

На правах рукописи

Козлова Наталия Юрьевна

**АЛГОРИТМЫ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ
МАНИПУЛЯТОРОМ СЕРВИСНОГО СПУТНИКА ПРИ РАБОТЕ
С НЕКООПЕРИРУЕМЫМ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ**

Специальность: 2.5.4

Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н. Э. Баумана).

Научный руководитель: **Смирнова Елена Валентиновна**, д.т.н., доцент кафедры «Компьютерные системы и сети» МГТУ им. Н. Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Дивеев Асхат Ибрагимович**, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, руководитель отдела ФИЦ «Информатика и управление» РАН

Шаронов Николай Геннадьевич, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Динамика и прочность машин» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова»

Защита состоится «14» октября 2025 года в 14.30 на заседании Диссертационного совета Д 24.2.331.14 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана, по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный переулок, д.10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru

Отзывы и замечания по автореферату в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просим направлять по вышеуказанному адресу: 105005, Москва, ул. 2-ая Бауманская, д. 5, с. 1 на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.т.н., доцент

И. В. Муратов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время одной из ключевых тенденций в развитии космической техники является создание сервисных спутников для дистанционного обслуживания некооперируемых космических аппаратов (КА), завершивших свой жизненный цикл вследствие выработки топлива или технических неисправностей.

Проблема продления срока службы и восстановления работоспособности таких аппаратов приобретает особую значимость в условиях роста стоимости запусков и насыщения орбиты ценными объектами, что подтверждается активным развитием международных проектов по орбитальному обслуживанию, включая инициативы Роскосмоса, NASA, DARPA, DLR и коммерческих компаний, таких как Space Logistics, SpaceX.

В работе исследуется система дистанционного управления манипулятором сервисного спутника при контакте с некооперируемым космическим аппаратом.

Актуальность темы диссертационного исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности дистанционного управления манипуляторами сервисных спутников при выполнении операций по захвату, стыковке и обслуживанию некооперируемых КА. Современные задачи в этой области требуют разработки новых математических моделей и алгоритмов управления, учитывающих динамическое взаимодействие между сервисным спутником и установленным на нем манипулятором, а также влияния задержек в каналах связи и необходимости снижения нагрузки на оператора при сохранении прозрачности управления.

В последние годы в России и за рубежом проведен ряд успешных экспериментов по дистанционному управлению сервисными манипуляторами (проекты «Контур», Orbital Express, OSAM-1, Mission Extension Vehicle и др.), однако остаются нерешенными задачи обеспечения устойчивости и повышения точности позиционирования исполнительных устройств при неизвестных задержках в канале связи, а также задачи обеспечения адекватного восприятия оператором удаленной среды при контакте манипулятора с объектом обслуживания.

Особую значимость приобретает разработка отечественных алгоритмов управления и математических моделей для сервисных спутников, что позволит снизить зависимость от зарубежных технологий и обеспечить конкурентоспособность российских решений на мировом рынке.

Таким образом, диссертационная работа направлена на решение актуальных научных и прикладных задач, связанных с развитием теории и практики дистанционного управления космическими манипуляторами, что соответствует современным мировым тенденциям и приоритетам развития робототехники и космической отрасли.

Целью диссертационной работы является разработка алгоритмов дистанционного управления манипулятором сервисного спутника при его контакте с некооперируемым космическим аппаратом, обеспечивающих устойчивость

системы, повышение точности позиционирования исполнительного манипулятора и прозрачности управления.

Для достижения этой цели в диссертационной работе рассматриваются **следующие задачи:**

1. Разработка новой математической модели системы дистанционного управления манипулятором сервисного спутника с учетом взаимного влияния сервисного спутника и установленного на нем исполнительного манипулятора.

2. Модификация метода пассивации для обеспечения устойчивости и повышения точности позиционирования исполнительного манипулятора сервисного спутника при контакте с некооперируемым КА без потери устойчивости системы при неизвестных задержках в канале связи.

3. Разработка метода снижения нагрузки на человека-оператора в процессе дистанционного управления манипулятором сервисного спутника без потери адекватности восприятия человеком-оператором удаленной среды (прозрачности) при контакте ИУ с препятствием и обеспечение устойчивости подсистемы, состоящей из ЗУ и оператора, за счет использования нелинейного закона управления.

4. Создание математической модели, реализованной в среде научных вычислений Simulink с анимацией динамики в симуляторе роботов V-Rep.

Научная новизна:

1. Трехуровневая математическая модель системы дистанционного управления сервисным спутником, состоящая из, модели управления движением сервисного спутника, учитывающей взаимное влияние сервисного спутника и установленного на нем исполнительного манипулятора, моделей управления двигательной установкой (ДУ) сервисного спутника и дистанционного управления исполнительным манипулятором (ИМ) сервисного спутника.

2. Предложена модификация метода пассивации, заключающаяся во введении в схему дополнительного источника скорости, обеспечивающая устойчивость и точность позиционирования исполнительного манипулятора сервисного спутника с подвижным основанием в процессе выполнения целевого сервисного обслуживания некооперируемого космического аппарата.

3. Разработан метод управления задающим устройством с использованием нелинейного закона управления, позволяющий снизить нагрузку на оператора при управлении задающим устройством без потери адекватности восприятия оператором удаленной среды (прозрачности) при контакте исполнительного устройства с препятствием.

Практическая ценность. Разработанные алгоритмы дистанционного управления манипулятором космического манипуляционного робота (КМР) и метод снижения нагрузки на оператора при его работе с системой без потери адекватности восприятия оператором удаленной среды (прозрачности) при контакте исполнительного манипулятора с препятствием могут быть использованы при создании дистанционно управляемых спутников сервисного обслуживания в космосе, а также манипуляторов для работы в экстремальных условиях.

Внедрение результатов работы. Результаты работы использованы в научно-исследовательской работе (НИР) по Гранту № 14366 ГУ / 2019 Фонда содействия инновациям Технет-НТИ «УМНИК-2018», в НИР по Гранту РФФИ «Аспиранты-2020» № 20-38-90261, FNFS-2024-0059, ООО "Телеконт" (г. Жуковский) при проектировании системы управления манипулятором, а также в учебном процессе на кафедре систем автоматического управления факультета «Информатика и системы управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках дисциплины «Основы управления ЛА».

Положения, выносимые на защиту:

1. Трехуровневая математическая модель системы дистанционного управления сервисным спутником, состоящая из модели управления движением сервисного спутника, учитывающей взаимное влияние сервисного спутника и установленного на нем исполнительного манипулятора, моделей управления двигательной установкой (ДУ) сервисного спутника и дистанционного управления исполнительным манипулятором (ИМ) сервисного спутника.

2. Алгоритм дистанционного управления сервисным спутником при временных задержках передачи сигнала в канале связи.

3. Метод устойчивого управления задающим манипулятором (ЗМ) для снижения нагрузки на оператора без потери адекватности восприятия оператором удаленной среды и алгоритмы его реализации.

4. Модифицированный метод пассивации, обеспечивающий точность позиционирования исполнительного манипулятора сервисного спутника в процессе выполнения им целевого обслуживания НКА без потери устойчивости системы при неизвестных задержках в канале связи.

