

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

На правах рукописи



Горькавый Михаил Александрович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ОПТИМАЛЬНЫХ КОЛЛАБОРАТИВНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В НЕДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ СРЕДЕ**

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор,
Соловьев Вячеслав Алексеевич

Комсомольск-на-Амуре 2026

Условные сокращения, используемые в тексте

CPS (КФС) – киберфизическая система.

CS – Кибернетическая система.

DDPG – Deep Deterministic Policy Gradient.

DT (ЦД) – цифровой двойник (Digital Twin).

HRP – Hard Restricted Part – жестко ограниченные движения.

HS – Система управления персоналом.

PS – Физические системы (аппаратная часть).

PTP – Point-to-Point, шаблон движения, движение между двумя точками КП.

RL – Обучение с подкреплением (Reinforcement Learning).

SRP – Soft Restricted Part – слабо ограниченные движения.

UML – Универсальный язык моделирования.

АО – Аппаратное обеспечение.

АСУПП – Автоматизированная система управления производственными процессами.

БД – База данных.

БЗ – База знаний.

БМ – Библиотека моделей.

ВП – Вспомогательный переход.

ВХ – Вспомогательный ход.

ДСМ – Дискретно-событийная модель.

ИЗУ – Измерительные устройства.

ИСУ – Интеллектуальная система управления.

КБ – Критерий максимизации степени безопасности.

КМП – Критерий максимизации производительности.

КМЭ – Критерий максимизации энергоэффективности.

КП – Конфигурационное пространство.

КПР – Коллаборативный промышленный робот.

КР – Коллаборативный робот.

КРК – Коллаборативный роботизированный комплекс.

КРТК – Коллаборативный роботизированный технологический комплекс.

КРТП – Коллаборативный роботизированный технологический процесс.

ЛКМ – Лакокрасочные материалы.

ЛПР – Лицо, принимающее решение.

ЛСУ – Локальная система управления.

МЧФ – Модель человеческого фактора.

НИМ – Нечеткая имитационная модель.

ННИМ – Нейро-нечёткая имитационная модель.

ОЗД – Обратная задачи динамики.

ОЗК – Обратная задача кинематики.

ОП – Операционное пространство.

ОТС – Организационно-техническая система.

ПАК – Программно-аппаратный комплекс.

ПЗК – Прямая задача кинематики.

ПО – Программное обеспечение.

ПР – Промышленный робот.

РДП – Редуцированное пространство.

РКП – Редуцированное конфигурационное пространство.

РТК – Роботизированный технологический комплекс.

РТП – Роботизированный технологический процесс.

РХ – Рабочий ход.

СКФС – Социо-киберфизическая система.

СНС – Синергетическая система.

СУ – Система управления.

СУТО (АСУТО) – Автоматизированная система управления технологическими операциями.

СУЭП – Система управления электроприводами.

ТО – Технологическая операция.

ТП – технологический процесс.

ТПд – Технологический переход.

ЦТИ – Центральная точка инструмента.

ШИМ – Широтно-импульсная модуляция.

ШИПД – Широтно-импульсный преобразователь – двигатель.

Оглавление

Введение.....	7
Глава 1. Обзор исследований и анализ перспектив развития АСУ ТП на базе промышленных и коллаборативных роботов	15
1.1. Основные публикации в области моделирования, управления, автоматизации и оптимизации КРТП	15
1.2. Анализ перспектив развития технологических процессов на базе промышленных и коллаборативных роботов	30
Выводы по главе 1	40
Глава 2. Теоретические основы формализованного описания и оптимального проектирования коллаборативных роботизированных технологических процессов	41
2.1. Структуризация и параметризация требований к частям технологических операций коллаборативных роботизированных технологических процессов	42
2.2. Разработка системы требований к КРТП.....	53
2.3. Процессная модель оптимального проектирования КРТП в формате синергетической системы (IDEF0).....	61
2.4. Разработка подхода к интеллектуализации системы управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами	68
2.5. Структурный синтез коллаборативного роботизированного технологического комплекса и вспомогательных систем	74
Выводы по главе 2.....	76
Глава 3. Разработка математического обеспечения ИСУ (АСУ) коллаборативными роботизированными технологическими процессами	78
3.1 Дискретно-событийная модель коллаборативного роботизированного технологического процесса	78
3.2 Кинематическая модель коллаборативного робота	91
3.3 Нелинейная имитационная модель системы управления взаимосвязанных электроприводов коллаборативного робота	94
3.4 Синтез имитационной модели энергопотребления промышленного робота на базе аппроксимирующей нейронной сети.	107
3.5. Модель логики управления технологическими операциями на базе теории конечных автоматов в реализации State-Flow.....	114
3.6 Моделирование человеческого фактора в системе управления коллаборативным роботизированным процессом.....	131
Выводы по главе 3	142
Глава 4. Разработка методов оптимизации функциональных подсистем АСУ коллаборативными роботизированными технологическими процессами в условиях стационарности параметров рабочей зоны	144
4.1. Постановка задач оптимизации	144

4.2 Метод снижения размерности задач оптимизации в операционном и конфигурационном пространстве	150
4.3. Анализ и исследование алгоритмов интерполяции траекторных перемещений коллаборативного робота при исполнении технологических операций	157
4.4 Автоматизация выбора наиболее эффективного алгоритма интерполяции траекторий перемещения коллаборативного робота в технологическом процессе сверления	167
4.5. Планирование и оптимизация движения коллаборативного робота в редуцированном конфигурационном пространстве в режиме позиционного управление без разрешения коллизий	188
4.6 Алгоритм поиска оптимальных параметров движения при прямолинейных технологических переходах коллаборативного робота.....	204
4.7 Разработка RL DDPG агента для планирования энергоэффективных траекторий коллаборативного робота по критерию минимизации затрат электрической энергии	214
Выводы по главе 4.....	220
Глава 5. Анализ и синтез методов оптимизации управления коллаборативным роботом в условиях недетерминированной среды рабочей зоны коллаборативного роботизированного технологического комплекса	221
5.1. Исследование алгоритмов разрешения коллизий при длинноходных перемещениях коллаборативного робота в полном и редуцированном пространствах	221
5.2. Планирование и оптимизация движений коллаборативного робота при разрешении коллизий в ограниченном операционном пространстве	240
5.3. Алгоритм планирования движения коллаборативного робота при разрешении коллизий на базе RL агента.....	256
5.4. Технологический метод планирования движений КР на основе последовательного применения алгоритмов разрешения коллизий	266
5.5. Разработка высокоуровневого алгоритма формирования итоговой траектории движения коллаборативного робота с учетом приоритетности критериев эффективности технологического процесса.....	278
Выводы по главе 5.....	282
Глава 6. Разработка алгоритмического и программного обеспечения ИСУ коллаборативным роботизированным технологическим процессом	283
6.1. Проектирование аппаратной части программно-аппаратного комплекса ИСУ коллаборативного роботизированного технологического процесса.....	284
6.2. Структура и реализация компонентов программно-аппаратного комплекса ИСУ коллаборативного роботизированного технологического процесса.....	287
6.3. Программное обеспечение АСУ технологическими операциями.....	291
6.4. Алгоритмическое и программное обеспечение управления движением коллаборативного робота в режиме позиционного управления.....	298
6.5. Алгоритмическое и программное обеспечение управления движением коллаборативного робота в режиме контурного и траекторного управления	303
Выводы по главе 6.....	316

Глава 7. Экспериментальные исследования модулей ИСУ коллаборативным роботизированным технологическим процессом в производственных условиях.....	317
7.1. Экспериментальные исследования реализации технологических переходов и рабочих ходов коллаборативного робота в технологическом процессе окрашивания изделий.....	317
7.2. Экспериментальные исследования реализации вспомогательных переходов и вспомогательных ходов коллаборативного робота в технологическом процессе механообработки	322
7.3. Экспериментальные исследования по оценке эффективности предложенного комплекса решений на имитационной модели коллаборативного роботизированного технологического процесса	329
Выводы по главе 7.....	346
Заключение	347
Список литературы	349
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Расширение диаграммы требований.....	378
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Функциональная модель процесса разработки синергетической системы .	379
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Акты внедрения	386
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Логика режимов работы элементов ДСМ (фрагмент).....	389
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Кинематическая модель KUKA LBR IIWA 7 R800.....	390
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Структурная схема имитационной модели КР KUKA LBR IIWA 7 R800 ..	391
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Модель системы управления технологической операцией	392
ПРИЛОЖЕНИЕ И. Состояние «Operator» – имитационная модель движения оператора	393
ПРИЛОЖЕНИЕ К. Состояние «Robot» – имитационная модель движения КР	394
ПРИЛОЖЕНИЕ Л. Визуализация динамики интегральных переменных и переменных состояния КР по линеаризованной модели	395
ПРИЛОЖЕНИЕ М. Диаграмма компонентов программной части ПАК КРТП	398
ПРИЛОЖЕНИЕ Н. Диаграмма артефактов отдельных компонентов программной части ПАК КРТП.....	399
ПРИЛОЖЕНИЕ П. Графики изменения переменных состояния КР	401
ПРИЛОЖЕНИЕ Р. Результаты моделирования для этапа 1 (оценка степени влияния степени недетерминированности рабочей сцены на интегральные показатели ТП).....	405
ПРИЛОЖЕНИЕ С. Результаты моделирования для этапа 2 (исследование эффективности механизмов разрешения коллизий в ТП).....	406

Введение

Актуальность темы. Концепция индустрии 5.0, Стратегия научно-технического развития и Нацпроект «Средства производства и автоматизации» РФ акцентируют внимание на научных задачах развития адаптивных киберфизических систем (КФС) для управления высокотехнологичными производственными процессами на базе роботов и искусственного интеллекта. Совокупность модулей автоматизации, расширенных комплексов прогнозирующих имитационных моделей, интеллектуальных систем управления (ИСУ) и мультимодальной сенсорики перспективных роботизированных комплексов направлена на достижение максимального уровня качества конечного результата производства высокотехнологичной продукции авиационной, ракетно-космической, судостроительной и других отраслей промышленности. При этом в рамках производственных процессов промышленных предприятий в технологии производства передовой высокотехнологичной продукции все еще присутствует значительная доля человеческого труда, что не позволяет обеспечить высокую степень точности и повторяемости результатов технологических операций (ТО), снижает производительность и определяет высокую зависимость результатов от мастерства конкретных исполнителей. Полное исключение человеческого фактора из технологических процессов (ТП), особенно при мелкосерийном и штучном производствах, в частности на авиастроительных предприятиях, невозможно, это обусловливается высоким уровнем неопределенности условий исполнения ТО, частой сменой номенклатуры выпуска, постоянными коррекциями технологии и самого продукта.

Для повышения степени автоматизации производства широко применяются коллаборативные роботизированные технологические комплексы (КРТК), включающие в качестве основных элементов: человека (оператора), коллаборативного робота (КР), специализированное оборудование и оснастку, программно-аппаратный комплекс (ПАК) автоматизированной системы управления (АСУ) ТП.

Анализ существующих практик внедрения КР в производство одновременно демонстрирует и положительные эффекты организации коллаборативных роботизированных технологических процессов (КРТП), и подчеркивает значительный объем негативных факторов, не позволяющих раскрыть весь потенциал повышения эффективности ТП. Сложности связаны с обеспечением безопасности работ человека в совместном пространстве с КР, организацией процессов управления КРТК в реальном времени, идентификацией параметров недетерминированной среды, необходимостью решения многокритериальных задач оптимизации, включающих требования по производительности, энергоэффективности, времени отклика систем управления и т.д.

Среди причин недостаточного раскрытия потенциала эффективности внедрения КР следует отметить отсутствие единого теоретического аппарата по проектированию оптимальных КРТП, фор-

мализованного описания технологий интеграции КРТК в существующие ТП промышленного предприятия, несовершенство прикладного математического, алгоритмического и информационного обеспечения для АСУ КРТП. В связи с этим устранение научных пробелов и актуализация существующих подходов в области проектирования АСУ КРТП предоставило бы инженерно-техническому персоналу промышленных предприятий опорную базу для проектирования прикладных решений на базе КР, способствующих повышению эффективности производства.

Исследования диссертационной работы направлены на решение фундаментальной научной проблемы – выявление ранее неизвестных параметрических, структурных и функциональных зависимостей, создание методологических и теоретических основ, позволяющих обеспечить полноту комплекса математических моделей и методов синтеза законов управления в АСУ КРТП производства высокотехнологичной продукции с учетом специфики задач промышленных предприятий.

Степень разработанности темы. На современном этапе значительный вклад в развитие научного направления по созданию эффективных систем управления и автоматизации роботизированных ТП (РТП) внесли российские ученые: Ющенко А.С., Афонин В.Л., Шолохов М.А., Ульянов С.В., Кобзев А.А., Дли М.И., Егоров И.Н., Крахмалев О.Н., Дивеев А.И., Прокопьев И.В., Серебрянный В.В., Умнов В.П., Кожевников М.М. Результаты исследования авторов получены с учетом специфики РТП, использующих различные методы обработки, формообразования, сборки и контроля качества изделий. В большинстве работ в качестве объектов управления выступают ТП на базе общепромышленных роботов, задачи управления связаны с повышением эффективности исполнения технологических переходов.

Из числа зарубежных авторов следует выделить Fangyi Zhang, Juxi Leitner, Peter Corke, Tobias Kaupp, Bruno Siciliano, Sallam Kouritem, Ishiguro Hiroshi, Oussama Khatib. Авторами разработан ряд фундаментальных научных трудов теоретической и прикладной направленности, изложенные принципы нашли применение при разработке КР различного назначения, являющихся основой КРТК.

Отечественными и зарубежными авторами раскрыты смежные вопросы, необходимые для построения КРТП, в области разработки мультимодальных интерфейсов, систем распознавания, кинематических моделей, моделей человеческого фактора (необходимых для организации человеко-машинного взаимодействия), цифровых двойников (ЦД), моделей оптимизации ресурсов, интеллектуальных алгоритмов управления и т. д.

Предложенные в работе научные решения базируются как на классической теории управления, отраженной в фундаментальных трудах ученых: Понтрягина Л.С., Соколовского Г.Г., Мирошника И.В., Летова А.М., Красовского А.А., Ким Д.П., Кузовкова Н.Т., так и включают методы и алгоритмы интеллектуальных систем управления, предложенных: Пospelовым Д.А., Хорошевым В.Ф., Гавриловой Т.А., Куприяновым М.С., Соловьевым В.А., Дли М.И., Филимо-

новым А.Б., Черным С.П. Тем не менее научный задел в области теории и методологии проектирования КРТП и их АСУ не достиг уровня, достаточного для обеспечения инженерных кадров необходимым инструментарием для повсеместного внедрения КРТК и повышения эффективности ТП в производстве, что определяет существование научной проблемы недостаточно полной формализации структурно-функциональных связей и режимов ситуационного управления человеко-машинных систем в КРТП. Решение указанной проблемы может значительно повысить эффективность КРТП промышленных производств.

Соответствие шифру специальности. Исследования, представленные в диссертационной работе, соответствуют специальности 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки), следующим ее пунктам: 5. Научные основы, алгоритмическое обеспечение и методы анализа и синтеза систем автоматизированного управления технологическими объектами; 4. Теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами; 8. Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления и их цифровых двойников; 3. Методология, научные основы, средства и технологии построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т.д.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является повышение эффективности функционирования автоматизированных систем управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами промышленных предприятий путем разработки и применения моделей и методов оптимального управления в условиях недетерминированной среды.

Достижение указанной цели предусматривает решение следующих задач:

- 1) Исследование состояния проблем, особенностей структуры и функциональности роботизированных технологических процессов, интегрированных в систему производства высокотехнологичной продукции.
- 2) Разработка системного подхода по проектированию инфраструктуры организации и модулей комплексной автоматизации коллаборативных роботизированных технологических процессов.
- 3) Разработка математической модели коллаборативного роботизированного технологического процесса, учитывающей технологические особенности функционирования коллаборативного робота и человека в совместной рабочей зоне при различных сценариях недетерминированной среды и типах технологических операций.

4) Разработка метода снижения размерности задач оптимизации автоматизированной системы управления коллаборативным роботизированным технологическим процессом.

5) Разработка метода и модели проектирования и многокритериального оптимального управления коллаборативным роботизированным технологическим процессом, основанных на ситуативной оценке киберфизической системы, позволяющих повысить производительность, энергоэффективность и степень безопасности коллаборативного роботизированного технологического процесса.

6) Разработка метода создания математического и программного обеспечения модулей функциональных автоматизированных систем управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами для эффективного управления исполнительными механизмами в реальном времени на основе программного управления.

7) Разработка математического, алгоритмического и программного обеспечения автоматизированных систем управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами для оптимизации режимов управления движением коллаборативным роботом в недетерминированной среде.

8) Апробация исполнения технологических операций в соответствии с предложенными научными результатами для решения прикладных задач управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами промышленного производства с соблюдением технологических режимов и требований безопасности.

Объект исследования – коллаборативные роботизированные технологические процессы промышленных производств.

Предмет исследования – модели, методы и алгоритмы повышения эффективности систем управления коллаборативными роботизированными процессами промышленных производств.

Методология и методы исследования. Научные исследования выполнены с использованием математического аппарата современной теории автоматического управления, теории нечетких множеств, искусственных нейронных сетей, теории электропривода, общей робототехники, общих принципов математического моделирования, системного подхода, теории инженерии знаний и теории алгоритмов. Проектирование программных модулей и имитационных моделей выполнялось на базе объектно-ориентированного подхода, методологии структурного анализа и проектирования, нотаций языков системного моделирования SySML и UML с программной реализацией на высокоуровневых языках MATLAB, C++, KUKA Sunrise.OS 1.16 в операционной системе ПП ROS2.

Научная новизна предлагаемых решений заключается в следующем:

1) развиты теоретические основы и технологии построения автоматизированных систем управления технологическими процессами роботизированной обработки изделий в коллаборативной среде, отличающиеся наличием детализированных интеграционных взаимосвязей меж-

ду подсистемами социо-киберфизической системы, способствующих возникновению синергетических эффектов функционирования систем в роботизированных процессах;

2) предложены метод и средства моделирования, формализованного описания и проектирования структуры и функциональности компонентов коллаборативных роботизированных технологических процессов, обеспечивающих гибкость структуры, модульность и интерпретируемость параметров;

3) разработана математическая модель коллаборативного роботизированного технологического процесса как объекта управления, учитывающая технологические особенности функционирования коллаборативного робота и человека в совместном пространстве при различных сценариях недетерминированной среды и типах технологических операций;

4) предложены теоретические основы и метод снижения размерности задач оптимального управления коллаборативным роботизированным технологическим процессом за счет введения ограничений операционного пространства и конфигурационного пространства коллаборативного робота, обеспечивающих эффективные для текущей технологической операции пространственные расположения центральной точки инструмента коллаборативного робота;

5) предложены и доказана эффективность метода и моделей многокритериального оптимального управления коллаборативным роботизированным технологическим процессом, основанные на ситуативной оценке киберфизической системы, оптимизирующие режимы управления на основе критериев максимизации производительности, энергоэффективности и степени безопасности, а также по интегральному критерию оптимизации;

6) представлен метод создания математического и программного обеспечения модулей функциональных автоматизированных систем управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами для эффективного управления исполнительными механизмами в реальном времени на основе метода программного управления.

Достоверность результатов диссертации подтверждается использованием общепринятых и апробированных методик структурного и параметрического синтеза АСУ, экспериментальными исследованиями КРТП, проведенными в производственных и в лабораторных условиях на промышленном оборудовании.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 1-я международная научно-практическая конференция «Современные технологии промышленной автоматизации» (MIAT), г. Владимир, 19–21 ноября 2025 г.; Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» «ISCIEAM-2025», г. Сочи, 12–16 мая 2025 г.; Международная научно-практическая конференция «Индустрия 4.0» «SmartIndustryConRus-2025», г. Сочи, 24–29 марта 2025 г.; 15-я международная конференция «Интеллектуальные системы 2022» (INTELS`2022), г. Москва, 14–16 декабря 2022 г.; 16-я международ-

ная конференция «Интеллектуальные системы 2024» (INTELS`2024), Москва, Россия, 2–4 декабря 2024 года.; 4-я Международная научная конференция «MIST: Аэрокосмическая промышленность-IV 2021: Передовые Технологии в аэрокосмической промышленности, машиностроении и автоматизации», (MIST: Aerospace-IV 2021), г. Красноярск, 10–11 декабря 2021 г.; Международная научно-практическая конференция «Индустрия 4.0» «SmartIndustryConRus-2024», г. Сочи, 25–29 марта 2024 г.; Международная научно-техническая конференция «Автоматизация» (RusAutoCon-2024) г. Сочи, 08–14 сентября 2024 г.; Международная научно-техническая конференция «Автоматизация» (RusAutoCon-2023) г. Сочи, 10–16 сентября 2023 г.; Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» «ICIEAM-2023», г. Сочи, 15–19 мая 2023 г.; 10-я онлайн-конференция по информатике 2021 «Информатика и кибернетика в интеллектуальных системах» (CSOC 2021), г. Злин, Чешская республика, 21 апреля – 02 мая 2021 г.; Международная научно-техническая конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon-2020», г. Владивосток, остров Русский, 6–9 октября 2020 г.; Международная научно-техническая конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon-2019», г. Владивосток, остров Русский, 1–4 октября 2019 г.; Международная научно-техническая конференция «Восток-Запад» ("EastConf"), г. Владивосток, 1–2 марта 2019 г.; Международная научно-техническая конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon-2018», г. Владивосток, остров Русский, 3–4 октября 2018 г.; Международная научно-практическая конференция «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению», г. Комсомольск-на-Амуре, 5–6 сентября 2018 г.; 8-я международная научно-техническая конференция «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования», г. Вологда, 27 марта 2018 г.; 2-я международная научная конференция «Передовые инновационные разработки. перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство», г. Казань, 30 марта 2019 г.; 18-я международная научно-практическая конференция «EURASIASCIENCE», г. Казань, 16–26 февраля 2021 г.; 5-я международная научно-практическая конференция «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению», г. Комсомольск-на-Амуре, 6–11 декабря 2021 г.; 6-я международная научно-практическая конференция «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению», г. Комсомольск-на-Амуре, 5–11 декабря 2022 г.; 4-я Всероссийская научно-практическая конференция «Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению», г. Комсомольск-на-Амуре, 7–8 октября 2025 г.; Международная конференция «Современные проблемы и пути развития промышленности: оборудование и технологии», г. Варшава, 1 января – 30 января 2021 г.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что на основе сформулированного единого теоретического подхода управления решена задача существенного повышения эффективности (производительности, энергоэффективности и безопасности) коллаборативных роботизированных технологических процессов, функционирующих в условиях нестационарности параметрических, структурных и функциональных зависимостей, вызванных недетерминированной средой совместного пространства коллаборативного робота и оператора.

Практическая значимость и реализация результатов работы. С использованием созданных моделей и методов могут быть построены автоматизированные системы управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами, синтезирующие и реализующие оптимальные законы управления движением коллаборативного робота с учетом специфики технологической операции, выполняемой в условиях недетерминированной среды. Универсальность и высокая эффективность разработанных моделей и методов позволяет использовать их в интегрированных системах управления технологическими процессами для широкого класса задач роботизированного производства.

Результаты, полученные в ходе проведения диссертационного исследования, использованы в: Филиале ПАО «ОАК» - КнААЗ им. Ю.А. Гагарина при модернизации АСУТП камеры роботизированного окрашивания; ПАО «АСЗ» при проектировании технологических процессов; в учебном процессе ФГБОУ ВО «КнАГУ», а также при выполнении научных исследований в рамках нескольких госбюджетных тем и грантов: 1. Грант РФФИ, № 25-21-00292, 2025–2026 гг., «Разработка интеллектуальных алгоритмов для построения коллаборативных роботизированных систем управления, функционирующих в недетерминированной среде». 2. Грант РФФИ, № 22-71-10093, 2022–2024 гг., «Разработка и синтез перспективных мультимодальных адаптивных алгоритмов и методов управления поведением коллаборативных робототехнических систем с учетом нештатных ситуаций и экстремальных условий в недетерминированной среде». 3. Государственное задание на 2024-2026 гг. (0750110472 S724600) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в целях выполнения НИР по созданию молодежных лабораторий в рамках федерального проекта «Развитие человеческого капитала в интересах регионов, отраслей и сектора исследований и разработок» национального проекта «Наука и университеты». 4. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы ФГБОУ ВО «КнАГУ» «Разработка методов повышения энергетической эффективности роботизированных технологических процессов», ВН002/2020, сроки 2020–2022 гг. 5. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы ФГБОУ ВО «КнАГУ» «Разработка технологии роботизированной лазерной сварки тонкостенных конструкций авиационного назначения из листового металла», сроки 2019–2020 гг., приказ №264-О от 01.07.2019.

Положения, выносимые на защиту

1) Научные основы и технологии построения автоматизированных систем управления технологическими процессами роботизированной обработки изделий в коллаборативной среде,

расширяющие функциональные возможности человеко-машинного взаимодействия современного производства.

2) Теоретические основы формализованного описания, моделирования, управления и метод проектирования оптимальных коллаборативных роботизированных технологических процессов, специфицирующие теорию ситуационного управления в контексте роботизированного производства.

3) Математическая модель коллаборативного роботизированного технологического процесса как объекта управления, полученная на основе выявленных в ходе экспериментальных исследований технологических особенностях функционирования КР и человека в совместной рабочей зоне.

4) Теоретические основы и метод снижения размерности задач оптимального управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами за счет введения ограничений операционного и конфигурационного пространств коллаборативного робота, обеспечивающих эффективные для текущей технологической операции пространственные расположения центральной точки инструмента.

5) Модели и методы проектирования и многокритериального оптимального управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами, обеспечивающие повышение ритма выпуска продукции и снижение энергозатрат производства.

6) Алгоритм и технология создания математического и программного обеспечения модулей функциональных автоматизированных систем управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами для эффективного управления исполнительными механизмами в реальном времени на основе метода программного управления.

7) Алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированных систем управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами, обеспечивающее оптимизацию режимов управления движением коллаборативного робота в недетерминированной среде с целью исполнения технологических и вспомогательных переходов по результатам идентификации параметров совместного рабочего пространства.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 83 научные работы, в том числе 1 монография, 1 патент на изобретение, 14 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ, 27 статей в журналах, входящих в список ВАК по профильной научной специальности; 29 статей Scopus и/или Web of Science.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, заключения и списка используемой литературы (374 источника); изложена на 406 страницах текста, содержит 202 рисунка, 60 таблиц и 15 приложений.

Благодарность. Автор выражает глубокую признательность научному консультанту профессору Соловьеву Вячеславу Алексеевичу за активную поддержку, которая завершилась появлением настоящей диссертации.

Глава 1. Обзор исследований и анализ перспектив развития АСУ ТП на базе промышленных и коллаборативных роботов

В главе представлен анализ научных публикаций в области проектирования компонентов систем управления КРТП. Основной упор делается на применение КР как основного оборудования ТП. Представлены технические задачи, в которых целесообразно было бы применение КР совместно с человеком.

1.1. Основные публикации в области моделирования, управления, автоматизации и оптимизации КРТП

Индустрия 4.0, 5.0. Эффективность производственных процессов промышленного предприятия напрямую зависит от эффективности внутренней системы управления, реагирующей на задающее воздействие ближней внешней среды – законов управления производственных систем более высокого уровня, а также испытывающей негативное влияние возмущающих воздействий недетерминированных факторов производственной среды предприятия. Система управления производственным процессом в составе комплекса технических, технологических, информационных, социальных объектов и группы центров принятия решений не гарантирует формирование оптимального закона управления в силу высокой неопределенности входящих в нее объектов, стохастичности параметров производственной среды предприятия. Тем не менее, в условиях развития современной науки модернизируются существующие и создаются новые глобальные механизмы, направленные на увеличение управляемости и наблюдаемости производственных процессов. Одним из ключевых ориентиров для руководства высокотехнологических промышленных предприятий в области инновационного развития служат положения проекта «Цифровая экономика РФ», а также стратегии развития РФ до 2035 года.

Смена понимания и видения концепций развития экономики и промышленности, отражающаяся в эволюционном переходе от Индустрии 4.0 к Индустрии 5.0, затрагивает не только глобальные экономические процессы, но и оказывает существенное влияние на всех уровнях управления промышленным предприятием в соответствии с его спецификой иерархического устройства. Таким образом, становится очевидным факт невозможности рассмотрения задач поиска вариантов синтеза локальных законов управления производственным процессам без моделирования и прогнозирования вектора движения надсистем и систем горизонтального уровня ближнего и дальнего окружения.

Процессы трансформации производства концепции Индустрии 5.0 ведут к эволюционному изменению объектов управления Индустрии 4.0: от КФС к синергетическим системам или интеллектуальным кибер - социальным экосистемам. В работе [15] представлена нейро-

экосистемная модель концепции Индустрии 5.0, по сути, являющаяся логическим расширением Индустрии 4.0 [266]. Согласно [15], объект управления и прорывная технология – КФС, ключевые технологии: интернет вещей, роботизация [362] и искусственный интеллект, большие данные и облачные хранилища в системе с индустриальными операторами технологичности знаний (киберфизическая трансформация и цифровая трансформация) Индустрии 4.0 [209], являются подмножествами функциональных и структурных модулей Индустрии 5.0 [188, 278], в которой объектом является – кибер-физико-социальная (или синергетическая) экосистема [323, 338, 346, 347], прорывными технологиями – биокибернетические системы и коллаборативная робототехника (КРТП [270, 362]), ключевыми технологиями – роботизация и искусственный интеллект, устойчивое развитие, возобновляемые ресурсы (энергоэффективность) и бионика. При этом операторы преобразования расширяются парой: нейро-цифровая трансформация и нейробионическая трансформация. Концепция удачно сочетает в себе перспективные технологии человеко-ориентированного подхода Индустрии 5.0 с возможностями и функционалом интегрированного интеллекта на основе человеческого и машинного интеллектов.

В работах [15, 63] А. В. Бабкин определяет киберсоциальную экосистему Индустрии 5.0 как среду, в которой люди и умные устройства сосуществуют в физическом и виртуальном взаимодействии. Согласно [15] экосистема определяется как формализованное представление:

$$\begin{cases} H + PC = PS, \\ H + [CC \cap PC] = CPES, \\ \{CC \cap PC \cap SmC\} \cap SC + H = SmCSES, \\ SoS \cap PC; SoS \cap CPES; SoS \cap SmCSES, \end{cases}$$

где H – человек; PC – физическая компонента; PS – физическая система Индустрий 1.0 – 3.0; CC – кибернетическая компонента; $CPES$ – киберфизическая экосистема Индустрии 4.0; SmC – интеллектуальная компонента («умная»); SC – социальная компонента; $SmCSES$ – интеллектуальная киберсоциальная экосистема Индустрии 5.0; SoS – система систем.

Таким образом, КФС как основные элементы фабрик будущего (цифровые, умные, виртуальные) Индустрии 4.0 в результате эволюционного перехода включаются в интеллектуальные киберсоциальные экосистемы синергетических фабрик Индустрии 5.0. Синергетический эффект достигается за счет создания условий, обеспечивающих взаимодействие между разнородными подсистемами разной природы физического и виртуального пространств (рис. 1.1) [15].

В основном отсутствие перехода производственных процессов промышленных предприятий в русло концепции Индустрии 5.0, в первую очередь, связано с отставанием развития промышленности от передовых научных и технологических результатов. Так, большинство отечественных предприятий в лучшем случае завершают только переход от концепции Индустрии 3.0 к Индустрии 4.0. В тоже самое время низкие темпы процессов перехода от Индустрии 4.0 к Индустрии 5.0 связаны не только с недостаточной степенью проработки инфраструктурных

решений по внедрению (непроработанный математический аппарат идентификации, описания, формализации, моделирования и интеграции), но и незавершенной стадией синтеза искусственной части СУ коллаборативным процессом (аппаратное обеспечение КР, средства сбора, обработки и анализа информации, программное обеспечение (ПО) КР, алгоритмы, сценарии и процедуры поведения и принятия решений) и существенно низкой степенью полноты и адекватности моделей человеческого фактора (МЧФ).

Таким образом, говорить о доступности технологической возможности внедрения синергетических систем (или модернизации CPS в SS) на промышленных предприятиях не представляется возможным. Тем не менее такая потребность присутствует в основном в связи с потребностью повышения кастомизации (персонализации) продукции, в частности, на предприятиях авиастроительной отрасли, где зачастую каждое последующее изделие имеет ряд существенных отличий от предыдущего. Отличия определены реализацией процедур непрерывного совершенствования продукции на всех этапах жизненного цикла. В таких задачах не представляется возможным эффективно использовать CPS на базе промышленных роботов, поскольку время проектирования, программирования и отладки процесса (для очередного изделия) становится сопоставимо и даже больше времени исполнения операций.

При попытке последовательного рассмотрения всех проблем синтеза и эксплуатации SS можно приближенно выделить следующую цепочку:

1) Определение целесообразности разработки и внедрения SS в технологический/производственный процесс (понятие целесообразности должно быть продиктовано определенной системой критериев технической, технологической, экономической, экологической, социальной или комплексной направленности). Решение данной проблемы осложняется зачастую низкой степенью цифровизации процессов, выражающейся в отсутствии или низкой степени адекватности моделей текущего, вышестоящего и параллельных технологических/производственных процессов, что ставит под сомнение саму возможность разработки SS технологического процесса, функционирующего в отсутствии требуемого уровня цифровой среды.

2) Проведение процедур идентификации структур, параметров и взаимосвязей текущего ТП. Отличительной особенностью данной проблемы является «необходимость» включения в

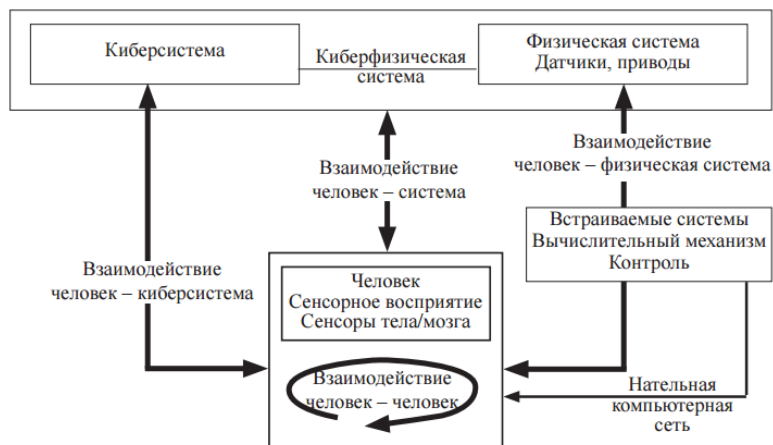


Рисунок 1.1 – Взаимодействие в киберсоциальной экосистеме Индустрии 5.0 в контуре «человек – встраиваемая система – физическая система – киберсистема» [15]

цифровую среду (прототип имитационной модели) социальной системы (человеческий фактор, поведение) – физическую, эмоциональную, мотивационную, поведенческую составляющие. Таким образом, данная проблема не ограничивается областью описания искусственных систем, но охватывает и научные области управления персоналом, человеческими ресурсами, социологию, психологию (в том числе, разделы конфликтологии и программирования поведения).

3) Цифровизация необходимого объема физического мира, включая информационные процессы коммуникации «человек - человек», «человек – КР», выраженная в построении комплекса моделей, используемых на различных этапах жизненного цикла SS. Например, промежуточные и концептуальные модели (полученные при помощи инструментов IDEF, UML, Semantic web и т.п.) необходимы для получения моделей, являющихся эталоном при формировании управленческих решений и поведения агентов интеллектуальными системами, входящими в состав SS. При этом в моделях должны быть предусмотрены механизмы воздействия как на КР (например, оптимизация траекторных перемещений в соответствии с одной из систем критериев), так и на человека, участвующего в КРТП (например, в случае необходимости коррекции его положения в пространстве, что позволит КР осуществлять перемещения по оптимизированным траекториям). Необходимо отметить, что модели должны формироваться на базе существующих элементов ТП, а также с учетом его будущей модернизации и научно-технологического прогресса. Верификация и валидация конечных моделей должны проводиться, в том числе, с учетом мнения экспертной комиссии, включающей специалистов технической и социальной направленности. Также должны быть предусмотрены процедуры и модели актуализации моделей, участвующих в выводе решений управляющими модулями.

