \cdot v_z + (J_{xx} + \lambda_{44}) \cdot \omega_x + (-J_{xy} + \lambda_{45}) \cdot \omega_y] \cdot \omega_y + \\
& + [\lambda_{12} \cdot v_x + (m + \lambda_{22}) \cdot v_y + \lambda_{26} \cdot \omega_z] \cdot v_x - [(m + \lambda_{11}) \cdot v_x + \lambda_{12} \cdot v_y + (-m \cdot y_C + \lambda_{16}) \cdot \omega_z] \cdot \\
& \cdot v_y = M_z^T - 0.5 \cdot (m_z^\alpha \cdot \alpha + m_z^{\omega_z} \cdot V^{1/3} \cdot \omega_z) \cdot \rho \cdot V \cdot |v_z + v_z^f| \cdot (v_z + v_z^f) + \\
& + A \cdot x_A \cdot \cos(\psi) \cdot \cos(\theta) - A \cdot y_A \cdot \sin(\psi),
\end{aligned}$$

где m – масса НПА; λ_{ij} – присоединенные массы НПА; v_x, v_y, v_z – проекции скорости движения НПА; v_x^f, v_y^f, v_z^f – проекции скорости подводного течения; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – угловые скорости движения НПА; y_C – координата центра водоизмещения относительно центра тяжести; T_x, T_y, T_z – пропульсивные силы; M_x^T, M_y^T, M_z^T – пропульсивные моменты; α, β – углы атаки и дрейфа; $c_x^\alpha, c_x^\beta, c_y^\alpha, c_y^{\omega_z}, c_z^\beta, c_z^{\omega_x}, c_z^{\omega_y}$ – производные коэффициентов гидродинамических сил, действующих вдоль координатных осей, по соответствующим углам и угловым скоростям; $m_x^\beta, m_x^{\omega_x}, m_x^{\omega_y}, m_y^\beta, m_y^{\omega_x}, m_y^{\omega_y}, m_z^\alpha, m_z^{\omega_z}$ – производные коэффициентов гидродинамических моментов по соответствующим углам и угловым скоростям; V – объемное водоизмещение НПА; A, G – сила Архимеда и вес НПА; φ, θ, ψ – углы курса крена и дифферента. Представленная модель использована для имитационного моделирования работы синтезированной системы. Для подготовки к синтезу модель линеаризована и дополнена интервальными параметрами. Для декомпозиции связанной модели на модели движения в отдельных степенях свободы кинематические параметры в слагаемых, описывающих взаимовлияния движений, заменены на интервалы их значений. Такие интервалы линейных и угловых скоростей предложено оценивать, исходя из свойств ДРК НПА. Например, в первом уравнении представленной ранее системы, описывающем движение НПА вдоль оси x , v_x принята искомой функцией, а $v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$ и их производные – интервальными параметрами. На основе ранее записанных уравнений получена модель процесс движения НПА в форме передаточных функций с интервальными параметрами:

$$\begin{aligned}
W_{v_x T_x}(s) &= \frac{1}{(m + \lambda_{11}) \cdot s + 0.5 \cdot c_x([\alpha], [\beta]) \cdot \rho \cdot V^{2/3} \cdot [k_{11}] - \lambda_{12} \cdot [\omega_z]}; \\
W_{v_x v_f}(s) &= 0.5 \cdot c_x([\alpha], [\beta]) \cdot \rho \cdot V^{2/3} \cdot [k_{12}] \cdot W_{v_x T_x}(s); \\
W_{v_y T_y}(s) &= \frac{1}{(m + \lambda_{22}) \cdot s + 0.5 \cdot c_y([\alpha], [\omega_z]) \cdot \rho \cdot V^{2/3} \cdot [k_{21}] + \lambda_{12} \cdot [\omega_z]}; \\
W_{v_y v_f}(s) &= 0.5 \cdot c_y([\alpha], [\omega_z]) \cdot \rho \cdot V^{2/3} \cdot [k_{22}] \cdot [\alpha] \cdot W_{v_y T_y}(s); \\
W_{v_z T_z}(s) &= \frac{1}{(m + \lambda_{33}) \cdot s + 0.5 \cdot c_z([\beta], [\omega_x], [\omega_y]) \cdot \rho \cdot V^{2/3} \cdot [k_{31}]}; \\
W_{v_z v_f}(s) &= 0.5 \cdot c_z([\beta], [\omega_x], [\omega_y]) \cdot \rho \cdot V^{2/3} \cdot [k_{32}] \cdot [\beta] \cdot W_{v_z T_z}(s); \\
W_{\omega_x M_x^T}(s) &= \frac{1}{(J_{xx} + \lambda_{44}) \cdot s + (m \cdot y_C + \lambda_{34}) \cdot [v_y] - (-J_{xy} + \lambda_{45}) \cdot [\omega_z]}; \\
W_{\omega_x v_x}(s) &= 0.5 \cdot m_x([\beta], [\omega_x], [\omega_y]) \cdot \rho \cdot V \cdot [k_{11}] \cdot W_{\omega_x M_x^T}(s); \\
W_{\omega_x v_f}(s) &= 0.5 \cdot m_x([\beta], [\omega_x], [\omega_y]) \cdot \rho \cdot V \cdot [k_{12}] \cdot W_{\omega_x M_x^T}(s); \\
W_{\omega_y M_y^T}(s) &= \frac{1}{(J_{yy} + \lambda_{55}) \cdot s + ((-J_{xy} + \lambda_{45}) \cdot [\omega_z] - \lambda_{35} \cdot [v_x])}; \\
W_{\omega_y v_y}(s) &= 0.5 \cdot m_y([\beta], [\omega_x], [\omega_y]) \cdot \rho \cdot V \cdot [k_{21}] \cdot W_{\omega_y M_y^T}(s); \\
W_{\omega_y v_f}(s) &= 0.5 \cdot m_y([\beta], [\omega_x], [\omega_y]) \cdot \rho \cdot V \cdot [k_{22}] \cdot [\alpha] \cdot W_{\omega_y M_y^T}(s); \\
W_{\omega_z M_z^T}(s) &= \frac{1}{(J_{zz} + \lambda_{66}) \cdot s + \lambda_{26} \cdot [v_x] - (-m \cdot y_C + \lambda_{16}) \cdot [v_y]}; \\
W_{\omega_z v_z}(s) &= 0.5 \cdot m_z([\alpha], [\omega_z]) \cdot \rho \cdot V \cdot [k_{31}] \cdot W_{\omega_z M_z^T}(s); \\
W_{\omega_z v_f}(s) &= 0.5 \cdot m_z([\alpha], [\omega_z]) \cdot \rho \cdot V \cdot [k_{32}] \cdot [\beta] \cdot W_{\omega_z M_z^T}(s).
\end{aligned}$$

где k_{ij} — коэффициенты линеаризации квадратичных зависимостей гидродинамических сил и моментов от соответствующих проекций скорости движения НПА.