5. Результаты экспериментальных исследований, подтверждающие основные теоретические и методические положения диссертационной работы.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и получили положительную оценку на следующих научных формах:

1. Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства (Москва, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2025);

2. Мультиконференция по проблемам управления (МКПУ), конференция «Управление в аэрокосмических системах» имени академика Е.А. Микрина (УАКС-2020) (Санкт-Петербург, 2020, 2022).

3. 12-я Мультиконференция по проблемам управления (МКПУ) (Геленджик, 23-28 сентября 2019 г.);

4. 12th IFAC Symposium on Robot Control SYROCO 2018 (Budapest, Hungary, 27–30 August 2018);

5. 1-ая Межвузовская конференция на английском языке “Science, Engineering and Business” (Москва, 16 - 17 апреля 2019 г.).

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены 18 печатных изданиях, из них 4 в журналах, рекомендованных ВАК, и 6 индексированы в системах Scopus и Web of Science. На программную реализацию предлагаемого алгоритма получено Свидетельство о гос. регистрации программы

для ЭВМ № 2021617848 от 20.05.2021 «Программа для моделирования алгоритмов дистанционного управления манипуляционным роботом».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Полный текст диссертации изложен на 139 машинописных страницах, включая 55 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 136 наименований работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы, представлена структура диссертации, приведены положения, выносимые на защиту.

В **Первой главе** описан состав объекта управления, проведен обзор основных этапов сервисного обслуживания. Проведен обзор существующих подходы к решению проблем обеспечения устойчивости и прозрачности дистанционного управления манипулятором сервисного спутника, а также проблемы точности позиционирования схвата исполнительного манипулятора и снижения нагрузки на оператора при его работе с системой. Проведен обзор космических экспериментов по этапам сервисного обслуживания некооперируемых космических аппаратов. Представлены этапы сервисного обслуживания и выявлены критические технологии сервисного обслуживания (Рис.1).

Предметом диссертации является дистанционный метод управления манипулятором сервисного спутника. Исследуемая система состоит из наземного контура и сервисного спутника (космического манипуляционного робота). Сервисный спутник (СС) является свободнолетающим манипуляционным роботом. Система должна обеспечивать силомоментную обратную связь. Наземный контур включает в себя задающий манипулятор (ЗМ) копирующего типа, то есть манипулятор, кинематически схожий с исполнительным манипулятором (ИМ), установленным на сервисном спутнике. Обслуживаемый космический аппарат является некооперируемым (НКА), то есть отсутствует возможность управления его исполнительными органами, а также с ним не может быть установлена радиосвязь. Функциональная схема системы управления сервисным спутником представлена на Рис. 2.

Управление манипулятором на большом расстоянии вносит в систему существенные задержки при передаче данных и делает систему неустойчивой. Поэтому одной из основных задач диссертации является обеспечение устойчивости и точности позиционирования исполнительного манипулятора.

Вторая глава посвящена исследованию и уточнению алгоритмов управления КМР при контакте с некооперируемым КА в режиме дистанционного управления.

Относительная навигация		Захват/стыковка		Обслуживание НКО
Сближение на ζ_1 от НКО	Стабилизация на ζ_1 от НКО	Развертывание манипуляторов	Захват и стабилизация спутника с НКО	Стыковка спутника с НКО
Управление движением базы КМР	Управление концевым эффектором КМР и стабилизация базы	Управление концевым эффектором КМР и стабилизация базы	Управление базой КМР при ударе	Управление сцепкой КМР с НКО при переменном $\bar{J}$
$\dot{r} = 2v_{tar}$	$\dot{r} = v_{tar}$	$J = J_0 + \sum J_i$	$m = m_{base} + m_{tar}$ $\bar{J} = \bar{J}_{сц}$	$m = m_{base} + m_{tar}$ $J = J_0 + \sum J_i + J_{tar}$
- Наведение на целевой спутник	- Движение на заданном расстоянии	- Перемещение концевых эффекторов манипуляторов в заданное положение	- Стабилизация сцепки КМР с НКО	- Стабилизация сцепки КМР с НКО при стыковке
$\Delta r \rightarrow \zeta_1$	$\Delta r \rightarrow \zeta_1$	$x_s \rightarrow x_{sd}$	$\Delta \omega_{сц} \rightarrow 0$	$\Delta \omega_{сц} \rightarrow 0$
- Сближение до заданного расстояния	- Стабилизация	- Стабилизация		
$\Lambda^{tar} = [\lambda_0, \Lambda]$	$\Delta \omega \rightarrow 0$	$\Delta \omega \rightarrow 0$		
Устойчивое дистанционное управление		Снижение утомляемости оператора		Управление концевым эффектором КМР при неизвестных задержках в канале связи
Обеспечение устойчивости дистанционного управления и требуемой точности позиционирования ИУ		Управление концевым эффектором КМР при неизвестных задержках в канале связи		Управление концевым эффектором КМР при неизвестных задержках в канале связи
$E_N(k) = E^m(k) + E^s(k)$, при $\forall k \geq 0$		Управление концевым эффектором КМР при неизвестных задержках в канале связи		Управление концевым эффектором КМР при неизвестных задержках в канале связи
$\Delta x_{err} < \varepsilon $		Управление концевым эффектором КМР при неизвестных задержках в канале связи		Управление концевым эффектором КМР при неизвестных задержках в канале связи
Минимизация ощущения оператора веса ЗУ		Управление концевым эффектором КМР при неизвестных задержках в канале связи		Управление концевым эффектором КМР при неизвестных задержках в канале связи
$F_h \rightarrow \min$		Управление концевым эффектором КМР при неизвестных задержках в канале связи		Управление концевым эффектором КМР при неизвестных задержках в канале связи

Рис. 1. Этапы сервисного обслуживания некооперируемого космического аппарата

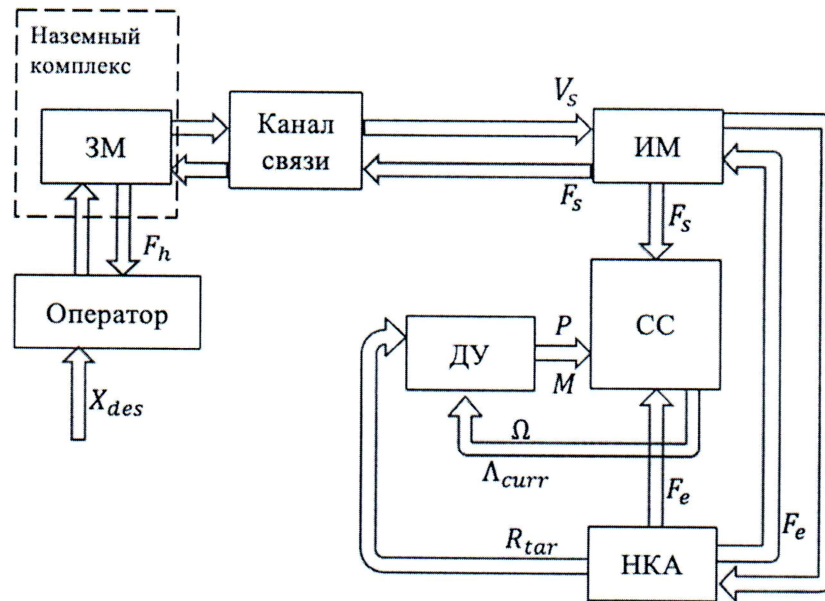


Рис. 2. Функциональная схема системы дистанционного управления

Поскольку, повторим, целевой спутник является некооперируемым, то есть, отсутствует возможность управления его исполнительными органами, с ним не может быть установлена радиосвязь и в общем случае он может находиться в состоянии неконтролируемого движения.