4) Синтез модулей управления, формирующих законы управления внутри физического и виртуальных миров (управление и оптимизация движением КР, управление системой сенсорики, управление выбором моделей и систем критериев, их своевременным переключением, диагностикой моделей, их адаптацией (обучением), управление системой эффекторов, направленных на коррекцию поведения человека, управление системой обратных связей с надсистемой текущего процесса с целью внесения глобальных изменений в SS или в аварийных ситуациях.

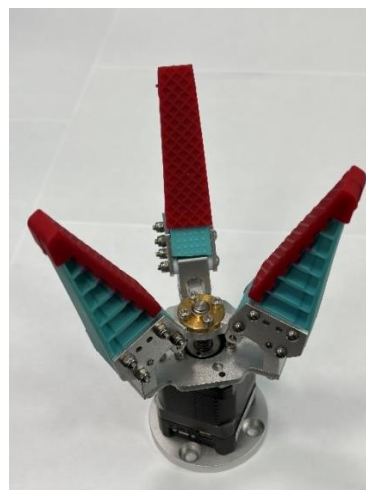
Качество результатов внедрения КРТП в формате синергетической системы, таким образом, зависит от значительного числа факторов. С учетом исследования ТП механосборочных производств в авиа-и судостроении целесообразно рассмотреть отдельные аспекты организационно-технологического обеспечения КРТП, представленные ниже.

Захваты КР. Процедура планирования и оптимизации движения КР в КРТП существенным образом зависит от класса инструмента, установленного на фланце. Само предназначение КРТП – универсальность во взаимодействии с человеком, определяет бесчисленное множество вариантов реализации рабочего органа КР (примеры представлены на рис. 1.2).

а)



б)



в)



г)



д)



е)



Рисунок 1.2 – Рабочий орган КР: а – шпиндель; б – трехпальцевый захват с силиконовыми пальцами; в – бионический захват «кисть»; г – металлический двухпальцевый захват; д – вакуумный захват; е – бионический универсальный захват

Захваты варьируются по массе, габаритам, принципу действия, источнику энергии (электрический, пневматический, гидравлический и т.п.), зависимости от ориентации (1 – зависимый, например, двухпальцевый схват, 2 – независимый, например шпиндель с фрезой, установленный соосно с фланцем), степени гибкости (1 – жесткий, например металлическое исполнение пальцев, 2 – гибкий, например силиконовое исполнение пальцев, 3 – универсальный, например вакуумный и бионический) и т.д.

Дополнительную сложность в синтезе закона для программного управления КР создают ТО в КРТП, сопряженные с захватом и перемещением объектов роботом. Для формирования закона

управления движением КР с присоединенным объектом должна быть в реальном времени перестроена расширенная кинематическая модель КР, при этом не всегда она может быть получена расчетным путем, зачастую с учетом специфики роботизированных захватов, кинематическая модель должна быть построена с помощью системы внешней сенсорики, уточняющей пространственное расположение присоединенного объекта относительно локальной базы захвата.

Таким образом, захваты и присоединенные объекты создают дополнительные требования к исполнению частей ТО, что ведет к необходимости переопределения начальных структурных и параметрических уставок для математических задач программного управления в части планирования и оптимизации пути, траектории и параметров движения КР. Для КРТП, отличающегося высокой степенью дифференциации частей ТО и недетерминированностью среды постановка задачи управления для каждой части ТО является в некоторой степени уникальной.

Требования к процессу управления движением робота определяются с учетом специфики класса ТП и установленного захвата. В частности для следующих примеров ТП набор требований будет различаться:

- захват и перемещение объектов с низкой прочностью поверхностной оболочки [305, 313, 345];
- захват гибким захватом и перемещение объектов [100, 126];
- высокоточное позиционирование, например в медицине [93];
- сверление, фрезерование симметричным инструментом [54];
- перемещение без предъявления высокой степени точности [327];
- сварка [219];
- универсальная сборка [317] и т.д.

Функциональное и объектно-ориентированное моделирование КРТП. Роботизация производства, а тем более внедрение универсальных КРТК в ТП предприятия требуют значительного количества ресурсов как на этапах внедрения, так и на этапах проектирования и сопровождения. Задача управления и оптимизации движения основным оборудованием КРТП – КР в условиях неопределенности внешней среды является сама по себе сложной и нетривиальной задачей. Потенциал эффективности функционирования такого процесса напрямую зависит от качества и адекватности заложенных еще в проекте КРТК концепций, моделей, структур и механизмов, продуманности всех взаимосвязей и унификации форматов данных.

В научном сообществе для обеспечения системного подхода в задаче формализации структурных и функциональных взаимосвязей синтезируемых высокотехнологичных процессов на концептуальном уровне и проектной стадии предпочтение отдается SADT методологии, в частности, стандарту онтологического исследования сложных систем IDEF и универсальным языкам моделирования, например UML и его диалектам, в частности, SysML [314]. Данная

связка позволяет подготовить максимально универсальный проект КРТП в парадигме объектно-ориентированного проектирования [16, 80, 87]. Специфика использования IDEF технологий и UML представлена в работах ученых [194, 301] применительно к внедрению роботизированных технологий в производственные процессы, в рамках общей технологии функционального моделирования в работах [123, 158] и в задачах построения ЦД в РТП в работах [39, 68].

Эргономические принципы проектирования КРТП. Одной из ключевых особенностей КРТП является предъявление максимальных требований к включению эргономических принципов при его проектировании. Сама идеология КРТП предполагает совместную работу человека и КР над одним изделием в общей рабочей среде. Рабочее пространство человека, включая КР, оснастку, вспомогательные механизмы, интерфейсы взаимодействия, системы информирования и прочие элементы инфраструктуры должны быть реализованы в исполнении, обеспечивающем удобство работы и безопасности человека.

Спецификацию требований, связанных с эргономикой, для КР следует определить, в частности, согласно ГОСТ [41, 42, 44–46, 186]. Проектирование КРТК в соответствии с эргономическими принципами помимо обеспечения необходимого уровня безопасности для человека в целом позволяет повысить производительность производственной системы. Отдельные научные проблемы, связанные с эргономикой коллаборативной робототехники рассмотрены А.С. Ющенко в работе [185]. Подавляющее большинство КР ведущих мировых производителей имеет конструктивные особенности, позволяющие минимизировать риск травм человека и повреждений оборудования при столкновении КР с объектом. Несмотря на имеющуюся возможность по модернизации конструкций, все же больший научный интерес в обеспечении безопасности оператора в рабочей зоне представляют элементы АСУ КРТП, определяющие поведение КР в ОП (в том числе в задачах разрешения коллизий), а также интерфейсы взаимодействия оператор – робот. Научные результаты с области создания и развития мультимодальных интерфейсов взаимодействия в КРТП, в том числе в задачах обеспечения безопасности и комфорта детальности человека, представлены в работах отечественных ученых А.С. Ющенко, В.В. Серебрянного, Ю.С. Иванова, [47, 57, 61, 66, 119, 131, 150, 176, 184, 262, 263, 373] и в работах зарубежных ученых В. Siciliano [297] и других [268, 272, 307, 323, 328, 368].

Машинное зрение в КРТП. Организация взаимодействия между оператором и КР с помощью мультимодальных интерфейсов подразумевает наличие расширенной системы сенсорики для измерения, оценивания и наблюдения ключевых параметров динамической внешней среды. Исполнение системы сенсорики может быть весьма разнообразной но в целом в КРТП ее функционал может быть сведен к нескольким группам задач: к определению текущего состояния геометрии ОП (с помощью камер глубины, лидаров, оптических, инерциальных и ультразвуковых датчиков, средств RF технологии, термографических камер и т.п.), фиксации паттернов движения объектов в

рабочей сцене (для дальнейшей передачи в системы детектирования и распознавания), фиксации паттернов эмоционального состояния оператора (для дальнейшей передачи в МЧФ), фиксации дополнительной информации (посторонних шумов, вибрации и т.п.) и др.

Широко распространенным набором (согласно публикациям ученых) средств сенсорики при проведении лабораторных и натурных испытаний КРТК, а также в чистых производствах является мультикамерная система на базе камер глубины и лидаров, дополненная оптическими и ультразвуковыми датчиками.

Ключевыми направлениями в области разработки мультимодальных сенсорных систем является повышение точности измерений, оценивания и наблюдений, а также повышение быстродействия первичного анализа информации для передачи в системы распознавания. Специфика применения сенсорных систем в КРТП и РТП представлена в работах отечественных [47, 116, 122, 127, 131] и зарубежных [290, 304, 351] ученых.

Алгоритмы распознавания в КРТП. Информация со средств мультимодальной сенсорики обрабатывается в системах распознавания и детектирования, задача которых состоит в идентификации текущей ситуации в рабочей зоне и передаче предобработанных данных в модели АСУ или ИСУ, например, как в [257]. Классификацию текущей сцены целесообразно осуществлять согласно классической теории ситуационного управления Д.А. Поспелова [118] с учетом особенностей управления техническими объектами, представленных в работах А.Б. Филимонова [171] и М.И. Дли [52].

Комплексы оптических, ультразвуковых и других датчиков, как правило, в КРТП используются в автоматических системах для оперативного переключения режимов функционирования, обеспечения подсистем индикации, информирования и оповещения. На базе быстродействующих датчиков создаются подсистемы разграничения рабочих зон, организации контуров безопасности, коррекции управляющих сигналов для КР при перемещении объектов, присоединенных с помощью гибкого захвата и т.д.

Важную функцию для организации работ в КРТП в штатном режиме выполняют системы распознавания на базе мультикамерных систем [254, 361]. Как правило, такие системы имеют в своем составе выделенные вычислительные устройства (в частности, на базе одноплатных компьютеров Jetson с GPU), позволяющие в реальном времени осуществлять анализ и обработку видеоряда и отправлять значимые паттерны в ИСУ для формирования управленческих воздействий на КР или человека (посредством системы оповещения). С помощью систем распознавания осуществляется коррекция модели геометрии рабочей зоны для объектов, не имеющих кинематических связей с глобальной системой координат (свободно перемещающихся объектов). Идентификация положения оператора происходит посредством детекции ключевых точек сочленений, по изменению положения ключевых точек в пространстве осуществляется коррекция кинема-

тической модели оператора в МЧФ. Аналогичным образом передается информация об изменении пространственного положения любого другого объекта рабочей зоны (свободно перемещающегося), например, инструмента оператора, оснастки, части изделия и т.п. Скорректированная модель геометрии рабочей зоны позволяет детерминировать задачу управления и оптимизации для движений КР по выполнению частей ТО.

Развитие систем распознавания в коллаборативной робототехнике, представляет значительный интерес для научного сообщества, данному вопросу посвящено большое количество работ, в частности, в книге Р. Corke [224] представлены фундаментальные алгоритмы распознавания, в работах авторов F. Zhang, J. Leitner и Р. Corke [306, 364] предложены модели определения траектории движения КР к захватываемому объекту по видеоизображению и расчету эффективного пространственного расположения ЦТИ робота для захвата объекта с помощью оригинальной сверточной сети (GG-CNN), в работе [351] для ускорения процесса распознавания предлагается модель Fast-RCNN, которая, по мнению авторов, при определенных условиях значительно превосходит по точности стандартные модели CNN. В работе [272] представлена модель распознавания намерений человека в процессе совместной сборки. В большинстве случаев процедуры распознавания в КРТП базируются на математическом аппарате нейронных сетей. Среди отечественных авторов В.В. Серебряный в работе [131] предлагает систему компьютерного зрения для промышленных сценариев применения КР на примере ТП клепки металлических пластин; продемонстрирована возможность эффективного применения моделей распознавания, основанных на YOLOv5. В работе автора Ю.С. Иванова [48] выполнен сравнительный анализ группы моделей распознавания изображения, включающий Mask R-CNN, AlphaPose, HigherHRNet-W48, SPPE, OpenPose, AssocEmb, PersonLab и прочих применительно к специфике функционирования КРПК в задачах совместной сборки. Автором сделан вывод о максимальной эффективности модели OpenPifPaf при синтезе мультимодальных адаптивных алгоритмов распознавания в КРТП с учётом нештатных ситуаций и экстремальных условий в недетерминированной среде. В работах [47, 262, 373] Ю.С. Иванов предлагает использовать большие языковые модели для распознавания действий оператора в рабочей зоне. Распознанные действия становятся первоначальными уставками для МЧФ и дальнейшего формулирования задач управления и оптимизации движения КР в КРТП по текущей части ТО.

Модели человеческого фактора. Особую роль в ИСУ КРТП играют МЧФ, поскольку именно человек является основным элементом, определяющим недетерминированность рабочей среды. Конечно, и другие, не имеющие кинематических связей с глобальной системой координат КРТП объекты могут изменить свое пространственное расположение в результате, например, некорректного захвата, коллизии или опять же последствий действий человека (оставление объекта в рабочей зоне в неположенном месте), но все же на долю оператора при-

ходится бо́льшая часть существенных изменений в геометрии рабочей зоны. В ходе анализа научной литературы выявлено, что МЧФ в ИСУ в качестве основных может включать три интегральные функции: 1) моделирование кинематики и динамики движения, 2) прогнозирование действий и последствий действий, 3) моделирование психофизиологического состояния человека. Первая из них является априори обязательной для любой ИСУ КРТП, поскольку при ее отсутствии не представляется возможным реализация любых алгоритмов разрешения коллизий. Вторая и третья являются расширением МЧФ и предоставляют возможности реализации более комплексных процедур оптимизации параметров ТП за счет вариаций параметров производительности, безопасности и энергоэффективности.

Задача моделирования кинематики и динамики движений человека в КРТП в большинстве научных работ сводится к актуализации пространственного расположения звеньев кинематической модели человека (в частности, представленной в формате *.urdf [363]) по детектированным ключевым точкам сочленений оператора. При этом с учетом понимания ограничений суставов человека (по предельным углам отклонения и максимальной скорости вращения) представляется возможным с некоторой долей вероятности осуществлять прогноз пространственного расположения частей тела человека на определенную временную глубину, что также может служить основой для принятия решения по ограничению режимов движения КР, его остановки или перехода в предустановленные конфигурации. Кинематические модели человека рассмотрены в работах ученых Hiroshi Ishiguro [280], С. О. Никифорова [109], в работе С. В. Ульянова [359] представлены примеры интеграции моделей систем человеко-машинного взаимодействия.

Модели психофизиологического состояния человека в разных аспектах рассмотрены в работе С. В. Ульянова [163] и работах отечественных и зарубежных авторов [154, 307, 330]. Технологии моделирования практик агрессии (наиболее приоритетной для идентификации в ответственных ТП) в социо-киберфизической среде представлены в работе [82]. Оценка психофизиологического состояния может основываться, в том числе, на результатах анализа персонализированного набора официальных данных о человеке (операторе КРТК) – цифрового профиля [17], цифровой профиль может базировать на данных, полученных как из систем управления персоналом АСУП предприятия [31], так и на основе исследования цифрового следа [53, 86, 88] конкретного оператора в рамках КРТП.

Модели прогнозирования действий подробно рассмотрены в работах [47, 262, 373]. Интеграция МЧФ в системы КРТП отражены в работах [260, 269, 359], процедуры планирования совместных задач (КР и оператора) в работах Tobias Kaupr [283, 284, 356] в рамках исполнения ТО и в работе [337].

Цифровые двойники КРТП. В рамках концепции Индустрии 5.0 и синергетической системы МЧФ интегрируются в ЦД, идентифицирующий КРТП. Функционал ЦД, как правило,

достаточно широк, его наполнение и специфика определяются при проектировании, исходя из предназначения КРТП, требований и критериев качества, предъявляемых как к конечному результату, так и к технологии управления. Но в обязательном порядке ЦД КРТП должен включать модели кинематики и динамики движения КР и вспомогательного оборудования (вспомогательных роботов, позиционеров, линейных направляющих и т.д.), МЧФ, среду моделирования, средства визуализации, интерфейсы взаимодействия.

Цифровой двойник должен быть интегрирован с АСУТП или ИСУ, форматы управления КР и его моделью в ЦД должны быть унифицированы, наиболее широкое распространение получило применение операционной системы ROS/ROS2 [315] в качестве среды управления КР [192, 193, 353,], в том числе, на примерах антропоморфных роботов KUKA.

Принципы разработки ПО, предназначенного для управления виртуальной моделью робота в КРТК, представлены в работах [197] и [102], в [102] использован кроссплатформенный движок Unity3D. В работе Сивкова В. С. [3] представлены технологии автоматизации ТП с использованием РТК на основе ЦД с применением библиотеки на платформе R-ProDigital. Результаты исследования возможностей объектного моделирования манипуляционных роботов представлены в работах О.Н. Крахмалева [78, 79]. В целях улучшения когнитивных способностей КР в работах [188, 230] предложен и исследован подход к распознаванию намерений движения при исполнении ТО, реализация подхода выполнена в ЦД с помощью математического аппарата нейронных сетей (DDPG агента). Доказана эффективность применения подхода на примере сборки генератора. На примере ТП механообработки в работе авторов R. Rosen, G. Wichert, G. Lo, K. Bettenhausen [195] отражена концепция ЦД поддержки проектирования высокотехнологичных производств по видению корпорации Siemens. Авторское видение направления развития методологии разработки ЦД в задачах управления КРТП представлены в работах [20, 68, 108, 128, 156]. При этом значительное внимание уделено расширению библиотеки ЦД моделями энергоэффективности основного и вспомогательного оборудования. В качестве основного ресурса рассмотрена электроэнергия.

Модели энергопотребления КР и вспомогательным оборудованием. Цифровой двойник, имеющий в своем составе модели кинематики и динамики движения КР, а также МЧФ в паре с ИСУ позволяют решать задачи управления и максимизации по производительности в КРТП с частичными ограничениями по безопасности. Также немаловажным фактором эффективности производственных процессов является механизм энергосбережения, напрямую влияющий на конкурентоспособность выпускаемой продукции.

Тогда постановка задачи оптимизации для КРТП в классическом варианте, когда в функционал качества вместе с функцией производительности и ограничениями по безопасности, вводятся функции энергопотребления, становится возможной при наличии моделей энергопо-

требления. Разработке моделей энергопотребления КР и алгоритмам повышения энергоэффективности КРТП [242] посвящено значительно количество работ в основном зарубежных ученых (в странах, где степень роботизации производства значительно опережает РФ). Вариативность моделей также весьма широка, исполнение модели зависит от конструктивных и функциональных особенностей оборудования, типов ТО, параметров рабочей зоны и так далее [342]. Как правило, конечным критерием выбора того или иного варианта моделирования является нахождение оптимального соответствия между степенью приближения модели и ее быстродействием. Например, для проведения отладочных работ или инженерии знаний (заполнения базы знаний (БЗ) ИСУ) целесообразно использовать расширенные модели энергопотребления (учитывающие и нелинейности системы), для принятия решения в реальном времени и формирования соответствующего управленческого воздействия целесообразно применить редуцированные модели с максимальным быстродействием. Таким образом, можно выделить три класса моделей энергопотребления, используемых в КРТП: 1) подробные нелинейные, 2) линеаризованные (упрощенные), 3) редуцированные (полученные с помощью универсальных аппроксиматоров – нейронных сетей или нейро-нечетких систем).

В работе [342] представлен обзор технических, технологических и организационных классов решений, направленных на повышение энергетической эффективности РТП. Необходимо отметить, что потенциал энергосбережения в КРТП существенно больше по отношению к РТП, так как коллаборативное взаимодействие сопряжено со значительным объемом параллельных ТО человека и КР, а также времени ожидания роботом человека, т.е. бóльшим вариационным полем для задачи оптимизации.

Авторами Aiming Liu и Huan Li в работе [240] приводится методика идентификации модели энергопотребления промышленного робота, представлено описание потребления мехатронных модулей согласно классической теории электропривода, а также рассмотрены линеаризованные модели. Приведены экспериментальные данные по распределению потерь среди элементов мехатронных модулей. В качестве экспериментального оборудования исследован промышленный робот ABB IRB 1200. Акцент в работе сделан на разработку модели энергопотребления для функционирования алгоритмов нахождения альтернативных (энергоэффективных) траекторий в КП без существенных изменений параметров движения в ОП.

В работе [319] представлены разработки модели оптимизации энергопотребления в рамках контроллера скользящего режима в задаче отслеживания положения SCARA робота. В исследовании Т. Otani [241] предложен метод генерации движений робота с низким энергопотреблением с использованием технологии квантовых вычислений. Исследованная модель формирования движения робота по заявлению авторов позволяет в среднем снизить крутящий момент на 10 %, при этом значительно сокращается время на расчет движения.

Альтернативным вариантом формирования энергоэффективных траекторий движения робота является подход, представленный в работе [370]. Алгоритмы планирования основываются на редуцированной модели энергопотребления, полученной с помощью технологий ML. В работе [302] предложены дополнительные компоненты аппаратного обеспечения (АО) и соответствующие модели, направленные на сохранение энергии в режиме торможения.

Результаты моделирования работы [371] показывают значительное сокращение затрат времени и энергии (до 5%) по сравнению с большинством траекторий, генерируемых программным обеспечением АБВ. Результат достигнут благодаря разработке систематизированной методологии идентификации промышленного робота (ПР). Идентификация производилась с помощью измерительного устройства Qualistar CA8335. В модели для минимизации функции затрат на механическую энергию используется алгоритм последовательного квадратичного программирования.

В авторских работах [5, 34, 55, 238] представлены результаты разработки и исследования редуцированных нейросетевых и нейро-нечетких моделей энергопотребления организационно-технологического класса. Показан эффект от использования моделей, позволяющих снизить затраты электроэнергии до 15 % только за счет выбора энергоэффективных зон обработки изделий в рабочей области робота; идентификация энергопотребления робота представлена в указанных работах, а также в работе [69]. Работы [27, 37, 152] посвящены синтезу гибридных моделей, совмещающих как классические принципы управления (например ПИД-регулирование), так и нейросетевые аппроксиматоры и нечеткие системы. Данные модели позволяют проводить идентификацию объекта (СУЭП КР) в отсутствии возможности получения аналитического описания структуры и параметров мехатронных модулей робота (например, при работе с импортным оборудованием). Идентификацию нелинейных зависимостей предложено выполнять посредством нейросетевых и нечетких систем, а также путем синтеза приближенных СУЭП на базе оптимального ПИД-или ПИ-регулятора (фрагменты методики представлены в работах [26, 105, 106, 277, 299, 349, 350]). Программное обеспечение для синтеза, исследования и использования моделей энергопотребления для поиска оптимальных решений представлено в [137, 138, 142, 146]. Вопросы интеграции полного комплекса моделей отражены в [22].

Задачи управления и оптимизации в КРТП. Комплекс моделей ЦД КРТП предоставляет широкий инструментарий для непосредственного осуществления ИСУ КРТП основного предназначения, а именно, решения задачи управления и оптимизации, т.е. формирования закона управления для организации движения КР в целях исполнения ТО в условиях ограничений технологических режимов, установленных критериев качества и текущих условий внешней среды.

Укрупненно процедуру реализации функции управления и оптимизации можно представить в виде следующего списка:

- 1) инициализация функционала качества ТП;
- 2) идентификация комплекса ТО, разбиение каждой ТО на части с классификацией по типу перехода;
- 3) для каждой части ТО:
 - идентификация параметров задания на исполнение части ТО;
 - идентификация текущей ситуации, формирование локального функционала качества;
 - планирование и оптимизация пути либо траектории движения в ОП [232, 352];
 - планирование и оптимизация движения в КП [208, 311] (включая задачи интерполяции промежуточных конфигураций, оптимизации динамики движения, разрешения коллизий при необходимости);
 - контроль исполнения закона управления, контроль аварийных или нештатных ситуаций, в случае необходимости возвращение обратно к первому подпункту исполнения части ТО;
- 4) анализ обстоятельств исполнения комплекса ТО, актуализация при необходимости БЗ ИСУ, коррекция моделей в библиотеке ЦД.

Решению задач оптимального управления движением КР в КРТП посвящено значительное количество работ отечественных и зарубежных ученых. При этом в силу низкой степени схожести различных КРТП между собой отсутствует единая технология разработки ТП на базе КР, а также механизмов управления и оптимизации.

Важными инструментами при оптимизации движения и синтеза соответствующего управляющего сигнала для КР выступают классические математические задачи обратной кинематики и интерполяции, модулями решения ОЗК и интерполяции являются неотъемлемой частью планировщика движений ИСУ КРТП. Представленные задачи широко изучены и представлены в отечественной и зарубежной литературе, в частности, классические методы интерполяции отражены в работах Akima H., Fritsch F., Carlson R. и других [198, 199, 227, 236, 248], методы решения ОЗК с ограничениями и без ограничений в работах [124, 234, 236, 244, 295, 367]. В целом в этом направлении усилия ученых сосредоточены на поиске путей сокращения требуемых вычислительных затрат, для уменьшения времени реакции ИСУ КР при работе в ответственных ТП совместно с человеком. В авторских работах [1, 8, 261] проведен анализ влияния различных алгоритмов интерполяции на энергоэффективность движений КР в ТП механической обработки и нанесения лакокрасочных материалов (ЛКМ).

Существенным функциональным отличием РТП от КРТП является наличие в ИСУ КРТП модулей разрешения коллизий. Факт наличия такого модуля в ИСУ КРТП обусловлен необходимостью планирования движений в недетерминированной среде, в которой присутствуют меняющие свое положение в пространстве объекты, причем заранее предсказать параметры движения этих объектов (в частности человека) в полной мере затруднительно. Из существующих

инструментов разрешения коллизий при планировании движений КР следует выделить: методы потенциальных полей (Potential Fields Method) [178], алгоритмы поиска пути (Path Planning Algorithms) [286, 291, 369], такие как A-Star, RRT, PRM, OBPRM, T-PRM и другие, градиентные алгоритмы оптимизации (CHOMP, TRAMP) [216], локальные методы коррекции траектории (Dynamic Window Approach (DWA), Vector Field Histogram (VFH)) [161, 187, 196, 237], алгоритмы клеточных карт (Cell Decomposition Methods), алгоритмы глубокого обучения [220, 228], в том числе Reinforcement Learning (RL). Выбор алгоритма зависит от особенностей задачи, типа КР и окружения (текущей ситуации в рабочей зоне). Авторские исследования в области совершенствования алгоритмов разрешения коллизий представлены в [21, 29, 35, 140, 144].

По аналогии с задачами интерполяции и обратной кинематики, процедура разрешения коллизии при использовании всех известных алгоритмов сопряжена со значительными затратами вычислительных ресурсов. Поэтому на современном этапе ученые работают над обеспечением быстродействия алгоритмов и нахождения максимально эффективного соответствия «экземпляр КРТП – конкретный метод». Особенно следует выделить алгоритмы разрешения коллизий, использующие интеллектуальные технологии и средства – алгоритмы глубокого обучения. В случае успешного обучения интеллектуального агента (например, в реализации нейронной сети) функционирование механизмов разрешения коллизий возможно организовать в реальном времени, что является немаловажным при совместной работе КР с человеком. Основной сложностью получения таких механизмов, является довольно затратный алгоритм обучения с негарантированным результатом, причем размерность пространства обучения растет с ростом степеней свободы движения КР. Так, обучение целевому движению ИСУ избыточных антропоморфных роботов, например, с помощью технологии RL, с удовлетворительным результатом сопряжено с использованием операций распараллеливания и привлечением высокопроизводительного АО.

Тем не менее, при обоснованном и целевом использовании RL могут быть получены результаты, соизмеримые с результатами, выдаваемыми оптимизационными методами. В работах [223, 228, 243, 292, 296, 322, 372] приведены результаты успешного применения технологии RL для разрешения коллизий как в КП, так и в ОП при планировании пути, а в работе [124] представлен нестандартный подход по решению ОЗК с помощью интеллектуального агента. Авторские работы [29, 146, 258] раскрывают практику применения DDPG RL и SAC RL агентов в задачах разрешения коллизий и максимизации энергоэффективности.

Представленные, а также другие стандартные компоненты оптимизации интегрируются с алгоритмами управления ИСУ КРТП, что позволяет уже комплексно подойти к задаче оптимизации движения КР в одной из классических постановок задач оптимизации [71, 172].

Характер направлений развития науки в области управления и оптимизации движения КР в КРТП дает анализ работ авторов А.А. Кобзева, [7, 51, 67, 73, 89], С.В. Ульянова [74, 107, 159, 162,

360] А.С. Ющенко [66, 184], В.Л. Афонина [11, 12, 65, 115] М.А. Шолохова [76, 179, 182] и других ученых [10, 14, 98, 107, 136, 190, 241, 251, 271, 318, 319, 321, 336, 355, 362]. Принципы и техники построения локальных систем управления роботами представлены авторами И.Н. Егоровым и В.П. Умновым в работах [54, 77, 95, 132, 164–167]. Принципы интеллектуального управления сложными объектами представлены в работах В.А. Соловьева и С.П. Черного [92, 108, 174, 175]. В случае построения КРТП с использованием КР, установленных на мобильные роботизированные платформы, при оптимизации и реализации режима одновременного управления роботами целесообразно использовать предложенные в работах А.И. Дивеева [49, 50, 83, 133], В.Ф. Филаретова и А.В. Зуева [168–169, 183] алгоритмы оптимального управления мобильными роботами. Существенный вклад авторов заключается в выявлении и интеграции большого объема знаний по управлению и оптимизации движения общепромышленных, коллаборативных и мобильных роботов с учетом конкретных условий широкого класса процессов и применения широкого набора алгоритмов управления и оптимизации, в том числе интеллектуальных (нейронных сетей, нечетких систем, генетических алгоритмов и т.п.).

Рассмотренные в текущем разделе результаты трудов отечественных и зарубежных ученых позволяют заключить, что несмотря на значительный объем решенных научных и практических задач в области построения КРТП имеется значительный пласт научных проблем без решения которых на текущий момент не представляется возможным утверждать о достижении максимальной эффективности человеко-машинного взаимодействия и организации синергетической системы в рамках существующих практик внедрения КРТП.

Детальный анализ рассмотренных работ позволил автору внести и обосновать оригинальные научные предложения в области управления, автоматизации и повышения эффективности КРТП, отраженные в работах [4, 19, 22, 33–36, 56, 108, 112, 137, 138, 142, 145, 201, 258, 261, 279, 333], а также в последующих главах пояснительной записки к диссертационному исследованию. Практические решения основывались на требованиях ГОСТ [40–46, 186].

1.2. Анализ перспектив развития технологических процессов на базе промышленных и коллаборативных роботов

Значимым фактором при организации КРТП является характеристика набора ТО в зависимости от используемых методов обработки, формообразования, сборки и контроля изделия [40]. Так, КР может использоваться либо в качестве основного элемента КРТК, либо вспомогательного. С учетом практик реализации КРТП на предприятиях приближенный вариант классификации возможности применения КР в качестве основного или вспомогательного оборудования в разрезе методов обработки, формообразования, сборки и контроля изделия можно представить согласно табл. 1.1.

Таблица 1.1 – Классификации возможности применения КР в качестве основного оборудования (ОО) или вспомогательного оборудования (ВО)

Метод обработки	Роль коллаборативного робота в ТО
Группа. Формообразование	
Литье	ВО
Формование	ВО
Спекание	ВО
Группа. Механическая обработка	
Сверление	ОО
Шлифование	ОО
Полирование	ОО
Фрезерование	ОО
Точение	ВО
Растачивание	ОО
Зенкерование	ОО
Протягивание	ВО
Раскрой	ОО
Группа. Обработка давлением	
Ковка	ВО
Штамповка	ВО
Группа. Сборка	
Сварка	ОО
Клепка	ОО
Пайка	ОО
Склеивание	ОО
Прочее	
Нанесение покрытия	ОО
Технический контроль	ОО
Маркирование	ОО
Упаковывание	ОО
Электрофизическая обработка	ОО
Электрохимическая обработка	ВО
Роль ОО для КР не исключает возможности использования робота в качестве ВО	

Анализ зарубежной и отечественной научной литературы позволяет заключить, что специалисты предприятий и ученые проектируют, внедряют и фиксируют значимые показатели эффективности для КРТП и РТП в различных отраслях техники и технологий, включающих авиастроение, космическую отрасль, судостроение, производстве машин и механизмов, ремонт, лесную промышленность, сельское хозяйство, медицину, аддитивные технологии и другие. При этом в силу универсальности КРТП и РТП и наличия общих принципов управления ТП на базе КР наблюдается высокая степень диффузии научных, технологических и технических решений по автоматизации и управлению КРТК и РТК между указанными отраслями. Несмотря на то, что в текущем исследовании акцент был сделан на процессы механообработки, сварки и нанесения покрытий в рамках авиастроительных и судостроительных производств, перечень анализируемого научного материала был расширен и на другие отрасли производства.

Сварка. Отечественными и зарубежными учеными в работах [67, 76, 113, 116, 179, 182, 219, 249, 290] представлены результаты исследований отдельных функциональных, конструктивных и технологических составляющих КРТП в ТП, связанных со сборочным производством методом сварки.

В работе [290] авторы исследовали пути повышения эффективности механизмов планирования и оптимизации траекторий движения для робота, осуществляющего сварку изделия в недетерминированной среде – под водой. Авторы акцентируют внимание на средствах внешней сенсорики, а именно компьютерного зрения, с помощью которого актуализируются опорные точки пути (по траектории сварного шва), а затем в режиме траекторного управления с использованием метода b-интерполяции синтезируется программа для реализации движения. Алгоритмы динамической коррекции движения в робототехнических системах для ТО сварки представлены в работе Кобзева А. А. [67]. Такие алгоритмы необходимы, если расположение рабочей технологической поверхности в пространстве отличается от расчетной, что характерно, например, в ТП сварки изделий сложной конфигурации, крупногабаритных деталей сборочных единиц, свойственных для авиа-и судостроения. Авторы основывают свое решение на принципах адаптивного управления, при этом по результатам исследования удастся достичь требуемого уровня точности. В работах Шолохова М.А. [76, 179] рассмотрены процессы электродуговой сварки, произведено сравнение трех вариантов реализации ТП применительно к изготовлению ответственных изделий: ручной сварки, сварки в рамках РТП и сварки в рамках КРТП. Представлена методика расчета параметров для ТО в рамках РТП. Сделан вывод о том, что для ТП в штучном и мелкосерийном производствах КРТП значительно выигрывает по показателям эффективности ТП с применением ручного труда сварщика и РТП. В качестве основных результатов применения КРТП выделены: повышение степени безопасности работ, увеличение скорости сварки, быстрая смена положения, более стабильное качество шва. Из недостатков КРТП авторы выделяют ограничение в габаритах обрабатываемых деталей (это вызвано небольшими габаритами самих КР, доступных на рынке). Этот недостаток может быть компенсирован использованием в ТП поворотных позиционеров, мобильных транспортных роботов или вспомогательных роботов.

Технологические процессы точечной сварки дверей транспортных средств в контексте применения промышленных роботов рассматриваются в работе Кожевникова М. М. [113], предложен метод планирования движения робота, основанный на использовании редуцированного (дискретного) пространства для возможных вариантов пространственного расположения сварочных клещей (оснащающего оборудования). Быстродействие алгоритмов разрешения коллизий повышается за счет ограничения задачи оптимизации по имеющемуся дискретному пространству. Эффективность предложения доказана на имитационных моделях в среде ROBOMAX. Решения, предложенные автором, могут быть экстраполированы на процессы

сборки методом точечной сварки дверей и капотов в авиастроении и судостроении, в том числе в КРТП. При применении в КРТП видится целесообразным синтез редуцированных пространств в ОП и КП как для основного КР, так и для вспомогательного.

Режимы синергетического взаимодействия КР и оператора представлены в работе [219], система управления сварочным роботом может функционировать в автономном режиме, а также в случае высокой степени недетерминированности текущей ситуации [118] поддерживает режим вмешательства оператора и гибридное управление. При этом обратная связь для оператора реализуется через тактильный интерфейс. Наличие таких режимов управления необходимо, во-первых, для уточнения необходимых пространственных расположений ЦТИ, а во-вторых, для организации процесса обучения КР (планированию или коррекции автоматически синтезированного движения системой управления КР).

Авторские работы [229, 276, 279, 348] посвящены вопросам организации сварочных РТК в авиационных производствах.

Анализ рассмотренных и других работ позволяет заключить о наличии существенного потенциала организации ТП на базе ПР или КР. Среди специфических особенностей ТП сварки в контексте разработки ИСУ КРТП необходимо выделить:

- наличие в ТП сварки ТО, сопряженных с низким и средним уровнем качества изготовления (что определяет возможность организации и эффективность коллаборативной сборки оператором с КР);
- наличие существенного объема сварочных работ в процессах штучной или мелкосерийной сборки изделий, ремонта, модификации конструкции;
- значительную долю ВП в структуре комплекса ТО;
- необходимость поддержания постоянной скорости и непрерывности перемещения ЦТИ в рамках одного сварочного шва;
- необходимость присутствия оператора в рабочей зоне КР, а рук оператора в непосредственной близости от рабочего органа КР;
- наличие стесненной рабочей зоны (наличие габаритного вспомогательного оборудования, значительных габаритов соединяемых изделий и т.д.);
- высокую степень недетерминированности окружающей среды.