В качестве примера применения построенных моделей описана трехсвязная система управления движением НПА в вертикальной плоскости, управляющая v_x , v_y и ψ . Значения интервальных параметров оценены для робастного и адаптивно-робастного режимов управления (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Интервальные параметры системы в робастном и адаптивно-робастном режимах

Параметр	Адаптивно-робастное управление	Робастное управление
$[\alpha], ^\circ$	$[0; 20]$	$[0; 90]$
$[c_x]$	$0.0327 + 1.365 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha = [0.033; 0.060]$	$[0.033; 0.350]$
$[c_y]$	$6.104 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha + 1.447 \cdot \omega_z = [-0.233; 0.233]$	$[-0.300; 0.300]$
$[k_{11}], \text{м/с}$	$[0.235; 2.345]$	
$[k_{21}], \text{м/с}$	$[0.183; 1.833]$	
$[k_{12}], \text{м/с}$	$[0.047; 0.470]$	$[0.05; 0.5]$
$[k_{22}], \text{м/с}$	$[0.017; 0.171]$	

Исходя из свойств объекта, решено применить для построения структуры системы управления движением исследуемого НПА принцип комбинированного управления и принцип подчиненного регулирования. Предлагаемая структура изображена на рисунке 2.

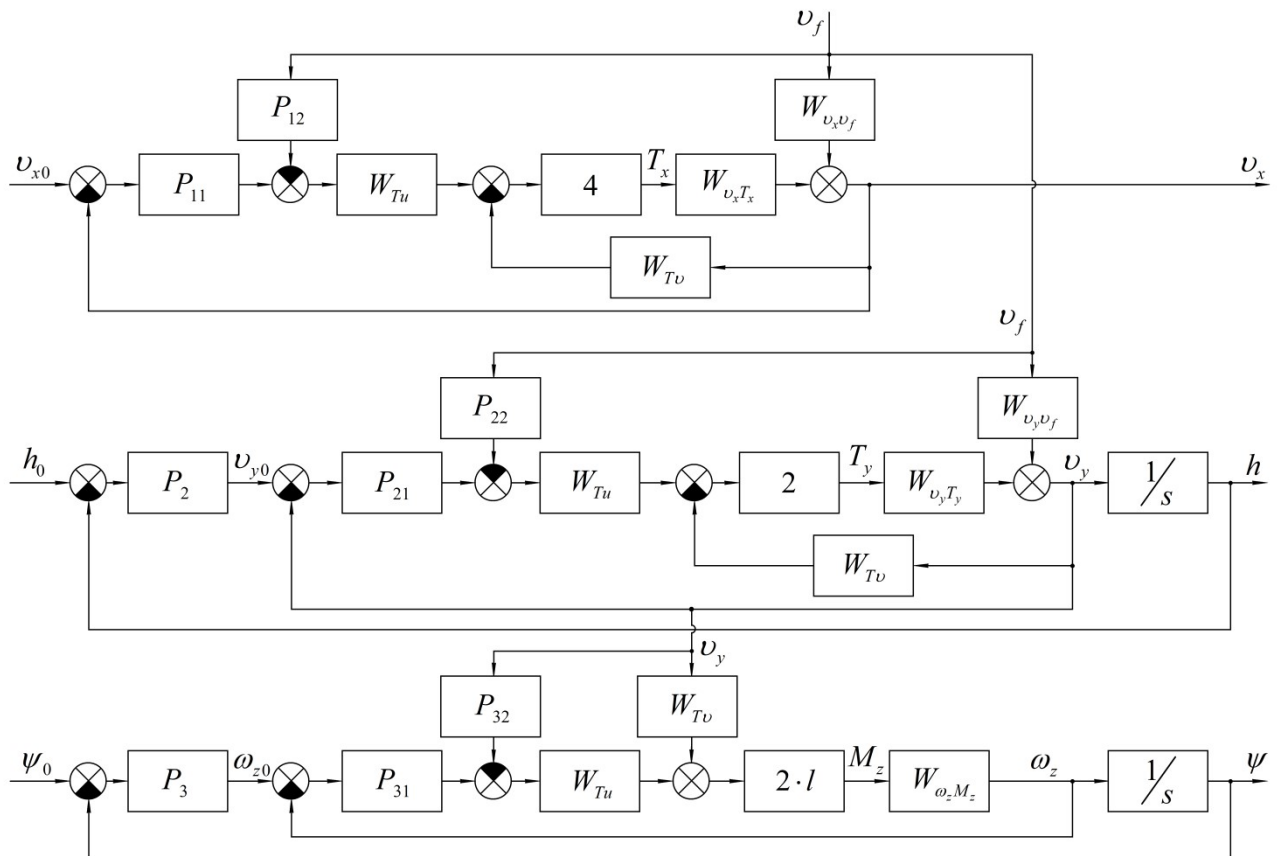


Рисунок 2 – Структурная схема трехсвязной системы управления движением исследуемого НПА

В третьей главе «Определение координат проверочных вершин параметрического многогранника для расположения полюсов системы в соответствии с принципом доминирования» обосновано применение для синтеза регуляторов модального подхода и принципа доминирования полюсов, а также

разработано правило поиска наборов проверочных вершин многогранника коэффициентов интервального характеристического полинома (ИХП), образы которых входят в правые границы областей локализации доминирующих и свободных полюсов и определяют значения корневых показателей робастного качества системы. Разработанное правило основано на интервальном расширении фазового уравнения корневого годографа, которое позволяет составить систему интервальных фазовых неравенств, связывающих угол выхода реберной ветви корневого годографа из исследуемого полюса по i -му коэффициенту ИХП с координатами прообраза этого полюса:

$$\underline{\Theta} \leq \pi \cdot r - \sum_{j=2}^n [\Theta_j] + i \cdot [\Theta_0] \leq \bar{\Theta}, \quad i \in 0, 1, \dots, n, \quad (1)$$

где $\underline{\Theta}$ и $\bar{\Theta}$ – минимальное и максимальное допустимое значение угла выхода реберной ветви; r – параметр, определяющий направление движения по реберной ветви, и предел i -го коэффициента ИХП; $[\Theta_0]$ – угол между положительным направлением действительной оси и радиус-вектором исследуемого полюса; $[\Theta_j]$ – углы между векторами, соединяющими прочие полюсы и исследуемый, и положительным направлением действительной оси; n – порядок ИХП. При этом $r=0$ соответствует максимум i -го коэффициента ИХП; $r=1$ – минимум коэффициента.

С помощью решения (1) найдены координаты проверочных вершин, обеспечивающих заданную степень устойчивости η , степень колебательности μ и степень доминирования δ системы с двумя доминирующими комплексно-сопряженными полюсами. Варианты расположения полюсов такой системы показаны на рисунке 3, на котором P_1 и P_2 – доминирующие полюсы; P_3 , P_4 – свободные полюсы.