Кинематическая схема сервисного спутника с установленным манипулятором показана на Рис. 3. Манипулятор имеет 4 степени подвижности. Для решения задачи управления движением сервисного спутника используется жестко связанная с сервисным спутником система координат $Oxyz$ (ССК), а также инерциальная система координат O_rxyz (ИСК), неподвижная относительно центра Земли и зафиксированная в момент включения режима. В начальный момент времени запуска режима сближения ССК совмещена с ИСК и неподвижна в ИСК. На Рис. 3 O_c – центр масс сервисного спутника с установленным манипулятором.

Угловое движение сервисного спутника в ССК координат определяется уравнениями:

$$\begin{cases} 2 \dot{\Lambda} = \Lambda \cdot \omega, \\ (m_r \rho_r + \sum m_i \rho_i) \times (\dot{v}_0 + \omega \times v_0) + J \dot{\omega} + \omega(J\omega + K_r) = -Q - K_r^* + M + M_g, \end{cases} \quad (1)$$

где $M = [M_x, M_y, M_z]$ – суммарный вектор управляющих моментов двигателей ориентации; Q – суммарный вектор моментов звеньев манипулятора; K_r – главный момент относительных количеств движения в полюсе O ; M_g – гравитационный момент.

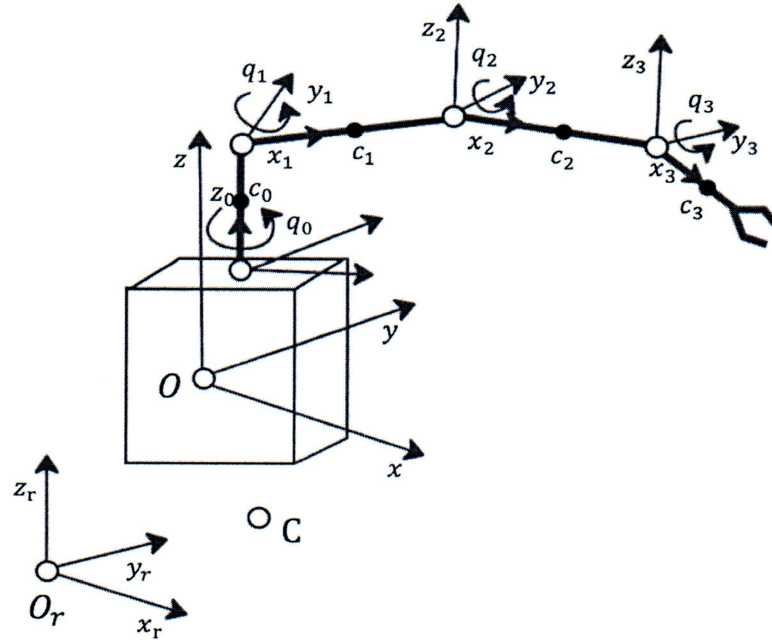


Рис. 3. Кинематическая схема сервисного спутника с установленным манипулятором

Кватернион перехода Λ^{tar} системы координат, связанной с корпусом сервисного спутника (далее - ССК), в конечное положение, определяется выражениями:

$$\Lambda^{tar} = [\lambda_0, \Lambda], \quad \lambda_0 = \frac{\sqrt{1+a_{11}+a_{22}+a_{33}}}{2}, \quad \lambda_1 = \frac{a_{23}-a_{32}}{4\lambda_0}, \quad \lambda_2 = \frac{a_{31}-a_{13}}{4\lambda_0}, \quad \lambda_3 = \frac{a_{12}-a_{21}}{4\lambda_0},$$

где

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \cdot \cos \beta & \sin \gamma \cdot \sin \beta \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \cdot \cos \beta & \cos \gamma \cdot \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Заметим, что так как задача состоит в наведении оси X_5 на целевой спутник, точно определенного углового положения сервисного спутника вокруг оси X_5 не требуется, а значит достаточно двух поворотов.

Уравнение движения центра масс сервисного спутника с установленным манипулятором определяется в форме уравнения Эйлера-Лагранжа:

$$\begin{aligned} m\mathbf{v}_0^* - (m_r \rho_r + \sum m_i \rho_i) \times \dot{\boldsymbol{\omega}} = \\ = -m(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_0) + \boldsymbol{\omega} \times (m_r \rho_r + \sum m_i \rho_i) \times \boldsymbol{\omega} - \sum (m_i (2\boldsymbol{\omega}) \times \boldsymbol{\rho}_i^* + \boldsymbol{\rho}_i^{**}) + P_{dv} + \frac{\mu R}{|R|^3}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $m = m_r + \sum m_i$ – масса сервисного спутника и манипулятора, ρ_r – фиксированный в ССК вектор положения центра масс сервисного спутника, $\rho_i, i =$

$0 \div 3$ – положение центров масс звеньев манипулятора с массой m_i , $\rho_i^* = \sum \frac{\partial \rho_i}{\partial q_s} \dot{q}_s$, $\rho_i^{**} = \sum \frac{\partial \rho_i}{\partial q_s} \ddot{q}_s + \sum \frac{\partial^2 \rho_i}{\partial q_k \partial q_s} \dot{q}_k$, где μ – гравитационный параметр, R – вектор расстояния от центра Земли до сервисного спутника.

В качестве прототипа исполнительного манипулятора используется манипулятор KUKA LWR немецкого производителя промышленных роботов и систем для автоматизации производства KUKA. При моделировании процесса разворачивания манипулятора использованы 4 степени этого манипулятора (Рис. 4).

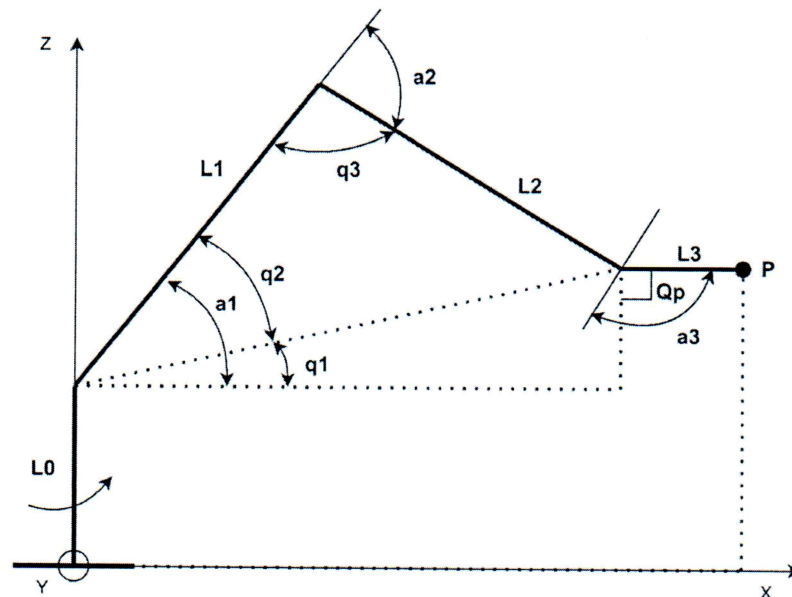


Рис. 4. Схема исполнительного манипулятора (вид в плоскости звеньев L_1, L_2, L_3 манипулятора)

Для осуществления ориентации КМР используется двигательная установка (ДУ), состоящая из восьми электрореактивных двигателей ориентации. Математическая модель двигательной установки представлена в работе и учитывает задержку на переключение двигателей и время нарастания и спада тяги. Управление включением двигателей осуществляется по релейному закону управления с гистерезисом.