Актуальные научные задачи для повышения эффективности КРТП сварки концентрируются возле проблем недостаточной степени быстродействия существующих систем управления при разрешении коллизий, отсутствия унифицированных средств автоматической генерации управляющих законов для организации движения КР в условиях недетерминированной среды, а также высоких удельных затрат электрической энергии в режимах ожидания и при исполнении ВП или ВХ.

Механообработка. Отечественными и зарубежными учеными в работах [12, 13, 54, 62, 65, 91, 281, 343, 355], проведены исследования КРТП и РТП с учетом специфики механообрабатывающих производств, в том числе применительно к авиа-и судостроению.

В работе [281] авторы исследуют пути решения проблемы, связанной с высокой размерностью решения оптимизационной задачи при планировании движений ЦТИ робота для механической обработки внутренних поверхностей деталей (фрезерования, шлифования и полирования) в стесненных условиях. В ходе выполненных научных работ, авторами исследована группа алгоритмов разрешения коллизий и сделан вывод об отсутствии приоритетного алгоритма при различных условиях внешней среды, предложен уникальный алгоритм CODES3 (Context Dependent Search Strategy Switching), динамически переключающий стратегии поиска (алгоритмы, характеризующиеся разными принципами функционирования) решения в зависимости от контекста и условий окружающей среды. По мнению авторов, такой подход позволяет значительно повысить время отклика системы при планировании сложных движений, что подтверждается результатами имитационного моделирования. Однако авторами не были проведены эксперименты в условиях ТП, а также при разрешении коллизий не была учтена ситуация наличия в рабочей зоне оператора. Тем не менее предложенные решения имеют научную ценность и перспективы внедрения в ТП.

Проблематика низкой жесткости сочленений КР, негативным образом влияющей на точность положения ЦТИ в режимах контурного и траекторного управления, рассмотрена в работе [343]. Исследования авторами проводятся применительно к ТП сверления и фрезерования. В отличие от ТО сварки в общем объеме ТО сверления и фрезерования характеризуются более высокими требованиями к точности позиционирования ЦТИ во времени и пространстве. Авторами предлагается подход по принципу позиционно-силового управления, позволяющий компенсировать отклонения при перемещении, вызванные низкой жесткостью сочленений КР. Лабораторные сравнительные эксперименты проведены на ПР Mitsubishi RV-2AJ и КР Universal Robot UR3. Подход представлен теоретически, авторы видят перспективы исследования в разработке математических моделей процесса и коррекции управляющих сигналов. Более подробно теория позиционно-силового управления роботами представлена в работах И.Н. Егорова [54], В.Л. Афолина [12] и Г.Я. Пятибратова [125], практические аспекты – в работе [213]. Интерес к решениям авторов применительно к КРТП состоит в возможности синтеза адаптивных АСУ, в том числе на базе технологий RL. Так, в модель окружающей среды может быть добавлена сила реакции обрабатываемой поверхности. Введенная таким образом информации позволит нейросетевому агенту корректировать выходной сигнал при отклонении ЦТИ от требуемого положения в результате низкой жесткости сочленений. Кроме того, позиционно-силовое управление может быть использовано для организации ТПд и РХ не только при возмущении,

вызванным резом, но и при столкновении КР с оператором или другими объектами в не критичной ситуации при небольших значениях силы.

В работах В.Л. Афолина [12, 13, 65] исследуются возможности интеллектуального управления для компенсации возмущающих воздействий при обработке сложных поверхностей промышленным роботом (на примере ТП механической обработки лопаток газотурбинных двигателей). Предлагается экспертная система, имеющая в своем составе модели движения ПР, расширенные введением взаимосвязей по нелинейным факторам, в частности по упругим деформациям. В ходе исследований авторы демонстрируют возможность замены отдельных операций по формированию управляющих программ, выполняемых в ручном режиме, на операции, которые планируются и оптимизируются в автоматическом режиме. Техническое решение позволяет автоматизировать ручной труд в РТП. Принцип моделирования и принятия решения в экспертной системе для рассматриваемого РТП представляется перспективным при организации КРТП.

Специфика функционирования РТК листовой штамповки титановых сплавов рассматривается в работе С. О. Никифорова [91]. Сложность процесса управления РТК состоит в необходимости одновременного регулирования переменных состояния нескольких механизмов (ПР, автоматизированного оборудования штамповки, устройства радиационного нагрева заготовок, устройства подачи заготовок и устройства приема готовых изделий). На основе теории конечных автоматов, в частности автоматов Мили, автором предлагается математическая модель процесса и логика управления РТК. Конечно-автоматная сеть предполагается к интеграции в систему управления РТК, по прогнозу автора, такой подход позволит повысить эффективность управления режимами и ТО комплекса. Представляет интерес практическое применение решений, оставленных авторами в качестве перспектив научных исследований.

Работа Е. Abele [355] посвящена разработкам решений по оптимизации пути движения ЦТИ робота в ТП механической обработки – снятия заусенцев с внутренних поверхностей авиационных изделий, изготавливаемых из алюминия и титана. Быстродействие системы установлено в качестве критерия оптимизации. В качестве основного алгоритма оптимизации пути автором принят алгоритм А*. Экспериментальные исследования при обработке гидравлического клапана воздушного судна продемонстрировали повышение производительности ТО на 37 %. Результаты работы автора в большей части могут быть экстраполированы на КРТП, например, для планирования пути при ВП.

Авторские работы [1, 8, 320] посвящены вопросам организации ТП механообработки на базе РТК в авиационных производствах. В работе [112] предложен способ оптимизации положения обрабатываемой заготовки для сокращения энергозатрат ПР.

Анализ рассмотренных и других работ позволяет сделать заключение о целесообразности организации ТП механообработки на базе ПР или КР. Среди специфических особенностей ТП механообработки в контексте разработки ИСУ КРТП необходимо выделить:

- наличие в ТП механообработки ТО, сопряженных со средним уровнем качества изготовления, при этом требования к обработке изделия существенно варьируются в зависимости от метода механической обработки;
- наличие существенного объема механообрабатывающих работ в процессах штучной или мелкосерийной сборки изделий, ремонта, модификации конструкции, подгонки, исправления дефектов, шлифования, полировки;
- существенную долю ВП в структуре комплекса ТО;
- высокие требования по безопасности при реализации методов обработки с использованием режущего инструмента;
- крайне существенные ограничения при оперативной коррекции движения по исполнению РХ в реальном времени;
- необходимость присутствия оператора в рабочей зоне КР;
- наличие стесненной рабочей зоны (наличие габаритного вспомогательного оборудования, значительных габаритов соединяемых изделий и т.д.);
- высокую степень недетерминированности окружающей среды.

Актуальность научных задач повышения эффективности КРТП механообработки затрагивают проблемы (помимо тех, которые были указаны при описании ТП сварки):

- отсутствия проработки комплексных АСУ безопасностью человека в рабочей зоне, предусматривающей несколько контуров логики защиты;
- неполноты математических моделей КРТК и РТК;
- наличия существенного возмущающего воздействия, формируемого силами резания, что в некоторых случаях (с учетом низкой степени жесткости сочленения КР) в принципе не позволяет выполнять процессы механической обработки на отдельных режимах;
- низкой степени унификации подсистем управления режимами управления.

Сборка. Отечественными и зарубежными учеными в работах [25, 95, 99, 101, 130, 131, 153, 161, 173, 177, 178, 203, 235, 272, 309, 317, 327, 332, 335, 353] проведены исследования КРТП и РТП с учетом специфики сборочных производств, среди прочих рассмотрены ТП производства авиационных деталей и малых космических аппаратов [160].

Широкий обзор научной литературы в вопросе повышения эффективности сборочных роботизированных производств представлен в статье Longhui Qin [327]. Среди ключевых технологических направлений, актуальных при роботизации ТП сборки, автор выделяет: идентификацию параметров окружающей среды КРТП, развитие манипуляционных устройств, интеллект-

туальное управление, машинное обучение, а также инструменты синтеза функционалов качества ТП с учетом их уникальных особенностей.

Теория организации РТК в ТО резьбового соединения [153], гидропрессования [101], завинчивания [130] и общей сборки [95] рассмотрена отечественными авторами. В их работах в качестве приоритетов исследования определены вопросы разработки детализированных моделей РТК и их АСУ, подчеркивается высокая степень зависимости итогового качества решения от глубины детализации структуры и функционала моделей. Кроме того, для актуализации состояния моделей авторами предлагаются системы внешней сенсорики (систем технического зрения, силомоментных датчиков), позволяющие детерминировать изменяющиеся условия в рабочей зоне.

В работе М. Р. Соорет [317] рассмотрен ТП высокоточной сборки электронных компонентов. В качестве ключевых критериев установлены минимизация вибрации при реализации движения и точность. Для оптимизации пути движения робота, реализующего ВП и ТПд, предлагается использовать генетический алгоритм, в качестве вариаций параметров движения выбрана четверка шаблонных типов движений Point-to-Point, Linear, Spline Point-to-Point, Spline Linear.

Разработки в задачах предотвращения столкновений КР с оператором и другими объектами рабочей зоны в КРТП сборки представлены в работах [327, 161]. Технические решения базируются на системе камер и лидаров. Авторы подчеркивают крайнюю важность наличия быстродействующих систем предотвращения столкновений именно в процессах сборки, для которых свойственны длинноходные перемещения КР и широкая область выполнения работ в ОП. В работе [309] мультикамерная нейроморфная система технического зрения применяется для высокоточного позиционирования инструмента (шпинделя со сверлом) КР для инициации РХ. Объединение функционала системы распознавания объектов и высокоточного позиционирования на базе одной аппаратной части представляется весьма перспективным при разработке современных КРТП.

В работах В. В. Серебряного и других авторов [25, 99, 131, 151, 173, 177, 235] исследованы аспекты общей организации роботизированных ячеек сборочных процессов. Работы дают представление о структуре РТК, классах используемого оборудования и общего функционала, необходимого для достижения поставленных требований по качеству и быстродействию.

Авторы работы [203] отмечают нетривиальную специфику процесса разборки устройств и механизмов, по их мнению, повышения эффективности таких процессов может быть достигнуто за счет использования КР и также формирования некой экспертной системы, задачей которой является в оперативном режиме формирование логики и последовательности работ, сопряженной с наименьшими трудозатратами и затратами машинного времени. Использование онтологий и семантических правил, построенных на языке SWRL, позволяет экспертной системе сформировать оптимальный метод разборки для каждого компонента механизма, непосредственно последовательность работ. Задача оптимизации решается в условиях ограничения, свя-

занных с особенностями разбираемого механизма и наличия инструментов. Из недостатков предложения можно отметить отсутствие результатов обобщенных экспериментов и невысокую степень гибкости решения в случае изменения класса разбираемых механизмов.

Из работ [121–122, 326] формируется краткое представление о проблемах и задачах по управлению роботами манипуляторами в лесной промышленности и сельском хозяйстве, среди ключевых можно отметить задачи поиска системой распознавания необходимого объекта, формирование оптимального движения для его захвата и непосредственно сам захват. Наработки авторов смежных отраслей промышленности могут быть полезны при решении аналогичных задач при синтезе КРТП авиационных и судостроительных предприятий.

Авторские работы [18, 253] посвящены вопросам организации и модернизации ТП сборки на базе РТК на судостроительных производствах.

Анализ рассмотренных и других работ позволяет сделать заключение о целесообразности организации ТП сборки на базе ПР или КР. Среди специфических особенностей ТП сборки в контексте разработки ИСУ КРТП необходимо выделить:

- требования универсальности КР для выполнения задач в качестве основного и вспомогательного оборудования, желательно с универсальными инструментами или автоматизированной станцией смены инструментов;
- наличие протяженных периодов ожидания или стабилизации изделия, инструмента в необходимом положении;
- наличие большой доли режима позиционного управления;
- наличие большого объема задач, не требующих высокой или средней точности позиционирования;
- необходимость присутствия оператора в рабочей зоне КР;
- высокую степень недетерминированности окружающей среды.

Актуальные научные задачи повышения эффективности КРТП сборки определяются проблемами (помимо упомянутых) неполноты математических моделей процессов; низкой степенью управления верхнего уровня и несовершенной системой внешней сенсорики.

Нанесение покрытий (окрашивание). Распространенными и ответственными для авиационных и судостроительных производств являются процессы нанесения ЛКМ на изделия и детали сборочных единиц. Покрасочные РТК широко распространены в автомобилестроении, но значительно реже на промышленных предприятиях, производящих авиационную продукцию и суда, что чаще всего связано со штучным и мелкосерийным производством. При этом отсутствие широкого распространения ТП на базе КР для нанесения покрытий связано с вредными условиями труда и с тем, что почти всегда комплекс ТО по окрашиванию представляется возможным решить в ячейке на базе ПР. Тем не менее в КРТП универсальной сборки могут иметь

место ТО нанесения покрытий на изделия, что определяет целесообразность исследования возможного функционала АСУ КР в задачах окрашивания. В работах зарубежных и отечественных авторов [9, 14, 207], а также в авторских работах [84–85, 365] концептуально рассмотрена специфика роботизированных покрасочных производств.

Специфические особенности ТП окрашивания с помощью ПР и КР в основном заключаются в необходимости согласованного управления движением робота с системой подачи ЛКМ, поскольку возникает ряд дополнительных требований к задаче планирования движения, связанных с обеспечением однородности нанесения покрытия, равномерности распыления, допуска толщины слоя нанесенного покрытия, допуска по разности толщин по площади изделия, требований по характеристикам подтеков и адгезии ЛКМ и т.д. При этом благодаря отсутствию непосредственного контакта инструмента КР с поверхностью изделия также отсутствует негативное влияния сил упругости.

Резка, термоупрочнение. В работах Н. А. Сазонниковой, В.Л. Афолина и других авторов [11, 62, 89, 96, 110, 114, 165] рассмотрена специфика РТП лазерного и гидроабразивного резания, термоупрочнения и инкрементального формообразования. Крайняя опасность для человека инструмента ПР почти полностью исключает возможность организации ТП на базе КР. В отдельных случаях, если рабочий орган робота в какой-то степени изолирован от человека, такая целесообразность может иметь место, например при использовании медицинского лазера или режущего инструмента в хирургии [308, 371] или при сборке изделий с использованием светотверждаемых материалов.

Обслуживание станков, ремонт, погрузочно-разгрузочные работы. При рассмотрении функционала КР и ПР в ремонтных, обслуживающих и погрузочно-разгрузочных работах авторы в статьях [6, 23, 75, 157, 233] в основном концентрируются на технологических аспектах и вопросах безопасности. В целом комплекс задач применения КР в сборочных производствах перекрывает более специализированные направления такие, как ремонт и обслуживание. В организации КРТП для осуществления погрузочно-разгрузочных работ может характеризоваться относительно большими массами перемещаемых грузов.

Представленный обзор научной литературы позволяет констатировать наличие широкого круга технических задач, которые могут быть успешно решены с помощью проектирования и внедрения КРТП, тем не менее с научной точки зрения наблюдаются значимые проблемы в области автоматизации КРТП, не позволяющие в полной мере раскрыть потенциал возможной эффективности. Таким образом, научные исследования в области разработки новых моделей, методов, алгоритмов и средств управления компонентами КРТП представляются перспективными и могут значительно повысить степень автоматизации ТП высокотехнологичных производств.

Выводы по главе 1

В качестве объекта управления выбраны коллаборативные роботизированные ТП сборочных производств промышленных предприятий.

Обзор научно-технической литературы показал, что несмотря на значительный объем решенных научных и практических задач в области построения КРТП, имеется значительный пласт научных проблем, без решения которых на текущий момент не представляется возможным достичь максимальную эффективность человеко-машинного взаимодействия и организации синергетической системы в рамках существующих практик внедрения КРТП. Отсутствует в полной мере формализованное описание параметрических, структурных и функциональных зависимостей, методологические и теоретические основы оптимального проектирования КРТП, позволяющие обеспечить полноту комплекса математических моделей и методов синтеза законов управления в АСУ КРТП производства высокотехнологичной продукции с учетом специфики задач промышленных предприятий.

По данным литературных источников обобщена информация о состоянии и тенденциях развития ТП на базе КР с акцентом на человеко-машинное взаимодействие. Показано, что научные исследования в области разработки новых моделей, методов, алгоритмов и средств управления компонентами КРТП представляются перспективными и могут значительно повысить степень автоматизации ТП высокотехнологичных производств.

Глава 2. Теоретические основы формализованного описания и оптимального проектирования коллаборативных роботизированных технологических процессов

Перспективность построения промышленных производств на базе синергетических систем (СНС) или социо-киберфизических систем (СКФС) подтверждают многочисленные исследования отечественных и зарубежных авторов [15, 63, 209, 278]. Синергетический эффект, порождаемый в таких системах, достигается, как правило, за счет организации многостороннего взаимодействия между КР и оператором [188-189] в рамках КРТП для решения не только общепромышленных задач [18, 188, 249, 331, 359] но и в процессах ассистирования человеку в штучном и мелкосерийном производстве инновационной продукции [63], в разных отраслях: механосборочном производстве, медицине, сборке электроники [354] и др.

Существует достаточное количество моделей КР от ведущих мировых производителей, таких как KUKA, ABB, FANUC, Kawasaki, Yaskawa [104, 341], которые могут быть интегрированы в процессы предприятий. Тем не менее в базовом варианте комплектации КР, поставляемые на предприятия, не могут раскрыть потенциал возможного синергетического эффекта взаимодействия между человеком и роботом и, как правило, свойство коллаборативности сводится только к обеспечению безопасности человека в одном рабочем пространстве с роботом внутри КФС (или CPS). Синтез систем управления КРТП только на основе робота, оснащенного внутренней системой сенсорики (комплексом силомоментных датчиков), позволяющей реализовывать механизмы организационного и технического разрешения коллизий КР и объектов рабочей зоны, затруднителен в силу ограниченности данных средств измерения и оценки внутренней среды в рабочем пространстве робота. Полученные решения не будут отличаться высокой эффективностью в силу невозможности осуществления управления по прогнозу. Управление же по ошибке повлечет дополнительные временные и энергетические затраты, не будет гарантировать достижение желаемого результата и в целом небезопасно.

Повышение эффективности систем управления КФС на базе КР возможно за счет расширения средств сенсорики (в частности, систем технического зрения) [357] и интеллектуальных модулей, планирующих и оптимизирующих движения КР с учетом изменений внешней среды [188–189]. При этом основными инструментами и механизмами обеспечения совместного взаимодействия и формирования оптимальных оперативных управленческих решений являются: продвинутые сенсорно-эффекторные системы на основе модулей сбора и анализа звуковых и видео-поток [328, 357], модели поведения основных объектов СНС (оператор – моделирование человеческого фактора, робот, внешние объекты и т.п.) разной природы (физические, временные, экономические и т.д.) [193, 283, 370], модули вывода управленческих решений для всех

элементов СНС, базирующиеся на интеллектуальных алгоритмах [196, 200, 374], системы функционалов качества ТП [265], интерфейсы взаимодействия и управления [210].

Концепция построения СНС декларирует повышение ключевых показателей эффективности ТП, таких как качество производимой продукции, снижение временных и энергетических затрат, снижение требований к компетентности и универсальности персонала и другие.

Имеющиеся решения в настоящий момент в полной мере не оформлены в виде понятных и прозрачных технологий для конечного пользователя (промышленного предприятия), информация в целом разрознена, инструменты не унифицированы, эффект от внедрения не очевиден, но при этом степень вмешательства, требуемого для внедрения СНС на базе КРТП, в стабильные бизнес-процессы предприятия существенна. Эти проблемы заставляют руководителей промышленных предприятий, если не отказаться от модернизации существующих систем, то отложить ее на будущее время. В настоящей работе предложены результаты исследования в области обобщения имеющегося опыта организации процессов совместного взаимодействия «человек - робот» (КРТП) в целях создания унифицированных технологий по разработке СНС и инструментов их сопровождения на всех этапах жизненного цикла. Среди ожидаемых практических результатов исследований видится повышение степени доступности и прозрачности технологий для широкого класса КРТП промышленных предприятий. В частности, среди первичных элементов средств промышленной технологии создания СНС, опирающейся на концепцию Индустрии 5.0 [15], требующих формализации являются: структурные схемы КРТК и КРТП, в рамках которого функционирует система, комплекс моделей, обеспечивающих интеллектуализацию вывода решений и алгоритмы функционирования модулей систем.

2.1. Структуризация и параметризация требований к частям технологических операций коллаборативных роботизированных технологических процессов

Для формирования обобщенного описания класса процессов, к которому могут быть применены решения по автоматизации за счет КРТК, следует обратить внимание на некоторые особенности пространства задач, связанных с реализацией ТО на промышленном предприятии. Согласно результатам исследования, представленных в гл. 4, при автоматизации КРТК в ИСУ должны быть заложены механизмы обеспечения решения пяти задач оптимизации: (№ 1 – 3) – задачи минимизации затрат ресурсов (в том числе временных); (№ 4 – 5) – задачи безопасности.

Система управления КРТК должна быть построена с учетом варианта использования рабочего пространства робота и человека (рис. 2.1) [44]: ячейка (cell), сосуществование (coexistence), синхронизация (synchronized), кооперация (cooperation), коллаборация (collaboration).

При определении потенциала эффекта процессов оптимизации должен быть учтен вид ТП: единичный, групповой, типовой. Определено наличие, а также детализация описания технологических методов выполнения ТО [40], наличие документального описания: маршрутное описание, операционное описание, маршрутно-операционное описание.



Рисунок 2.1 – Варианты использования рабочего пространства КР и человека

Кроме того, для разрабатываемой системы управления КРТК должны быть специфицированы следующие параметры из систем классификаций по ГОСТ 3.1109-82 [40]:

- а) классификация по методу обработки (например, обработка резанием, сварка, монтаж, нанесение покрытия, и т.п.);
- б) конкретизация и описание предметов труда (например, материал, основной материал, заготовка, «изделие и т.д.);
- в) описание средств выполнения ТП (например, инструмент, технологическая оснастка и т.д.);
- г) описание технологических норм (например, расценка, норма времени, норма основного времени и т.д.);
- д) описание характеристик ТП (ТО) (например, такт выпуска, технологический режим, припуск и т.д.);
- е) описание частей ТО (например, РХ, ВХ и т.д.).

Специфика ТП совместной работы робота и человека. Наибольший интерес в текущей работе представляют ТП, для которых необходимо и целесообразно включение режимов коллаборации или кооперации (см. рис. 2.1). При такой организации совместного рабочего пространства предлагаемые модели, методы и алгоритмы (гл. 4, 5) имеют максимальный технологический и экономический эффект. При этом должна быть обеспечена как безопасность самого человека, так и сохранность оборудования КРТК.

Список опасностей для человека в рамках РТК, процесс идентификации опасностей, описание процедур устранения опасностей и снижение рисков отражены в ИСО 10218-2:2011. Согласно нормативному документу основополагающие принципы безопасности КРТК следующие:

- а) установленные границы совместного рабочего пространства;
- б) управление доступом в совместное рабочее пространство, контроль промежутка безопасности;

- в) эргономика ТП;
- г) управление пределами использования и переходами (временные рамки);
- д) предоставление дополнительных защитных мер, таких как информация для использования, обучение, знаки, средства индивидуальной защиты.

Требования к применению РТК для совместной работы представлены в [41, 44]. В частности, переходы между несовместными и совместными ТО должны быть сконструированы таким образом, чтобы РТК не представлял неприемлемых рисков для оператора во время перехода; при совместной работе могут быть использованы один или несколько методов:

- а) контролируемая остановка с расчетной безопасностью;
- б) ручное управление;
- в) ограничение скорости и соблюдение защитного расстояния разделения;
- г) ограничение мощности и силы.

При этом расстояния (минимальные) могут быть рассчитаны с помощью формул, представленных в ГОСТ ИСО 13855 [42], дистанция остановки робота определяется в соответствии с ИСО 10218-1:2011 [44], в котором также представлено понятие предусмотренных контактных ситуаций, случайных контактных ситуаций, квазистатический контакт (зажимание) и кратковременный контакт.

Описание ТП и соответствующего набора ТО позволяет выстроить систему ограничений для задач управления по реализации движений с РХ ТПд и задач управления и оптимизации по реализации движения сопряженных с ВХ ТПд и ВП.

На рис. 2.2 представлена диаграмма классов для ТО ТП с акцентом на отдельные части ТО, для которых в гл. 3, 4 и 5 представлены модели и методы оптимизации движения КР.

Поскольку исследования направлены на повышение эффективности автоматизированных ТП, основанных на сотрудничестве КР и человека, то рассматриваются именно ТП в классификации рабочего пространства такие, как кооперация и коллаборация (см. рис. 2.1). Тогда очевидно, что безопасность человека может обеспечена согласно ГОСТ Р 60.1.2.3 – 2021 [44] только двумя из четырех методов, а именно: с) ограничением скорости и соблюдением защитного расстояния разделения; d) ограничением мощности и силы. Метод «а) «контролируемая остановка с расчетной безопасностью» подробно не рассматривается, поскольку, исключает реализацию кооперации и коллаборации с человеком и используется в работе как вариант защитной остановки в случае, если методы с) и d) не смогли обеспечить требуемый уровень безопасности; метод «b) ручное управление» не рассматривается в силу передачи ответственности за безопасность от ИСУ человеку.

С учетом особенностей организации ТП совместной работы робота и человека [44] и терминологии ТП изготовления и ремонта изделий машиностроения ГОСТ 3.1109-82 [40], а также задач оптимизации № 1 – 5 (гл. 4), поставленных для достижения цели повышения эффективности ТП, ключевыми абстракциями структуры описания ТО (ТП) являются: РХ робота, ВХ робота, ВП робота (см. рис. 2.2). Понимая предназначение и задачи КР в ТП, а именно позиционирование ЦТИ, стабилизация положения ЦТИ, перемещение

ЦТИ в системе пространство – время по заданной траектории, понятно, что каждая из абстракций сопровождается конкретным движением КР в КП, сопряженным с конкретной траекторией перемещения ЦТИ в системе пространство – время. При этом параметры движения и траектории определяются из описания ТО, критериев качества и принятой задачей оптимизации, а также изменением положения объектов в совместном пространстве.

Необходимо выделить параметры движения КР и сопряженной траектории (см. табл. 2.1), которые можно регулировать в целях оптимизации переходов, выполняемых КР в рамках ТО, в соответствии с одной из формулировок задач оптимизации.

В ходе проведенных исследований были сформированы требования, предъявляемые к движению КР, осуществляющего ТПд, или более обобщенно – жестко ограниченному движению HRP (Hard Restricted Part). Диаграмма требований в нотации языка UML представлена на рис. 2.3. Задачи оптимизации отмечены на рисунке цифрами 1 – 5, обозначение соответствует принятому в гл. 4 для рассматриваемых задач оптимизации.

Поскольку параметры HRP движения значительно ограничены технологически, потенциал оптимизации для таких типов движений невелик, что нельзя сказать о движениях типа SRP (Soft Restricted Part) – слабо ограниченных движениях, реализующих ВП и ВХ технологического перехода ТО. Для таких частей ТО также была разработана диаграмма требований (см. рис. 2.4). Движения SRP имеют высокий потенциал оптимизации и в большей степени являются предметом рассмотрения исследований, результаты которых представлены в гл. 3, 4 и 5.

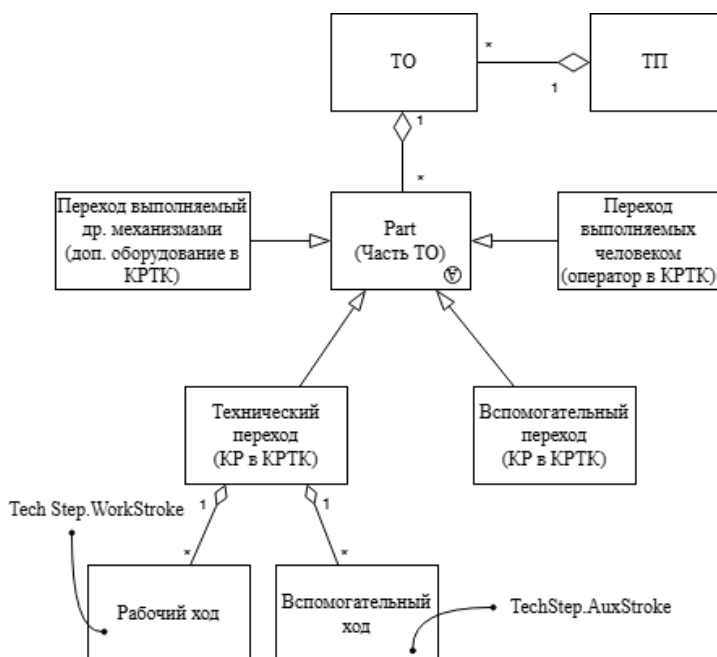


Рисунок 2.2 – Диаграмма классов для ТО (спецификация выполнена в соответствии с нотациями UML)

Таблица 2.1 – Параметры движения, влияющие на ход оптимизации части ТО

Группа параметров	Детализация или возможное значение	Иллюстрация
1. Количество точек пути	2 или > 2	
2. Тип движения в операционном пространстве	Прямолинейное, круговое, по криволинейной траектории, произвольное	
3. Ориентация ЦТИ в точке/точках назначения	R_f – определена в точке назначения	
	$R_s \dots R_i \dots R_f$ – определены в точке назначения и промежуточных точках	
	$R_s = \dots = R_i = \dots = R_f = \text{const}$ во всех точках траектории	
	Произвольная	
4. Ограничение линейных координат	• Положение XYZ ЦТИ или другого звена; • скорость ЦТИ; • ускорение ЦТИ	
5. Ограничение угловых координат; моментов на осях	• Угол положения $\varphi_1 \dots \varphi_7$; • угловая скорость $\omega_1 \dots \omega_7$; • угловое ускорение $\varepsilon_1 \dots \varepsilon_7$; • моменты $\tau_1 \dots \tau_7$	

Продолжение таблицы 2.1

Группа параметров	Детализация или возможное значение	Иллюстрация
6. Наличие остановок в промежуточных точках пути	- Да, $\omega = 0$ в промежуточных точках; - Нет, $\omega \neq 0$ в промежуточных точках	где $t_1 \dots t_n$ - моменты времени для промежуточных расположений робота; $j \in [1, 2 \dots 7]$ индекс оси КР
7. Метод интерполяции точек внутри одной части (отрезка) пути	Только в случае наличия остановок в промежуточных точках (п. 6) либо при количестве точек пути, равном 2	
8. Метод интерполяции промежуточных точек всего пути	В случае отсутствия необходимости остановок в промежуточных точках пути (<i>spline</i> , <i>Makima</i> , <i>PCHIP</i>). Будет присутствовать ошибка положения и ориентации в промежуточных точках пути	$P_2' - P_2 \neq 0$ $P_3' - P_3 \neq 0$
9. Наличие возможности остановки в промежуточной точке без последствий для изделия (либо другого объекта) с возможностью дальнейшего возобновления движения	- Присутствует; - отсутствует.	продолжение движения возможно продолжение движения невозможно
10. Наличие ограничения времени исполнения движения	- Присутствует; - отсутствует.	

Для четкой дифференциации частей ТО и соответственно требований к их организации должны в автоматическом или полуавтоматическом режиме быть проанализированы маршрутное и операционное описания ТО.

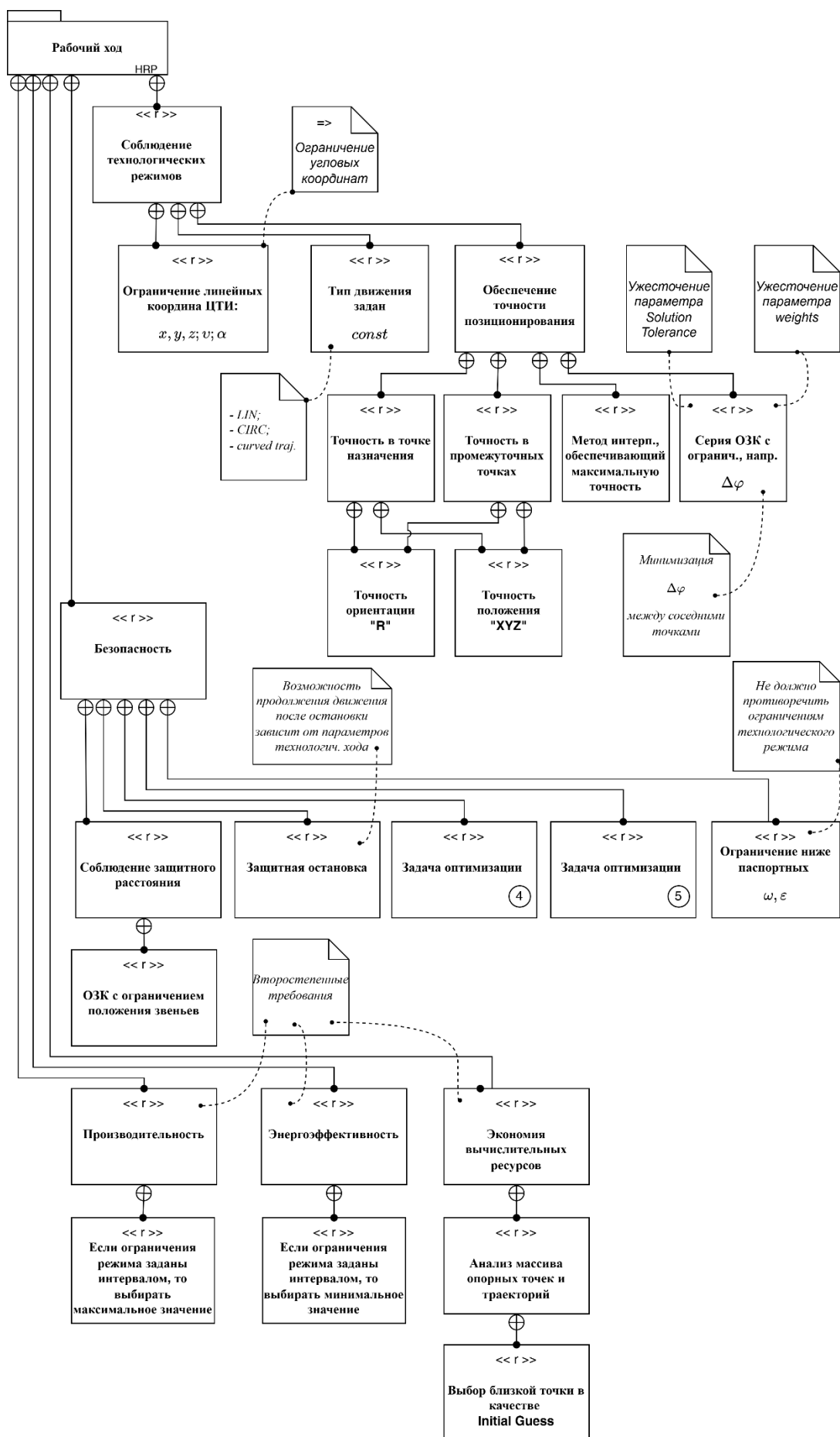


Рисунок 2.3 – Требования к организации РХ (HRP движения) в КРТП

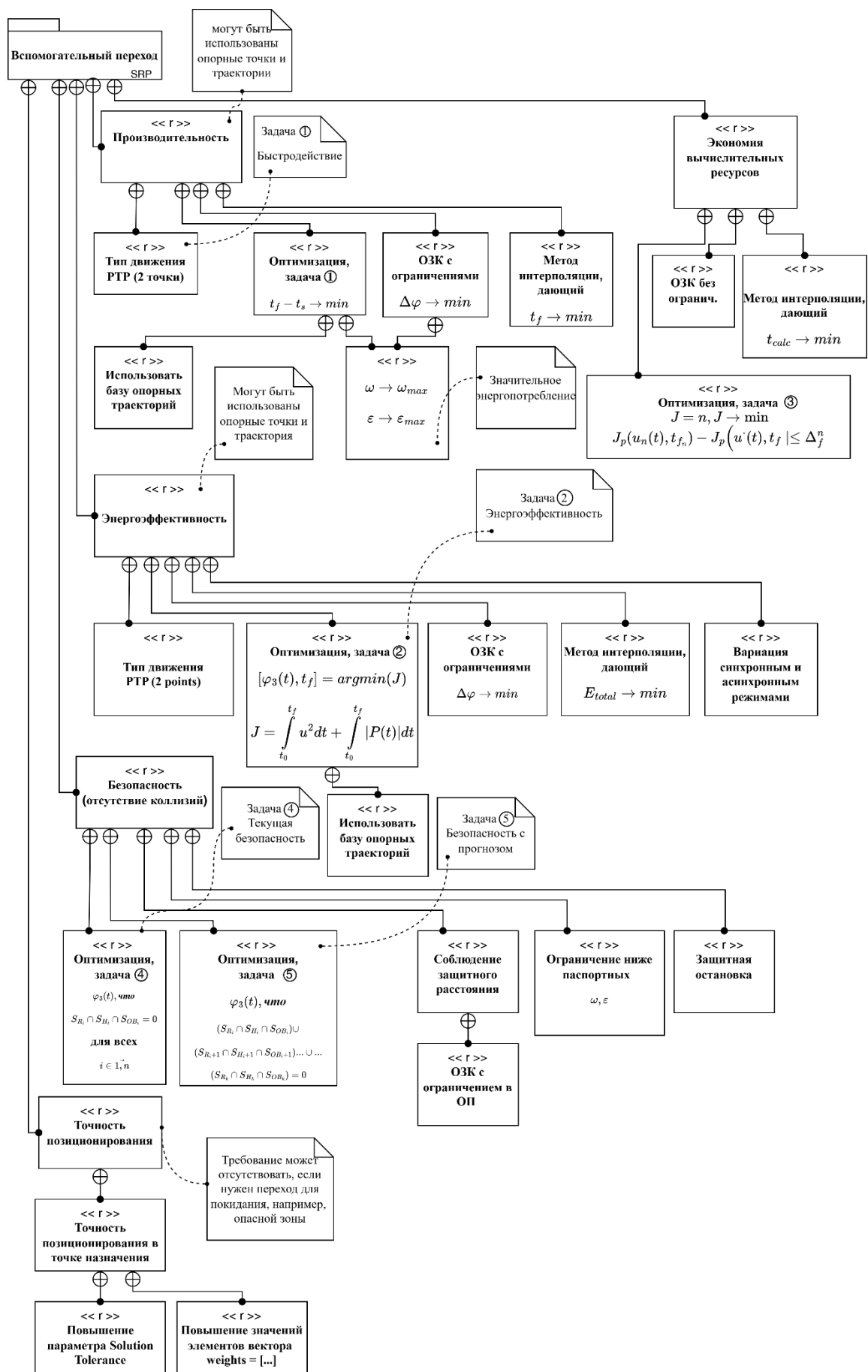


Рисунок 2.4 – Требования к организации ВХ (SRP движения) в КРТП

В табл. 2.2 представлена декомпозиция ТО. На рис. 2.5 представлен схематично маршрут движения ЦТИ КР при реализации ТО сверления двух отверстий в изделии (плоской плите). Введены три системы координат в ОП: XYZ – глобальная система координат; X_u, Y_u, Z_u – локальная база заготовки; X_{ee}, Y_{ee}, Z_{ee} – локальная база ЦТИ (End Effector), в данном случае ЦТИ – центр фланца 7-го звена КР. Точки $P_0, P_1 \dots P_8$ – опорные точки пути ЦТИ. Стрелочками обозначено условное направление движения ЦТИ вдоль одной части пути. Дугами обозначены условные траектории перемещения ЦТИ в пространстве.