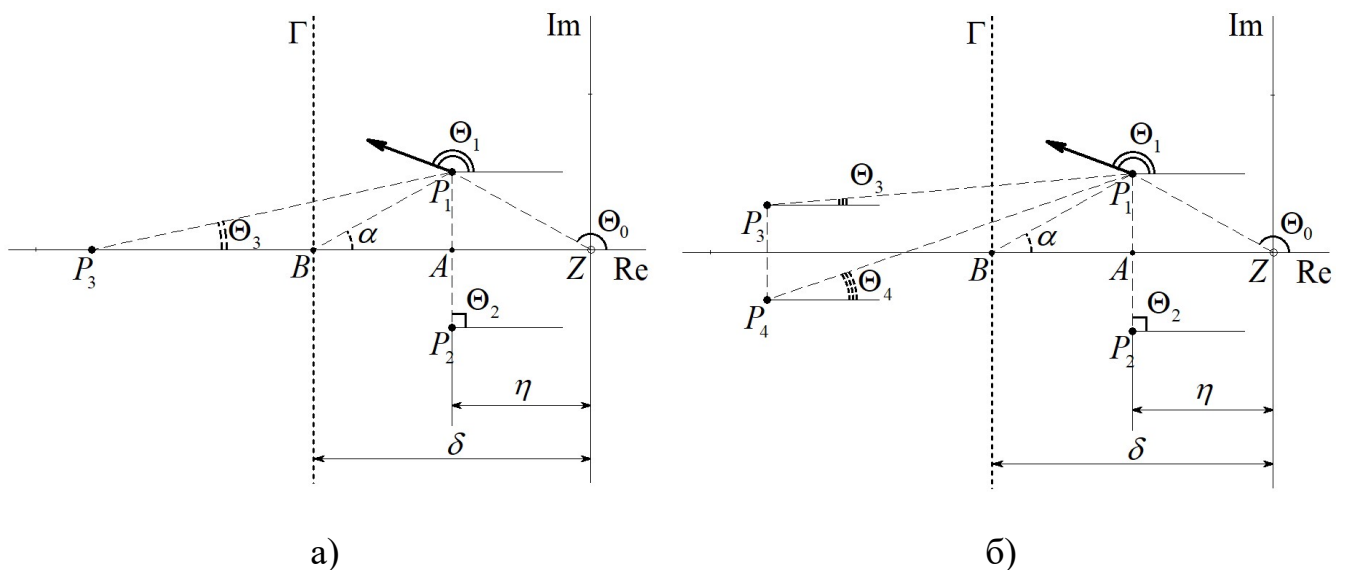


Рисунок 3 – Варианты расположения свободных полюсов относительно пары доминирующих комплексно-сопряженных полюсов: а) одного вещественного свободного полюса; б) пары комплексно-сопряженных свободных полюсов

В ходе исследования показанных на рисунке 3 вариантов расположения полюсов сформулированы и доказаны следующие утверждения, позволяющие оценить интервалы значений обозначенных углов:

– если свободный вещественный полюс P_3 движется вдоль вещественной оси в некоторой области локализации свободных полюсов, ограниченной справа прямой Γ , то значение угла Θ_3 между вектором $\overrightarrow{P_3P_1}$ и положительным направлением вещественной оси лежит в интервале $\Theta_3 = [0; \alpha]$ рад;

– если пара свободных комплексно-сопряженных полюсов P_3 и P_4 движется в некоторой области локализации свободных полюсов, ограниченной справа прямой Γ , то значение суммы углов Θ_3 и Θ_4 между векторами $\overrightarrow{P_3P_1}$ и $\overrightarrow{P_4P_1}$ и положительным направлением вещественной оси лежит в интервале $\Theta_3 + \Theta_4 = [0; 2 \cdot \alpha]$ рад.

Предположим, что поставлена задача найти набор проверочных вершин, определяющих степень робастной устойчивости, при $\mu=1$ и $\delta=10 \cdot \eta$. В таком случае $\alpha = \arctg(1/9) \approx 0.14 \cdot \pi/4$, $\Theta_0 = 3 \cdot \pi/4$, а (1) для ИХП n -го порядка может быть записана следующим образом:

$$\frac{3 \cdot \pi}{4} \leq \pi \cdot r_i - \left(\frac{\pi}{2} + (n-2) \cdot \left[0; \frac{0.14 \cdot \pi}{4} \right] \right) + i \cdot \Theta_0 \leq \frac{3 \cdot \pi}{2}, i \in \overline{0; n}.$$

Решения для $n \in \{2, 3, \dots, 6\}$ приведены в таблице 2; d_i – коэффициенты ИХП.

Таблица 2 – Координаты проверочных вершин, определяющих степень робастной устойчивости системы для $\mu=1$

№	Порядок ИХП	Координаты проверочных вершин
1	2	$V_{21}(\overline{d_0}, \underline{d_1}, \overline{d_2})$
2	3	$V_{31}(\overline{d_0}, \underline{d_1}, \overline{d_2}, \underline{d_3}); V_{32}(\overline{d_0}, \underline{d_1}, \overline{d_2}, \underline{d_3})$
3	4	$V_{41}(\overline{d_0}, \underline{d_1}, \overline{d_2}, \underline{d_3}, \overline{d_4}); V_{42}(\overline{d_0}, \underline{d_1}, \overline{d_2}, \underline{d_3}, \overline{d_4})$
4	5	$V_{51}(\overline{d_0}, \underline{d_1}, \overline{d_2}, \underline{d_3}, \overline{d_4}, \underline{d_5}); V_{52}(\overline{d_0}, \underline{d_1}, \overline{d_2}, \underline{d_3}, \overline{d_4}, \underline{d_5})$
5	6	$V_{61}(\overline{d_0}, \underline{d_1}, \overline{d_2}, \underline{d_3}, \overline{d_4}, \underline{d_5}, \overline{d_6}); V_{62}(\overline{d_0}, \underline{d_1}, \overline{d_2}, \underline{d_3}, \overline{d_4}, \underline{d_5}, \overline{d_6})$

Пример расположения областей локализации полюсов системы второго порядка и образа проверочной вершины из найденного набора приведен на рисунке 4.

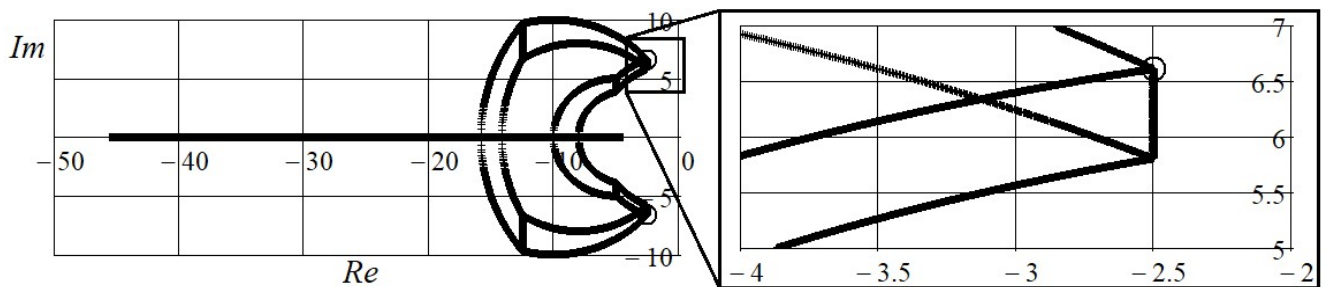


Рисунок 4 – Пример расположения областей локализации корней ИХП и образа проверочной вершины

Аналогичным образом найдены наборы проверочных вершин, обеспечивающие желаемое расположение свободных полюсов с заданной степенью доминирования и степенью колебательности.