При управлении исполнительным манипулятором осуществляется управление перемещением концевой схвата манипулятора в заданную точку относительно корпуса сервисного спутника. Решена обратная задача кинематики и найдены углы сервоприводов в зависимости от положения концевой схвата:

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{atan} \frac{y_P}{x_P} \\ \operatorname{atan} \frac{z_P + L_3 \cos Q_P}{x_P - L_3 \sin Q_P} + \operatorname{acos} \frac{d^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_1 d} \\ \pi - \operatorname{acos} \frac{L_1^2 + L_2^2 - d^2}{2L_1 L_2} \\ \left(\pi - \operatorname{acos} \frac{d^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_1 d} - \operatorname{acos} \frac{L_1^2 + L_2^2 - d^2}{2L_1 L_2} \right) + \\ \left(\pi - \operatorname{atan} \frac{y_N}{x_N} - \frac{\pi}{2} \right) - \frac{\pi}{2} + Q_P \end{bmatrix}$$

Для решения задачи динамики использовано уравнение Лагранжа второго рода.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_r}{\partial \dot{q}_s} \right) - \frac{\partial T_r}{\partial q_s} = Q_s - m(\mathbf{v}_0^* + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_0) \frac{\partial \rho_c}{\partial q_s} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega} \frac{\partial K_r}{\partial q_s} \boldsymbol{\omega} - \dot{\boldsymbol{\omega}} \left(\left(\frac{\partial K_r^*}{\partial q_s} \right) - \frac{\partial K_r}{\partial q_s} \right) - \sum_{\beta=1}^k \mu_\beta \alpha_{\beta s} \quad (4)$$

Полученная система дифференциальных уравнений 1, 3 и 4 позволяет решить задачу синтеза алгоритма стабилизации схвата манипулятора относительно требуемого положения на основе решения обратной задачи динамики.

В **третьей главе** представлены разработанные алгоритмы дистанционного управления манипулятором КМР для выполнения работ по обслуживанию некооперируемого КА. Рассмотрена классическая математическая модель и предложена новая модель системы дистанционного управления КМР, которая отличается от известной тем, что учитывает взаимное влияние движений сервисного спутника и установленного на нем исполнительного манипулятора.

Для обеспечения устойчивости системы дистанционного управления манипулятором КМР применен модифицированный метод пассивации, а именно, в прямой и обратный каналы связи введены дополнительные модули: модули контроля пассивности (FPO и BPO) и модули обеспечения пассивности (FPC и BPC), показанные на Рис. 5.

Для решения второй научной задачи, разработаны математические модели подсистем, выделенных на Рис. 5:

$$\begin{aligned} F_h &= M_h(x''_{des} - x''_m) + B_h(x'_{des} - x'_m) + K_h(x_{des} - x_{des}) \\ Z_h &= \frac{F_h}{x_h} = M_h S^2 + B_h S + K_h \\ Z_h - F_m &= M_m x''_m + B_m x'_m \\ Z_m^{-1} &= \frac{x_m}{F_h - F_m} = \frac{1}{M_m S^2 - B_m S} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F_m &= T_b F_s, \\
x_{sd} &= T_f x_m \\
\begin{cases} F_s = P_{sm} x_{sde} + D_{sm} x'_{sde}, \\ x_{sde} = x_{sd} - (x_{sb} + x_s), \\ F_s - F_e = M_{sm} x''_s \end{cases} \\
\begin{cases} F_{sb} = P_{sb} x_{sdeb} + D_{sb} x_{sdeb}, \\ x_{sdeb} = x_{sdb} - x_{sb}, \\ F_{sb} - (F_s + F_e) = M_{sb} x''_{sb}; \end{cases} \\
\begin{cases} F_e = (x_s - x_{wall}) K_{wall}, \text{ при } (x_s - x_{wall}) \leq 0, \\ F_e = 0, \text{ при } (x_s - x_{wall}) < 0; \end{cases}
\end{aligned}$$

Блок контроля пассивности (Passivity observer – PO) в режиме реального времени вычисляет энергию системы, принимая во внимание также энергию, рассеянную модулем пассивации (Passivity controller – PC). Для двух блоков контроля пассивации (FPO и BPO) имеем уравнения потока энергии:

$$W_m(k) = E_{in}^s(k - T_b(k)) - E_{out}^m(k) + E_{PC}^m(k - 1),$$

$$W_s(k) = E_{in}^m(k - T_f(k)) - E_{out}^s(k) + E_{PC}^s(k - 1),$$

где E_{PC}^m и E_{PC}^s – корректирующие энергии, введенные посредством модулей пассивации FPC и BPC на предыдущих шагах; T_b – время задержки прохождения сигнала в отрицательном направлении; T_f – время задержки прохождения сигнала в положительном направлении.

Потоки энергии в прямом W_m и обратном W_s каналах должны быть положительными в любой момент времени. В противном случае в соответствующем направлении включается модуль пассивации PC, рассеивающий столько энергии, сколько необходимо для обеспечения положительного потока энергии через блок MTDPN.

Справедливо уравнение:

$$f_m(k) = f_s(k - T_b(k)) + \alpha(k) v_m(k).$$

Коэффициент $\alpha(k)$ зависит от потока энергии, вычисленного на k – ом шаге модулем контроля пассивации FPO и определяется как:

$$\alpha(k) = \begin{cases} 0, \text{ если } W^m(k) > 0, \\ -\frac{W^m}{\Delta T v_m^2(k)}, \text{ если } |v_m(k)| > 0 \end{cases}$$

Энергия, рассеянная блоком FPC, вычисляется следующим образом:

$$E_{PC}^m(k) = \Delta T \sum_{j=0}^k \alpha(j) v_m^2(j).$$

Аналогично получаем поток энергии, вычисляемый блоком ВРО, и энергию, рассеянную ВРС, соответственно:

$$v_{sd}(k) = v_m(k - T_f(k) + \beta(k)f_s(k)$$

$$b(k) = \begin{cases} 0, & \text{если } W^s(k) > 0, \\ -\frac{W^s}{\Delta T f_s^2(k)}, & \text{если } |f_s(k)| > 0 \end{cases}$$

$$E_{PC}^s(k) = \Delta T \sum_{j=0}^k \beta(j) f_s^2(j).$$

Хотя метод пассивации канала связи обеспечивает устойчивость системы дистанционного управления, однако, при этом возникают существенные отклонения положения захвата исполнительного манипулятора от требуемого, что снижает точность работы системы.