Таблица 2.2 – Декомпозиция ТО

№	Переход	Тип перехода	Кол-во частей	Назначение перехода
1	$P_0 P_1 P_2 P_1$	Вспомогательный	3	Захват инструмента
2	$P_1 P_3$	Вспомогательный	1	Перемещение в зону сверления 1
3	$P_3 P_4 P_5 P_6 P_7$	Технологический	4	Сверление отверстия № 1
4	$P_3 P_6$	Вспомогательный	1	Перемещение в зону сверления 2
5	$P_6 P_7 P_8 P_7 P_6$	Технологический	4	Сверление отверстия № 2
6	$P_6 P_1 P_2 P_1$	Вспомогательный	3	Возврат инструмента в станцию хранения
7	$P_1 P_0$	Вспомогательный	1	Возврат в домашнюю позицию

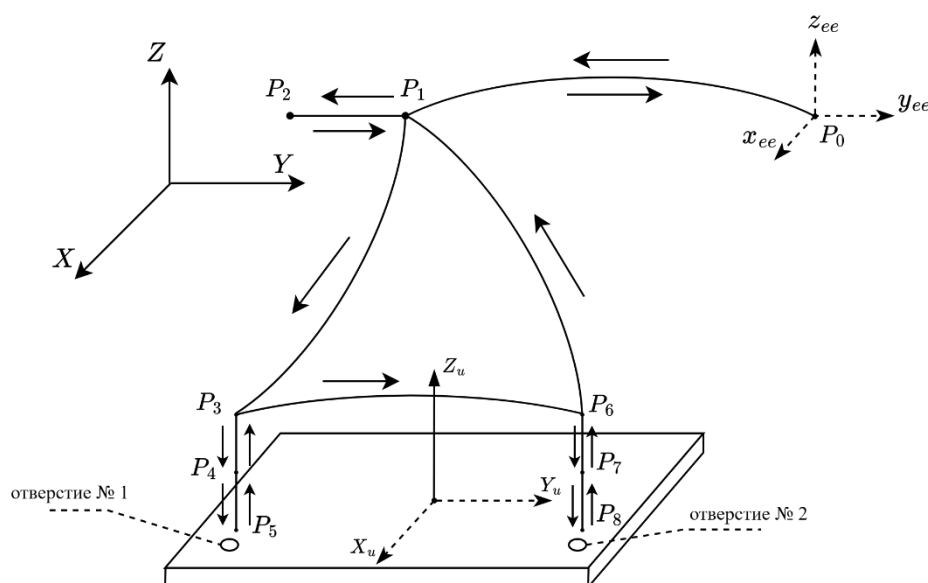


Рисунок 2.5 – Маршрут движения ЦТИ (фланца) КР при реализации ТО сверления двух отверстий в изделии

Рассматривается случай, когда все представленные движения не вызывают коллизий с объектами совместного пространства. При использовании совместного пространства в вариантах кооперации и коллаборации и с учетом самого предназначения совместной с КР работы. Часть задач для КР, а следовательно часть движений для него, не определены заранее и выдаются в реальном времени ИСУ или оператором. Например, в рамках представленной на рис. 2.5 ТО, координаты отверстий № 1 и № 2 могут определяться автоматически системой распознавания посредством считывания пятна лазерного маркера, направляемого оператором. Тогда исхо-

для из схемы маршрута движения (пути), точки $P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8$ и соответственно ориентация ЦТИ в них заранее не предустановлены, что определяет необходимость поведения полного цикла действий процедуры планирования и реализации движения (включая этапы формализаций задачи, планирования пути и траектории перемещения с учетом оптимизации мероприятий) в реальном времени течения ТО. Очевидно, что включение задачи оперативного планирования движений КР в ТО будет напрямую влиять на интегральные показатели эффективности ТО, такие как качество конечного результата, производительность, энергоэффективность и безопасность. В табл. 2.3 представлена декомпозиция переходов ТО, маршрута движения (см. рис. 2.5).

Таблица 2.3 – Декомпозиция переходов ТО

№	Часть перехода	Назначение части перехода	Тип части	Степень ограничения движения	Тип перемещения	Возможность оперативной корректировки движения	Последствия защитной остановки
1.1	$P_0 P_1$	Перемещение в зону захвата	Часть ВП	Низкая SRP	Произвольное	Имеется	Отсутствуют
1.2	$P_1 P_2$	Перемещение в точку захвата	Часть ВП	Высокая HRP	LIN	Имеется; в крайнем случае	Полное перепланирование части
1.3	$P_2 P_1$	Выход из зоны захвата	Часть ВП	Высокая HRP	LIN	Имеется; в крайнем случае	Полное перепланирование части
2.1	$P_1 P_3$	Перемещение в зону 1 сверления	Часть ВП	Низкая SRP	Произвольное	Имеется	Отсутствуют
3.1	$P_3 P_4$	Выход в точку $SDIS_1$	BX	Высокая HRP	LIN	Имеется; в крайнем случае	Полное перепланирование части
3.2	$P_4 P_5$	Сверление	PX	Высокая HRP	LIN	Отсутствует	Брак заготовки
3.3	$P_5 P_4$	Выход в точку $SDIS_1$	BX	Высокая HRP	LIN	Отсутствует	Брак заготовки
3.4	$P_4 P_3$	Выход из зоны сверления	BX	Высокая HRP	LIN	Имеется; в крайнем случае	Полное перепланирование части
4.1	$P_3 P_6$	Перемещение в зону 2 сверления	BX	Низкая SRP	Произвольное	Имеется	Отсутствуют
5.1	$P_6 P_7$	Выход в точку $SDIS_2$	BX	Высокая HRP	LIN	Имеется; в крайнем случае	Полное перепланирование части
5.2	$P_7 P_8$	Сверление	PX	Высокая HRP	LIN	Отсутствует	Брак заготовки
5.3	$P_8 P_7$	Выход в точку $SDIS_2$	BX	Высокая HRP	LIN	Отсутствует	Брак заготовки
5.4	$P_7 P_6$	Выход из зоны сверления	BX	Высокая HRP	LIN	Имеется; в крайнем случае	Полное перепланирование части
6.1	$P_6 P_1$	Перемещение в зону захвата	Часть ВП	Низкая SRP	Произвольное	Имеется	Отсутствуют
6.2	$P_1 P_2$	Перемещение в точку захвата	Часть ВП	Высокая HRP	LIN	Имеется; в крайнем случае	Полное перепланирование части
6.3	$P_2 P_1$	Выход из зоны захвата	Часть ВП	Высокая HRP	LIN	Имеется; в крайнем случае	Полное перепланирование части
7.1	$P_1 P_0$	Перемещение в исходную позицию	Часть ВП	Низкая SRP	Произвольное	Имеется	Отсутствуют
LIN – прямолинейное перемещение ЦТИ в пространстве							

Необходимо отметить, что в ГОСТ 3.1109-82 [40] не выделяется отдельного термина для части ВП, в табл. 2.3 такие части обозначаются как части ВП. Каждую часть перехода с учетом понимания специфики ТП и ТО можно отнести либо к классу HRP (см. рис. 2.3) либо к SRP (см. рис. 2.4). Такая классификация позволяет конкретизировать для каждой части задачу оптимизации, а также возможность или невозможность предпринять действия по разрешению коллизий, не прибегая к функциям защитной остановки.

Нетрудно заметить, что наибольший потенциал оптимизации по критериям «производительность» и «энергоэффективность» (задачи 1 и 2) сосредоточен в отдельных частях класса SPR ВП. Также не каждая часть перехода в случае коллизии или прогноза коллизий может быть перепланирована без существенных последствий для ТО.

Части переходов класса SPR, для (см. рис. 2.5) P_0P_1 , P_1P_3 , P_3P_6 , P_6P_1 и P_1P_0 , как было сказано ранее, являются ключевыми абстракциями, для которых могут быть решены все пять поставленных задач оптимизации, либо составлена многокритериальная задача из их комбинаций по взвешенной системе критериев. При этом в ходе поиска оптимальных или близких к оптимальным решениям может быть использована база знаний (БЗ), включающая базу опорных траекторий, базу конфигураций с признаками предназначения (например, массив конфигураций, отражающих эффективные позы КР, массив конфигураций аварийных переходов и др.), RL агенты аппроксимации движения и др. (см. гл. 5).

Необходимо отметить, что представляемые требования и организации SR и HR частей переходов в рамках технологического метода обобщаются на большой класс процессов механической обработки на базе роботов, такие как сварка, шлифование, фрезерование, покраска и т.д.

Выводы

1) Представлен обобщенный пример ТО КР в совместном рабочем пространстве с человеком, наглядно демонстрирующий части ТО, для которых могут производиться оптимизационные мероприятия.

2) Определены требования, предъявляемые к SRP и HRP движениям, реализующим ТПд и ВП, рабочие и вспомогательные ходы. Требования, отраженные в диаграммах (см. рис. 2.4 и 2.3), служат основой для алгоритмов управления и оптимизации движений КР в совместной с человеком рабочей зоне.

3) Представленная параметризация специфичных движений КР (см. табл. 2.3), позволяет определить ключевые регулируемые переменные для решения установленной задачи оптимизации в КРТП.

2.2. Разработка системы требований к КРТП

Детализация вариантов движения КР в контексте исполнения частей ТО (ВП, ВХ и РХ); обобщенное описание классов ТП, имеющих потенциал по автоматизации за счет внедрения КРТК под управлением ИСУ; предложенные механизмы управления и оптимизации (см. гл. 4, 5), модели и модули прогнозирования (см. гл. 3) детерминирует предметную область задач разработки программно-аппаратного комплекса (ПАК) ИСУ КРТП.

На рис. 2.6 представлена контекстная диаграмма модели КРТК.

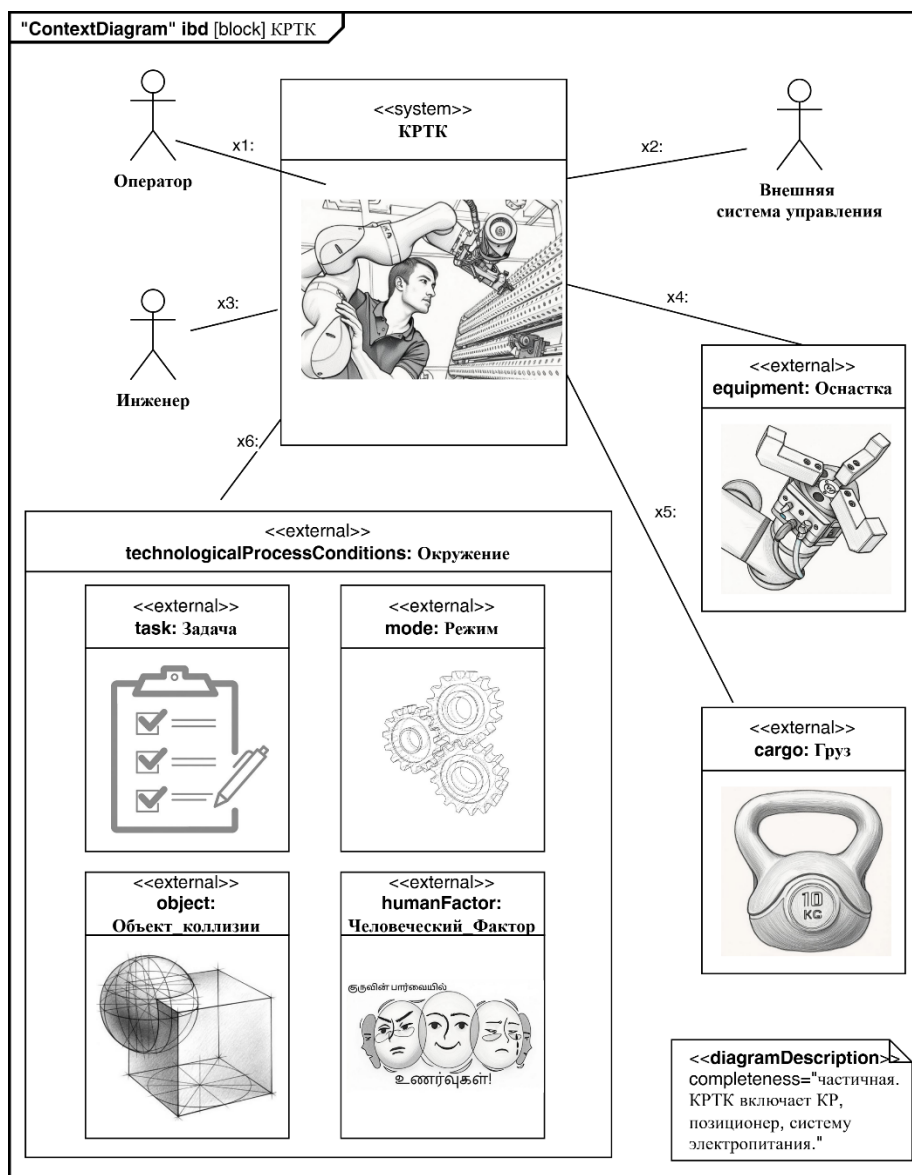


Рисунок 2.6 – Контекстная диаграмма модели КРТК

Отображены ключевые взаимодействия абстракций для КРТК, среди которых:

- основными пользователями процесса являются оператор, инженер, АСУ верхнего уровня;
- отдельно учитываются абстракции оснащающего КР оборудования, перемещаемый груз, рабочий орган КР

- элементами внешнего окружения являются задачи ТО, режимы движения, объекты коллизии недетерминированной среды и модель человеческого фактора (МЧФ).

Функционал ИСУ КРТП для внешнего окружения предлагается определять исходя из существующих эффективных концепций организации интерфейсов АСУТП [102], предоставляемых для агентов взаимодействия, включая интеллектуальных. На рис. 2.7 предложен верхний уровень диаграммы вариантов использования ИСУ КРТП для трех ключевых агентов: оператора, инженера-наладчика и автоматизированного (интеллектуального) модуля вышестоящей системы управления – АСУПП.

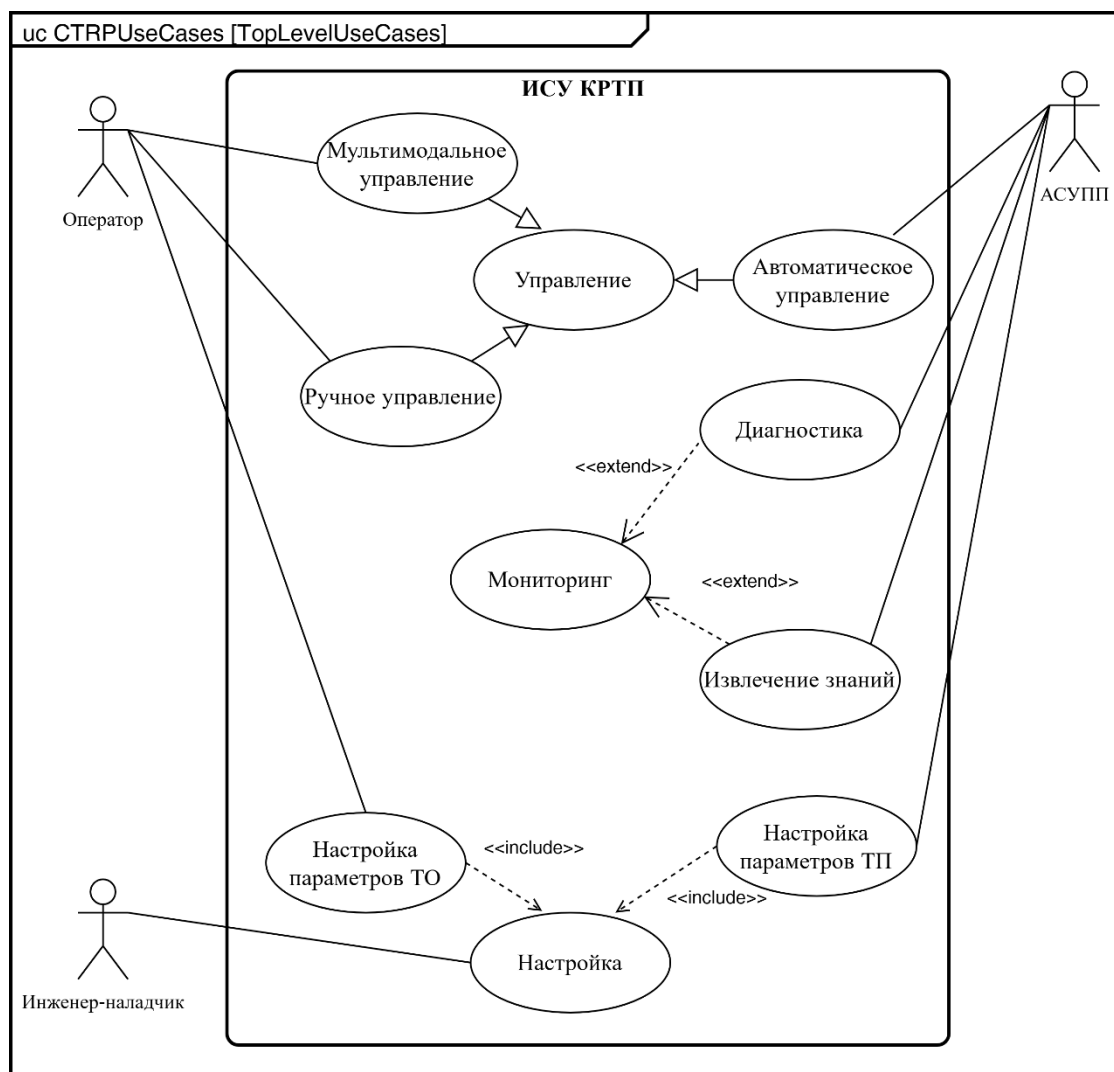


Рисунок 2.7 – Диаграмма вариантов использования ИСУ КРТП

В контексте функционирования КРТП оператор одновременно является и элементом КРТК, и внешним агентом. Помимо активных действий, например задания команд или инициации подпроцессов, выполняемых в роли внешнего агента, оператор также непреднамеренно влияет на организацию процессов управления в ИСУ (являясь объектом коллизии [161], фактором риска, нелинейным элементом в случае стабилизации или удержании изделия и т.п.).

Для оператора (в качестве внешнего агента) доступны три варианта использования: ручное управление, мультимодальное управление [57, 108, 127] и настройка локальных параметров выполняемых ТО.

Варианты использования ИСУ КРТП такие, как автоматическое управление, диагностика, извлечение знаний и настройка глобальных параметров ТП, доступны только для надсистемы АСУПП. Инженер-наладчик осуществляет структурную, параметрическую и функциональную настройку системы посредством предоставляемого ИСУ интерфейса.

С учетом результатов функционального анализа процессов авиастроительного предприятия, имеющего в своем составе роботизированное оборудование или потенциально подходящие для внедрения КРТП, и на основе математических, алгоритмических, теоретических и методологических предложений в гл. 3, 4 и 5 в целях спецификации ИСУ КРТП (см. гл. 6) предлагается оригинальная система требований (рис. 2.8, 2.9, 2.10) на языке системного моделирования SysML [314].

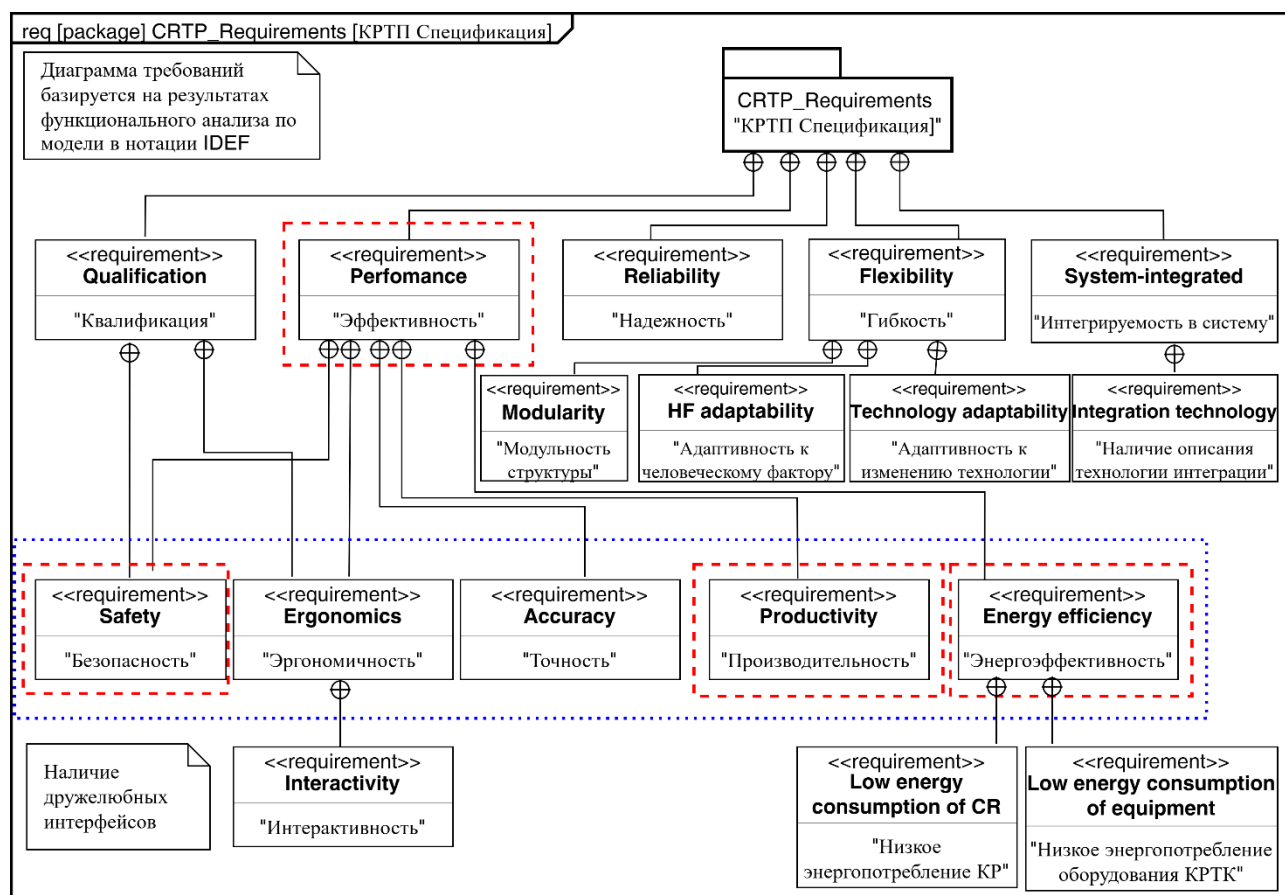


Рисунок 2.8 – Диаграмма требования спецификации ИСУ КРТП (первый фрагмент)
Диаграммы уточняют задачи оптимизации и управления в формате предъявления требований и определения необходимого функционала, формируя часть технического задания для проектирования ПАК для ИСУ КРТП:

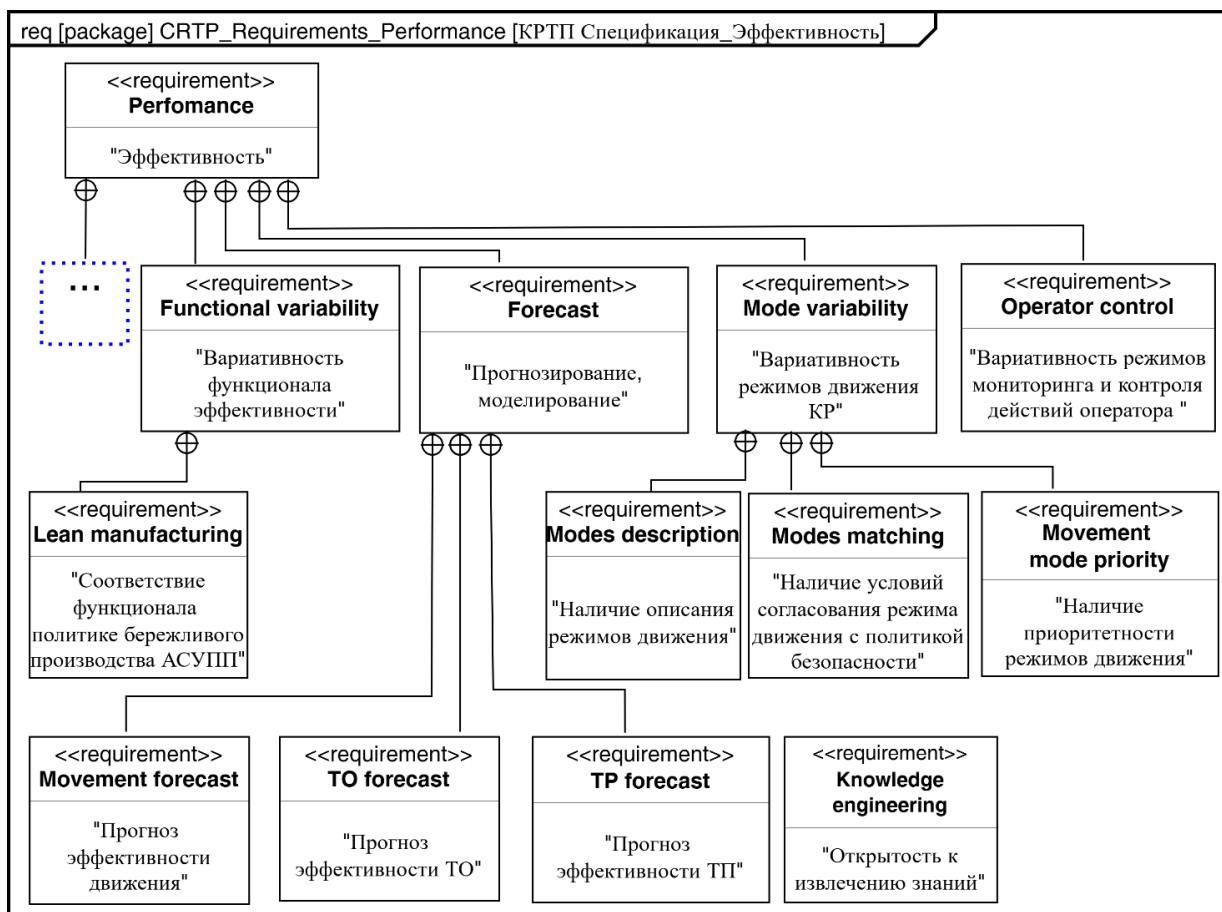


Рисунок 2.9 – Диаграмма требования спецификации ИСУ КРТП (второй фрагмент)

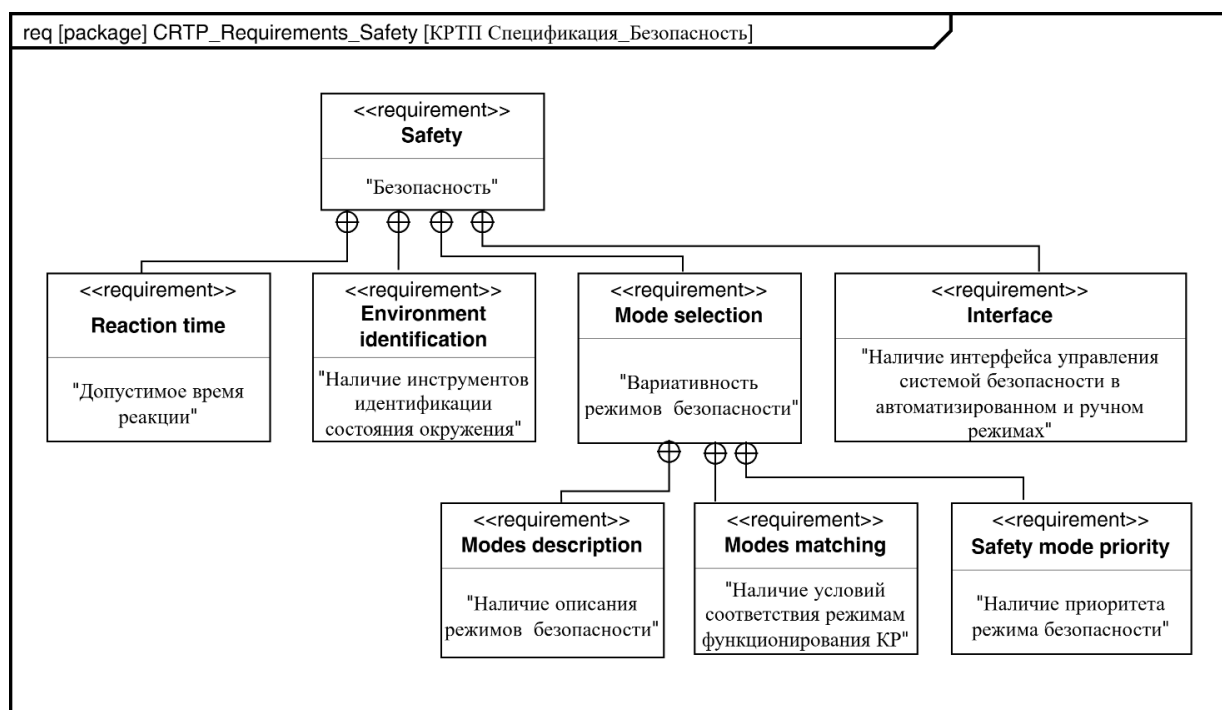


Рисунок 2.10 – Диаграмма требования спецификации ИСУ КРТП (третий фрагмент)

- квалификация системы, подтверждающая соответствия функционала системы основным государственным и стандартам предприятия по безопасности при работе с промышленным оборудованием, включая ПР и КР;

- эффективность системы, агрегирующая в соответствии с определенным функционалом качества (см. гл. 4) требования точности, производительности, энергоэффективности, вариативности функционала эффективности, вариативности режимов движения, мониторинга и контроля действий оператора, а также комплексного и детализированного моделирования (см. рис. 2.8 – 2.10);

- безопасность системы, поскольку оператор является неотъемлемой частью КРТП, функционирование системы для обеспечения его безопасности, будет сказываться на эффективности КРТП, поэтому требование по безопасности агрегируется не только требованием квалификации системы, но и требованием эффективности КРТП;

- надежность системы, согласно показателям теории надежности [31, 117];

- гибкость системы, агрегирующая требования наличия модульной структуры, согласно [16, 87], адаптивности к человеческому фактору (см. гл. 3) и изменению технологий производственных процессов, интегрирующих рассматриваемый КРТП;

интегрируемость, наличие возможности встроиться в АСУПП и вышестоящие производственные процессы промышленного предприятия [64], не снижая при этом ритм выпуска и другие значимые показатели эффективности производственного процесса.

В качестве базовых требований по спецификации ИСУ КРТП выделено пять позиций (см. рис. 2.8). Наличие требования обеспечения безопасности для оператора существенным образом ограничивает задачи оптимизации движений КР по технологическим показателям таких, как производительность и энергоэффективность (требования безопасности в основном реализуется через системы ограничений нелинейных решателей задач оптимизации (см. гл. 4, 5)). Это вызвано, во-первых, ограничением движения КР в ОП и сниженной динамикой в КП, во-вторых, ощутимыми затратами вычислительных ресурсов на работу механизмов идентификации состояния окружения (посредством мультимодальной сенсорики) и необходимостью переключения режимов безопасности согласно регламенту ТП (см. рис. 2.10). Малое время реакции системы, для обеспечения безопасности оператора и исключений коллизий с объектами рабочей зоны КР определяет новые повышенные требования к алгоритмам планирования и оптимизации движений (см. гл. 4, 5). Применение оператором согласно диаграмме вариантов использования (см. рис. 2.7) интерфейса мультимодального управления (требование диаграммы см. рис. 2.8) вместе с удобством и комфортом реализации задающих воздействий (посредством жестов, голоса, движений и т.п.) опять задействует вычислительные ресурсы и сокращает долю времени, выделяемого на планирование движений КР в общем доступном (установленном) времени реакции ИСУ КРТП. Помимо мультимодального управления, доступного для оператора, через интерфейсы автоматизированного управления вышестоящая АСУПП совместно с ИСУ КРТП или самостоятельно (см. рис. 2.7) должна формировать сигналы оповещения для оператора (напри-

мер, как в [111]) или его руководства в случае аномального поведения (см. гл. 3), а также блокировать КРТК в случае аварийных или опасных ситуаций.

Дополнительные связи и ограничения в задачу оптимизации движений КР и обеспечения эффективности КРТП вносит декомпозиция требований к ИСУ КРТП по энергоэффективности, агрегирующая требования по обеспечению энергоэффективности КР и остального оборудования КРТК.

Мощность потребителей электрической энергии оснащающего и дополнительного оборудования в рассматриваемом классе ТП, как правило, постоянна, либо дискретно варьируется в пределах задаваемых режимов (например, скоростных режимов шпинделя). Потребленная энергия при этом растет с увеличением времени функционирования, также, мощность СУЭП КР зависит от динамики движения, а потребляемая энергия не пропорциональна времени. Таким образом, для обеспечения общей энергоэффективности КРТП [342] требуется одновременный учет режима функционирования гетерогенных потребителей КРТК.