В четвертой главе «Методики синтеза модальных робастных и адаптивно-робастных регуляторов пониженного порядка на основе принципа доминирования полюсов» на основе принципа доминирования полюсов разработаны методики синтеза типовых регуляторов пониженного порядка с постоянными или подстраиваемыми параметрами, обеспечивающих квазипостоянные или постоянные значения корневых показателей робастного качества соответственно. Методики основаны на разделении ИХП системы $D(s)$ на три составляющих: доминирующий полином $A(s)$, свободный полином $B(s)$ и остаток R . Корнями $A(s)$ являются доминирующие полюсы системы λ , определяющие качество ее работы. Свободный полином $B(s)$ – это результат деления $D(s)$ на $A(s)$; его корни – все прочие полюсы системы, кроме доминирующих, иначе говоря, свободные полюсы. Остаток R – это остаток от деления $D(s)$ на $A(s)$. Коэффициенты полиномов также зависят от вектора параметров регулятора K . Разделим K на векторы свободных $K_{\text{св}}$ и зависимых $K_{\text{зав}}$ параметров. При этом значения $K_{\text{св}}$ определяют положение свободных полюсов, а значения $K_{\text{зав}}$ должны выбираться, исходя из желаемых λ . С учетом введенных обозначений предлагаемое разбиение ИХП на составляющие описано следующим образом:

$$\begin{aligned} D(s, q, K) &= \sum_{i=0}^n [d(q, K)]_i \cdot s^i = A(s, \lambda) \cdot B(s, \lambda, d, K_{\text{св}}) + R(s, d, K_{\text{зав}}, K_{\text{св}}) = \\ &= \prod_{i=1}^k (s - [\lambda]_i) \cdot \sum_{j=0}^{n-k} [b(\lambda, d, K_{\text{св}})]_j \cdot s^j + \sum_{l=0}^{k-1} [r(d, K_{\text{зав}}, K_{\text{св}})]_l \cdot s^l, \end{aligned}$$

где q – вектор первичных интервальных параметров системы; k – количество доминирующих полюсов. При таком разбиении ИХП на составляющие задача обеспечения желаемого расположения областей локализации полюсов свелась к заданию области локализации λ ; обеспечению расположения корней $B(s, \lambda, d, K_{\text{св}})$ в соответствии с принципом доминирования; обеспечению равенства $R(s, d, K_{\text{зав}}, K_{\text{св}})$ нулю. Рассмотрены два практически значимых случая: расположение одного доминирующего полюса в заданном отрезке вещественной оси и пары доминирующих комплексно-сопряженных полюсов в заданных областях комплексной плоскости. Для обоих этих случаев найдены выражения для R и коэффициентов $B(s)$.

Для случая с одним вещественным интервальным доминирующим полюсом $[\lambda] = [\underline{\lambda}; \bar{\lambda}]$, $k = 1$, $A(s) = s - [\lambda]$ выражения для R и коэффициентов $B(s)$ имеют вид:

$$R([\lambda], [d]_i) = \sum_{i=0}^n [d(K_{\text{зав}}, K_{\text{св}})]_i \cdot [\lambda]^i = D([\lambda]) \quad (2)$$

$$[b]_j = [b]_{j+1} + [d(q, K_{\text{св}})]_{i+2} \cdot [\lambda]; \quad j \in \{n-1, n-2, \dots, 0\}. \quad (3)$$

Для случая с двумя интервальными комплексно-сопряженными полюсами $[\lambda]_{1,2} = -[\alpha] \pm j \cdot [\beta]$, $k = 2$, $A(s) = (s + [\alpha] - j \cdot [\beta]) \cdot (s + [\alpha] + j \cdot [\beta])$ выражения для R и коэффициентов $B(s)$ имеют вид:

$$R(s) = ([d]_1 + [x] \cdot [b]_0 - [y] \cdot [b]_1) \cdot s + [d]_0 - [y] \cdot [b]_0, \quad (4)$$

$$[b]_i = [d(q, K_{\text{св}})]_{i+2} + [x] \cdot [b]_{i+1} - [y] \cdot [b]_{i+2}, i \in \{n-2, n-3, \dots, 0\}. \quad (5)$$

На основе представленных выражений разработана методика синтеза модальных ПИД-регуляторов, обеспечивающих заданное расположение полюсов:

1. Исходя из желаемых значений показателей качества, задать интервал доминирующего полюса или крайние точки правой границы области локализации для пары доминирующих комплексно-сопряженных полюсов.

2. На основе (2) получить зависимость значений остатка для левой и правой границ доминирующего полюса от настроек регулятора (для пары комплексно-сопряженных полюсов воспользоваться (4) и набором проверочных вершин из таблицы 1).

3. Приравняв полученные зависимости к нулю, получить систему уравнений относительно параметров регулятора.

4. Решив данную систему, получить функции зависимых параметров от свободного параметра ПИД-регулятора, обеспечивающие желаемое расположение доминирующих полюсов.

5. Найти коэффициенты свободного полинома по выражению (3) для одного вещественного интервального доминирующего полюса или (5) для пары интервальных комплексно-сопряженных полюсов. Если коэффициенты свободного полинома содержат зависимые параметры регулятора, то подставить вместо них функции, найденные в п. 4, обеспечив инвариантность расположения областей локализации свободных полюсов относительно зависимых параметров регулятора.

6. Провести D-разбиение для свободного полинома в проверочных вершинах и выбрать значение свободного параметра ПИД-регулятора. В том случае, если область устойчивости, найденная методом D-разбиения, пуста, необходимо вернуться к предыдущему пункту и изменить требования к области локализации свободных полюсов.

7. Вычислить значения зависимых параметров по функциям из п. 4.

Примеры расположения областей локализации полюсов, которых можно добиться с помощью разработанной методики синтеза робастных регуляторов с постоянными параметрами, приведены на рисунке 5.

Согласно п. 4, желаемое расположение областей локализации доминирующих полюсов обеспечивается решением $R(d, K_{\text{зав}}, K_{\text{св}}) = 0$ в проверочных вершинах. Предполагая, что интервальные параметры измеримы, можно получить из решения $R(d, K_{\text{зав}}, K_{\text{св}}) = 0$ законы адаптации зависимых параметров регулятора $K_{\text{зав}} = f(d, K_{\text{св}})$ для стабилизации доминирующих

полюсов в точках комплексной плоскости. Исходя из этого, разработаны методики синтеза ПИ-регулятора и ПИД-регулятора, обеспечивающего стабилизацию одного вещественного и пары комплексно-сопряженных доминирующих полюсов соответственно как показано на рисунке 6.