Ошибка позиционирования исполнительного манипулятора с применением метода пассивации накапливается:

$$x_{err}(k) = \Delta T \sum_{j=0}^k (v_{sd}(j) - \hat{v}_{sd}(j)) = \Delta T \sum_{j=0}^k b(j) f_s(j).$$

Для решения данной проблемы, являющейся третьей научной задачей в работе, применен модифицированный метод пассивации канала связи и в систему введен зависимый источник скорости v_{ad} (Рис. 6):

$$v_{ad} = \frac{a}{\Delta T} (\hat{x}_{sd}(k) - \Delta T \sum_{j=0}^{k-1} (j) - \hat{v}_{sd}(k) \Delta T),$$

где $\hat{x}_{sd}(k) = x_m(k - T_f(k))$ – сигнал перемещения захвата манипулятора задающего устройства после прохождения коммуникационной линии связи; v_{sd} – желаемая скорость, поступающая на контроллер манипулятора исполнительного устройства; $\hat{v}_{sd}(k) = v_m(k - T_f(k))$ – сигнал скорости захвата манипулятора исполнительного устройства после прохождения коммуникационной линии связи, ΔT – период дискретизации.

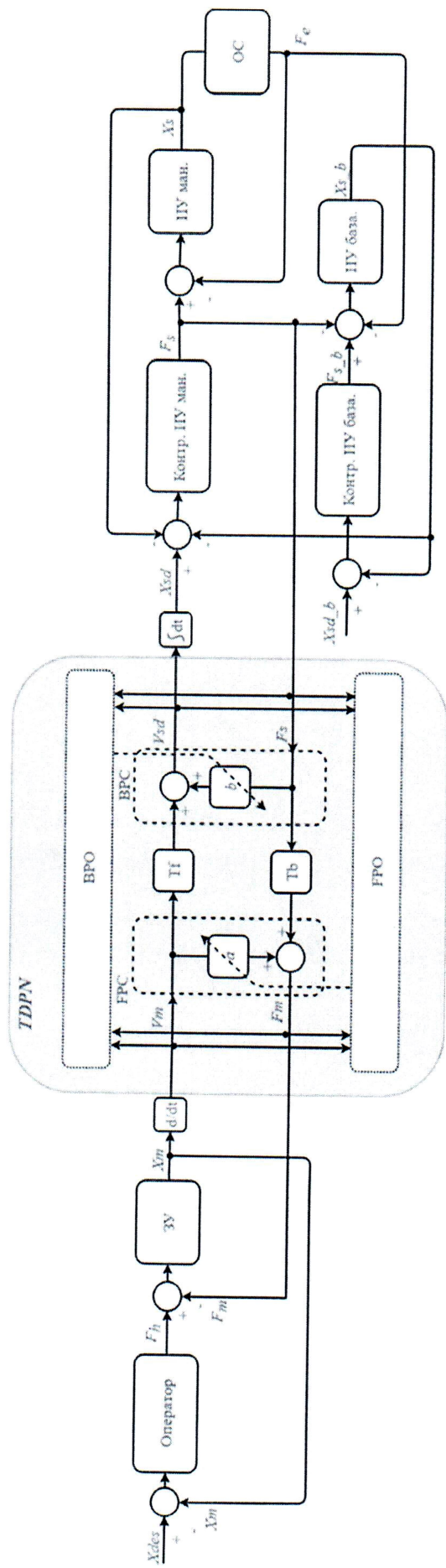


Рис. 5. Контур системы дистанционного управления с применением метода пассивификации канала связи

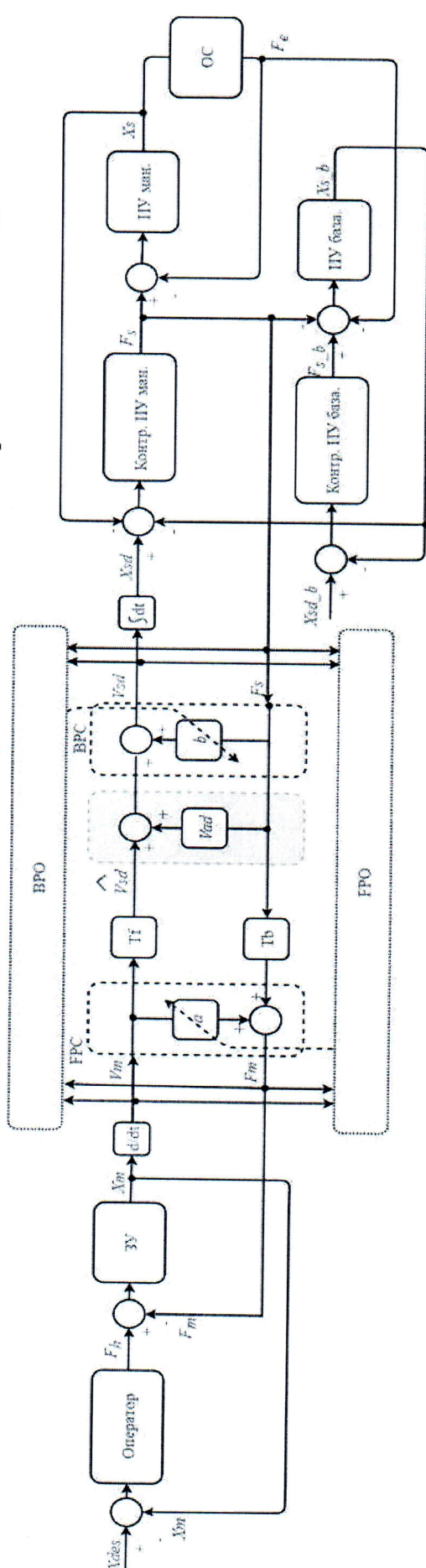


Рис. 6. Контур системы дистанционного управления с применением метода пассивификации канала связи и компенсацией отклонений положения ИУ

Ошибка позиционирования исполнительного манипулятора после применения модифицированного метода пассивфикации:

$$x_{err}(k) = \Delta T b(k) f_s(k).$$

Когда модуль пассивфикации ВРС неактивен ($b(k) = 0$), отклонение положения захвата манипулятора исполнительного устройства $x_{err}(k)$ равно нулю. Таким образом, больше исключено постоянное накопление отклонения перемещения захвата манипулятора исполнительного устройства.

Для решения четвертой научной задачи предложен и математически обоснован метод, позволяющий снизить ощущаемый оператором вес ЗУ при свободном движении ИУ при этом сохранить адекватность восприятия оператором удаленной среды при контакте ИУ с препятствием. Метод основан на введении в локальный контур управления ЗУ нелинейного коэффициента увеличения силы воздействия оператора на задающее устройство (Рис. 7).

$$\tilde{F}_h = G F_h = (\alpha(\tilde{F}_e) + 1) F_h.$$

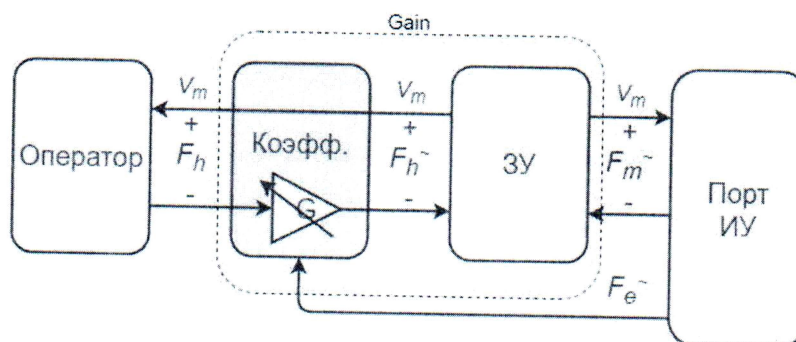


Рис.7. Локальный контур управления ЗУ с применением нелинейного коэффициента

Здесь $\alpha(\tilde{F}_e)$ – нелинейный коэффициент, зависящий от силы воздействия удаленной среды по сигмоидальному закону:

$$\alpha = \frac{\alpha^{max}}{1 + e^{k(|\tilde{F}_e| - F_{e0})}},$$

где k – крутизна кривой; α^{max} – максимальное значение коэффициента усиления.