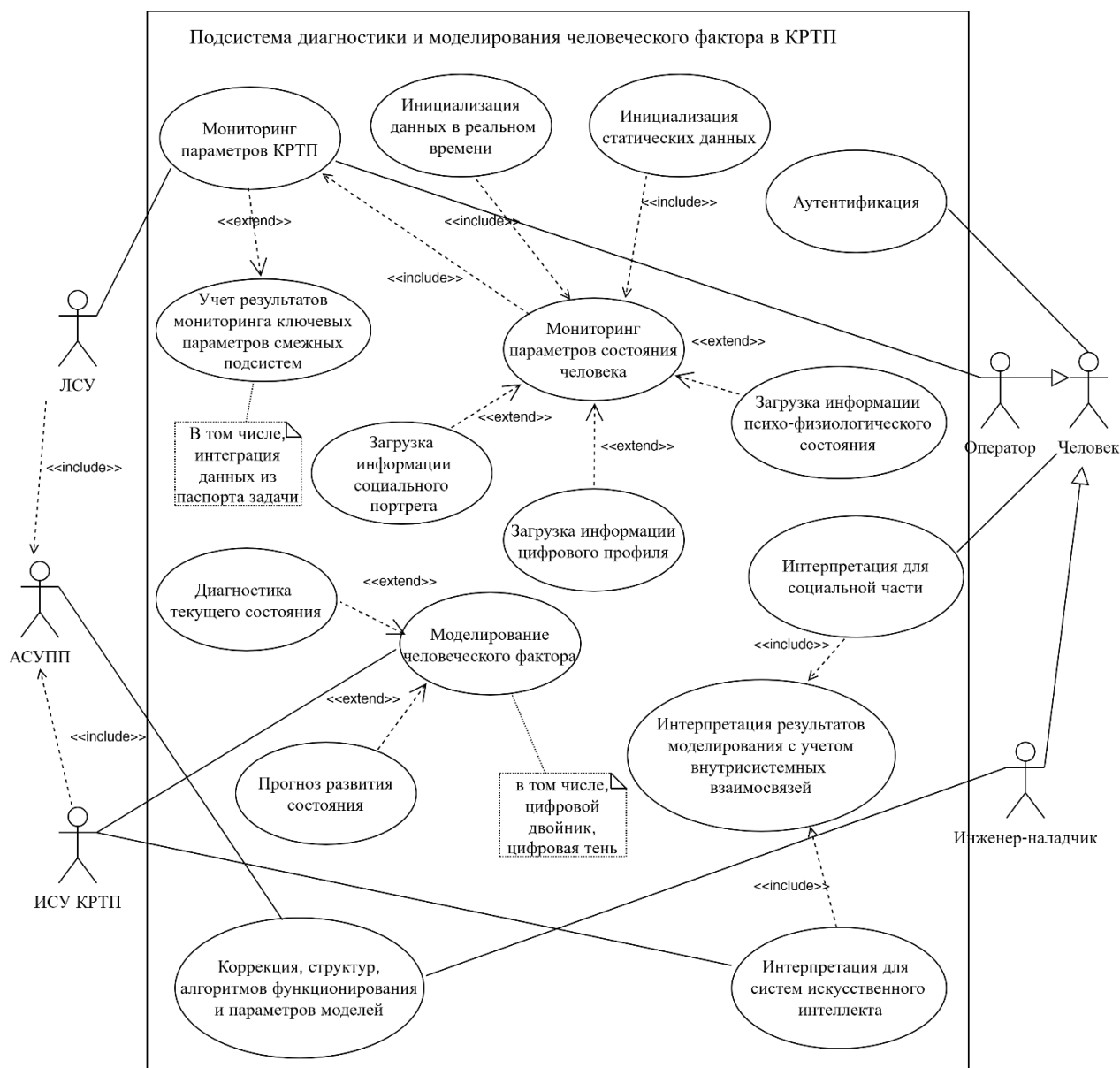
Детализация требования по отклонению точностных параметров движения КР представлены на расширенной диаграмме требований для РХ ТО в (см. рис. 2.3).

Важным в системе является требование обеспечения возможности моделирования и прогнозирования для поддержки различных функциональных алгоритмов, связанных с планированием и оптимизацией движений, выбора режимов и др. Комплекс моделей необходим для принятия управленческих решений на уровнях ТП, ТО и ЛСУ. Подробное математическое описание предлагаемых моделей представлено в (см. гл. 3).

Необходимо отметить, что функционирование КРТП в рамках ситуационного управления [118] должно предусматривать не только непосредственно процессы моделирования, но и выбор самих моделей из набора (полные нелинейные модели, линеаризованные модели, упрощенные модели, приближенные модели на базе нечеткой логики или нейронных сетей [108]). Такой выбор должен быть направлен на максимизацию установленного критерия эффективности, в котором важную роль, особенно при разрешении коллизий, играет время реакции ИСУ КРТП. Прогнозирование действий и поведения оператора предлагается осуществлять по модели, предложенной в гл. 3 согласно диаграмме вариантов использования (рис. 2.11).

В ответ на результат моделирования, диагностики и прогнозирования с учетом выбранного режима и определенной политики безопасности, а также в соответствии с установленным критерием эффективности должны быть выполнены процедуры планирования и оптимизации движения КР, реализующего часть ТО. Применение полного комплекса ограничений сразу в задаче оптимизации при планировании движения будет сопряжено с существенными временными затратами, поэтому к ИСУ КРТП в части обеспечения эффективности предлагается предъявлять требования по первичному выбору режима движения (см. рис. 2.9). Вариативность

режимов позволит сократить сложность оптимизационной задачи и обеспечить ее решение в установленные политикой безопасности или регламентом ТП сроки.



Анализ специфики производственных процессов авиастроительных производств [253], показал приоритетность критериев эффективности ТП, связанных с максимизацией ритма выпуска продукции и обеспечения максимальной производительности ТП, участков и отдельного оборудования при выполнении всех требований, предъявляемых к качеству продукции. Тогда для КРТП как класса роботизированного ТП критерий максимизации производительности (см. рис. 2.8) также является основным, но автоматически вступает в противоречие с показателями обеспечения безопасности, точности и энергоэффективности (см. прил. А). Если в некоторых

случаях критерий энергоэффективности можно игнорировать, хотя это и повлечет за собой противоречия в политики бережливого производства предприятия [253], то критерии обеспечения заданной точности и безопасности оператора в принципе проигнорированы быть не могут.

Становится очевидным, что в таких условиях планирование и оптимизация движений одним универсальным алгоритмом не представляется возможным, что предопределяет два дополнительных требования к ИСУ КРТП:

- наличие комплекса алгоритмов разрешения коллизий;
- наличие комплекса алгоритмов планирования и оптимизации движений.

Каждый из алгоритмов должен специализироваться для определенного класса ситуаций в рабочей зоне КР, режима функционирования или задания по ТО. Переключение между ними должно осуществляться в соответствии с технологическим методом выбора механизма планирования и оптимизации движения (см. гл. 5) с учетом характерного для текущей ситуации функционала эффективности части ТО (см. прил. А).

Возможность успешного функционирования технологического метода может быть достигнуто за счет принятия решения на основе прогноза с использованием библиотеки моделей с учетом предложенной в гл. 3 математической постановки задач оптимизации в специфике КРТП. Для сокращения времени реакции системы в расширенной диаграмме для ИСУ КРТП добавлено требование наличия механизмов сокращения пространства решений задач оптимизации, функционал, отвечающий этому требованию представлен в гл. 4. Техническая реализация технологического метода возможна за счет разработки специализированного ПАК, совместимого с ЛСУ КР (требование «ПАК реализации алгоритмов технологического метода»). Глобальная настройка параметров ИСУ КРТП средствами АСУПП или наладчика (см. рис. 2.7) должна быть реализована с учетом требования наличия системы загрузки метаданных.

Реализация всех установленных требований в ИСУ КРТП должна обеспечить повышение эффективности КРТП за счет управления движением КР для исполнения частей ТО в оптимизированных режимах с учетом выполнения регламента ТП.

Выводы

1) С учетом результатов анализа специфики ТП авиастроительных предприятий была разработана и формализована на языке системного моделирования SysML новая оригинальная структура требований к ИСУ КРТП, являющаяся фундаментальной основой для организации системного подхода к проектированию модулей комплексной автоматизации при организации коллаборативных роботизированных систем.

2) Выявленные в ходе исследования взаимосвязи требований и контекстные противоречия позволяют определить структуру ПАК, реализующего ИСУ КРТП.

2.3. Процессная модель оптимального проектирования КРТП в формате синергетической системы (IDEF0)

Автоматизация ТП современных промышленных предприятий играет ключевую роль в техническом и технологическом развитии их производственных мощностей [94], поддержании требуемого уровня качества выпускаемого продукта и формировании задела по выпуску перспективной продукции. Среди наиболее эффективных средств автоматизации промышленности являются механизмы автоматизации и интеллектуализации управляющих систем [359] и многофункциональные универсальные машины – промышленные КР [359]. Тогда как объединение представленных классов в единые системы – КРТК с ИСУ при должном уровне умений системных проектировщиков и архитекторов систем в рамках ТП с участием человека (оператора) может вызвать синергетический эффект, образуя СНС.

Регулярное создание СНС в различных ТП предприятия постепенно перестраивает организационно-техническую систему (ОТС) предприятия, повышая степень интеграции ее отдельных элементов, степень адаптивности используемых систем управления и технологий. Эффективный КРТП, интегрированный в вышестоящее АСУПП, успешно функционирующий как элемент ОТС, может существовать только при наличии ИСУ, поддерживаемых математическими моделями типа Digital Twin (DT) [3].

Сложность в построении эффективно функционирующих КРТП в формате СНС заключается в необходимости задействования значительного количества интеллектуальных ресурсов широкого спектра специалистов: технологов, технических специалистов, системных аналитиков, программистов, программных архитекторов и робототехников; наличия на предприятии информационной, технической, организационной и инновационной инфраструктуры, располагающей к внедрению такого рода систем; наличия понятной методологической базы последовательности действий и т.д. Эти трудности в большинстве случаев отталкивают стремление руководства отечественных предприятий к инвестированию создания таких систем в требуемом количестве. Поэтому с научной точки зрения видится целесообразным развитие теоретических и методологических основ процессов организации разработки инфраструктуры, способствующей синтезу и развитию СНС.

В работе предлагается оригинальная функциональная модель, отражающая ключевые процессы, информационные связи и материальные потоки ОТС, способствующие построению КРТП в формате СНС под управлением интеллектуальных систем на базе DT.

В прил. Б (см. рис. Б.1) представлен контекстный уровень А0 функциональной модели синтеза КРТП, обладающего синергетическими эффектами.

Как и было положено в поставленной цели моделирования процесса синтеза СНС, ключевым выходным потоком являются непосредственно информационная и материальная составляющие

СНС, т.е., как и было сказано ранее, КРТП на базе КРТК в совместном с человеком и КР рабочем пространстве под управлением ИСУ. Индикаторами эффективности процесса служат технико-экономические прогнозы, полученные на базе встроенных модулей ДТ [3, 156] КРТП. При этом полученные в ходе научных, инженерных и организационных работ по синтезу СНС генерируются дополнительные инновационные технологии, модели, алгоритмы и т.д., анализируются и при необходимости ими дополняются существующие БЗ и БД ОТС предприятия.

Механизмы реализации процесса А0 (см. прил. Б, рис. Б.1) на верхнем уровне абстракции представляются в виде целостной ОТС без детализации. В качестве входных информационных и материальных потоков, основываясь на классических теориях проектирования сложных систем [72], предлагается выделить: аппаратную составляющую в виде оборудования КРТК, включая встроенные ЛСУ; высокоуровневую программную составляющую: КИС предприятия, прототипы БД и БЗ, оболочки ПО, фреймворки, а также эскизы СНС и КФС; подсистему, отражающую человеческий фактор, экземпляры участников КРТП, а также их компетентностно-психологические портреты [17, 53], согласно представленной в гл. 3 диаграмме вариантов использования. При этом в обязательном порядке все процессы по созданию СНС должны протекать строго в соответствии с регламентами и нормами, определенными нормативной документацией предприятия. На основании исследования производственных процессов промышленных предприятий (например КнААЗ) (см. прил. В), был сформирован вывод о крайне высоком влиянии именно нормативной составляющей и возможности внесения в нее изменений на реализацию инновационных технологических мероприятий или мероприятий по модернизации технической и информационной составляющих основных производственных систем. Данная зависимость зачастую тормозит развитие ТП, имеющих потенциал модернизации и не требующих значительных затрат ресурсов технических систем. ТП остаются без изменений продолжительное время в силу невозможности согласования отдельных моментов в организационной компоненте ОТС в силу дезорганизации смежных управляющих систем. В предлагаемой модели уделено значительное внимание зависимостям, определенным организационной составляющей для актуализации внимания проектировщиком технологических и технических изменений на информационных потоках регламентирующих документов, а также отражении их содержательной структуры в модулях ЦД КРТП.

В прил. Б (см. рис. Б.2) представлена декомпозиция уровня А0 функциональной модели. Уровень А0 содержит:

- группу процессов А0-2, А0-3 и А0-4, непосредственно направленных на идентификацию структур, параметров и взаимосвязей модернизируемых ТП; моделирование модулей СНС и непосредственно синтез целостной СНС;

- процесс А0-5, направленный на внесение изменений в существующие и функционирующие внутри ОТС стабильные системы, процессы, информационные и технологические связи, директивы поведения отдельных сотрудников и коллективов;

- общий управляющий процесс А0-1, чаще всего являющийся элементом вышестоящих АСУП или АСУПП, имеющий информационную поддержку внутри КИС, и физически поддерживаемый профильным подразделением предприятия (например, управлением по развитию производства, отделом инновационного развития и т.п.).

При этом еще на начальных этапах функционирования модели (когда еще процессы А0-3, А0-4 и А0-5 не запущены) встроенные механизмы процесса управления А0-1 должны иметь представление (на основе информации, поставляемой процессом А0-2, и глобального задания) о системе критериев эффективности (см. гл. 4, 5) проектируемого КРТП, по которой можно будет оценить характеристики СНС и в последующем провести валидацию и верификацию ТП.

Процесс идентификации. В представленной модели процессу А0-2 отведена первостепенная роль, поскольку качество его функционирования определяет в принципе возможность успешного синтеза СНС. Выходной поток процесса «Информация об элементах существующих CPS и HS» (где HS – система управления персоналом) впоследствии служит основанием для формирования целого цикла управляющих процедур процесса А0-1 (см. прил. Б, рис. Б.3). Процесс идентификации и эскизного проектирования ТП должен максимально полно, достоверно, корректно, структурированно и системно описать техническую, технологическую, информационную, организационную и экономическую составляющие тех систем и процессов, которые ассоциируются с базой (основой) для создания нового или модернизируемого КРТП.

Функционирование процесса А0-2 заиклено с процессом А0-1 через своевременные управляющие потоки, выраженные в предоставляемых и постоянно уточняемых процедурах идентификации. В свою очередь, процесс А0-1 в своей деятельности руководствуется глобальным заданием, поставляемым из вышестоящих АСУПП и руководящих подразделений.

Результаты идентификации процесса А0-2, сопровождаемые актуальными аналитическими выводами, указаниями и процедурами, выработанными процессом А0-1, создают предпосылки для разработки в процессе А0-3 группы моделей, максимально описывающих подсистемы и функциональные связи разрабатываемого КРТП, в частности в гл. 3 представлены разработанные и модернизированные модели, наиболее востребованные при проектировании ДТ КРТП. Инструменты параметризации, структуризации, измерения и оценки, а равно и все возможности ОТС в целом образуют механизмы, позволяющие произвести идентификацию.

Детализированное функционирование процесса А0-2 представлено в прил. Б (см. рис. Б.4). Протоколы идентификации и оценки базовых групп элементов – технических систем, программных систем и социальных компонентов в обязательном порядке проходят процедуры

совместного анализа в задачах оценки полноты и непротиворечивости информации, качества оценки и определения возможности интеграции, а также степени совместимости элементов при дальнейшем построении моделей в процессе А0-3. В рамках функционирования процесса А2-2 непосредственно на местах решаются задачи модернизации, актуализации средств идентификации и диагностики, а также выполняются действия по адаптации модернизированных механизмов для повышения эффективности всего процесса А0-2.

Процесс моделирования. Процесс А0-3 «Моделирование и проектирование функциональных модулей СНС» детализирован и представлен в прил. Б (см. рис. Б.5). Задачи процесса заключается в выполнении комплекса действий, направленных на получение и постоянную актуализацию достоверных математических моделей, используемых в дальнейшем в процессе синтеза СНС в рамках КРТП, управления этими системами и оценки качества конечного продукта. Процесс генерирует комплекс моделей разного уровня проработки от концептуальных, отражающих ключевые вопросы тактического и стратегических уровней до компьютерных моделей – модулей ЦД, рабочих инструментов на оперативном уровне управления.

Согласно теории систем [72], принципов объектно-ориентированного проектирования [16, 87] и специфики рассматриваемых КРТП предлагается выделить 4 группы моделей, генерируемых внутри процесса А0-3, и необходимых для обеспечения возможности синтеза СНС в рамках КРТП.

1) группа концептуальных моделей:

- концептуальная модель;
- функциональная модель разработки КРТП как СНС;
- структурная модель КРТК и ИСУ КРТП;
- функциональная модель ТП, выступающего базой для модернизации или реализации на его основе КРТП [84];

- обобщенное описание класса процессов, к которым могут быть применены решения по автоматизации за счет КРТК;

- модель требований;
- модель вариантов использования;
- поле знаний предметной области, например в формате семантической сети;

2) группа моделей физических и технологических процессов

- дискретно-событийная модель КРТП;
- кинематическая модель КР;
- модели безопасности [108];
- модели динамики:

- линеаризованная модель СУЭП шарниров КР;

- нелинейная имитационная модель СУЭП взаимосвязанных шарниров КР (ШИМ, ПИД, вязкое и сухое трение, демпфирование, автономный источник питания);
- редуцированные модели энергопотребления, нечеткие, нейросетевые, для короткоходных и длинноходных движений [37, 94, 108];
- технико-экономическая модель [75];
- 3) *группа моделей элементов систем ПЛАК (на языках системного моделирования SysML/UML):*
 - структурные модели ПО (диаграмма классов, диаграмма компонентов (см. гл. 6);
 - модели поведения (алгоритмы (см. гл. 4, 5), диаграммы взаимодействия, диаграммы состояний (см. гл. 3));
 - модели архитектуры (диаграммы артефактов, диаграммы размещения, ROS система) (см. гл. 6) и [129];

4) *Группа моделей виртуальной реальности (ЦД)*

- элементы ЦД - 3D модель КРК с оператором и объектами рабочей зоны (см. гл. 3), [108];
- модель окружающей среды (Environment) для нейронных сетей – RL агентов [258];

Системный анализ результатов исследования предлагаемых моделей применительно к базовому ТП, относительно которого строится СНС, позволяет выделить систему критериев эффективности КРТП. Как правило, синергетический эффект от взаимодействия роботизированных устройств и оператора ТП может выражаться в увеличении производительности, снижении затрат ресурсов и повышении степени безопасности ТП. Подробнее постановка задач оптимизации и, соответственно, математическое описание функционала качества для предлагаемых КРТП представлено в гл. 4 и 5.

Функционирование процессов уровня А0-3 обеспечивается языками, средами и фреймворками моделирования, в частности в работе при проектировании моделей использовались:

- 1) среда математического моделирования Matlab со специализированными пакетами [298]:
 - Control System Toolbox для синтеза СУ;
 - Fuzzy Logic Toolbox для синтеза моделей и модулей управления на базе нечеткой логики;
 - Stateflow для синтеза ДСМ;
 - SimEvents для синтеза дискретных систем;
 - Robotics System Toolbox для синтеза систем управления и моделирования роботизированными устройствами;
 - ROS Toolbox для создания инфраструктуры управления элементами КРТК;
 - Reinforcement Learning Toolbox для синтеза агентов управления по технологии обучения с подкреплением;
 - Simulink Control Design для разработки и анализа СУ общего назначения;
 - Simscape для моделирования электромеханических систем;

- Simscape Multibody для имитационного моделирования механических систем;
 - Simscape Electrical для моделирования электрических систем;
 - MATLAB Coder для генерации кода на языках C/C++;
 - Optimization Toolbox для синтеза и исследования алгоритмов оптимизации;
 - Deep Learning Toolbox для синтеза нейронных сетей глубокого обучения;
 - Curve Fitting Toolbox для синтеза приближенных функций и другие.
- 2) языки и нотации графического моделирования IDEF, UML, SysML;
 - 3) среды симуляции Gazebo, Webots, операционная система ROS2;
 - 4) высокоуровневые языки программирования C/C++, Matlab, Python, KRL и другие.

Системное управление процессом моделирования должно обеспечивать целостное построение комплекса гетерогенных моделей (см. гл. 3) и достаточный уровень абстракции без потери требуемого уровня функциональности. Интеграционные связи между моделями должны поддерживаться за счет унифицированности интерфейсов, модульной архитектуры и приверженностью установленным стандартам предприятия. Процессы моделирования не должны завершаться даже по окончании процесса А0-4 «Синтез СНС», а должны продолжаться в рамках CALS системы [103, 134], поддерживающей созданный или модернизированный КРТП.

Последовательность построения комплекса моделей определена с учетом постепенного уточнения и детализации структур и параметров. Так в А0-3-2 в процессе унификации, структуризации, стандартизации первичной информации и концептуализации входящего потока информации о существующих элементах КФС и социальных системах синтезируются обобщенные структурные, функциональные модели и модели принципа действия, уточняются их глобальные параметры. Полученные и формализованные знания в А0-3-2 образуют поле знаний, направляемое на анализ и обработку в процессы А0-3-4 для запуска механизмов интеграции решений в общие АСУТП и АСУПП предприятия. Модели первого уровня абстракции, попадая в процессы А0-3-3, становятся основой для синтеза имитационных моделей элементов СНС КРТП, причем компьютерные реализации сопровождаются подготовленной документацией, в том числе графическими абстракциями на языке UML, описывающими программно-аппаратные решения. Полученные алгоритмы функционирования и управляющие программы (см. гл. 6) становятся основой построения прототипов отдельных модулей и элементов СНС. Деятельность процесса А0-3-3 обеспечивается за счет актуализированных и специфицированных инструментов математического моделирования, предоставляемых в формате механизма процессом А0-3-6. Стоит отметить, что процесс А0-3-6 предоставляет механизмы в виде специфицированных инструментов моделирования для всех процессов уровня А0-3 кроме А0-3-1, для которого формирует протоколы изменений в среде моделирования.

Постоянный мониторинг необходимости внесения коррекций в среды моделирования осуществляет процесс управления А0-3-1, который на основе мер по обеспечению оптимизации, задаваемых вышестоящими управляющими органами, формирует техническое задание на модернизацию и коррекцию сред моделирования. Изменения могут вноситься на разных уровнях вмешательства: отказа от существующих решений в пользу нового варианта, модернизации отдельных модулей ядра среды, добавление или модернизации пакетов расширения (Toolbox), добавления или модернизации отдельных модулей, классов, функций и сценариев. При этом механизм процесса А0-3-6 - ОТС должна обеспечивать возможность внесения таких изменений, ответственность за ее эффективность возлагается на профильные производственные процессы промышленного предприятия.

Процесс А0-3-6 «Эскизное проектирование элементов СНС» завершает последовательность моделирующих действий и предоставляет для процесса А0-4 модели подпроцессы и подсистемы поведения в виде регламента управления, а также отдельные эскизные модули ЦД поступающие на вход А0-4 для дальнейшей интеграции и модернизации.

Процесс синтеза СНС. Процесс А0-4 «Синтез синергетической системы» детализирован и представлен в прил. Б (см. рис. Б.6). Основное предназначение процесса заключается в выполнении комплекса действий, направленных на синтез КРТП под управлением интеллектуальной системы, работающей в едином пространстве с человеком (оператором), обученным и способным к эффективному взаимодействию с роботами в целях выполнения возложенных технологических задач. Немаловажным является необходимость интеграции полученного ТП и системы управления в ОТС предприятия на физическом уровне и на информационном уровне как модуля или функционала в рамках киберплатформы.

Вместе с новой СНС процесс А0-4 предоставляет средства интеграции СНС (технические, программные, технологические, нормативные и т.д.), а также дополнительные инновационные технологии, математические методы, модели и алгоритмы, полученные в ходе выполнения в рамках процесса научно-исследовательских задач. Особенностью разработки КРТП как элемента СНС является учет обязательного требования к обеспечению технико-экономической эффективности полученного процесса в рамках существующей производственной системы промышленного предприятия. Поэтому в формате информационного сопровождения предоставляется прогноз технико-экономического эффекта от внедрения КРТП и его оперативная технико-экономическая модель как дополнительный модуль к ДСМ (см. гл. 3).

Вместе с обеспечивающими и вспомогательными процессами А0-4-4, А0-4-5, А0-4-6, а также управляющим процессом А0-4-1 основные функции по созданию СНС выполняют процессы А0-4-2 – «Разработка метамодели организации взаимодействия физических и виртуальных агентов, параметризация и инициализация агентов» и А4-3 «Интеграция модулей PS, CS,

HS в единую систему и подключение к киберплатформе», где PS – аппаратная часть физических систем, CS – кибернетические системы.

Процесс разработки и модернизации модулей CPS и HS. Процесс A0-5 «Модернизация, доработка, наладка, ПО, АО, обучение и тренировка СО» детализирован и представлен в прил. Б (см. рис. Б.7). Основное предназначение процесса заключается в выполнении комплекса действий, направленных на разработку и модернизацию отдельных модулей и функционалов CPS и HS систем, из которых в процессе A0-4 за счет интеграции синтезируется СНС. Входными материальными и информационными потоками процесса A0-5 являются компоненты ОТС – составляющие разрабатываемого КРТП, в частности, ПО и АО, технологии, персонал, СУ, БЗ и базы данных и т.д. Управление процессом A0-5 осуществляется процессом A0-1, вырабатывающим задающие и регламентирующие инструкции.

Процессы A0-5-2, A0-5-3, A0-5-4, A0-5-5 содержат основной функционал по разработке и модернизации модулей, дифференциация задач выполнена по структурному принципу. Работы, связанные с персоналом и его компетентностью [31], оборудованием, алгоритмами и ПО, выполняются в отдельных подпроцессах; в то же время, идентификация и интеграция межсистемных связей осуществляются процессом A0-5-2, который через управляющие воздействия контролирует процессы с выделенным функционалом, обеспечивая сохранение в системах синергетических свойств.

Выводы по разделу

1) В ходе исследования, а именно работ по выявлению ключевых процессов, участвующих в создании СНС, ключевых информационных потоков и материальных объектов, предложена оригинальная функциональная модель процесса разработки СНС в формате нотации IDEF0. Отличительной чертой модели является ее специализация для задач синтеза СНС в КРТП, объединяющих в себе объекты нескольких перспективных научных областей исследования: КР, интеллектуальные системы, компьютерные модели технологии DT.

2) Несмотря на специализацию модели для области построения КРТК, представленный уровень абстракции позволяет рассмотреть функциональную модель через призму других, схожих классов ТП промышленных предприятий, тем самым формируя в виде предложенной модели элемент теоретических и методологических основ в задачах планирования процессов синтеза СНС.

2.4. Разработка подхода к интеллектуализации системы управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами

В работе предлагается подход к формированию структурно-функциональных моделей КРТК, оснащенного ИСУ с возможностью самообучения и дообучения в целях перспективной разработки мультимодальных адаптивных алгоритмов и методов управления поведением кол-

лаборативных робототехнических систем с учетом нештатных ситуаций и экстремальных условий в недетерминированной среде (на примере КР KUKA LBR IIWA 7).

При выполнении исследования были использованы базовые подходы теории управления и элементы математического метода векторно-матричного описания систем управления, методы системного анализа, в том числе методы структурной и функциональной декомпозиции. Элементы предложенных решений подтверждены на базе результатов эксперимента, выполненного на промышленном оборудовании фирмы KUKA Robotics.

Подход к интеллектуализации системы управления. На рис. 2.12 представлена структурная схема управления КФС в составе лица принимающего решения (ЛПР), ЛСУ КР, СУ КРТП (с библиотекой моделей поведения (БМ)) внутри АСУПП предприятия.

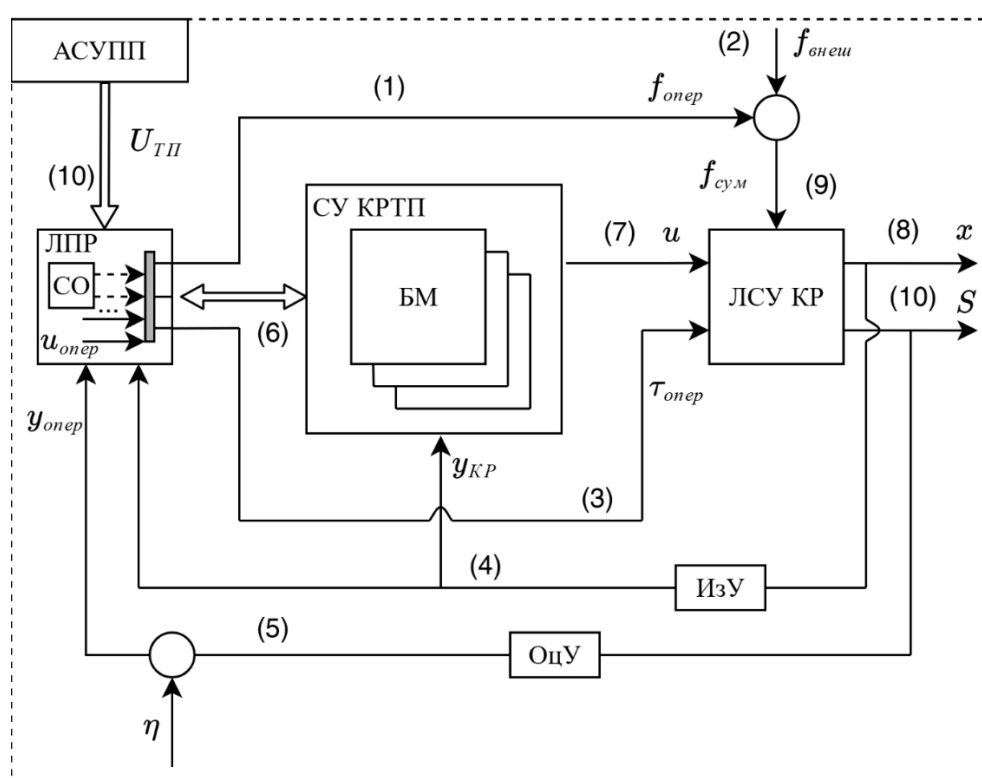


Рисунок 2.12 – Структурно-функциональная схема СУ КРТП; ИзУ – система измерительных устройств; ОцУ – система оценки; $U_{ТП}$ – массив задания

Типовая СУ КРТП работает в двух основных режимах:

- исполнения задач ТП;
- отладки ТП (отработки отдельных ТО или частей ТО, формирования программного кода, настройка стратегии реагирования на данные внутренней системы сенсорики КР).

Описание линейной части [277] системы управления КФС в укрупненном виде может представлено в следующем виде (детализация математического описания СУЭП КР представлено в гл. 4):

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B_{u_1} \cdot u(t) + B_{u_2} \cdot u_{\text{опер}}(t) + B_{M_1} \cdot f_{\text{опер}}(t) + B_{M_2} \cdot f_{\text{внеш}}(t) \\ y_{\text{КР}}(t) = C_{\text{ИзУ}} \cdot x(t) \\ y_{\text{опер}}(t) = C_{\text{ОцУ}} \cdot S(t) + \eta(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

где

- A – функциональная матрица состояния объекта (силовой части);

- B_{u_1}, B_{u_2} – матрицы управления;

- $x(t) = [x_1(t), x_2(t) \dots x_7(t)]^T$, $x_i(t) = \begin{bmatrix} \varphi_i \\ \omega_i \\ I_i \\ e_i \\ \vdots \end{bmatrix}$ – переменные состояния КР;

- B_{M_1}, B_{M_2} – матрицы возмущения;

- $u(t) = [u_1(t), u_2(t) \dots u_7(t)]^T$ – закон управления в виде информационного управляющего сигнала;

- $u_{\text{опер}}(t) = [u_{\text{опер}_1}(t), u_{\text{опер}_2}(t) \dots u_{\text{опер}_7}(t)]^T$ – закон управления, создающий крутящий момент $\tau_{\text{опер}}$ оператором в ходе реализации силомоментного управления;

- $f_{\text{опер}}(t) = [f_{\text{опер}_1}(t), f_{\text{опер}_2}(t) \dots f_{\text{опер}_7}(t)]^T$ – незапланированное, случайное силовое воздействие на звенья КР, оказываемое оператором;

- $f_{\text{внеш}}(t) = [f_{\text{внеш}_1}(t), f_{\text{внеш}_2}(t) \dots f_{\text{внеш}_7}(t)]^T$ – незапланированное, случайное силовое воздействие на звенья КР, вызванное как активными (движущимися) объектами рабочей зоны (например, посторонним человеком), так и в результате столкновения робота с пассивными объектами (к ним относятся все объекты коллизий рабочей зоны, например, стол, изделие, оснастка и т.п.);

- $u_{\text{КР}}(t)$ и $y_{\text{опер}}(t)$ – векторы измерений и оценивания значимых переменных состояния КР и переменных, отражающих расположение (геометрическое) ключевых точек КР в пространстве, соответственно;

- $C_{\text{ИзУ}}, C_{\text{ОцУ}}$ – матрицы измерения и оценивания соответственно;

- $S(t)$, – множество всех точек оболочки КР в пространстве в момент времени t ;

- $\eta(t)$ – вектор погрешности оценивания.

В соответствии с заданием, представляющим собой комплекс задач вышестоящей АСУПП, определяющим ТП, оператор (на схеме обозначен как ЛПР) (см. рис. 2.12) по каналу 6 в автоматическом или автоматизированном режиме выбирает предустановленную модель из библиотеки моделей (БМ), если таковая имеется, либо формирует новую. Модель включает в себя комплекс желаемых диапазонов и ограничений для движений КР (скоростные режимы, виды траекторий, критерии оптимизации, алгоритмы управления и оптимизации, уровни срабатывания системы внутренней сенсорики, алгоритмы реакции на сработку в случае возникновения сигнала 9 и т.п.).

Локальная система управления КР (ЛСУ КР) исполняет движения, определенные законами $u(t)$ (формируемыми СУ КРТП на базе БМ (канал 7) и $\tau_{\text{опер}}(t)$, задаваемым непосредственно ЛПР.

Значения переменных состояния $x(t)$ (канал 8) КР доступны и СУ КРТП, и ЛПР (канал 4). Кроме того, часть переменных состояния КР приближенно оценивается при помощи естественных органов чувств человека (зрения, осязания, слуха) по каналу 5 системы оценки. Данный вариант обратной связи, помимо мониторинга общего состояния процесса, используется при формировании/корректировке модели из БМ путем физического воздействия на КР (канал 3) и перемещения его в нужную точку с сохранением координат в модели. Внутренняя система сенсорики и алгоритмы реакции на сработку датчиков в БМ позволяют ЛСУ КР «компенсировать» возмущающие воздействия $f_{\text{сум}}$ в ограниченном диапазоне. Со стандартной комплектацией СУ КРТП реакция по возмущению происходит «по ошибке», встроенная система сенсоров не позволяет в оперативном режиме сформировать представление о препятствии в статике и тем более в динамике. Данные факты не позволяют СУ КРТП гарантировать восстановление траектории движения после появления возмущения. Кроме того, такая система, в которой роль устройства управления выполняет оператор, сложно поддается оптимизации, особенно в соответствии со сложной системой критериев, включающей одновременно производительность и энергоэффективность.

Также немаловажным фактором, снижающим эффективность СУ КРТП (см. рис. 2.12) является возможность формирования возмущения самим оператором (канал 1), причем как в режиме отладки процесса, так и в режиме исполнения.

Рассмотренные проблемы и ограничения, присущие стандартной СУ КРТП, которые представлены в большей части объема коллаборативных систем промышленных предприятий, не позволяют построить полноценную СНС [63] и организовать эффективное человеко-машинное взаимодействие в ТП с учетом нештатных ситуаций в недетерминированной среде.

Наиболее перспективным решением совершенствования СУ КРТП [189, 212] является добавление в типовую систему СУ КРТП (см. рис. 2.12) средств «очувствления» КР: расширенной (мультимодальной) системы сенсорики [357] и продвинутых интеллектуальных алгоритмов в составе распределенной системы анализа и управления [189]. Исследование направлено на синтез законов управления внутри СУ КРТП и на изменение значений переменных состояния не только ЛСУ КР, но и ЛПР, посредством формирования советов либо предписаний. При этом предлагается интерфейс ИСУ ассоциировать именно с ЛСУ КР, создавая тем самым иллюзию очувствления и одушевления КР [330].