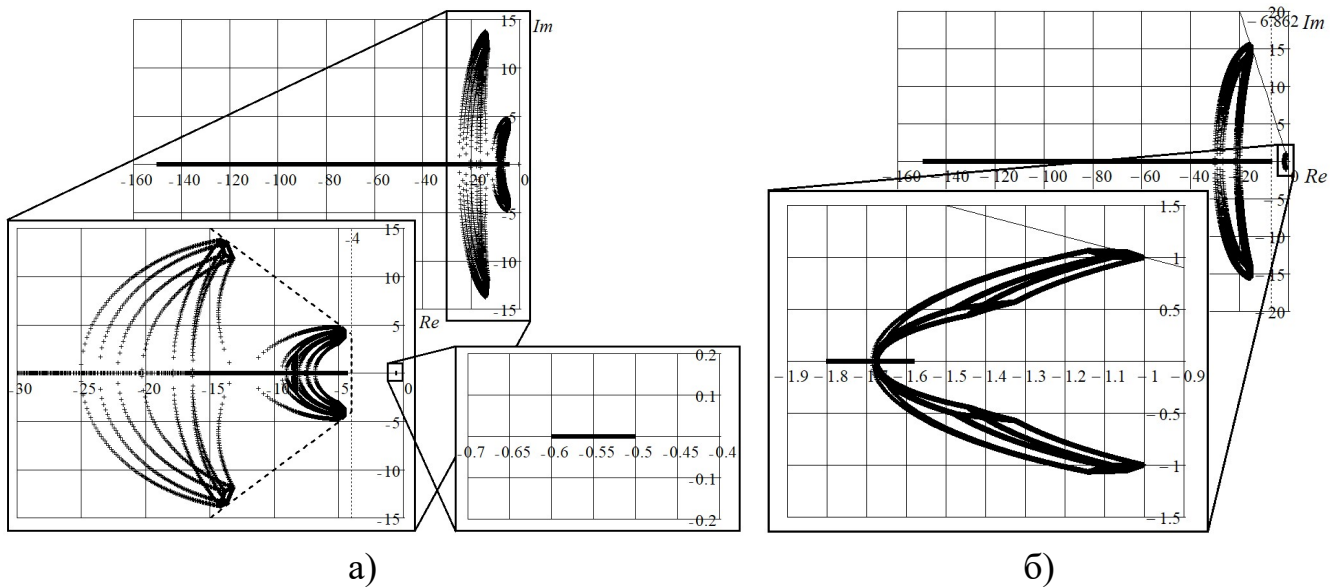


Рисунок 5 – Примеры расположения областей локализации полюсов системы: а) с одним вещественным интервальным доминирующим полюсом; б) с двумя комплексно-сопряженными доминирующими интервальными полюсами

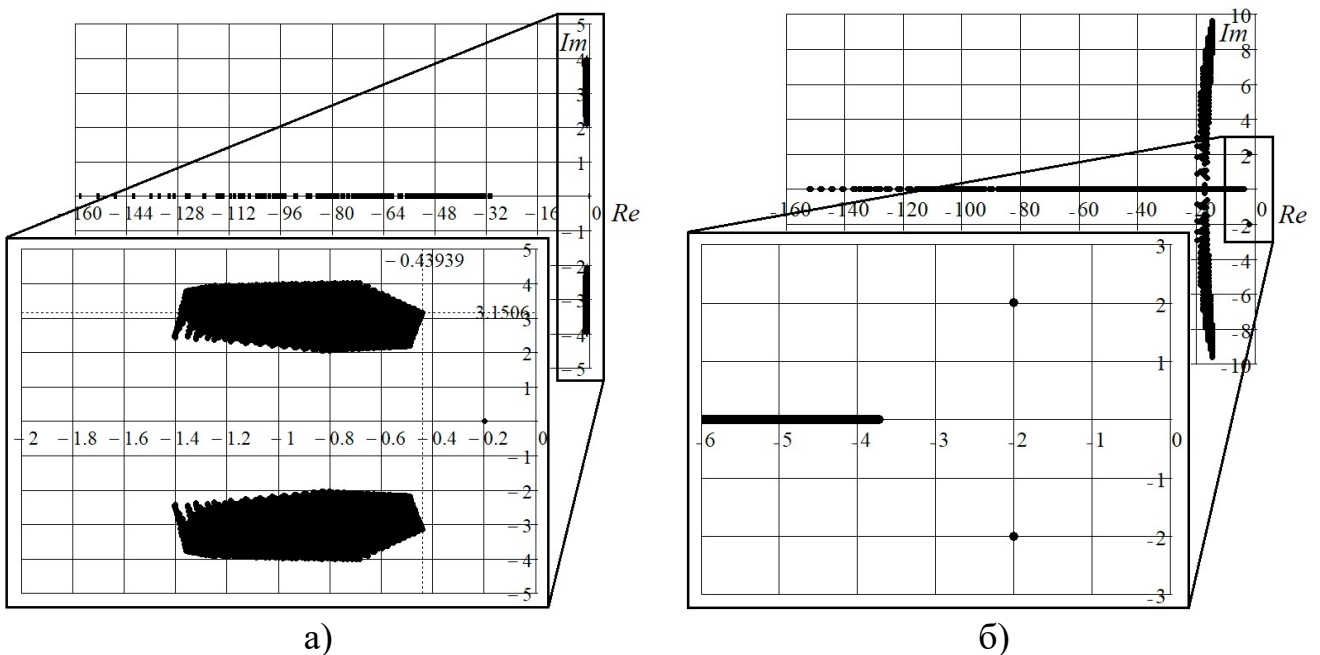


Рисунок 6 – Примеры расположения областей локализации полюсов системы: а) с одним вещественным доминирующим полюсом; б) с двумя комплексно-сопряженными доминирующими полюсами

В пятой главе «Синтез регуляторов и имитационное моделирование системы автоматического управления движением НПА в вертикальной плоскости» разработанные методики и построенная математическая модель применены для синтеза регуляторов системы управления движением

исследуемого НПА в вертикальной плоскости. Как показано на рисунке 7, исследуемый аппарат оснащен четырьмя маршевыми движителями в кормовой части, двумя вертикальными и одним горизонтальным подруливающими устройствами. Регулирование скорости движения осуществляется при помощи маршевых движителей, регулирование глубины – при помощи вертикальных подруливающих устройств, а регулирование дифферента – за счет разности тяг вертикальных подруливающих устройств.

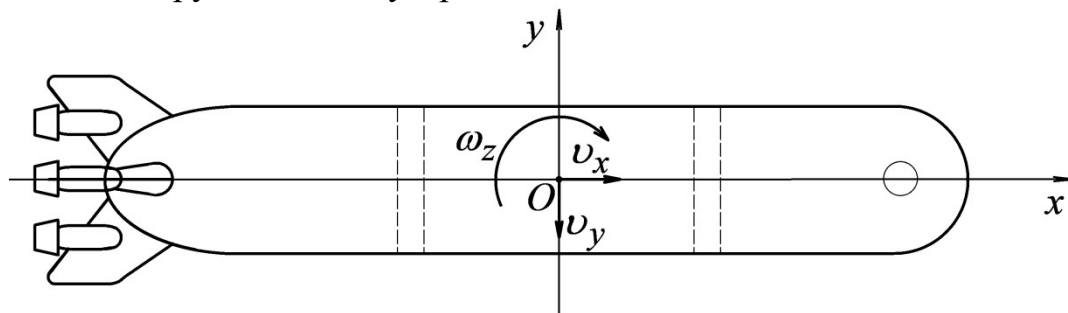


Рисунок 7 – Схематичное изображение исследуемого НПА сбоку

На рисунках 8 и 9 показаны расположения областей локализации полюсов синтезированного канала регулирования скорости движения маршем v_x в робастном и адаптивно-робастном режимах, а также переходная характеристика этого канала и сигнал ошибки регулирования по возмущающему воздействию. Двухрежимный регулятор P_{11} синтезирован с помощью разработанных методик; регулятор по возмущающему воздействию P_{12} синтезирован, исходя из условия минимального коэффициента скоростной ошибки. Цель синтеза: обеспечить в системе аperiodический переходный процесс длительностью не более 5 с, перерегулирование – не более 5%, нулевую статическую ошибку по задающему и возмущающему воздействию.