Подсистема G на Рис. 7 является активной, а значит делает всю систему неустойчивой:

$$P_{active} = \tilde{F}_h v_m - F_h v_m = \alpha F_h v_m.$$

Для обеспечения устойчивости системы используется два метода, введение демпфера с помощью функции энергии и с помощью метода пассивфикации ЗУ.

В первом случае в систему добавлен демпфер γ , который рассеивает активную энергию. Для уменьшения значения демпфера использована пассивная природа задающего устройства:

$$\gamma \geq -\frac{M \dot{\alpha}}{2(1 + \alpha)} - B,$$

где M – масса ЗУ, B – вязкое трение, F_μ – кулоновское трение, α – коэффициент местной обратной связи по усилию.

Недостатком данного метода является то, что для нахождения требуемого значения γ должны быть определены точные значения инерции и физический демпфер, что является достаточно трудной задачей.

Проблема определения трения решена путем рассмотрения коэффициента G одновременно с задающим устройством (выделенный пунктиром блок *Gain* на Рис. 7). Пассивность блока *Gain* может быть обеспечена с помощью метода МТДРА, в основе которого лежит изменение значения демпфера γ в соответствии с обнаруженной активной энергией:

$$\gamma = \begin{cases} -\frac{P_{obs}}{v_m^2}, & \text{если } P_{obs} < 0, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$P_{obs} = F_h v_m - \tilde{F}_m v_m.$$

В четвертой главе проведено математическое моделирование алгоритмов дистанционного управления в среде Matlab/Simulink и V-REP сервисным спутником (Рис. 8) и экспериментальное исследование метода снижения нагрузок на оператора на полунатурном стенде с использованием манипулятора KUKA LWR7+ в качестве задающего манипулятор (Рис. 9).

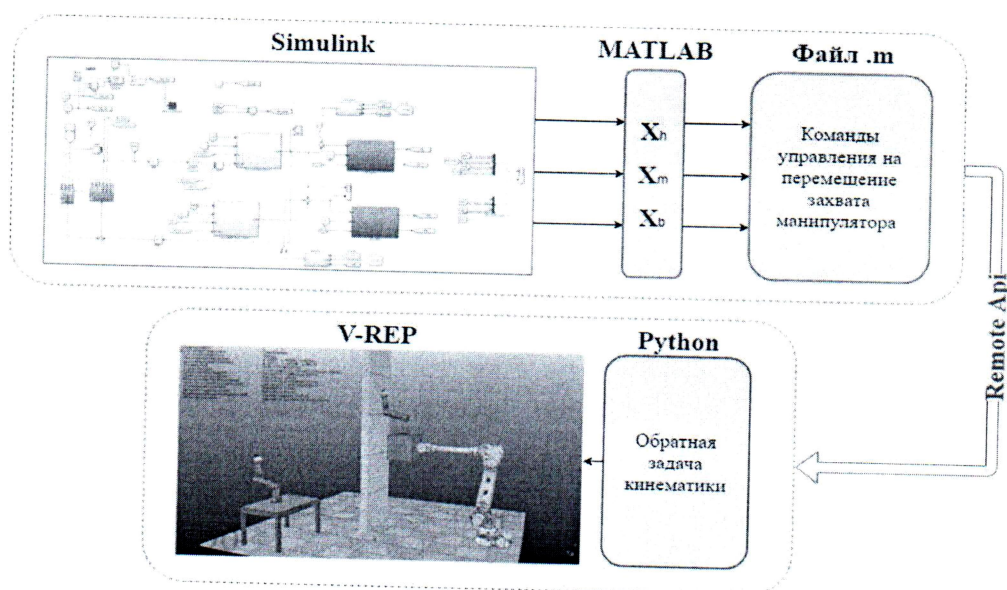


Рис. 8. Структура виртуального стенда

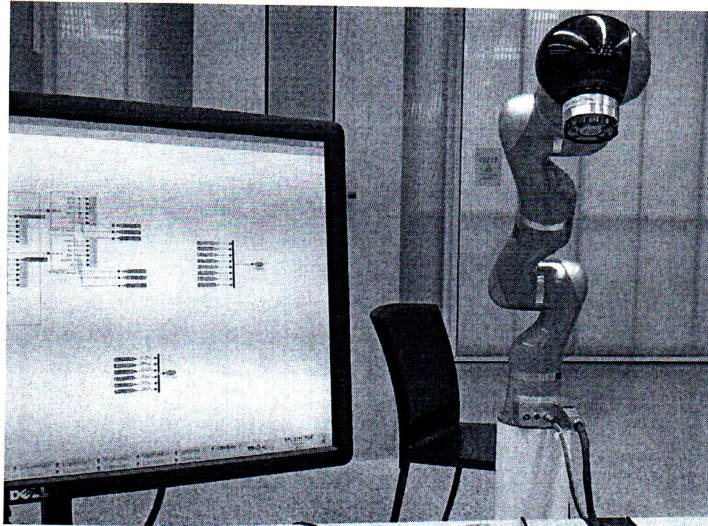


Рис. 9. Вид экспериментальной установки полунатурного стенда

Моделирование системы дистанционного управления осуществлялось при свободном движении исполнительного манипулятора и при его контакте с препятствием. Моделирование показало, что система дистанционного управления является не устойчивой в общем случае (Рис. 10).

С применением модифицированного метода пассивации система дистанционного управления сервисным спутником обеспечивается устойчивость системы и повышается точность позиционирования исполнительного манипулятора (Рис. 11).

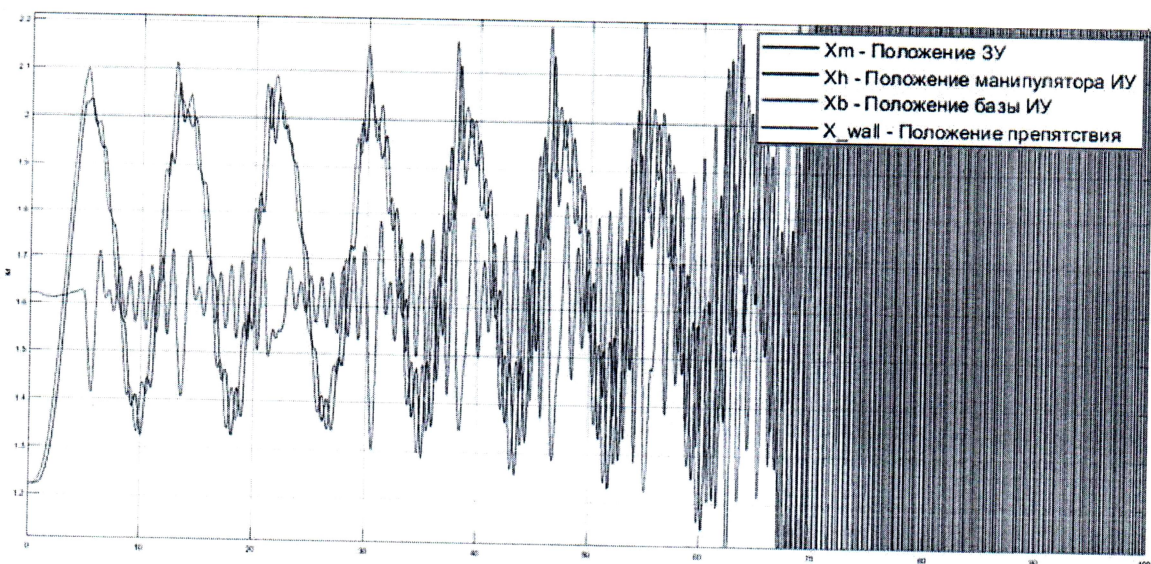


Рис. 10. График перемещений захватов манипуляторов задающего и исполнительного устройств и сервисного спутника при контакте с препятствием