Новый подход к управлению предлагается реализовать согласно разработанной структурно-функциональной схеме (рис. 2.13), которая расширяет схему (см. рис. 2.12) ИСУ в составе подсистемы сбора, распознавания и первичного анализа данных, подсистемы формирования

и в режиме рекомендации к действиям, например, в формате AR инструкции; также должен быть предусмотрен режим архивирования данных и предоставления их на вышестоящий уровень управления в целях контроля поведения оператора.

Благодаря внедрению ИСУ с внешней сенсорикой становятся доступны для сбора и анализа информации два канала – 11 и 12, определяющие геометрию физических объектов (оператора $S_{\text{опер}}$ и любых внешних недетерминированных объектов коллизий $S_{\text{внеш}}$), которые вызывают или могут в будущем создавать возмущающие воздействия $f_{\text{сум}}$. Модуль идентификации и детектирования предоставляет в ИМ массивы ключевых точек объектов, а также прогноз вектора их смещения, тем самым, позволяя ИМ с учетом знаний модели поведения ЛСУ КР и текущего состояния КР оперативно корректировать модель поведения ЛСУ КР либо осуществлять их переключение. Следовательно, в системе реализуется управление по прогнозу или в гибридном режиме: комбинация серий управляющих воздействий по ошибке и по прогнозу (в случае невозможности разрешения коллизий).

Кроме того, благодаря доступности канала 11 одновременно с архивом шаблонов действий оператора в ИМ представляется возможным выявлять аномалии в поведении оператора, контрпродуктивные, вызывающие возмущение $f_{\text{опер}}$ по каналу 1, определенные эмоциональной составляющей оператора. Таким образом, за счет взаимодействия МИД-ИМ-СВ может быть устранено либо существенно снижено влияние $f_{\text{опер}}$ путем устранения самого генератора возмущений по каналу 12 либо путем оперативной коррекции модели в ИСУ КРТП и формирование нового закона управления (канал 7), корректирующего состояние КР еще до момента сработки его штатной автоматической системы обеспечения безопасности.

Помимо решения задач разрешения коллизий, ИМ должен учитывать критерии эффективности функционирования ЛСУ КР, установленные в соответствующей модели в БМ, в том числе в рамках моделей повышения энергоэффективности и минимизации времени исполнения ТО. Детализированное описание комплекса моделей, алгоритмов и методов оптимизации и общий функционал ИСУ КРТП представлено в гл. 3, 4 и 5.

Выводы

1) Предложен оригинальный подход повышения эффективности КРТП, отличающийся от существующих возможностью интенсификации процесса прогнозирования сценариев течения ТО при формировании закона управления. Особенностью предлагаемого подхода является усиление интеграционных связей модулей интеллектуального анализа и оптимизации, позволяющих осуществлять мультимодальную обработку сенсорных данных и моделирование окружающей среды в режиме реального времени для прогнозирования действий человека, недетерминированных объектов коллизий и формирования актуального управляющего воздействия КР.

2) Предложены структурно функциональные решения, позволяющие сформировать стратегию повышения степени синергетического эффекта человеко-машинного взаимодействия. Разработана оригинальная концептуальная модель ИСУ КРТП, отличающаяся реализацией механизмов вариативности при формировании законов управления для ЛСУ КР. Эффект ожидается достичь за счет внедрения расширенной системы датчиков и аналитики, а также интеллектуального модуля формирования и оптимизации траектории движения КР при возмущающих воздействиях.

2.5. Структурный синтез коллаборативного роботизированного технологического комплекса и вспомогательных систем

Оригинальный подход к интеллектуализации промышленных КФС концептуально встраивает основные перспективные направления исследований, направленные на повышение эффективности КРТП. Оригинальную ИСУ КРТП предлагается реализовать на базе КРТК, концептуальная структурная схема которого представлена на рис. 2.14.

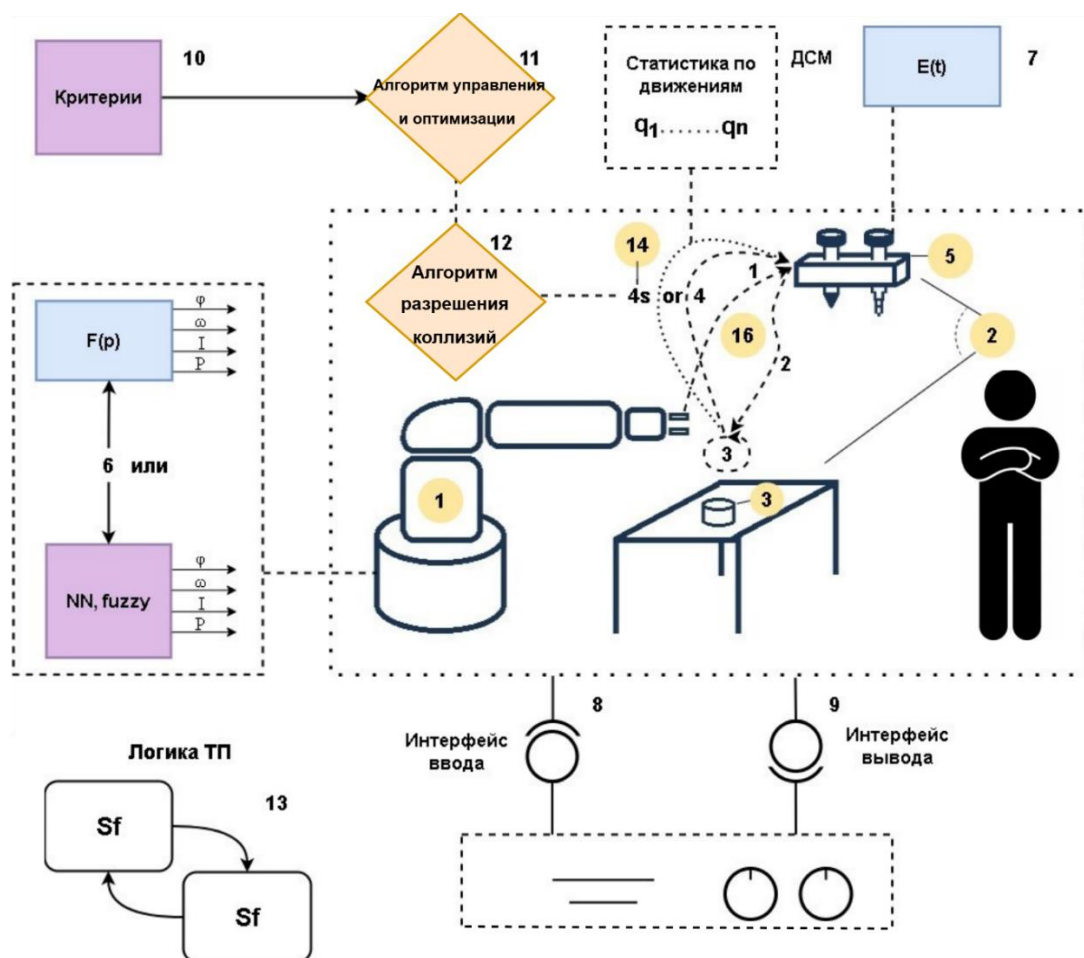


Рисунок 2.14 – Структурная схема КРТК

Библиотека моделей, выполняющих требуемые ИСУ расчеты и предоставляющих оператору интерпретацию и визуализацию результатов и/или прогнозов представлены в блоках 6 и 7. Модели функционируют на базе математического аппарата дифференциальных уравнений, не-

четкой логики и нейронных сетей, обеспечивают прогноз энергопотребления и времени исполнения ТО, служат основой для реализации оптимальных законов управления алгоритмами ИСУ и подробно рассмотрены в гл. 3. Блоки 1, 2, 3, 4 и 5 представляют собой ключевые элементы КРТК (1 – КР, 2 – инфраструктура рабочей области РТК, 3 – оператор, 4 – изделие либо его компоненты, 5 – инструмент. Блок 8 реализует интерфейс инициализации и оперативной корректировки программных элементов КРТК, соответственно интерфейс вывода 9 обеспечивает передачу всей необходимой информации как управляющим модулям ИСУ, так и оператору.

Помимо реализации органов управления с помощью интерфейса ввода в СУ задается комплекс команд (на естественном языке или псевдокоде), (см. гл. 3) отражающий программу ТП и выраженный в наборе предустановленных или требуемых движений 16.

Логика переключения режимов ТП и установка параметров состояний компонентов РТК предлагается реализовать на базе гибридных конечных автоматов (машин Мура и Мили) в блоке 13 (см. гл. 3). При этом архивация параметров каждой ТО реализована с помощью ДСМ блока 14, что позволяет создавать и актуализировать БЗ модулей оптимизации 11 ИСУ и библиотеки моделей (см. гл. 4), опирающихся на адаптивную систему критериев блока 10 (см. гл. 5). Прерывание предустановленной программы осуществляется в результате работы алгоритма определения факта и прогноза коллизий 12.

Информация для визуализации блоков 2 и 4 задается путем загрузки соответствующих моделей из САД системы, для визуализации блока 5 – из набора моделей инструментов КРТК [373]. Динамика позиции ЦТИ и звеньев КР определяется по известной кинематической схеме КР (см. гл. 3). В случаях сцепления или расцепления инструмента со схватом КР (идентифицируемым АСУ или в соответствии с информацией локализации инструмента по данным систем видеоаналитики [48]) используется расширенная кинематическая модель.

Если позиция объектов, визуализируемых блоками 2, 4 и 5 остается статичной либо сцепленной с локальной базой объектов 1 и 3, то сама позиция объектов 1 и 3 изменчива во времени, при этом оператор и КР являются объектами управления в задачах оптимизации РТП, решаемой ИСУ. Схема позволяет за счет эффекторных (предупреждающих для человека) и программных средств (управление КР) изменять отраженные в предустановленной программе траектории перемещения в соответствии с алгоритмом 11. Таким образом, адекватный расчет вектора ключевых переменных состояния и их отображение для объектов 1 и 3 является первостепенной задачей для синтеза и модернизации моделей.

При этом для блоков 1 и 3 вместе с движением должны быть реализованы процессы обеспечения его адекватности с точки зрения физических законов, для объекта 3 – в части обеспечения адекватности динамики движения при прогнозировании местоположения, для объекта 1 – в части обеспечения динамики движения при прогнозировании и при обеспечении динамики

движения КР в режиме функционирования модели в реальном времени, а также в части расчета временных и энергетических затрат, ограничений, накладываемых АО. Модель оператора 3 имеет в своем составе управляемую 3D-модель, функционирующую согласно кинематической схеме (см. гл. 3), учитывающей анатомию человека, структурно-функциональную схему, определяющую динамику перемещения звеньев модели оператора в условиях реального ТП, интерфейс управления моделью за счет задания углов поворотов сочленений, шаблонов поз или матриц однородного преобразования вида $T_0^n = [...]$, получаемых со средств видеоаналитики.

Конфигурирование геометрических моделей в пространстве осуществляется на основе модулей расчета прямой и обратной задачи кинематики по методу Денавита-Хартенберга в соответствии с предустановленной кинематической схемой КР. Совокупность моделей блока 1 позволяет получить исчерпывающую информацию о пространственных перемещениях.

Библиотека моделей блока 6, представляет собой ансамбль моделей, базирующихся на классическом аппарате систем дифференциальных уравнений, нечеткой логики, нейронных сетей и их гибридов. Переключение моделей позволяет поддерживать вариативность функционала качества оптимизации, например, высокая точность расчета и прогноза может быть обеспечена моделью на базе систем ДФУ, тогда как высокая скорость – средствами интеллектуальных модулей и суррогатных моделей. Кроме того, модели на базе интеллектуальных алгоритмов позволяют интегрировать в ИСУ на базе интеллектуальных модулей технологии адаптации, в частности RL, что позволяет повысить степень адаптивности ИСУ в нештатных ситуациях и экстремальных условиях.

В целом, предлагаемые решения по внедрению ИСУ КРТП направлены на обеспечение повышения производительности ТП за счет человеко-машинного взаимодействия, при этом обеспечивается требуемый уровень безопасности всех объектов рабочей зоны.

Выводы

1) Разработана концептуальная структура КРТК для реализации ИСУ КРТП, направленная на повышение производительности ТП за счет более эффективного человеко-машинного взаимодействия. Вариативность моделей, режимов, систем критериев и алгоритмов упрощает задачи оптимизации при планировании движений, что сокращает время реакции системы на прогнозируемое или существующее возмущающее воздействие.

Выводы по главе 2

С учетом систематизации существующих и полученных результатов научных исследований была разработана и формализована на языке системного моделирования новая оригинальная структура требований к ИСУ КРТП, являющаяся фундаментальной основой для организации системного подхода по проектированию модулей комплексной автоматизации при организации

коллаборативных роботизированных систем. Детализация требования была определена с учетом спецификации двух классов жестко и мягко ограниченных движений КР в КРТП, что в процессе автоматизированного планирования движений для реализации частей ТО позволяет определить актуальный функционал качества для постановки задач оптимизации и управления для каждой отдельной части ТО, что повышает эффект от оптимизационных процедур.

Анализ производственных систем, использующих КРТП или потенциально пригодных для их внедрения, позволил выделить ключевые иерархические и горизонтальные взаимосвязи, существенным образом сказывающиеся на эффективности как самого КРТП, так и агрегирующего его производственного процесса. На основе результатов анализа предложена оригинальная функциональная модель процесса разработки СНС на базе КРТП, являющаяся элементом теоретических и методологических основ в задачах планирования процессов синтеза высокоэффективных организационно-технологических систем.

Предложен оригинальный подход повышения эффективности КРТП, отличающийся от других существующих методов возможностью интенсификации процесса прогнозирования сценариев течения ТО при формировании закона управления. Особенностью предлагаемого подхода является усиление интеграционных связей модулей интеллектуального анализа и оптимизации, позволяющих осуществлять мультимодальную обработку сенсорных данных и моделирование окружающей среды в режиме реального времени для прогнозирования действий человека, недетерминированных объектов коллизий и формирования актуального управляющего воздействия КР. Подход опирается на структурно функциональные решения, позволяющие сформировать стратегию повышения степени синергетического эффекта человеко-машинного взаимодействия, в частности, на концептуальную модель ИСУ КРТП, отличающуюся реализацией механизмов вариативности при формировании законов управления для ЛСУ КР.

Глава 3. Разработка математического обеспечения ИСУ (АСУ) коллаборативными роботизированными технологическими процессами

В главе представлен разработанный комплекс оригинальных математических моделей для трех уровней управления: управления ТП, управления планированием и исполнением ТО и управления локальной системой управления (СУЭП КР). Комплекс моделей объединен в многоуровневую математическую модель КРТП как объекта управления, учитывающую технологические особенности функционирования КР и человека в одной рабочей зоне при различных сценариях недетерминированной среды, типах ТО и режимах управления.

В основе предлагаемого комплекса модели лежат концепция, принципы и подходы идентификации ТП (полученные в качестве научных результатов (см. гл. 2)), специфичные для процессов функционирования КР и человека в совместной рабочей зоне в условиях производства промышленного предприятия. Основным предназначением комплекса моделей, помимо функционала по идентификации и формализации КРТП, является формирование базы для функционирования разработанных и предложенных в последующих главах методов, алгоритмов и элементов ПО, а также проведение численных экспериментов, в том числе по апробации алгоритмических и программных решений для планирования и оптимизации движений КР в КРТП механообработки, позиционирования, окрашивания и других процессах общего назначения.

3.1 Дискретно-событийная модель коллаборативного роботизированного технологического процесса

Согласно результатам исследования, представленным в гл. 2, разработка КРТП в формате СНС должна сопровождаться проектированием имитационных моделей. Функционал имитационных моделей задействован в системах управления КРТК при формировании требуемого закона управления, в том числе в задачах оптимизации (см. гл. 4). Учитывая комплексность задач по разработке ИСУ КРТП, оправданным решением является применение иерархического подхода проектирования моделей, интегрируемых в единую структуру и коррелирующих с уровнями автоматизации комплекса (ЛСУ, АСУТП).

Принимая во внимание необходимость бесшовной интеграции предлагаемых решений в АСУП предприятия, верхний уровень структуры модели КРТК должен обеспечивать функционал как ручной параметризации ключевых переменных, ЛПР вышестоящего уровня (должностным лицом, курирующим процесс производства, либо АСУТП, или функциональным модулем АСУПП), так и автоматической параметризации встроенными модулями оптимизации и интеллектуализации. Бесшовная интеграция модулей АСУТП, а также их актуализация, тестирова-

ние, отладка возможна только при наличии центральной модели –платформы ТП, объединяющей модели локальных АСУ и отдельных подсистем.

Для этих целей в ходе исследования автором предлагается исполнение обобщенной модели верхнего уровня РТП механообработки в обобщенном виде в формате дискретно-событийных абстракций [30, 340, 259]. Данный формат представления хорошо себя зарекомендовал при моделировании производственных процессов за счет акцентировании внимания на наиболее значимых структурах и параметрах, но при этом обеспечивая возможность постепенной детализации и актуализации отдельных модулей, в частности моделей ЛСУ. Этот факт является крайне важным, поскольку ТП на базе КРТК структурно и параметрически не стабильны во времени, что влечет за собой необходимость постоянной модернизации его АСУ.

Модель-платформа представляет собой элемент ЦД, включает в себя компоненты имитации исполнения ТО, интеграции АО и ПО, коммуникации и маршрутизации информационных и материальных потоков; позволяет инициировать процессы управления, диагностики, мониторинга и прогнозирования. Концептуальная структура ДСМ представлена на рис. 3.1. Модель включает три контура управления: управление задачами (управление ТО), управление комплексом подзадач (управлением частями ТО), управление движением (управление ТПд и ВП).

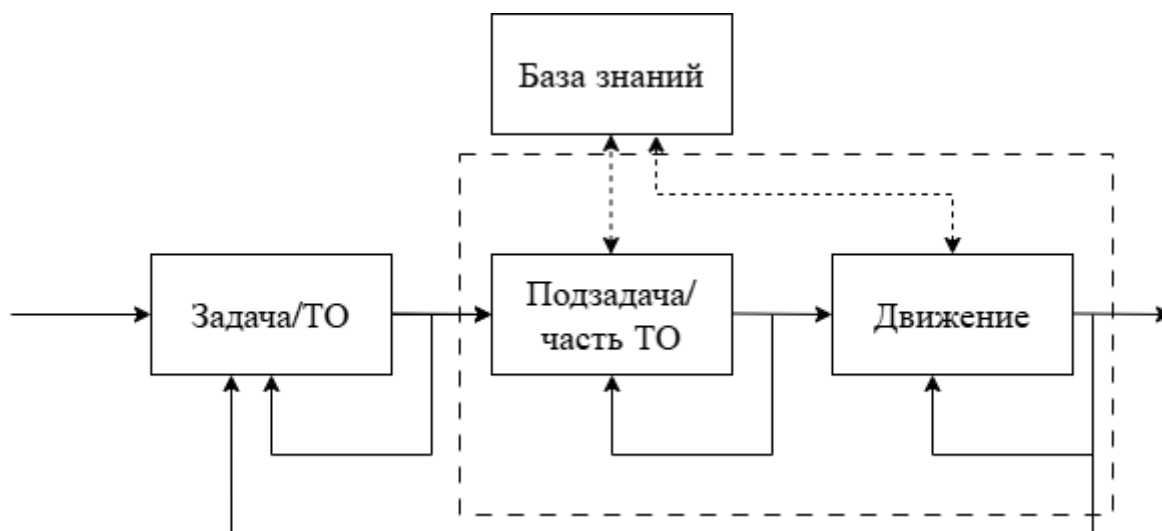


Рисунок 3.1 – Концептуальная структура ДСМ

Спецификация ТО формируется вышестоящей АСУТП, исходя из документации по соответствующему ТП. Необходимо отметить, что структурно элементы БЗ не ограничиваются только одноименным блоком, а также содержатся внутри контуров управления ТО, частями ТО и движением.

Детализированная структура ДСМ, построенной в пакете SimEvents среды Matlab, представлена на рис. 3.2, интерфейсы ввода-вывода разработаны в формате заполняемых вручную или автоматически диалоговых окон и на схеме не представлены.

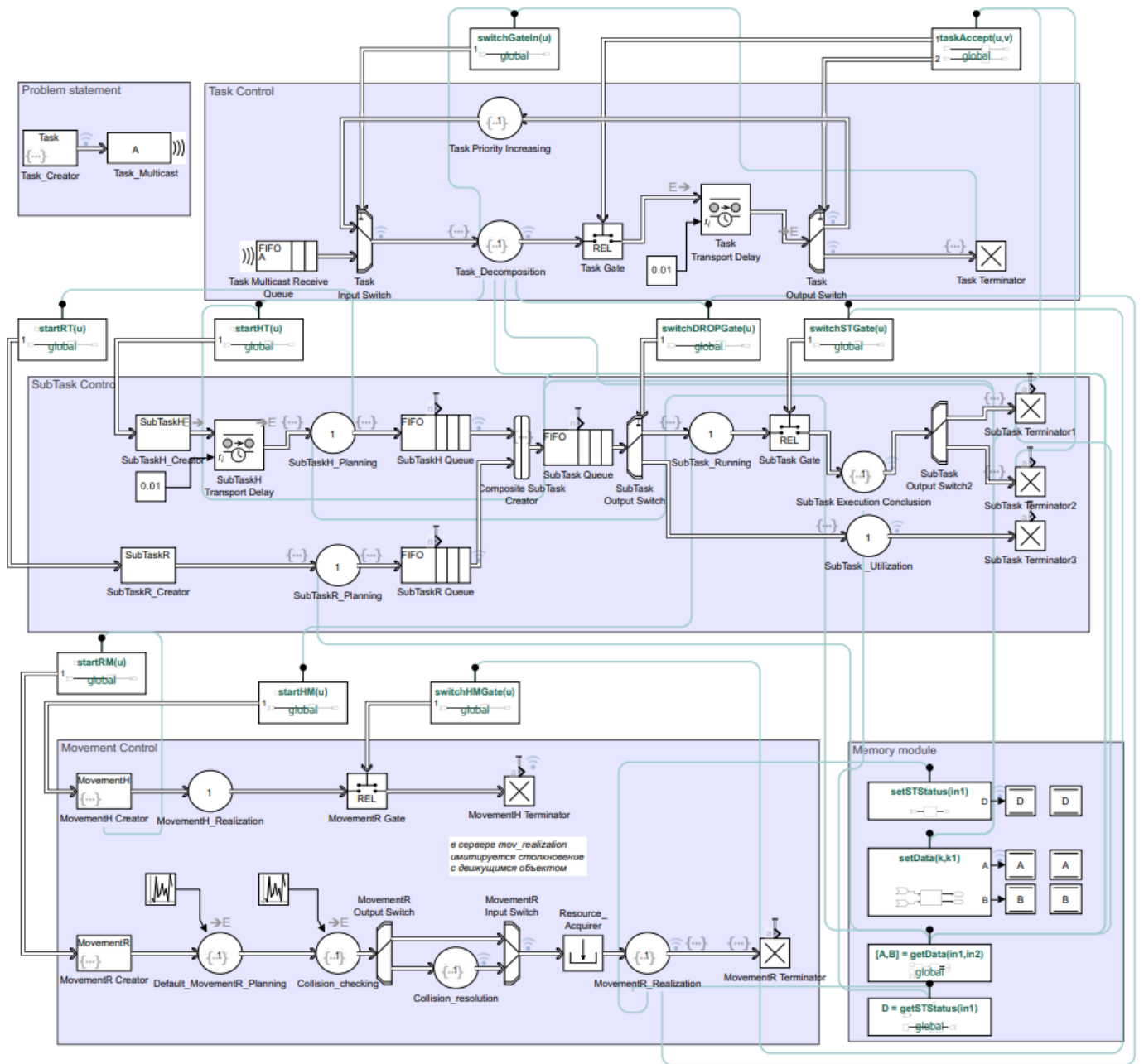


Рисунок 3.2 – Структура дискретно-событийной модели

Представленная модель, выступая как интеграционная платформа для всех остальных моделей и программных модулей ПО КРТК, обладает широким функционалом, по сути, предоставляя интерфейсы ввода/вывода по всему комплексу элементов ПО. Среди прочего модель обеспечивает техническое управление режимами работы планировщика движений (см. гл. 6), решающего поставленные в гл. 4 задачи оптимизации.

Вышестоящей АСУ план ТП представляется в виде набора задач

$$TPP = \{T_1, T_2, \dots, T_n\} \equiv \{T_i\}_{i=1}^n. \quad (3.1)$$

В контуре управления задачами (см. рис. 3.1) каждой задаче T_i из множества TPP ставится в соответствие единственная TO TO_j из множества $TO = \{TO_1, TO_2, \dots, TO_m\}$:

$$\varphi(T_i) = TO_j, \quad T_i \in TPP, \quad TO_j \in TO, \quad (3.2)$$

где φ — отображение, ставящее в соответствие каждой задаче технологическую операцию.

Формализация становится возможной благодаря совместному функционалу оператора и инструментов интеллектуальной поддержки, выполняющих технический анализ сопровождающей документации и общих критериев эффективности, заданных по ТП.

Далее каждая задача T_i из множества TPP разбивается на упорядоченный набор подзадач:

$$T_i = \{ST_{i1}, ST_{i2}, \dots, ST_{ik}\}, k \geq 1, \quad (3.3)$$

где $ST = \{ST_1, ST_2, \dots, ST_k\}$ — множество подзадач, т.е. представляется как упорядоченная последовательность

$$T_i = (ST_{i1}) \rightarrow (ST_{i2}) \rightarrow \dots \rightarrow (ST_{ik}), \quad (3.4)$$

и отправляется во второй контур управления, в котором каждой подзадаче ST_{ij} с учетом знаний формализации соответствующей ТО ставится в соответствие часть ТО P_q^{TO} из ограниченного множества $P^{TO} = \{P_1^{TO}, P_2^{TO}, \dots, P_l^{TO}\}$.

Здесь каждый элемент может быть (см. гл. 2) либо ВП (P_{add}^{TO}), либо частью ТПд – ВХ (P_{am}^{TO}) (additional move) или – РХ (P_{wm}^{TO}) (work move):

$$\psi(ST_{ij}) = P_q^{TO}, ST_{ij} \in ST, \quad P_q^{TO} \in P^{TO}, \quad (3.5)$$

где ψ — отображение, определяющее соответствие между подзадачей и частью ТО. При этом каждой подзадаче ST_{ij} соответствует ровно одна часть ТО P_q^{TO} :

$$\forall ST_{ij} \in ST \quad \exists! P_q^{TO} \in P^{TO} \mid \psi(ST_{ij}) = P_q^{TO}. \quad (3.6)$$

Для каждой части ТО в соответствии с выбранными установками планирования устанавливается вектор параметров:

$$p_{ij} = (p_{ij}^{(1)}, p_{ij}^{(2)}, \dots, p_{ij}^{(L)}), \quad (3.7)$$

где: L — количество параметров для части ТО, реализующей подзадачу (фиксировано или варьируется); p_{ij}^k — значение k -го параметра части ТО P_q^{TO} . Набор возможных параметров представлен в гл. 2, программные решения по параметризации частей ТО представлены в гл. 4 и 5.

Необходимо отметить, что модель второго контура управления (см. рис. 3.2) содержит два синхронных канала планирования подзадач и частей ТО отдельно для оператора и отдельно для КР. При этом планирование подзадач для оператора осуществляется им самим при поддержки интеллектуальных средств.

Подзадача, формализованная в виде части ТО, блокируется во втором контуре управления SubTask Control (см. рис. 3.2), как и соответствующая задача в контуре TaskControl (см. рис. 3.2), до тех пор, пока в контуре Movement Control (см. рис. 3.2) не будет выполнено планирование, оптимизация, коррекция и реализация производного движения КР совместно с оператором, либо не установлен факт невозможности нахождения решения в виде движения для части ТО. Если не найдено

ни одного движения по выполнению части ТО, соответствующая часть ТО и подзадача снимаются (аннулируются), все последующие подзадачи также аннулируются, а текущая задача пересматривается в контуре TaskControl с учетом выполненных подзадач, если таковые имеются.

Описание элементов ДСМ (см. рис. 3.2) представлено в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Краткая характеристика основных элементов ДСМ

Наименование элемента	Краткое описание, функционал компонентов модели	Группа компонентов ПО, коррелирующая с элементом ДСМ
Problem statement	Субмодель. Моделирование процесса постановки задач в рамках ТП вышестоящей АСУ	–
Task Control	Субмодель. Моделирование процесса формализации задачи в виде ТО.	–
SubTask Control	Субмодель. Моделирование процесса декомпозиции задач на подзадачи и их формализации в виде частей ТО	–
Movement Control	Субмодель. Моделирование процесса, планирования, коррекции, оптимизации и управления движением КР и оператора	–
Memory module	Фрагмент БЗ. Обеспечение функционирования встроенных алгоритмов управления и оптимизации	–
Task Multicast Receive Queue	Очередь. Получение задачи из вышестоящей АСУ, управление ею (хранение в упорядоченной по приоритетности очереди)	–
Task Input Switch	Логический элемент. Обеспечение приоритетности поступления задач на обработку в сервер Task_Decomposition	<i>switchGateIn(u)</i> – управляющая функция
Task_Decomposition	Сервер. Построение структуры подзадач. Взаимодействие БЗ. Инициация процессов генерации частей ТО для подзадач в субмодели SubTask Control	• <i>switchGateIn(u)</i> – управляющая функция для элемента Task Input Switch; • <i>startHT(1)</i> – управляющая функция для запуска SubTaskH_Creator; • <i>switchDROPEGate(1)</i> – управление элементом SubTaskOutput Switch; • процедура, имитирующая процессы создания структуры декомпозиции.
Task Output Switch, Task Gate, Task Transport Delay	Группа элементов. Сортировка задач по статусу, отражающий факт выполнения или срыва	<i>taskAccept(u,v)</i> – управляющая функция
Task Terminator	Компонент. Утилизация выполненных задач, трансляция полученной статистики в вышестоящую АСУ	<i>switchGateIn(u)</i> – управляющая функция

Продолжение таблицы 3.1

Наименование элемента	Краткое описание, функционал компонентов модели	Группа компонентов ПО, коррелирующая с элементом ДСМ
Task Priority Increasing	Сервер. Коррекция остановленной задачи из-за неисполнения локальных подзадач	–
SubTaskH_Creator, SubTaskR_Creator	Генератор. Инициализация первичными параметрами частей ТО для реализации поставленных подзадач для оператора (H) и КР (R) соответственно	–
SubTaskH_Planning	Сервер. Формализация части ТО для оператора	<i>startRT(1)</i> – управляющая функция для запуска по событию элемента SubTaskR_Creator;
SubTaskR_Planning	Сервер. Формализация части ТО для КР с учетом формализованной части ТО для оператора	<i>startRT(1)</i> – управляющая функция для запуска по событию элемента SubTaskR_Creator;
SubTaskH Queue, SubTaskR Queue, Composite SubTask Creator, SubTask Queue	Группа элементов. Формализация, сортировка и хранение составной части ТО, включающей пару частей ТО – оператора и КР	–
SubTask Output Switch	Логический элемент. Маршрутизация подзадач (частей ТО). Варианты маршрутов – завершение в связи с выполнением, в связи с невозможностью исполнения и утилизация в связи с невозможностью реализации предыдущих в последовательности подзадач.	<i>switchDROPGate(u)</i> – управляющая функция
SubTask_Running	Сервер. Пауза продвижения подзадачи в субмодели SubTask Control, связанная с функционированием контура Movement Control по исполнению части ТО соответствующей подзадачи; запуск процедур планирования движения в субмодели Movement Control	<i>startHM(1)</i> – управляющая функция для запуска по событию элемента MovementR_Creator;
SubTask Gate	Логический элемент. Шлюз, открывающий возможность продвижение подзадачи	<i>switchSTGate(u)</i> – управляющая функция
SubTask Execution Conclusion	Сервер. Присвоение статуса подзадаче по результатам нахождения или невозможности нахождения решения (движения КР) в субмодели Movement Control	–
SubTask_Utilization	Сервер. Присвоения статуса подзадаче в связи с фактом невыполнения предыдущей.	–
SubTask Output Switch2	Логический элемент. Маршрутизация подзадач (частей ТО). Варианты маршрутов – завершение в связи с выполнением, в связи с невозможностью исполнения	переключение портов по атрибуту <i>entity.E2.Status</i>

Окончание таблицы 3.1

Наименование элемента	Краткое описание, функционал компонентов модели	Группа компонентов ПО, коррелирующая с элементом ДСМ
SubTask Terminator (1-3)	Компоненты. Утилизация подзадач, трансляция статистики для доступа через интерфейсы вывода модели: для незавершенных подзадач – (1), завершенных подзадач – (2) и отмененных подзадач (3)	$taskAccept(u,v)$ – управляющая функция для элементов (1) и (2)
MovementH_Creator, MovementR_Creator	Генератор. Инициализация первичными параметрами проекта движения для реализации спроектированных частей ТО для оператора (H) и КР (R) соответственно	$startRM(l)$ – управляющая функция, вызываемая в генераторе MovementH_Creator для запуска генератора MovementR_Creator
MovementH_Realization	Сервер. Реализация оператором части ТО, выполнение движений	–
MovementR Gate	Логический элемент. Шлюз, открывающий возможность продвижение абстракции движения по факту синхронного завершения движения КР.	$switchHMGate(u)$ – управляющая функция
MovementH Terminator	Компонент. Утилизация абстракции выполненного движения оператором, трансляция полученной статистики для доступа через интерфейсы вывода модели	–
Default_MovementR_Planning	Сервер. Планирование движения КР по требуемой части ТО. Движение (по умолчанию) планируется в соответствии с предустановленными параметрами, характерными для текущей части ТО. Также выполняются задачи оптимизации	Соответствующее ПО представлено в гл. 4
Collision_checking	Сервер. Прогнозирование коллизий	ПО представлено в гл. 5
MovementR Output Switch, MovementR Input Switch	Группа логических элементов. Маршрутизация абстракции движения по результатам прогноза возникновения коллизий	–
Collision_resolution	Сервер. Разрешение коллизий одним из предложенных алгоритмов в зависимости от класса пространства (редуцированное или полное). Оповещение контура 2 для завершения обработки соответствующей подзадачи	Соответствующее ПО для алгоритмов manCOMP, manRRT, basePoints, PTS, RLOS представлено в гл. 5; $switchDROPGate(u)$ – управляющая функция
MovementR_Realization	Сервер. Реализация движения, ожидание информации от ЛСУ о факте успешного завершения движения или аварийной остановки	–
MovementR Terminator	Компонент. Утилизация абстракции выполненного движения КР, трансляция полученной статистики для доступа через интерфейсы вывода модели	$switchSTGate(l)$; $switchHMGate(l)$; – управляющие функции
Resource_Acquirer	Компонент. Выделение ресурсов на реализацию движения (фиксация затрат электрической энергии)	–

Первоначально планирование движения КР происходит в сервере Default_MovementR_Planning, где с учетом требований по заданной части ТО P_q^{TO} и ее параметров p_{ij} выполняется последовательная серия действий:

- 1) уточнение параметров части ТО и формирование ограничений рабочих и вспомогательных зон, а также предустановленных положений с использованием модели State flow;
- 2) классификация ОП и КП на предмет возможности решения последующих задач планирования и оптимизации в РДП;
- 3) поиск пути движения;
- 4) определение возможных форм траекторий для ЦТИ в ОП, выбор наилучшей формы траектории;
- 5) на базе кинематической модели и модели динамики КР получение математического описания движения одним из рассмотренных в гл. 4, 5 методов расчета (в частности, через решения ОЗК или инерциальный); расчет движения может быть осуществлен одной из предложенных в гл. 6 функций: пользовательских $PTP(...)$, $LIN(...)$; $CIRC(...)$, $trajSmooth(...)$;
- 6) выполнение процедур оптимизации движения согласно одному из трех критериев оптимизации (представленных в гл. 4) – по быстродействию, по энергосбережению или по минимизации времени расчета движения, т.е. $\min_x J_k(x)$, $k \in \{1,2,3\}$; для критерия энергосбережения оптимизация может быть выполнена на основе одной из предложенных моделей энергопотребления: нелинейной модели энергопотребления СУЭП (см. разд. 3.3), нечеткой или нейронечеткой модели энергопотребления (см. разд. 3.4); решение задачи может быть выполнено одним из предложенных в гл. 4 и 5 алгоритмом, в том числе на базе RL-агентов;
- 7) интерполяция и сглаживание (гл. 3);
- 8) формирование итогового закона управления в виде $\varphi_s(t)$ с учетом шага интегрирования контроллера КР.