ИХП синтезированной системы в робастном режиме записан следующим образом:

$$D(s) = s^4 + [1673.175; 1674.932] \cdot s^3 + (2539.040 \cdot K_D + [70805.486; 73744.417]) \cdot s^2 + (2539.040 \cdot K_P + [3921.497; 128132.294]) \cdot s + 2539.040 \cdot K_I,$$

где $K_P = 170$; $K_I = 63.179$; $K_D = 5.211$ – коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих синтезированного робастного ПИД-регулятора. Области локализации полюсов этого полинома изображены на рисунке 8а.

Для синтеза адаптивно-робастного регулятора ИХП системы был рассмотрен с учетом зависимостей его коэффициентов от первичных интервальных параметров (см. таблицу 1):

$$D(s) = s^4 + (6.049 \cdot 10^{-3} \cdot [k_v] + 15.333 \cdot [c_x] \cdot [k_{11}] + 1673.120) \cdot s^3 + (10.121 \cdot [k_v] + 3358.703 \cdot [c_x] \cdot [k_{11}] + 70712.700) \cdot s^2 + (2539.040 \cdot K_P + 427.747 \cdot [k_v] + 141922.302 \cdot [c_x] \cdot [k_{11}]) \cdot s + 2539.040 \cdot K_I,$$

где $K_p = 111$; $K_I = 39.986 + 0.067 \cdot k_v + 22.814 \cdot c_x \cdot k_{11}$ – коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих адаптивно-робастного ПИ-регулятора. С учетом зависимостей в таблице 1 перепишем закон адаптации: $K_I = 39.986 + 0.067 \cdot v + v_x \cdot (0.746 + 3.114 \cdot 10^{-2} \cdot \alpha)$. Области локализации полюсов этого полинома изображены на рисунке 8б.

Согласно рисунку 8а, в робастном режиме степень устойчивости системы изменяется в интервале $[0.3; 0.4]$; в адаптивно-робастном режиме, согласно рисунку 8б, степень устойчивости системы постоянна и равна 0.4. Все полюсы системы вещественные в обоих режимах. Такое отличие в корневых показателях качества отразилось на переходных характеристиках системы по задающему воздействию. Временные характеристики канала изображены на рисунке 9.

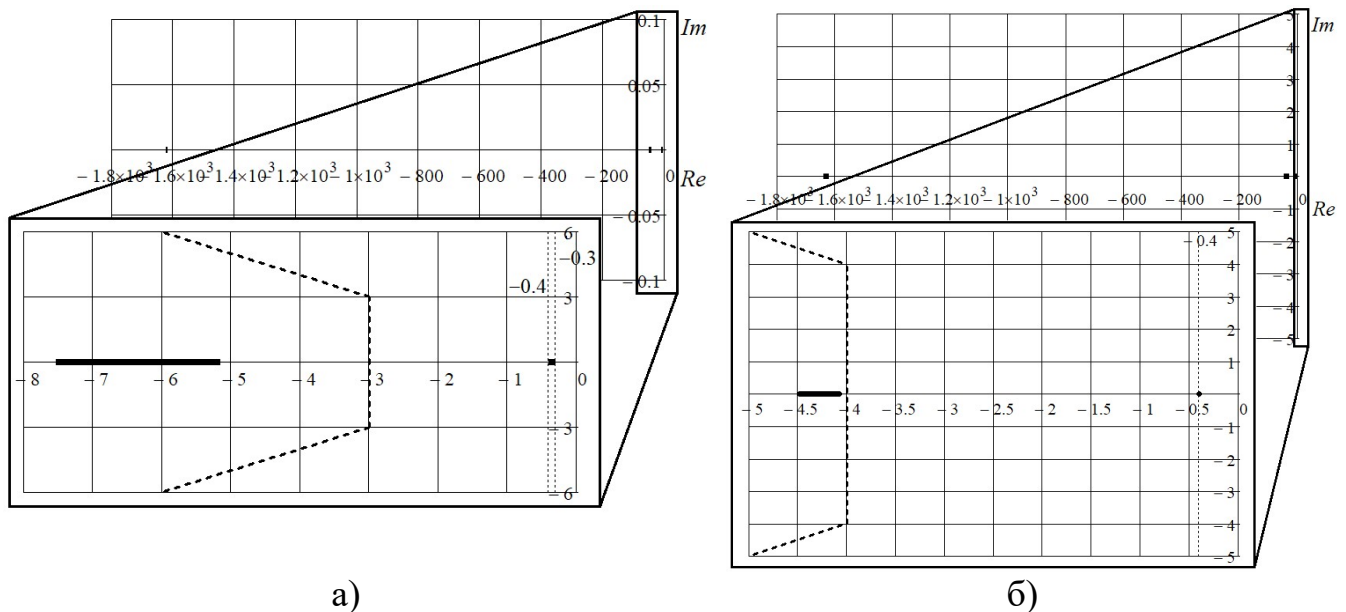


Рисунок 8 – Расположение областей локализации полюсов канала регулирования v_x : а) в робастном режиме; б) в адаптивно-робастном режиме

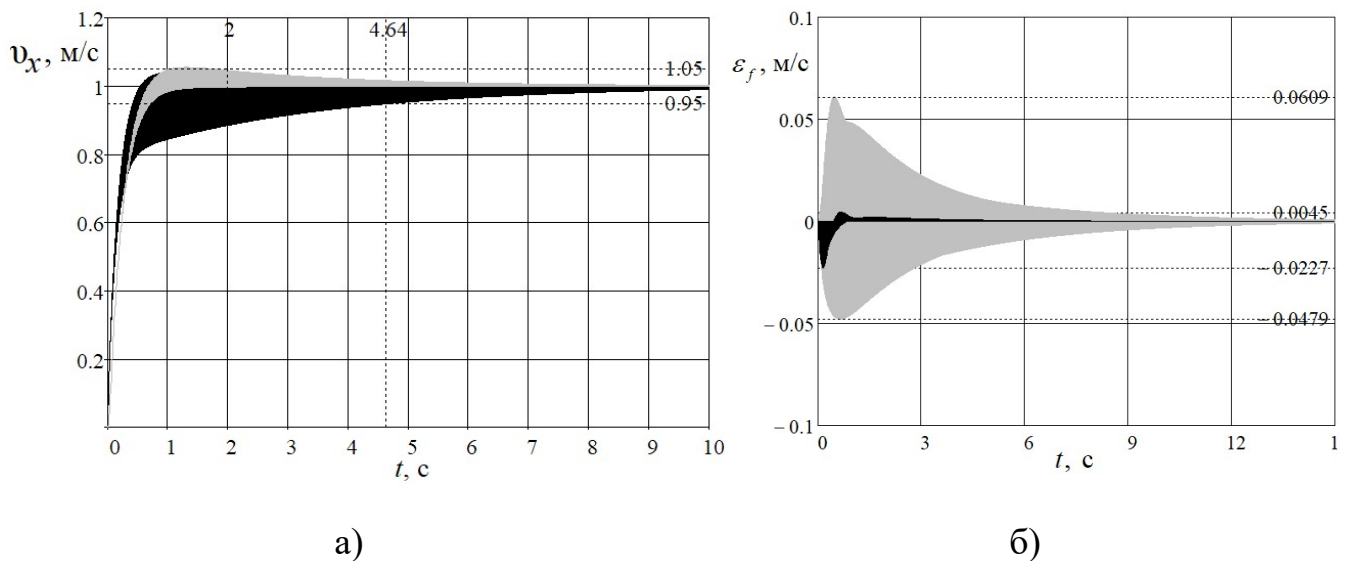


Рисунок 9 – Характеристики канала регулирования v_x : а) переходная характеристика; б) ошибка регулирования по возмущающему воздействию

На рисунке 9а переходные характеристики исследуемого канала в робастном режиме изображены черным цветом; в адаптивно-робастном – серым цветом. Исходя из разницы площадей, можно утверждать, что качество регулирования в адаптивно-робастном режиме стабильнее, чем в робастном.