Результаты математического и полунатурного моделирования системы дистанционного управления с применением метода снижения нагрузки на оператора при его работе с системой показали, что предложенный нелинейный метод позволяет снизить нагрузку на человека-оператора при свободном движении

ИУ, при этом сохранить адекватность восприятия им удаленной среды при контакте ИУ с препятствием.

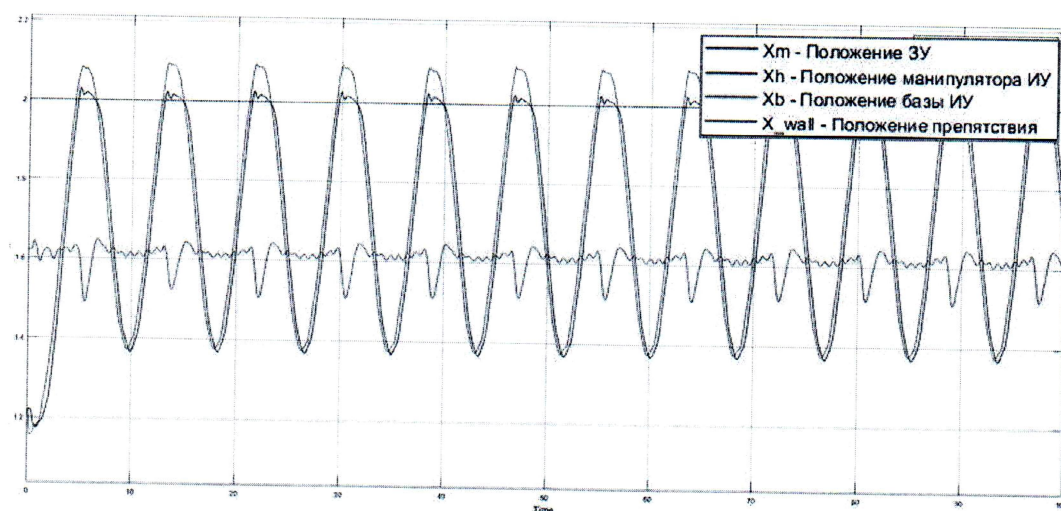


Рисунок 11 — График перемещения захватов манипуляторов задающего и исполнительного устройств и сервисного спутника с пассивацией канала связи и компенсацией отклонения положения при контакте с препятствием

На Рис. 12 представлены результаты полунатурного моделирования положения задающего и исполнительного манипуляторов и усилия при применении нелинейного закона управления с локальной обратной связью с пассивацией системы с помощью метода ТДРА.

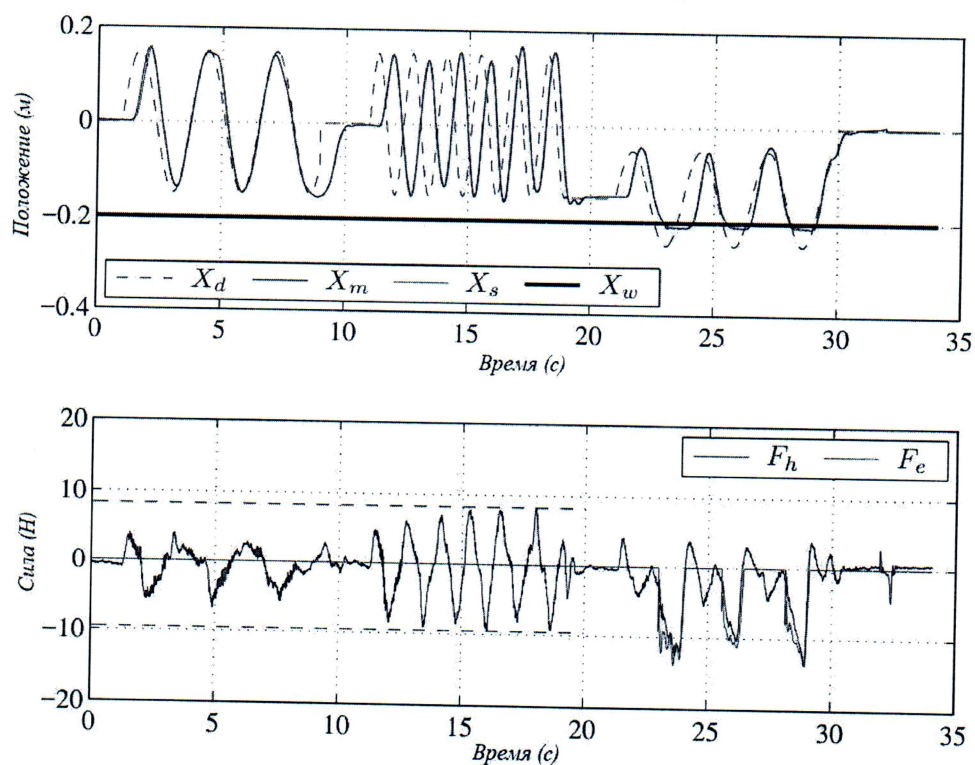


Рис. 12 — График изменения положения задающего и исполнительного манипуляторов и усилия при применении нелинейного закона управления с локальной обратной связью с пассивацией системы путем введения дополнительного демпфера

Для оценки предложенных методов посчитан корень из среднеквадратической ошибки (RMSE) между измеренной силой воздействия удаленной среды F_e и силой, ощущаемой оператором F_h , для случаев отсутствия локальной обратной связи, применения пропорционального закона управления с локальной обратной связью, применения нелинейного закона управления с обеспечением устойчивости путем введения дополнительного демпфера и путем пассивации подсистемы с помощью метода TDPA. Результаты показаны на Рис.13, по которому можно сделать вывод о максимальной эффективности нелинейного метода снижения утомляемости с использованием метода TDPA как при свободном движении ИУ, так и при контакте ИУ с препятствием.