После выполнения последовательности действий спланированное движение в сервере Collision_checking проходит проверку на наличие коллизий с объектами рабочей зоны. Если коллизии отсутствуют, то полученный закон управления отправляется в ЛСУ КР, и робот начинает движение по исполнению P_q^{TO} . Если коллизии связаны с оператором, то с помощью системы оповещения совершаются попытки воздействия на человека с целью изменения его пространственного расположения в рабочей зоне. Если изменить положение оператора не представляется возможным, то в сервере Collision_resolution происходит процесс итерационного перепланирования движения. Аналогичным образом осуществляется перепланирование, если первоначальный прогноз коллизий связан с прочими объектами рабочей зоны (оснасткой, инструментом, позиционером и т.п.).

Реагирование на факт прогнозирования коллизий для движения, реализующего часть ТО, в случае невозможности разрешения коллизии организационными способами имитируется в элементе DCM – сервере Collision_resolution, содержащим полный функционал всех представленных в работе методов и алгоритмов разрешения коллизий (гл. 5), в том числе RRT, CHOMP, PTS, RLOS, multyALG. При этом основными критериями оптимизации для движений становятся четвертый или пятый критерий оптимизации (гл. 4) – безопасность или безопасность с прогнозом, т.е. $\min_x J_k(x)$, $k \in \{4,5\}$, а также цепочки последовательности критерия из второй группы $\{4,5\}$ и критерия из первой группы $\{1,2,3\}$, т.е. нахождения $\hat{x}$:

$$x^* = \min_x J_{k_1}(x), \quad k_1 = \{4,5\} \quad (3.8)$$

$$\hat{x} = \min_x J_{k_2}(x^*), \quad k_2 = \{1,2,3\}. \quad (3.9)$$

В сервере MovementR_Realization выполняется моделирование полученного в итоге движения на базе модели StateFlow, время работы сервера определяется значением параметра абстракции движения (t_{end}) – общего времени исполнения движения, при этом потребление энергии (E_{total}) фиксируется в элементе Resource_Acquirer. Интегральные параметры движения, время исполнения и затраты энергии возвращаются из общей структуры данных по движению согласно приведенным в гл. 6 алгоритмами в серверах Collision_resolution или Default_MovementR_Planning, время, затраченное на расчет движения, определяется по факту завершения алгоритмов планирования движения.

Таким образом, предложенная имитационная модель предназначена для обеспечения доступа к имеющимся знаниям и прогнозирования событий для функционирования алгоритмов ИСУ КРТП в задачах планирования и оптимизации движений КР в совместной с оператором рабочей зоне. Модель содержит функционал, предоставляющий для АСУ интерфейсы:

- тестирования общих алгоритмов управления;
- тестирования режимов функционирования КРТП;
- тестирования алгоритмов планирования и оптимизации движений КР;
- мониторинга показателей качества процесса;
- прогнозирования технических, технологических технико-экономических эффектов;
- фиксации ключевых событий рассматриваемых абстракций;
- хранения данных и знаний, ведения статистики, отображения зависимостей;
- генерации и фиксации математического описания редуцированных пространств;
- формирования инструкций при выборе приоритетности алгоритмов (например, при разрешении коллизий, оптимизации, интерполяции и т.д.);
- формирования и предоставления предобработанной информации для ЛПП;
- формирования обучающих выборок для систем, основанных на знаниях, в частности RL агентов;

- отслеживания, исследования событий, ведущих к сбоям и задержкам в задачах реализации ТО и т.д.

Для формирования законов управления КР в рамках ТО согласно критериям эффективности 1 - 5 и ограничений задач оптимизации (гл. 4) модель предоставляет расчет полного комплекса значений переменных и показателей. В частности, оценку эффективности функционирования КРТП предлагается основывать на следующей структуре показателей.

Контролируемые переменные (показатели качества КРТП):

Доля отмененных частей ТО в общем объеме запланированных ТО в единицу времени (за смену):

$$\alpha_{del}^N = \frac{N_{del}^{PTO}}{N_{total}^{PTO}} \cdot \frac{1}{t}. \quad (3.10)$$

Доля выполненных частей ТО в общем объеме запланированных ТО в единицу времени (за смену):

$$\alpha_{done}^N = \frac{N_{done}^{PTO}}{N_{total}^{PTO}} \cdot \frac{1}{t}. \quad (3.11)$$

Доля выполненных ТО (задач) без перепланирования к общему объему запланированных ТО в единицу времени:

$$\beta_{done}^N = \frac{N_{+}^{TO}}{N_{TO}} \cdot \frac{1}{t}. \quad (3.12)$$

Средний цикл ТО (единица времени – смена) – интервал времени от начала до конца ТО с учетом требуемого времени на перепланирование в случае отмены частей ТО $\bar{T}_c^{TO}$:

- среднее подготовительно-заключительное время $\bar{T}_{pf}^{TO}$;
- среднее штучное время $\bar{T}_{prod}^{TO}$;
- среднее оперативное время $\bar{T}_{oper}^{TO}$;
- среднее вспомогательное время $\bar{T}_{add}^{TO}$;
- среднее основное время $\bar{T}_{main}^{TO}$.

Время обслуживания рабочего места и время на личные потребности в рамках модели не учитывались, в силу рассмотрения ТП с короткой продолжительностью смены.

Ритм выпуска изделий:

$$\tau_{unit} = N_{unit} \cdot \frac{1}{t}. \quad (3.13)$$

Отношение времени, затрачиваемого на планирование движений в контуре Movement Control, и временем исполнения движений (т.е. основного времени и вспомогательного в контуре Movement Control) к общему времени, сопряженному с планированием и исполнением ТО:

$$\varepsilon t^{ws} = \frac{(\bar{T}_{main}^{TO} + \bar{T}_{add}^{TO} \cdot MC) \cdot N_{total}^{PTO}}{\bar{T}_c^{TO} \cdot N_{TO}}. \quad (3.14)$$

Ритм выпуска изделий максимизируется за счет решения задачи 1 оптимизации, отраженной в гл. 4.

Производительность КРТК (субмодель – Movement Control):

$$P_{unit} = \frac{N_{unit}}{t} = \frac{Prob}{\frac{1}{P_{PTO}} \bar{N}_{unit}^{PTO}} = \frac{Prob}{\bar{t}_{PTO} \cdot \bar{N}_{unit}^{PTO}} \quad (3.15)$$

где N_{unit} – количество изделий, произведенных за рассматриваемый интервал времени (например, смену), $Prob$ – вероятность успешного выполнения движения, реализующего одну часть ТО; P_{PTO} – производительность КРК в единицах движения, реализующих части ТО; $\bar{N}_{unit}^{PTO}$ – среднее количество частей ТО в одной ТО (в рассматриваемом случае принято, что для изготовления одного изделия требуется одна ТО), $\bar{t}_{PTO}$ – время, требуемое для планирования и исполнения одного движения в субмодели Movement Control.

Энергия, потребленная КРТК в основное время за смену – E_{dmt}^{ws} .

Энергия, потребленная КРТК во вспомогательное время в субмодели Movement Control за смену – E_{aut}^{ws} .

Общая потребленная энергия КРТК за смену – E_{total}^{ws} .

Отношение суммы потребленной энергии КРТК во вспомогательное время в субмодели Movement Control и в основное время к общей потребленной энергии за смену:

$$\varepsilon^{ws} = \frac{E_{dmt}^{ws} + E_{aut}^{ws}}{E_{total}^{ws}}. \quad (3.16)$$

Общая потребленная энергия может быть получена либо по опросу имитационных моделей реального времени, либо через усредненные значения среднего времени ожидания серверов ДСМ и значений средней мощности КР в режиме ожидания и режиме функционирования по формуле:

$$E_{total}^{ws} = \bar{T}_{task}^{TO} \cdot \bar{P}_{standby} + (\bar{T}_{main}^{TO} + \bar{T}_{add_{MC}}^{TO}) \cdot (\bar{P}_{mov} - \bar{P}_{standby}). \quad (3.17)$$

Показатель ε^{ws} в рамках ТП минимизируется за счет решения задачи 2 оптимизации, рассмотренной в гл. 4.

Перечисленные переменные состояния ТП, которые могут быть получены на модели, не является исчерпывающим. В гл. 7 приводятся результаты имитационного моделирования для доказательства эффективности предложенных в работе алгоритмов, методов и решений. Также ДСМ предоставляет визуализацию динамики переменных состояния, что позволяет выполнять анализ и принимать решения при формировании систем критериев эффективности для задач оптимизации.

На рис. 3.3 представлена визуализация динамики исполнения движений, связанных с выполнением частей ТО (ТПд, ВП, РХ и ВХ), сплошной линией обозначен объем ТО в количестве частей ТО, в частности курсором отмечен факт получения задания на выполнение ТО, состоящей из 9 частей. Технологическая операция может завершиться либо полным выполнением частей, как в ТО, отмеченной курсором, так ошибкой выполнения части ТО (например, в результате коллизии или защитной остановки), как в моментах времени 150 секунд, 620 секунд и др.

Зелеными маркерами обозначены факты исполнения части ТО, либо факт обнаружения проблемы (последний зеленый маркер в серии), оранжевыми маркерами обозначены части ТО, не реализованные (информация по ним утилизируется, последующие ТО планируются с учетом их отмены).

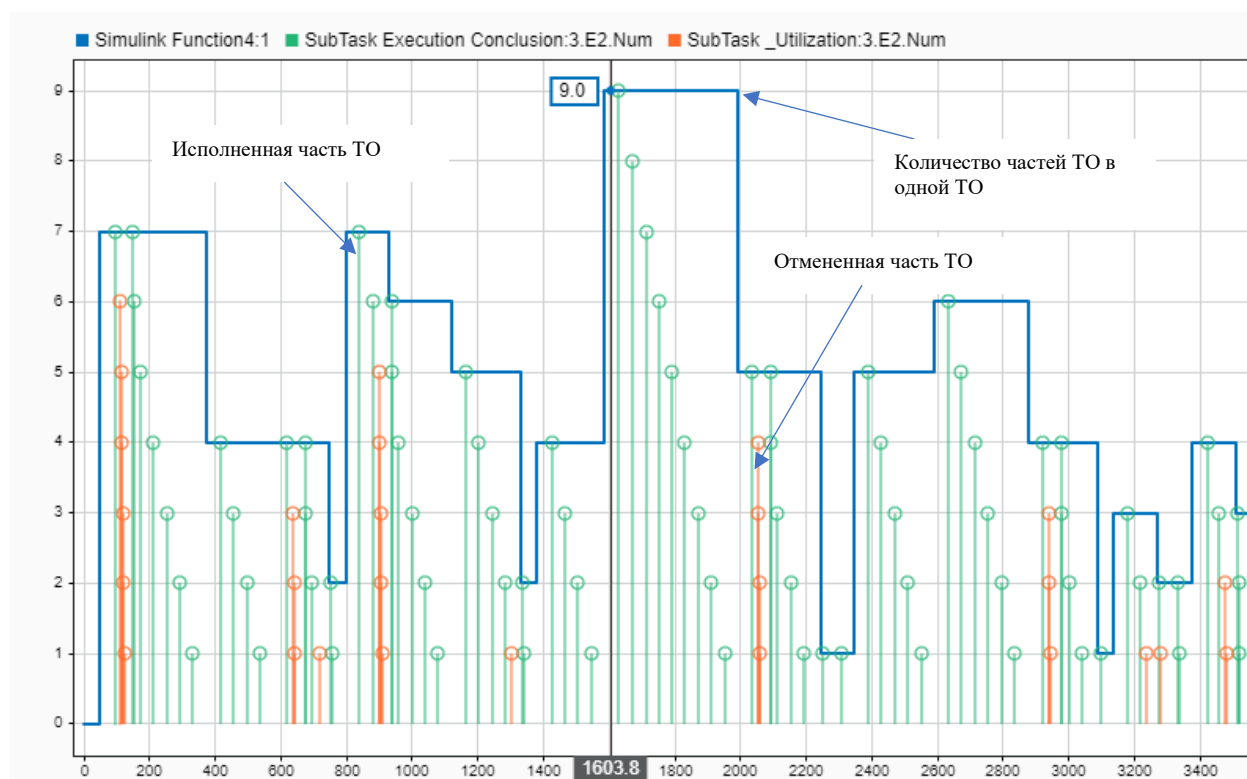


Рисунок 3.3 – Визуализация процесса исполнения запланированных частей ТО

На рис. 3.4 представлена визуализация динамики переменных состояния КРТП, в прил. Г – циклограмма имитации ТП (логика режимов работы элементов ДСМ). Анализ зависимостей и значения переменных в определенный момент времени, например, за смену, позволяет сформировать вывод о техническом, технико-экономическом результатах предлагаемых в работе решений по синтезу законов управления, в том числе полученных в ходе решения задач оптимизации.

Представленные в текущем разделе зависимости отражают результаты имитации КРТП с высокой степенью вовлеченности человека (параметризация модели была реализована в соответствии с данным посылом). Доля суммы основного времени работы КР и вспомогательного времени (рис. 3.4, а), связанно с планированием движений в контуре Movement Control, в общем объеме времени планирования и выполнения ТО за смену (ϵt^{ws}) составляет немногим более 7 %, при этом отношение энергии, затрачиваемой КР за соответствующее время к общей энергии, затраченной для реализации всех ТО за смену (ϵt^{ws}) составляет 17,49 %.

Кроме того, в КРТП имитирована высокая вероятность возникновения коллизий, не поддающихся разрешению, например, когда объект рабочей зоны (рука оператора или инструмент) перекрывает геометрически положения ЦТИ в точке назначения или внезапно перекрывает тра-

екторию движения на скоростях, значительно превышающих скорость реакции АСУ КР. В этом случае движущийся КР аварийно останавливается, а часть ТО перепланируется, данный факт демонстрируют зависимости (см. рис. 3.4, д, г).

При параметризации контура Movement Control в данной демонстрации были введены установки для КР, реализующего короткоходные перемещения [94]. Среднее время, затрачиваемое на реализация движения (см. рис. 3.4, е) составляет $\sim 1,72$ секунды.

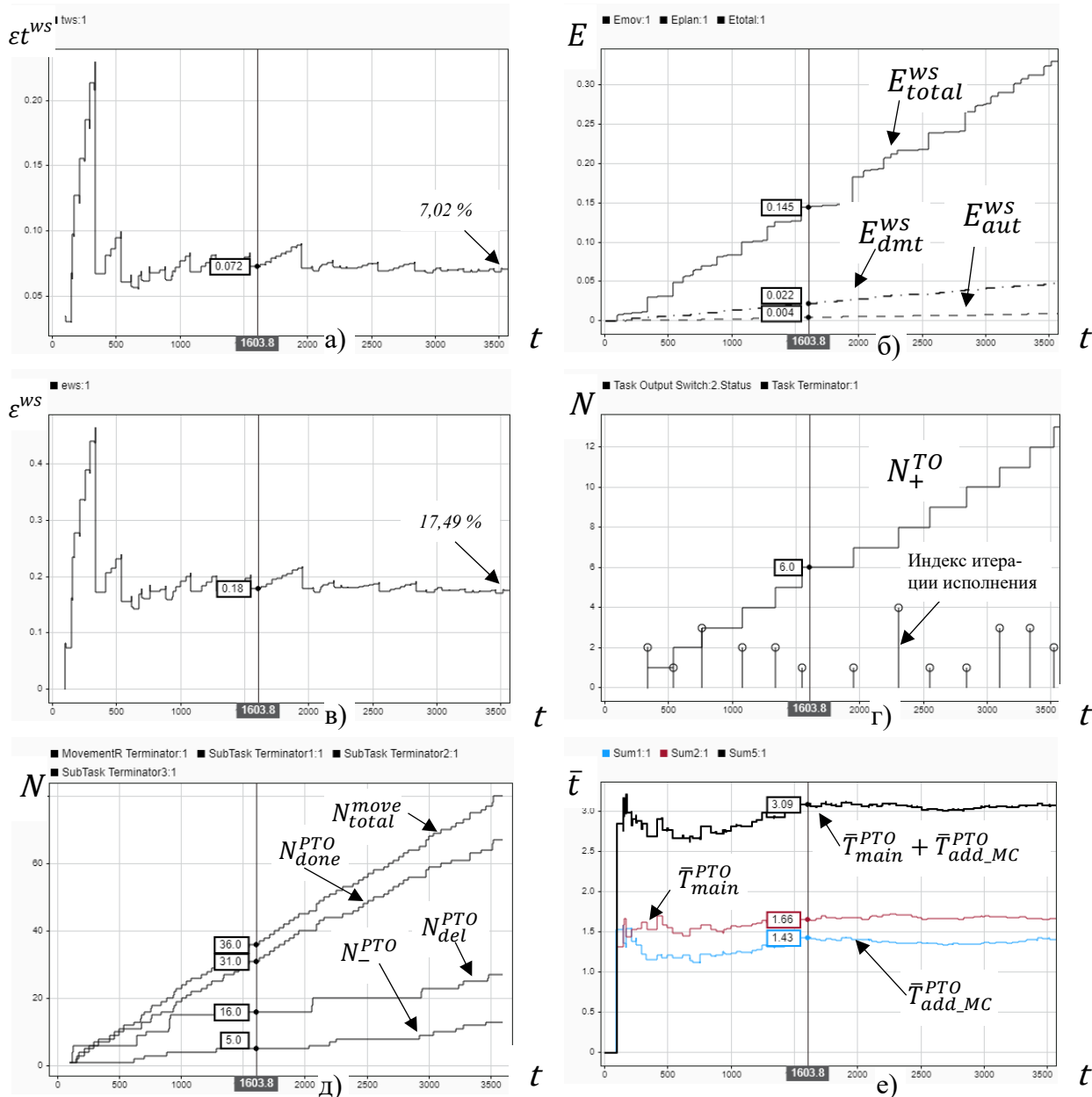


Рисунок 3.4 – Визуализация динамики переменных состояния КРТП на примере смены длительностью один час

Намеренно выбранная совокупность представленных и остальных факторов текущей настройки модели, моделирующей КРТП с высокой степенью вовлеченности оператора, образуют негативный сценарий для получения технико-экономического эффекта от решения оптимизационных задач по критериям, отраженных в гл. 4. Но даже при таких условиях результаты моделирования демонстрируют наличие потенциала увеличения производительности и энергоэффективности

КРТП за счет сокращения временных затрат и снижения энергопотребления в контуре Movement Control. Соответственно, модели КРТП, характеризующиеся средним и слабым уровнем вовлеченности оператора в ТО, будут коррелировать со значительно более высоким потенциалом оптимизации. Подробно результаты влияния предложенных оптимизационных и управленческих решений на интегральные показатели КРТП для различных сценариев представлены в гл. 7.

Выводы

1) В целях развития обеспечения синтеза СНС на базе КРТП промышленных производств обоснована необходимость разработки и исследования моделей верхнего уровня для ТП, интегрирующих интерфейсы управления ЛСУ, в виде дискретно-событийных абстракций.

2) Предложена оригинальная ДСМ, обладающая широким функционалом, направленным на организацию процессов управления и оптимизации ключевых переменных состояния КРТП в рамках АСУТП, включающая в себя компоненты имитации исполнения ТО, интеграции АО и ПО, коммуникации и маршрутизации информационных и материальных потоков.

3) На примере одного из обобщённых сценариев функционирования ТП на параметризованной ДСМ, отражающей высокую вовлеченность оператора в планирование и реализацию ТО, доказано наличие значительного оптимизационного потенциала по переменным состояния производительности и энергоэффективности.

3.2 Кинематическая модель коллаборативного робота

При исследовании КРТП планирование и реализация движений выполнялись для КР KUKA LBR IIWA 7 R800 (рис. 3.5). Робот включает 7 звеньев и 7 поворотных шарниров (рис. 3.6). Кинематика KUKA LBR IIWA 7 R800 [234] описывается в соответствии с соглашением Денавита-Хартенберга согласно схеме рис. 3.7 и табл. 3.2.



Рисунок 3.5 – Внешний вид КР KUKA LBR IIWA 7 R800

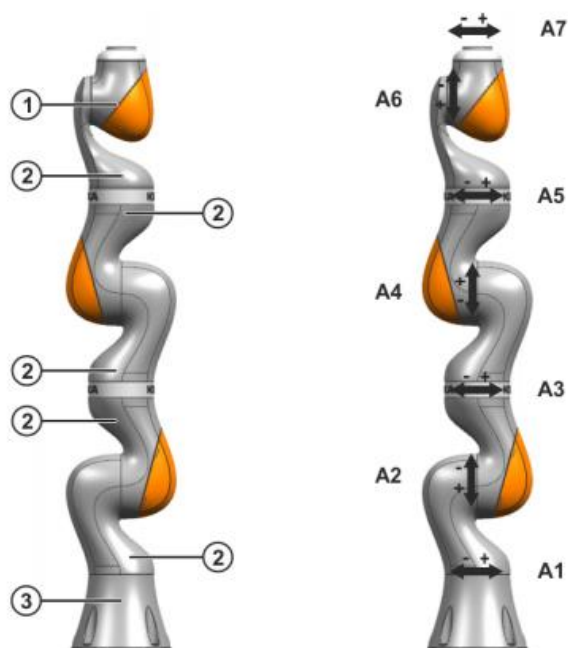


Рисунок 3.6 – КР KUKA LBR IIWA 7 R800: 1 – встроенное запястье; 2 – звено; 3 – база; A1–A7 – шарниры КР

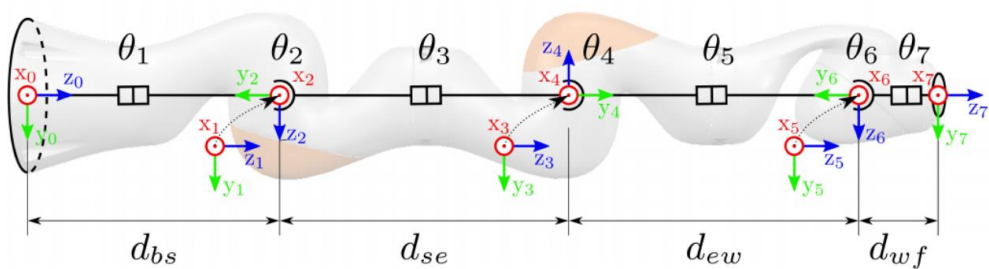


Рисунок 3.7 – Схема DH параметров для КР KUKA LBR IIWA 7 R800

Таблица 3.2 – DH параметры КР KUKA LBR IIWA 7 R800

i	α_i	d_i	a_i	θ_i
1	$-\frac{\pi}{2}$	d_{bs}	0	θ_1
2	$\frac{\pi}{2}$	0	0	θ_2
3	$\frac{\pi}{2}$	d_{se}	0	θ_3
4	$-\frac{\pi}{2}$	0	0	θ_4
5	$-\frac{\pi}{2}$	d_{ew}	0	θ_5
6	$\frac{\pi}{2}$	0	0	θ_6
7	0	d_{wf}	0	θ_7

$$d_{bs} = 340 \text{ mm}, d_{se} = 400 \text{ mm}, d_{ew} = 400 \text{ mm}, d_{wf} = 126 \text{ mm}$$

Тогда в соответствии с DH параметрами и на основе однородного преобразования матрица трансформации системы координат $(i-1)$ в систему (i) имеет вид:

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Массы звеньев, включая фланец согласно URDF модели [97], представлены в табл. 3.3. Ограничения угла положения и угловой скорости для каждого звена представлены в табл. 3.4.

Таблица 3.3 – массы звеньев робота в кг, включая фланец

m1	5
m2	3.4525
m3	3.4821
m4	4.0562
m5	3.4822
m6	2.1633
m7	2.3466
m8	3.1290

Таблица 3.4 – Ограничения угла положения и угловой скорости шарниров A1–A7 КР

Range of motion	
A1	±170 °
A2	±120 °
A3	±170 °
A4	±120 °
A5	±170 °
A6	±120 °
A7	±175 °
Speed with rated payload	
A1	98 °/s
A2	98 °/s
A3	100 °/s
A4	130 °/s
A5	140 °/s
A6	180 °/s
A7	180 °/s

Кинематическая модель КР с установленными значениями параметров разработана в MATLAB/Simscapе Multibody, структурная схема представлена в прил. Д. Технические решения задач оптимизации и реализация предложенных алгоритмов (гл. 4 и 5), в том числе базировались на штатных механизмах обеспечения безопасности KUKA LBR IIWA 7 R800 [287]. В СУ КР постоянно определены следующие функции безопасности: аварийная остановка; активация; блокировка режима работы (с помощью переключателя с ключом).

Предварительно настроены и могут быть интегрированы в систему через интерфейс безопасности контроллера КР следующие функции:

- безопасности оператора (защищенный контур рабочей зоны);
- внешнего устройства аварийной остановки;
- внешней аварийной остановки с сохранением траектории;

К дополнительным функциям системы безопасности КР, использованным в оригинальных алгоритмах как элементарные механизмы относятся:

- внешнее устройство активации;
- внешняя безопасная остановка работы;
- мониторинг рабочего пространства в КП;

- мониторинг рабочего пространства в ОП;
- мониторинг защищенного пространства в ОП;
- мониторинг скорости;
- мониторинг останова;
- мониторинг крутящего момента по осям;
- обнаружение столкновений.

Механизмы обеспечения безопасности штатными средствами могут быть настроены с учетом разграничений зон рабочей области (рис. 3.8).

Выводы

1) Представлена параметризованная кинематическая модель промышленного КР KUKA LBR IIWA 7 R800, используемая при имитационном моделировании АСУ КРТП как в качестве модели КР, выполняющего основные части ТО, так и в качестве модели позиционирующего устройства, осуществляющего ВП.

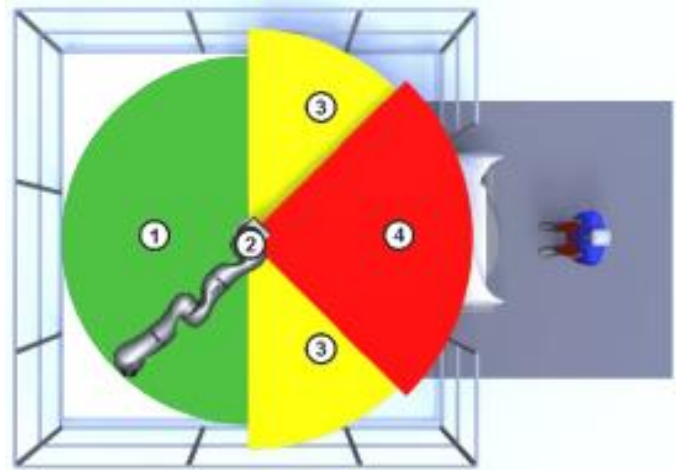


Рисунок 3.8 – Разграничение зон рабочей области КР и оператора (встроенная система безопасности) для KUKA LBR IIWA 7 R800; 1 – рабочая зона КР; 2 – КР; 3 – зоны останова; 4 – безопасная зона

3.3 Нелинейная имитационная модель системы управления взаимосвязанных электроприводов коллаборативного робота

Алгоритмы планирования и оптимизации движений КР, реализующие части ТО, представленные в настоящем исследовании, используют модели СУЭП, в частности, для оперативного планирования предложена упрощенная линеаризованная модель. Модель позволяет решать ОЗД, находить потребляемую мощность и затрачиваемую энергию за короткий интервал времени, приемлемый для оперативного планирования движений.

Результат решения ОЗК или получения массива конфигураций КР инерциальным способом, а именно вектор угловых координат, скоростей и ускорений, является исходным массивом данных для решения ОЗД – нахождения требуемых вращающих моментов на каждой оси.

Согласно методу Ньютона-Эйлера [246, 264] вектор результирующих моментов, приложенных к осям КР, находится из следующего уравнения:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M(q)^{-1} (-C(q, \omega) \cdot \omega - G(q) - J(q)^T F_{Ext} + \tau) \\ \omega \end{bmatrix}, \quad (3.19)$$

которое может быть также записано в виде

$$M(q) \frac{d\omega}{dt} = -C(q, \omega) \frac{d\omega}{dt} - G(q) - J(q)^T F_{Ext} + T_j. \quad (3.20)$$

Здесь $M(q)$ – матрица масс в КП, определенных по текущей конфигурации КР; $C(q, \omega)$ – термы Кориолиса; $G(q)$ – гравитационные моменты и силы; $J(q)$ – геометрический Якобиан; F_{Ext} – матрица внешних сил, приложенных к телу; T_j – вектор моментов и усилий, приложенных к каждой оси; $q, \omega, \frac{d\omega}{dt}$ – положения, скорости и ускорения шарниров, задаваемые отдельными векторами, в рад, рад/с и рад/с², соответственно. При реализации ВП (без оказания воздействия на обрабатываемую деталь) внешние силы F_{Ext} – отсутствуют.

Приведенный к двигателю результирующий момент сил на осях механизма рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{mech} = T_j \cdot \left(\frac{1}{K_{red}} \right). \quad (3.21)$$

Динамический момент двигателя равен:

$$T_{dyn} = J_r \cdot \ddot{q} \cdot K_{red}, \quad (3.22)$$

где K_{red} – коэффициент передачи редуктора.

Развиваемый двигателем момент равен сумме результирующего момента на оси механизма, момента трения и динамического момента:

$$\left(\frac{1}{c} \right) \cdot R_a \cdot (U_a - c \cdot \dot{q} \cdot K_{red}) = T_{mech} + T_{dyn} + T_{fr}, \quad (3.23)$$

где R_a – сопротивление обмотки якорной цепи, U_a – напряжение обмотки якорной цепи, c – конструктивный коэффициент двигателя. Тогда напряжение и ток обмотки якорной цепи:

$$U_a = (T_{mech} + T_{dyn} + T_{fr}) \cdot \frac{c}{R_a} + c \cdot \dot{q} \cdot K_{red}; \quad (3.24)$$

$$I_a = \frac{1}{c} \cdot (T_{mech} + T_{dyn} + T_{fr}), \quad (3.25)$$

где I_a – ток якорной цепи. В свою очередь, потребляемая мощность вычисляется, как

$$P_{wr} = |I_a \cdot U_a|, \quad (3.26)$$

где $\cdot$ – оператор поэлементного умножения матриц.

Матрица затрачиваемой энергии:

$$E_{ngy} = \int_{t_{start}}^{t_{end}} P_{wr} \cdot dt + P_{eq} \int_{t_{start}}^{t_{end}} 1 \cdot dt, \quad (3.27)$$

где t_{start} – время начала движения; t_{end} – время окончания движения; $P_{eq} = const$ – установленная мощность потребителя электрических устройств оснастки. При этом, общая затрачиваемая энергия на реализацию перемещения составляет:

$$E_{total} = \sum E_{ngy}(:, end), \quad (3.28)$$

где end – индекс последнего столбца матрицы E_{total} .

При моделировании значения переменных необходимые для расчета динамики движения устанавливались согласно табл. 3.5.

Программная реализация предложенной математической модели представлена в функции DE (Dynamics+Energy), описание входных аргументов и возвращаемых значений приведено в Листинге 3.1 фрагмента функции.

Таблица 3.5 – Данные для расчета динамики движения

Математическое обозначение переменной	Программное обозначение переменной	Значение переменной
K_{red}	<i>InitialData.Kred;</i>	50
J_r , кг · м ²	<i>InitialData.Jr;</i>	0.1077
R_a , Ом	<i>InitialData.Ra;</i>	0.53
c	<i>InitialData.c;</i>	2
L_a , Гн	<i>InitialData.L;</i>	0.0265

Листинг 3.1

```
function [D]=DE(lbr,Q,EquipmentPower)
% DE - функция, возвращающая описание динамики
% электромеханической части робота в пространстве состояний
% Input variables:
% lbr      - объект типа 1x1 rigidBodyTree (7-осевой робот), например,
%           lbr=loadrobot('kukaliwa7','DataFormat','row',Gravity=[0 0 -9.81]);
% Q        - структура, описывающая кинематику движения робота;
% EquipmentPower - мощность установленной на роботе оснастки (const);
% Output variables:
% D -      - структура, описывающая динамику движения робота
%           D.jointTorq - массив моментов механизма (не приведенного к двигателю);
%           D.Power - массивы значений мгновенной мощности;
%           D.Energy - массивы значений потребленной энергии
%           D.TotalEnergy - итоговое значение потребленной энергии всеми приводами
%           D.Ia - массивы значений тока якорной цепи;
%           D.Va - массивы значений напряжений на входе якорной цепи
%                 (без учета добавочного сопротивления)
%           D.jointTorq_motorFr - массивы значений моментов трения;
%           D.jointTorqMech - массивы значений моментов механизма (приведенного к двигателю)
%           D.jointTorq_motorD - массивы значений моментов динамических двигателя;
%           D.jointTorqS - массивы статических моментов механизма в каждый момент времени;
% Example:
%   D=DE(lbr,Q3,10);
end
```

Нелинейная модель СУЭП управления КР на примере KUKA LBR IIWA 7 R800. В целях проведения экспериментальных исследований на предмет проверки предлагаемых алгоритмов управления была разработана детализированная имитационная модель системы управления КР в ПО MATLAB/C++ в среде математического и физического моделирования *Simscape*. Верхний уро-

вень системы управления в виде структурной схемы продемонстрирован в прил. Е, включает подсистему формирования задающего воздействия (Signal Generation Subsystem), взаимосвязанную систему управления электроприводами КР (IEDCS) и кинематическую модель промышленного КР (Kinematic_model(KUKA LBR IWA 7 R800)).

Подсистема задания предусматривает три интерфейса параметризации задающего сигнала: в виде желаемой конфигурации в точке назначения, выраженной в виде $\varphi_3 = q \rightarrow const$, в виде произвольной (генерируемой автоматически) конфигурации в точке назначения $\varphi_3 = q(rng)$, где rng – генератор произвольных значений в установленных пределах (допустимых углов поворота осей КР), и в виде полного описания движения (в пределах шага дискретизации) за счет задания $\varphi_3(t) = interp(q(t))$. В модели задающий сигнал $\varphi_3(t)$ генерируется путем интерполяции табличными блоками, полученного от подсистемы планирования и оптимизации движений (гл. 4, 5, 6) массива $q(t), t \in [1, t_{end}]$, где t_{end} – время окончания движения, шаг дискретизации определен исходя из установок планировщика движений и, как правило, задается с учетом частоты дискретизации контроллера КР.

Модель включает 7 нелинейных СУЭП на базе математического описания двигателя постоянного тока. Взаимосвязь систем управления отдельных шарниров КР реализована посредством интерфейсов механической части модели в подсистеме Kinematic Model. Кинематическая модель КР в исследовании используется для формирования законов управления (для планирования и оптимизации движения) как для КР, выполняющего основные ТО, так и для КР, осуществляющего вспомогательные функции, например, для позиционирования и стабилизации изготавливаемых изделий и т.п. Визуализация движения КР в модели осуществляется как встроенными средствами пакета Simscape Multibody [339] (рис. 3.9, а), на основе значений переменных состояния кинематической модели и графических объектов, включающих модели звеньев (в формате *.stl) и модели других объектов рабочей зоны, так и других средств симуляции, поддерживающих коммуникацию посредством ROS2 [315], например, Webots (рис. 3.9, б), Gazebo и т.п.).