Ошибка регулирования (см. рисунок 9б) в адаптивно-робастном режиме затухает в два раза быстрее, чем в робастном; ее максимальная амплитуда в 2.68 раза меньше. Для остальных каналов получены аналогичные результаты.

Для проверки работоспособности синтезированной системы на нелинейной модели проведено имитационное моделирование средствами MATLAB Simulink. В ходе первой серии вычислительных экспериментов исследована работа канала управления v_x в обоих режимах. Результаты приведены на рисунке 10.

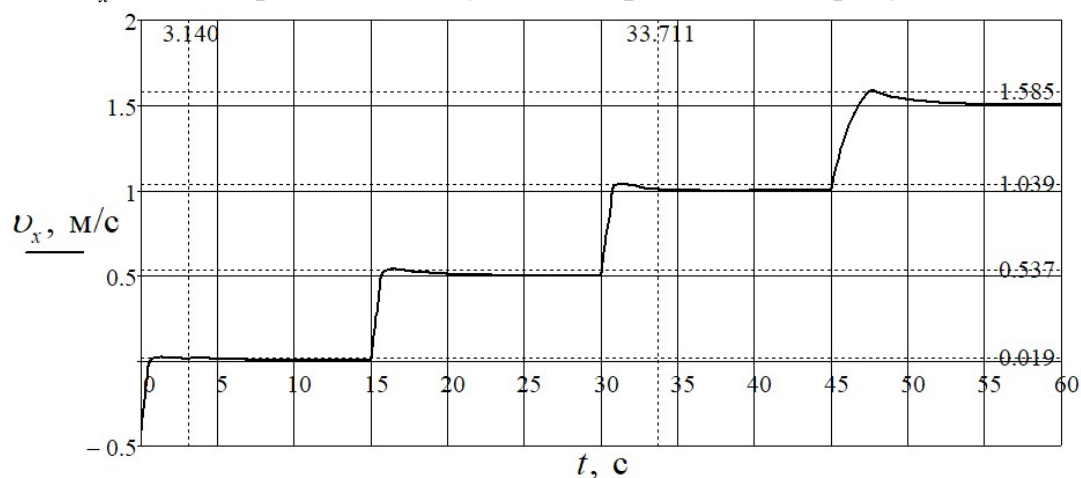


Рисунок 10 – Моделирование работы канала управления v_x

Исходя из рисунка 10, можно утверждать, что в условиях нелинейности переходные процессы сохраняют заданные значения показателей качества. Переключение между режимами работы системы происходит безударно.

В ходе второй серии экспериментов исследована работа синтезированной трехсвязной системы управления движением при наличии подводного течения. Результаты моделирования приведены на рисунке 11.

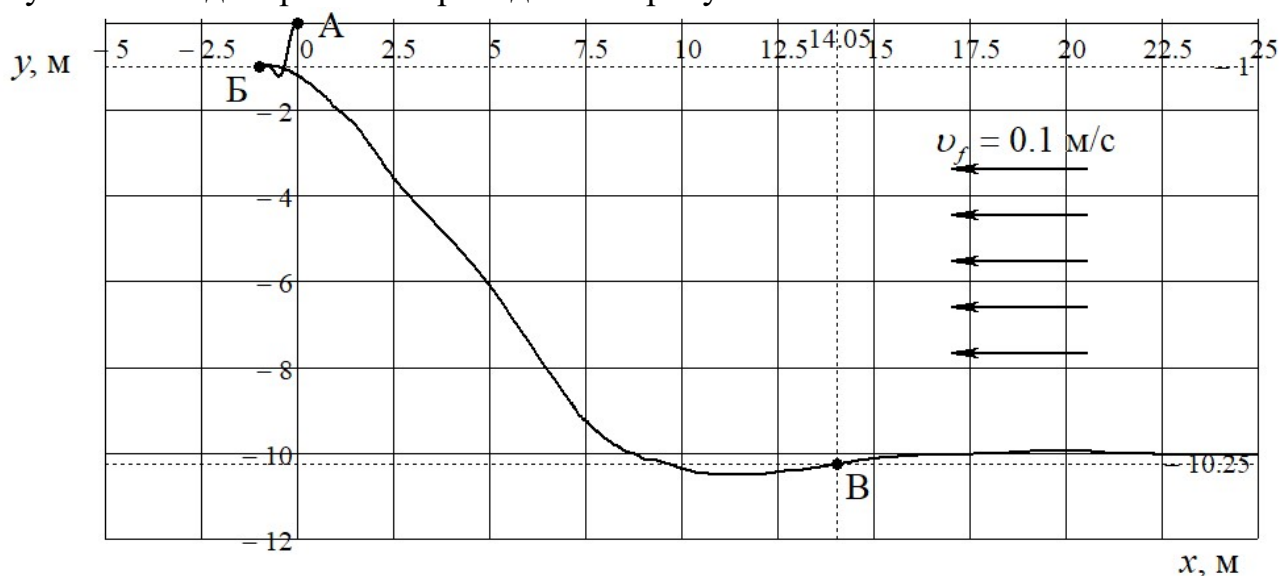


Рисунок 11 – Траектория движения НПА при связной работе каналов системы

Последовательность уставок регулируемых величин имитирует погружение НПА на заданную глубину в два этапа: на участке траектории А-Б происходит погружение НПА на глубину в 1 м под управлением каналов регулирования глубины и дифферента; на участке траектории Б-В происходит погружение НПА под управлением канала регулирования скорости движения маршем и дифферента. После точки В движение управляется тремя каналами одновременно.

Исходя из результатов моделирования, можно утверждать, что синтезированная система сохраняет работоспособность при моделировании с учетом подводного течения с постоянной скоростью; нестационарности, многосвязности и нелинейности объекта.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе результатов анализа проблем применения НПА и управления их движением сформулированы требования к качеству систем управления движением НПА. На основе результатов анализа особенностей НПА как объекта управления сформулирован подход к двухрежимному управлению движением НПА с учетом его нелинейности и параметрической неопределенности.

2. Разработана математическая модель исследуемой системы в шести степенях свободы в форме набора передаточных функций с интервальными параметрами.

3. С помощью разработанной модели описана трехсвязная система управления движением НПА в вертикальной плоскости. Постоянные и интервальные параметры модели оценены на основе реальных экспериментальных характеристик. Разработана структура такой системы.

4. На основе интервальных фазовых неравенств разработано правило поиска наборов проверочных вершин многогранника коэффициентов ИХП для обеспечения желаемого расположения областей локализации полюсов.