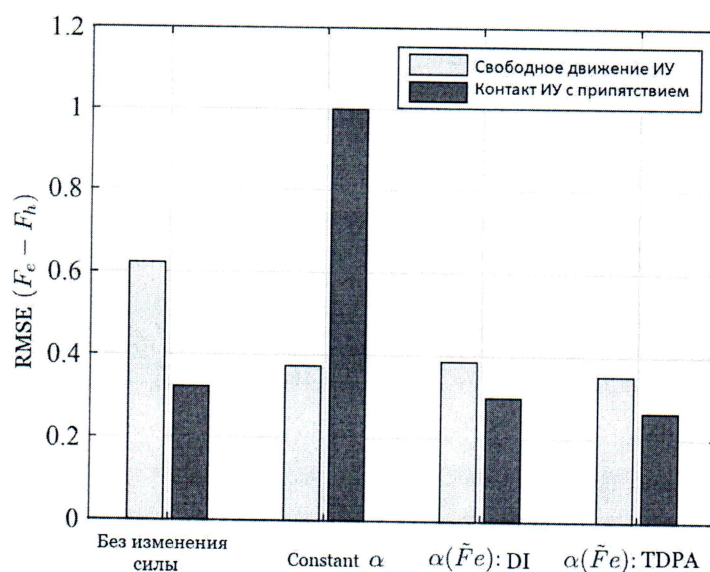


Рисунок 12 — Сравнение ошибок RMSE для рассматриваемых случаев

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен анализ систем сервисного обслуживания в космосе, проводимых космических экспериментов и сформированы основные критерии управления КМР при сближении с НКА.
2. Разработана математическая модель системы дистанционного управления манипулятором КМР, отличающейся от известных учетом взаимного влияния сервисного спутника и установленного на нем исполнительного манипулятора.
3. Разработан алгоритм управления, основанный на методе пассивации, обеспечивающий устойчивость и позволяющий повысить точность позиционирования исполнительного манипулятора КМР в процессе выполнения целевого обслуживания НКА без потери устойчивости системы при неизвестных задержках в канале связи.
4. Разработан метод снижения нагрузки на человека-оператора в процессе дистанционного управления манипулятором КМР без потери

адекватности восприятия человеком-оператором удаленной среды (прозрачности) при контакте ИМ с препятствием и обеспечение устойчивости подсистемы, состоящей из ЗМ и оператора, за счет использования нелинейного закона управления, позволяющий снизить нагрузку на оператора.

5. Разработана программная реализация алгоритмов автоматического и дистанционного управления КМР на языке Matlab.

6. Создан виртуальный стенд для системы дистанционного управления манипулятором КМР, тестирования и отладки разработанных методов и алгоритмов в вычислительных средах Matlab/Simulink и V-Rep.

7. Проведено экспериментальное исследование алгоритмов дистанционного управления, по результатам моделирования в 10 раз снижена ошибка позиционирования ИУ, на 30% снижена нагрузка на человека-оператора при работе с системой.

8. Проведен сравнительный анализ предлагаемого нелинейного метода снижения утомляемости оператора с обеспечением устойчивости путем введения дополнительного демпфера и путем использования метода ТДРА и классического линейного метода. По сравнению с прототипом нелинейного метода снижения утомляемости оператора показал лучшую эффективность как при свободном движении ИУ, так и при контакте ИУ с препятствием

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Non-Linear Local Force Feedback Control for Haptic Interfaces / R. Balachandran, N. Kozlova, C. Ott, A. Albu-Schaeffer // IFAC-PapersOnLine. — 2018. — Vol. 51, no. 22. — P. 486–492. (1п.л./0.5п.л.)

2. Козлова, Н. Ю., Фомичев, А. В. Методы повышения эффективности дистанционного управления свободнолетающим космическим манипуляционным роботом // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2019. — Т. 7, № 209. — С. 189–200.

3. Козлова, Н. Ю., Фомичев, А. В. Алгоритмизация наведения и управления движением космическим манипуляционным роботом в задачах сервисного обслуживания некооперируемого космического аппарата. Мехатроника, автоматизация, управление. 2023; 24(4): 216-224.

4. Козлова, Н. Ю., Смирнова, Е. В. Алгоритм снижения утомляемости человека при работе с тактильным интерфейсом системы дистанционного управления. Перспективы науки, № 11(170).2023, С 29-34.

5. Козлова Н.Ю., Смирнова Е.В. Использование модифицированного метода пассивации канала связи для компенсации случайных задержек в системе дистанционного управления космическим манипулятором. Перспективы науки, № 11(170).2023, С 34-41.

6. Ю. Козлова Н., В. Фомичев А. Программа для моделирования алгоритмов дистанционного управления манипуляционным роботом: патент № 2021617848 RU. — 2021.

7. Kozlova N. Y., Fomichev, A. V. Development of the remote control system of the free-flying space manipulation robot with force feedback // AIP Conference Proceedings. — 2019. — no. 2171. — P. 150005.
8. Kozlova, N. Y., Fomichev, A. V. Promising on-orbit servicing tasks for spacecraft life extension // AIP Conference Proceedings. — 2021. — Vol. 2318, no. 1. — P. 130008.
9. Kozlova, N. Yu., Fomichev, A. V. Mathematical model of free-flying space manipulation robot when approaching a non-cooperative spacecraft // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 1864, no. 1. — P. 012131.
10. Kozlova, N. Y., Fomichev, A. V. Service satellite control in Rendezvous with a non-cooperative spacecraft // AIP Conference Proceedings. — AIP Publishing, 2023. — Vol. 2549. — No. 1.
11. Козлова, Н. Ю., Фомичев, А. В. Разработка системы дистанционного управления космическим роботом-манипулятором с силомоментным оцувствлением // XLIII Академические чтения по космонавтике. — Т. 2. — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. — С. 103–105.
12. Козлова, Н. Ю., Фомичев, А. В. Повышение эффективности дистанционного управления свободнолетающим космическим манипуляционным роботом // XII мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2019). — Т. 4. — Таганров: Издательство Южного федерального университета, 2019. — С. 47–49.
13. Козлова, Н. Ю., Фомичев, А. В. Перспективные задачи сервисного обслуживания для продления срока эксплуатации космических аппаратов // XLIV Академические чтения по космонавтике. — Т. 2. — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. — С. 218–220.
14. Козлова, Н. Ю., Фомичев, А. В. Разработка математической модели системы управления свободнолетающим космическим манипуляционным роботом при сближении с некооперируемым спутником // 13-я Мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2020), Конференция «Управление в аэрокосмических системах» имени академика Е.А. Микрина (УАКС-2020). — СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020. — С. 58–60.
15. Козлова, Н. Ю., Фомичев, А. В. Управление сервисным спутником при сближении с некооперируемым космическим аппаратом // XLV Академические чтения по космонавтике. — Т. 3. — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. — С. 371–372.
16. Козлова, Н. Ю., Фомичев, А. В. Управление движением сервисного спутника на этапе дальнего наведения. XLVI Академические чтения по космонавтике (Москва, 25–28 января 2022 г.): сборник тезисов: т. 3 — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. С. 449 – 451.
17. Козлова, Н. Ю., Фомичев, А. В. Разработка алгоритмов управления движением сервисного спутника// Материалы конференции «Управление в аэрокосмических системах» (УАКС–2022) имени академика Е.А. Микрина». СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2022. С. 87-90.

18. Козлова, Н. Ю., Фомичев, А. В. Алгоритмизация наведения и управления движением сервисного спутника при сближении с некооперируемым космическим аппаратом. XLVII Академические чтения по космонавтике (Москва, 24–27 января 2022 г.): сборник тезисов: т. 3 — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. С. 139 – 140