5. На основе принципа доминирования полюсов разработаны методики синтеза типовых робастных или адаптивно-робастных модальных регуляторов пониженного порядка, обеспечивающих в системе с интервальными параметрами квазипостоянные или постоянные значения корневых показателей качества.

6. С помощью разработанных методик для каждого из режимов работы системы синтезированы регуляторы, обеспечивающие заданные корневые показатели качества.

7. Качество работы синтезированной двухрежимной системы управления движением НПА в вертикальной плоскости проверено имитационным моделированием на нескольких типах моделей: линейной модели с интервальными параметрами, на основе которой выполнялся синтез; нелинейной модели одного из каналов системы; трехсвязной нелинейной модели. Установлено, что синтезированная система сохраняет работоспособность и заданные значения показателей качества в перечисленных случаях.

8. Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении НИР по грантам Госзадание «Наука» №4.1751.ГЗП.2017 и РНФ №18-79-00264; в НИЛ телекоммуникаций, приборостроения и морской геологии и Отделении автоматизации и робототехники ИШИТР ТПУ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Хожаев, И.В. Адаптивно-робастная стабилизация корневых показателей качества интервальных систем на основе метода доминирующих полюсов / И.В. Хожаев, С.А. Гайворонский, Т.А. Езангина // Проблемы управления. – 2019. – № 6. – С. 22-31 (Khozhaev, I.V. Adaptive-Robust Stabilization of Interval Control System Quality on a Base of Dominant Poles Method/ Khozhaev I.V., Gayvoronskiy S.A., Ezangina T.A. // Automation and Remote Control. – 2021. – Vol. 82. – P. 132-144) (WoS, Scopus).

2. Хожаев И.В., Определение вершинных полиномов для анализа степени робастной устойчивости интервальной системы / С.А. Гайворонский, Т.А. Езангина, И.В. Хожаев, А.А. Несенчук // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20, № 5. – С. 266-273 (Scopus).

3. Хожаев И.В., Параметрический синтез робастного регулятора на основе метода доминирующих полюсов / С.А. Гайворонский, Т.А. Езангина, И.В. Хожаев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – Т. 21, № 1. – С. 14-20 (Scopus).

4. Khozhaev, I.V. Motion control system for a remotely operated vehicle with interval parameters / S.A. Gayvoronskiy, I.V. Khozhaev, T.A. Ezangina // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 2017. – Vol. 6, No. 5. – P. 378-384 (Scopus).

5. Khozhaev I.V. Adaptive Robust Stabilization of an Aperiodic Transient Process Control Quality in Systems with Interval Parametric Uncertainty // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51, No 32. – P. 826-831 (Scopus).

6. Khozhaev I.V., Multivariable control system of vertical motion for an unmanned underwater vehicle with interval parameters / I.V. Khozhaev, T.A. Ezangina, S.A. Gayvoronskiy, M.S. Sukhodoev // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 2018. – Vol. 7, No. 6. – P. 679-683 (Scopus).

7. Khozhaev I.V., Determination of Vertices and Edges in a Parametric Polytope to Analyze Root Indices of Robust Control Quality / S. Gayvoronskiy, T. Ezangina, I. Khozhaev, V. Kazmin // International Journal of Automation and Computing. – 2019. – Vol. 16, No. 6. – P. 828-837 (Scopus).

8. Khozhaev I.V., Parametrical synthesis of linear controllers in aperiodical systems on basis of decomposition approach / S.A. Gayvoronskiy, I. Khozhaev, M. Pushkarev, T. Ezangina // International Review of Automatic Control. – 2019. – Vol. 12, No. 4. – P. 192-199 (Scopus).

Публикации в трудах конференций, проиндексированных в Scopus

9. Khozhaev, I.V. Method of interval system poles allocation based on a domination principle / S.A. Gayvoronskiy, I.V. Khozhaev, T.A. Ezangina // 2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering, ICMSC 2017, St. Petersburg, 19–21 May 2017. – St. Petersburg, 2017. – P. 245-249.

10. Khozhaev, I.V. Parametric synthesis of a robust controller on a base of interval characteristic polynomial coefficients / S.A. Gayvoronskiy, T. Ezangina, I. Khozhaev // ICINCO 2017 - Proceedings of the 14th International Conference on

Informatics in Control, Automation and Robotics : 14, Madrid, 26–28 July 2017. Vol. 2. – Madrid, 2017. – P. 411-416.

11. Khozhaev, I.V. Providing an aperiodicity of transient process in a interval control system on a base of pole domination principle / T. Ezangina, S.A. Gayvoronskiy, I. Khozhaev // ACM International Conference Proceeding Series, Beijing, 26–28 December 2018. – Beijing, 2018. – P. 122-126.

12. Khozhaev, I. V. Parametric synthesis of a robust PID-controller for interval control system with aperiodic transient process / T.A. Ezangina, S.A. Gayvoronskiy, I.V. Khozhaev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 8, Paris, 23–25 July 2019. – Paris, 2019. – P. 012009.

13. Khozhaev, I.V. Robust Controllers Synthesis and Order Reduction of Unmanned Underwater Vehicle Submerging Control System with Interval Parametric Uncertainty / I.V. Khozhaev, S.A. Gayvoronskiy, T.A. Ezangina // IFAC-PapersOnLine : 12th, Daejeon, 18–20 September 2019. Vol. 52. – Daejeon, 2019. – P. 224-229.

14. Khozhaev, I.V. Placing Poles Allocation Areas of Interval Control System with Desired Root Quality Indices / S.A. Gayvoronskiy, T. Ezangina, I. Khozhaev // Proceedings - 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019, Sochi, 08–14 September 2019. – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 8867591.

15. Khozhaev, I.V. The synthesis of a linear controller of the interval control system on the basis of robust D-partition / S.A. Gayvoronskiy, T. Ezangina, I. Khozhaev // 2019 International Automatic Control Conference, CACS 2019, Keelung, 13–16 November 2019. – Keelung, 2019. – P. 9024737.

16. Khozhaev, I.V. Parametric synthesis of a robust controller on a base of D-partition and method of dominant poles / S.A. Gayvoronskiy, T. Ezangina, I. Khozhaev // 2019 International Automatic Control Conference, CACS 2019, Keelung, 13–16 November 2019. – Keelung, 2019. – P. 9024735.

17. Khozhaev, I.V. Adaptive stabilization of certain dominant poles of control system with interval parametric uncertainty for providing constant indices of control quality / S. Novokshonov, T. Ezangina, I. Khozhaev // Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, Sochi, 18–22 May 2020. – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 9112058.

Публикации в других изданиях

18. Хожаев, И.В. Трехсвязная система управления движением необитаемого подводного аппарата в вертикальной плоскости в условиях интервальности его параметров / И.В. Хожаев, Т.А. Езангина, С.А. Гайворонский // Технические проблемы освоения Мирового океана. – 2017. – Т. 7. – С. 374-379.

19. Хожаев, И.В. Многосвязное управление движением необитаемого подводного аппарата в продольно-вертикальной плоскости в условиях интервальной неопределенности параметров аппарата и окружающей среды // Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докладов, Евпатория, 30 июня – 07 июля 2019 года. – Евпатория: Издательство МАИ-Принт, 2019. – С. 170-171.