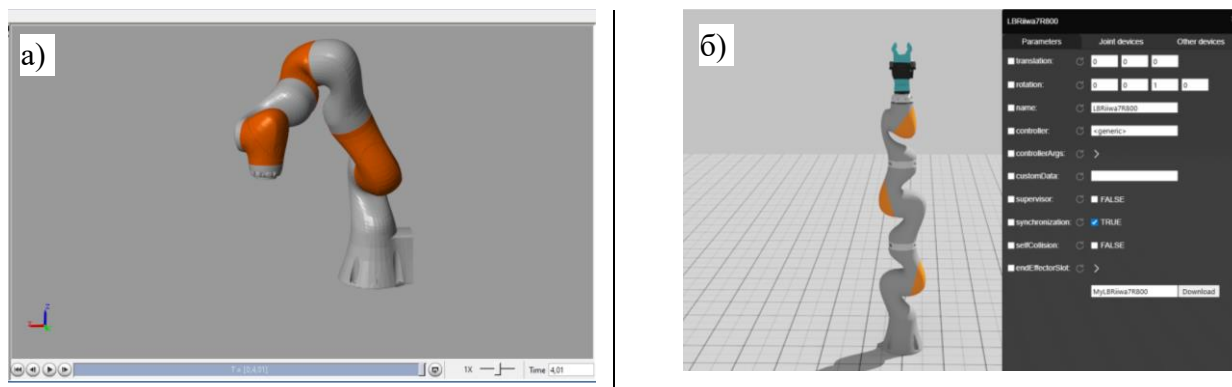


Рисунок 3.9 – Пример визуализации КР KUKA Iiwa 7lbr средствами: а – Simscape Multibody/Matlab; б – Webots

Система управления электропривода отдельного шарнира КР была построена согласно (рис. 3.10) на примере шарнира, осуществляющего поворот первой оси. Модели СУЭП остальных шарниров построены по аналогии. Механизм КР вынесен за структуру модели, а его связи заведены через информационный канал q_out (q – угол положения) и физические параметры (ω – угловая скорость), крутящий момент двигателя, усиленный редуктором t (τ – крутящий момент), прикладывается к механизму шарнира КР.

$$W(z) = K_p + \frac{K_i T_s}{z-1} + \frac{K_d (z-1)}{T_c z}. \quad (3.29)$$

Параметр или настройки	Значение
Частота ШИМ, Гц	1000
Амплитуда напряжения выхода ШИМ, В	3,6
Уровень входного напряжение ШИМ для 100 % рабочего цикла, U_{max} ; для 0 % рабочего цикла, U_{min} В	3,6; 0
Коэффициенты ПИД регулятора K_p, K_i, K_d	100; 0,09; 10
Режим обратного хода для H-bridge	через 1 полупроводниковый ключ и 1 обратный диод
Пороговое напряжение (H-bridge): включения, обратного хода, отключения, В	2,5
Общее сопротивление (H-bridge), Ом	0,1
Сопротивление обратного диода, Ом	0,05
Электропроводность обратного диода, См	10^{-6}

Управляющий сигнал усиливается блоком Power Amplifier1 (рис. 3.11). Основными блоками являются устройство ШИМ (Controlled PWM Voltage) и Н – мост (блок H-Bridge) с внешним источником питания, моделируемым согласно структуре (рис. 3.12). Скважность ШИМ (duty cycle) определяется по формуле:

$$S = \frac{U_{ref} - U_{min}}{U_{max} - U_{min}} * 100 \%, \quad (3.30)$$

значения уровней опорного напряжения и другие параметры для усилителя и Н-моста представлены в табл. 3.6.

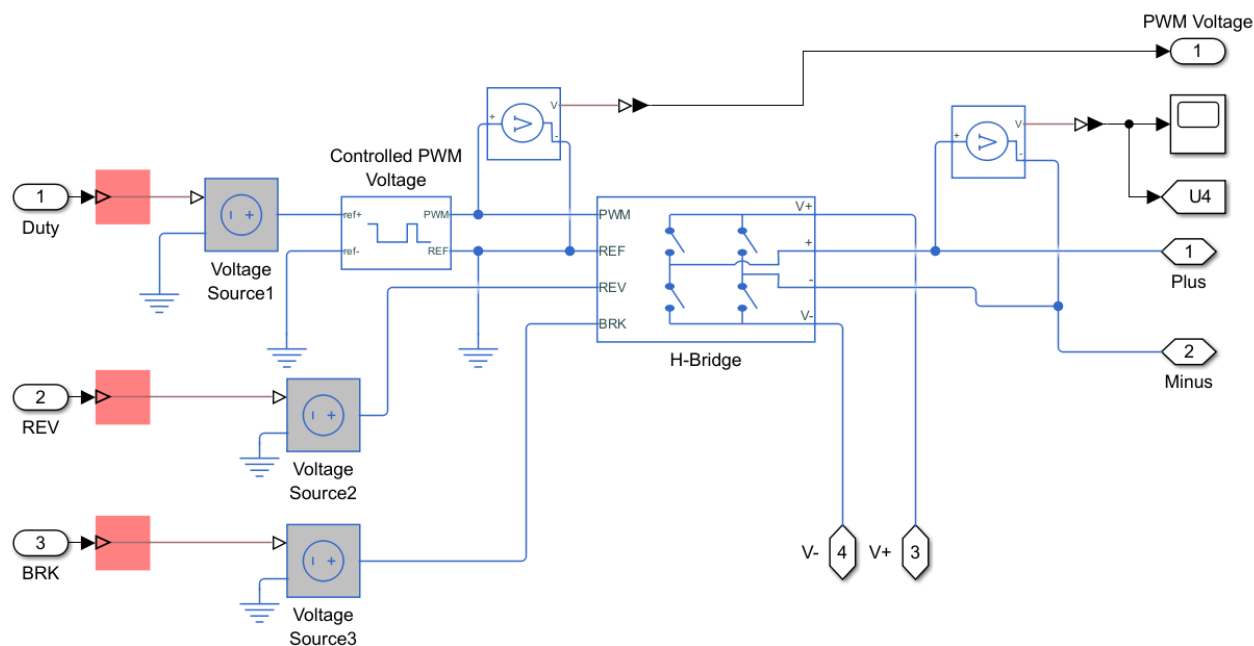


Рисунок 3.11 – Структурная схема усилителя СУЭП

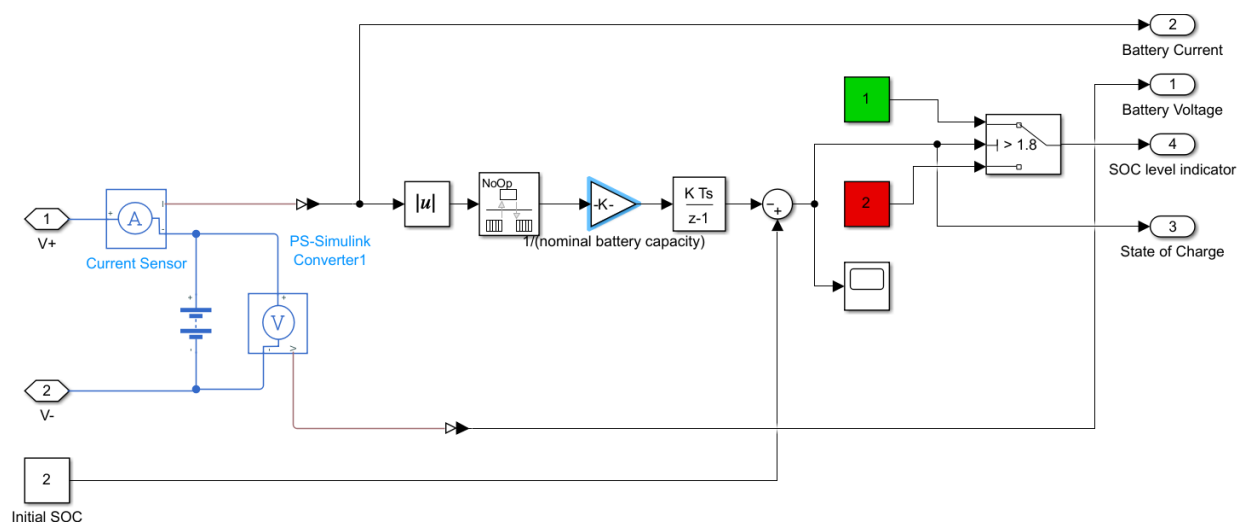


Рисунок 3.12 – Структурная схема модели источника питания СУЭП

Внешний блок питания моделируется моделью аккумулятора Battery пакета Physical Modeling/Simscape Battery, при моделировании питания КР через преобразователь от сети устанавливается бесконечный уровень заряда, при моделировании автономного источника питания

блок моделирует аккумулятор как последовательное внутреннее сопротивление и источник напряжения, зависящий от заряда, при этом напряжение определяется по формуле:

$$U = \frac{U_{nom} \cdot SOC}{(1 - \beta \cdot (1 - SOC))} \quad (3.31)$$

где U_{nom} – номинальное напряжение, SOC – уровень заряда, β – поправочный коэффициент, учитывающий падение напряжения при снижении уровня заряда. Уравнение определяет приблизительное соотношение между напряжением и остаточным зарядом (воспроизводит увеличение скорости падения напряжения при низких уровнях заряда и гарантирует, что напряжение аккумулятора станет равным нулю при нулевом уровне заряда). В схеме модели источника питания СУЭП (см. рис. 3.12) реализована система диагностики уровня заряда, которая необходима для тестирования предлагаемых алгоритмических и оптимизационных решений для задач управления КРТК на базе автономных источниках питания.

Модель электродвигателя (рис. 3.13), отображает электрические характеристики и характеристики крутящего момента и реализована в виде эквивалентной схемы. Электромеханические параметры двигателя представлены в табл. 3.5.

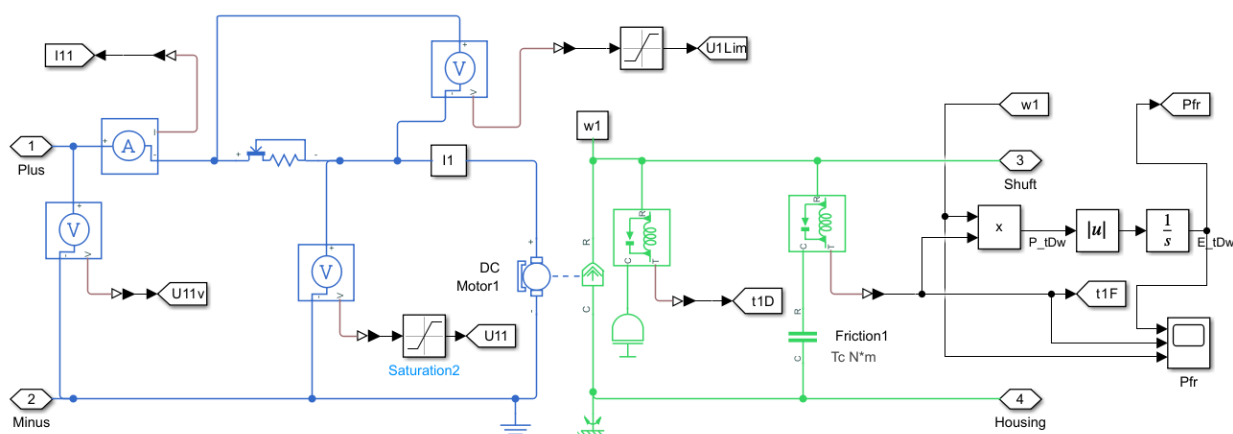


Рисунок 3.13 – Структурная схема модели электродвигателя с ограничением тока

Модель СУЭП звена КР содержит нелинейность в виде трения вращения [205]:

$$T_{fr} = \sqrt{2e} \cdot (T_{brk} - T_C) e^{-\left(\frac{\omega}{\omega_{St}}\right)^2} \cdot \frac{\omega}{\omega_{St}} \cdot \text{sign}(\omega) + T_C \cdot t \tanh\left(\frac{\omega}{\omega_{coul}}\right) + f \cdot \omega, \quad (3.32)$$

где

$$\omega_{St} = \omega_{brk} \cdot \sqrt{2};$$

$$\omega = \omega_R - \omega_C;$$

$$\omega_{Coul} = \frac{\omega_{brk}}{10}.$$

Здесь T_{fr} – суммарный момент трения, Н·м; T_{brk} – момент трения покоя, Н·м; T_C – Кулонов момент трения, Н·м; ω – относительная скорость, рад/с; ω_{St} – пороговое значение скорости для трения Штрибека, рад/с; ω_{coul} – пороговое значение скорости для Кулонова трения, рад/с;

f – коэффициент вязкого трения, Н·с/рад; ω_{brk} – пороговое значение скорости для трения покоя, рад/с; ω_R, ω_C – абсолютные угловые скорости двух частей вращающегося механизма (см. рис. 3.13) портов R и C соответственно, рад/с.

На рис. 3.14 представлен график зависимости момента трения вращения от угловой скорости, общий момент трения является композицией трех компонентов (моментов): Кулоново трения, трения Штрибека и вязкого трения. При моделировании значения переменных, необходимых для расчета момента трения устанавливались согласно табл. 3.7:

В комплексной имитационной модели автоматизированной СУЭП КР с силовой частью на базе ШИПД (шиотно-импульсный преобразователь – двигатель) модель трения вращения реализована блоком Friction библиотеки Simscape/Mechanical Matlab (см. рис. 3.13, – блок Friction1).

Модель ограничения тока исполнена блоком Current Limiter, реализующим ограничение тока с помощью функции гиперболического тангенса:

$$I = I_{lim} \cdot \tanh\left(\frac{4 \cdot V}{U_{lim}}\right) + g_{lim} \cdot U, \quad (3.33)$$

где I – ток, протекающий через ограничитель; I_{lim} – предельный ток; U_{lim} – приблизительное падение напряжения на ограничителе при активации ограничения тока; g_{lim} – скорость изменения тока при падении напряжения в момент $I = I_{lim}$ (предельная проводимость); U – падение напряжения на ограничителе.

В момент $U = U_{lim}$, ток, протекающий через ограничитель, равен:

$$I = I_{lim} \cdot \tanh(4) + g_{lim} \cdot U = 0,9993 \cdot I_{lim} + g_{lim} \cdot U. \quad (3.34)$$

В табл. 3.8 представлены значения параметров для ограничителя тока.

Таблица 3.7 – Данные для расчета момента трения

Переменная	Программное обозначение переменной	Значение
T_{brk} , Н·м	InitialData.Tbrk	0.16;
T_C , Н·м	InitialData.Tc	0.08;
ω_{brk} , рад/с	InitialData.wbrk	0.1;
ω_{st} , рад/с	InitialData.wst	0.1414
ω_{coul} , рад/с	InitialData.wc	0.01
f , Н·с/рад	InitialData.f	0.01

Таблица 3.8 – Значения параметров настройки блока Current Limiter

Параметр	Значение
I_{lim} , А	20
V_{lim} , В	0,1
g_{lim} , Ом ⁻¹	10 ⁻³

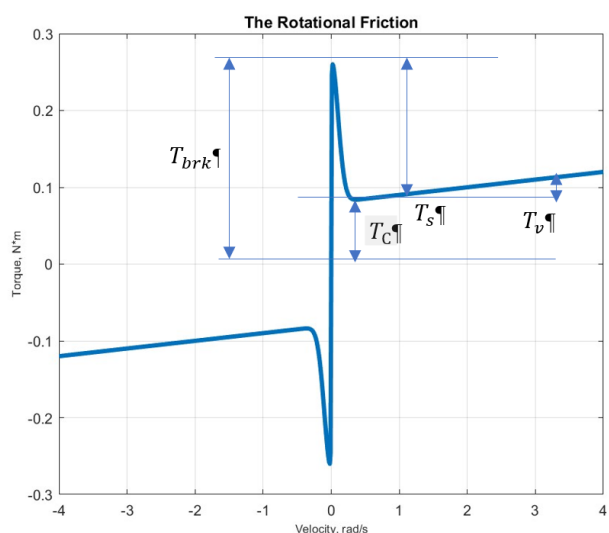


Рисунок 3.14 – Зависимость момента трения вращения от угловой скорости

Модель механической части (редуктора) (рис. 3.15), представляет собой идеальную не-планетарную передачу с фиксированным передаточным отношением $K_{red} = 50$.

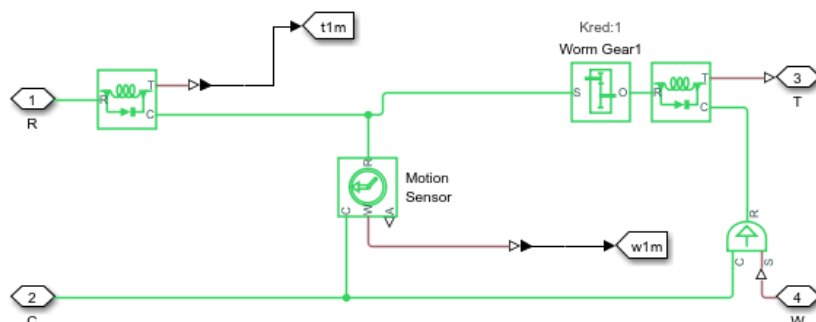


Рисунок 3.15 – Структурная схема модели механической передачи

Имитационная модель предусматривает интерфейс вывода динамики переменных состояния СУЭП по каждому отдельному шарниру, соответствие программных переменных и их математического обозначения представлено в табл. 3.9.

Таблица 3.9 – Соответствие между математическими и программными переменными в интерфейсе вывода имитационной модели

Программная переменная	Математическая переменная
U11	U_a – напряжение обмотки якорной цепи
I1	I_a – ток якорной цепи
t1D	T_{dyn} – динамический момент двигателя
w1	$\omega(t)$ – угловая скорость первого шарнира
t1m	T_{mech} – приведенный к двигателю результирующий момент сил на первой оси механизма
U1Lim	U_{clim} – падение напряжения на ограничителе тока
q_out1	$\varphi^1(t)$ – фактический угол положения для первого шарнира или $q_1(t)$ – обобщенная координата первого шарнира
q_in1	$\varphi_3^1(t)$ – заданный угол положения для первого шарнира или $q_3^1(t)$ – обобщенная координата первого шарнира
P_UI	P – потребляемая мощность электропривода шарнира
P_I2R	P_{ed} – мощность тепловых потерь
P_t1Dw1	P_d – механическая мощность нагрузки (подвижной части электродвигателя);
P_t1mw1	P_m – механическая мощность нагрузки (механизма)
E_ui	E – общая потребляемая мощность электропривода шарнира
E_loss	E_{loss} – тепловые потери в двигателе
E_md	E_d – механическая энергия, отдаваемая нагрузкой (ротатор)
E_mm	E_m – механическая энергия, отдаваемая нагрузкой (механизм)
E_k	E_k – кинетическая энергия ротора двигателя
E_f	E_f – потери в элементе трения

Пример результатов визуализации динамики части переменных для одного движения КР представлен на рис. 3.16 – 3.20. Визуализация необходима для исследования динамики переменных состояния объекта при различных режимах движения КР, получаемых в ходе исполнения закона управления, реализующего спланированные части ТО технологического процесса. Дополнительные исследования на нелинейной модели (детализированной математической мо-

дели) необходимы для валидации результатов автоматизированного синтеза законов управления, рассматриваемых в работе механизмов планирования движений, в том числе алгоритмов разрешения коллизий. Валидация проводится в связи с использованием упомянутыми механизмами в целях экономии вычислительных ресурсов при выводе решения упрощенных моделей СУЭП и упрощенных моделей энергопотребления – линейаризованных, нейросетевых и нейро-нечетких.

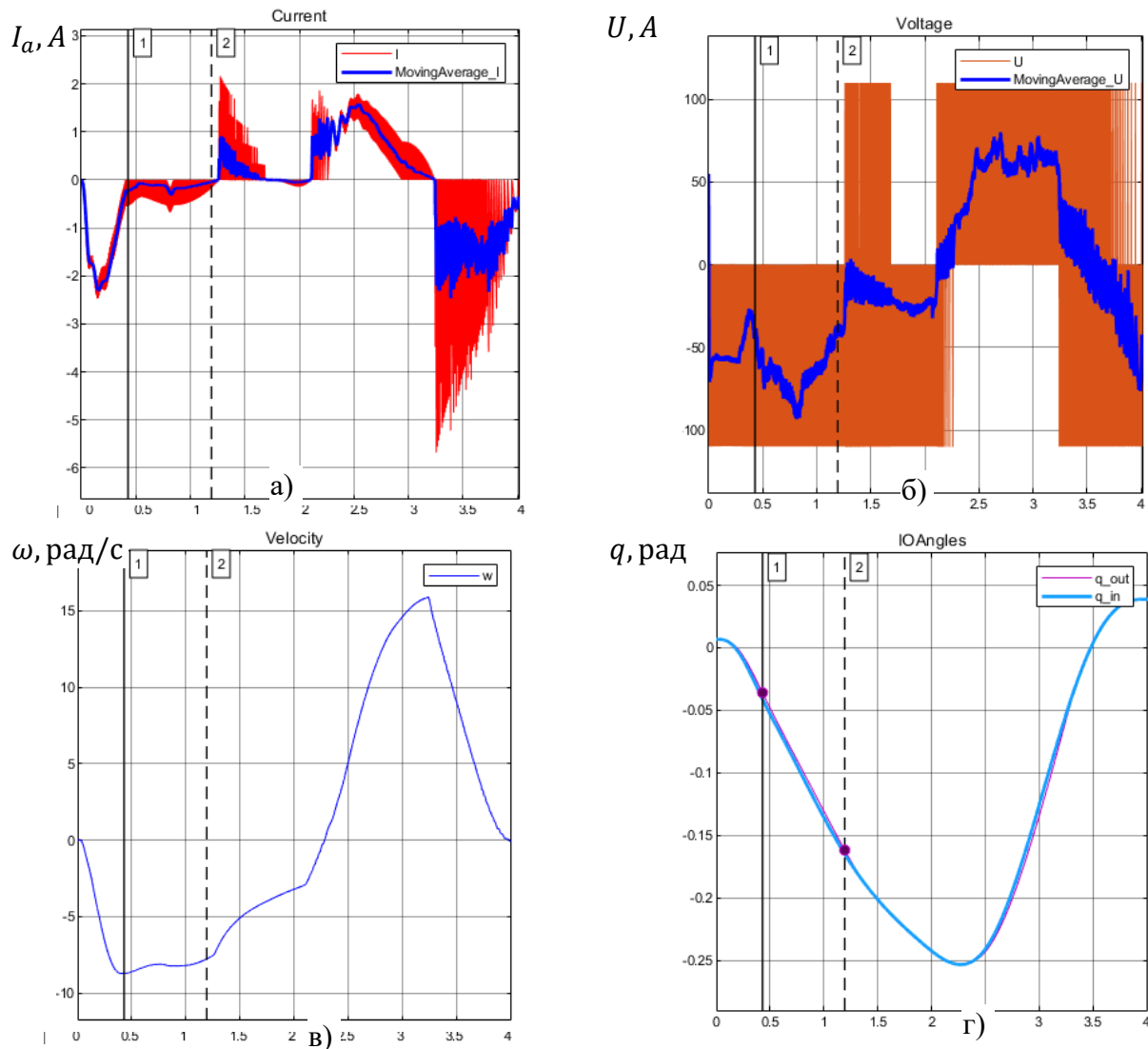


Рисунок 3.16 – Динамика переменных состояния модели СУЭП второго шарнира КР: а – ток якорной цепи; б – напряжение питания; в – угловая скорость вращения; г – заданный и фактический углы положения

В частности, при разрешении коллизий алгоритмами оптимизации RRT или CHOMP при поддержке БЗ РКП (гл. 4) из-за наложений факторов высокого весового коэффициента сглаживания, жестких временных ограничений на планирование движения и ошибки по точности в динамике может произойти касание объекта коллизии несмотря на отрицательный прогноз алгоритмов на упрощенной модели. При обнаружении с помощью нелинейной детализированной математической модели таких фактов могут быть внесены коррективы в уставки для алгоритмов разрешения коллизий в рамках конкретного редуцированного пространства, например, путем созда-

ния дополнительной виртуальной оболочки объектов коллизий как дополнительной защитной зоны от касаний звеньями или рабочим органом КР.

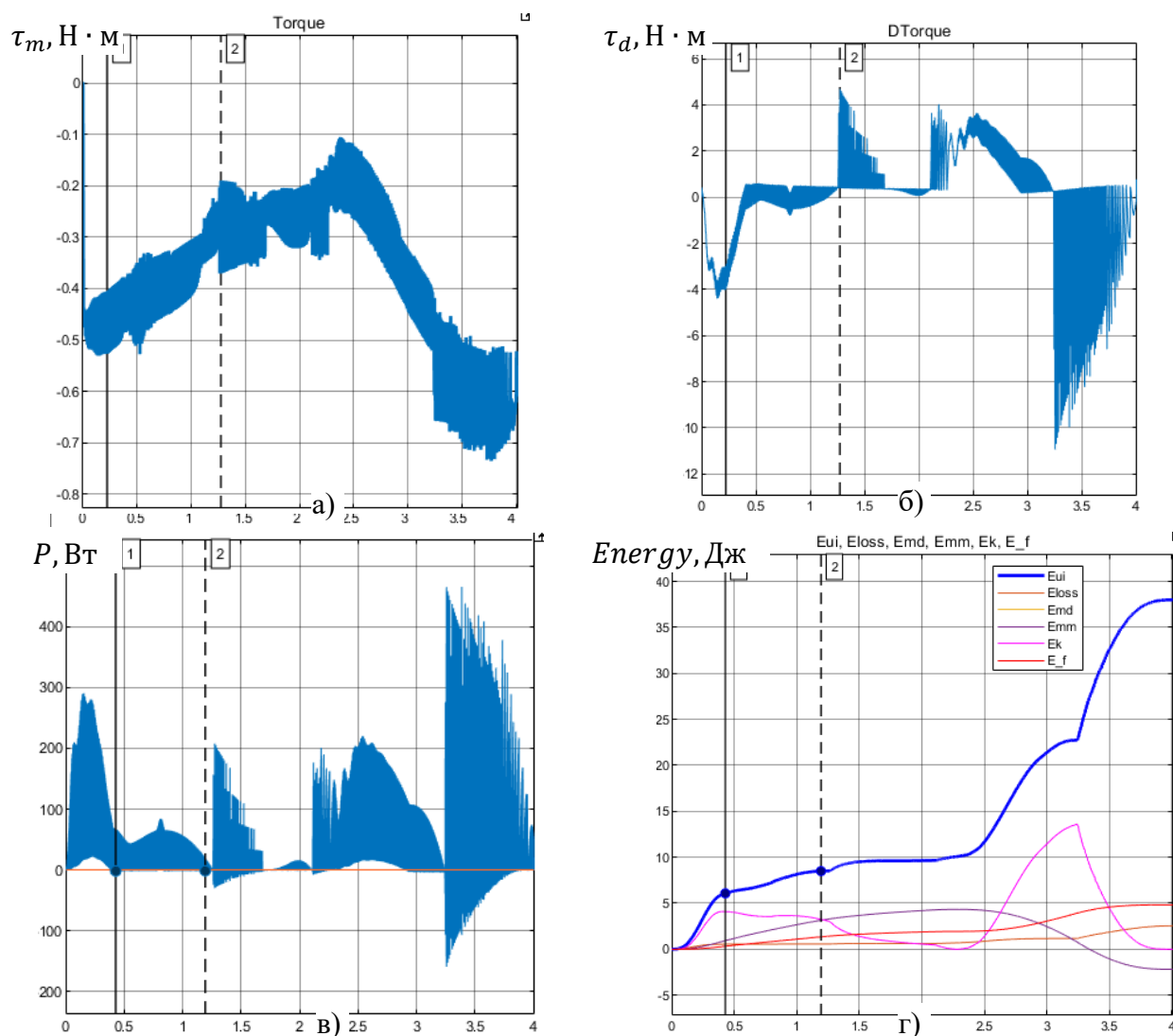


Рисунок 3.17 – Динамика переменных состояния модели СУЭП второго шарнира КР:
а – момент механизма приведенный к двигателю; б – крутящий момент двигателя;
в – потребляемая мощность СУЭП второго шарнира; г – общая потребляемая энергия (E),
а также E_{loss} , E_d , E_m , E_k , E_f

Анализ динамики переменных состояния системы взаимосвязанных электроприводов робота (энергопотребления, мощности, момента, скорости, тока и т.п.) при реализации движений в рамках отдельного ТП в разрезе группы редуцированных пространств, механизмов оптимизации и алгоритмов разрешения коллизий позволяет получать оптимальные для конкретных условий наборы рассмотренных в работе инструментов, среди которых:

- способы планирования движений (инерциальный, оптимизационный с решением ОЗК);
- способы и уставки решения ОЗК;
- шаблоны движений;
- алгоритмы интерполяции и сглаживания и их уставки;
- системы критериев оптимизации;
- алгоритмы оптимизации движений;

- алгоритмы разрешения коллизий их уставки;

- алгоритмы функционирования аварийных режимов и др.

Фазовые траектории (см. рис. 3.18, 3.19) представляют собой визуализированные информационные срезы, удобные для исследователя и архитектора РДП, при выборе соответствующих пространству наборов механизмов планирования движений и режимов функционирования КР. В частности, фазовые траектории ограничивающих сил критически важны при настройке режимов КР в ТП, требующих высоких показателей динамики (максимальных скоростей движения, максимальной массы перемещаемых КР объектов) в целях снижения износа механической части шарниров.

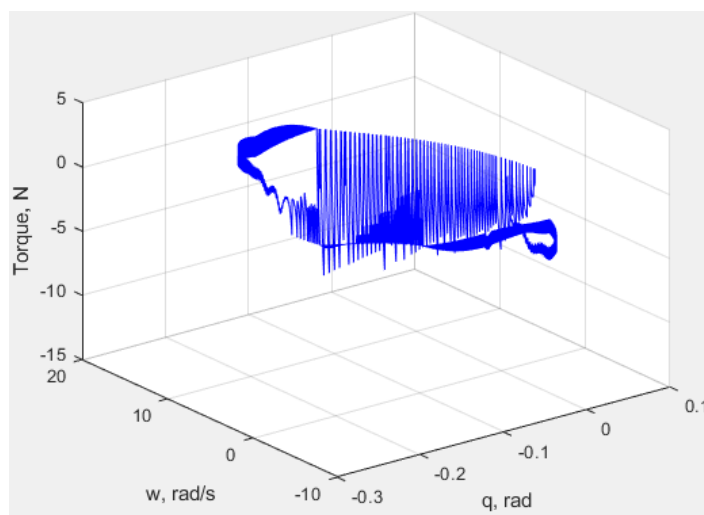


Рисунок 3.18 – Фазовая траектория СУЭП второго шарнира КР при реализации движения $QD_Total\{1,23\}$

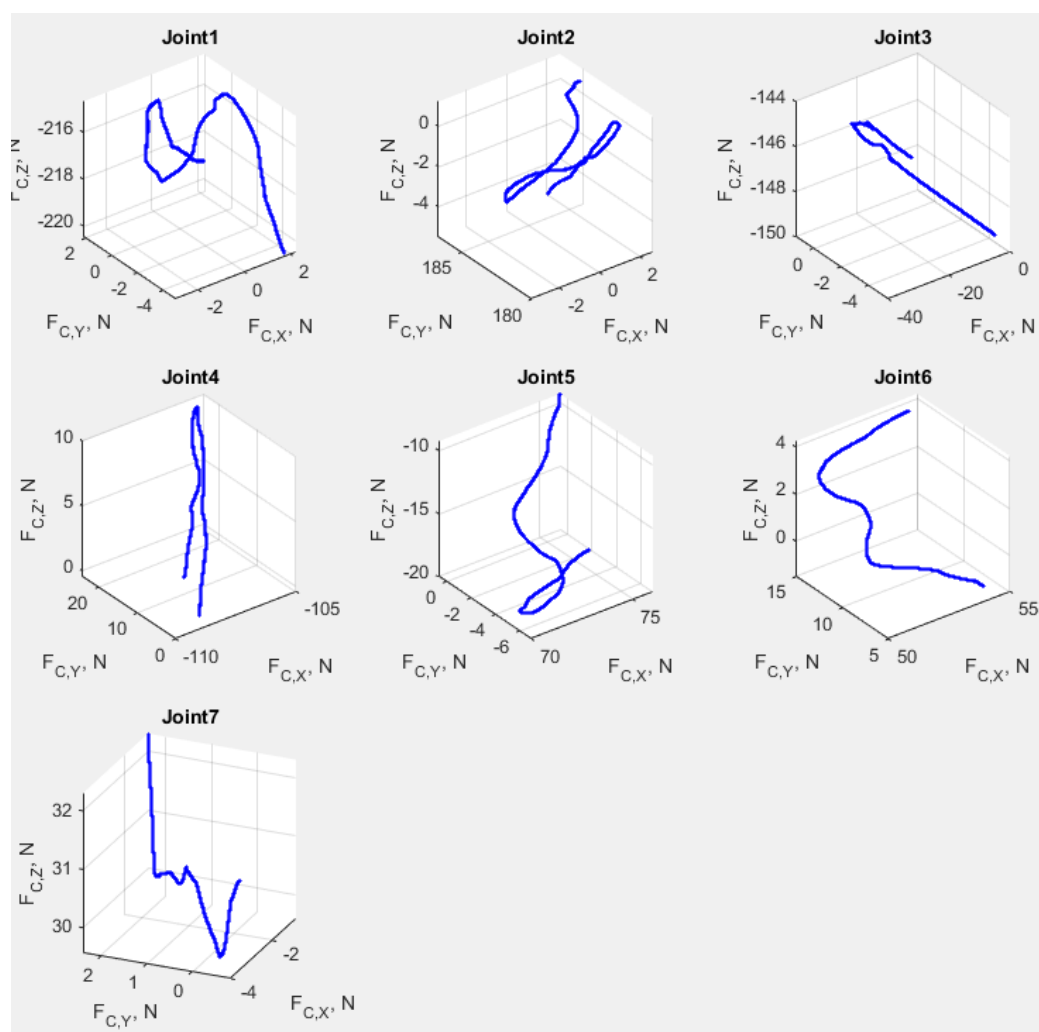


Рисунок 3.19 – Фазовые траектории СУЭП ограничивающих сил семи шарниров КР при реализации движения

Механическая мощность нагрузки и накопленная механическая энергии согласно [43–44] являются источниками опасности при достижении предельно допустимых значений и могут служить индикаторами для выбора режимов ограничения переменных состояния КР с целью исключения опасных ситуаций.

Трассировка геометрического положения звеньев и рабочего органа в пространстве и времени, совмещенное с векторным графиком изменения центра локальных баз и осей вращения звеньев робота (см. рис. 3.20) предоставляет оператору видение объемов занимаемого пространства рабочей области при реализации движения и величин изменения положения и ориентации локальных баз каждого шарнира, что может помочь, например, при выборе алгоритмов планирования и оптимизации движения в существенно ограниченных наличием объектов коллизий рабочих зонах.

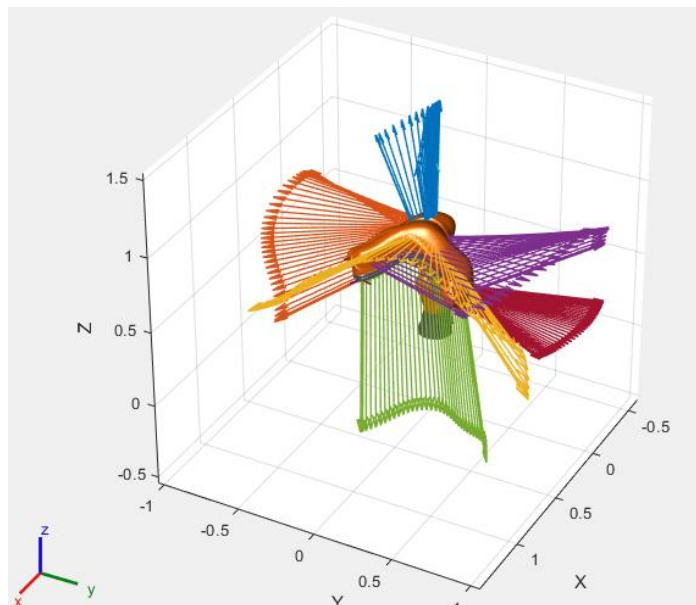


Рисунок 3.20 – Трассировка геометрического положения звеньев и ЦТИ КР в пространстве, совмещенное с векторным графиком изменения центра локальных баз и осей вращения звеньев КР

Выводы

1) Представлено математическое описание линеаризованной (упрощенной) модели электропривода КР, необходимой для оперативного планирования и оптимизации движений, реализующих части ТО. Модель обеспечивает решение алгоритмами планирования обратной задачи динамики с целью прогнозирования изменения основных переменных состояния объекта, в частности, развиваемых моментов, токов, потребления энергии, для обеспечения установленных ограничений для ТО или решения задачи оптимизации в соответствии с функционалом качества.

2) Представлено детализированное математическое описание СУЭП КР. Предложенная комплексная нелинейная имитационная модель с управлением на базе ПИД и силовой частью на основе ШИПД предназначена для исследования и оценки качества результатов планирования движений алгоритмами планирования, оптимизации и разрешения коллизий (функционирующих на упрощенных моделях) – валидации результатов автоматизированного синтеза законов управления для КР, реализующего части ТО. Среди функциональных возможностей модели следует выделить:

- оценку точности позиционирования ЦТИ в статике и в динамики;

- оценку динамики переменных электрической части электроприводов, в частности, показателей электрической мощности;
- оценку динамики переменных механической части мехатронных модулей КР, в том числе, показателей механической мощности, направлений и величин сдерживающих сил в шарнирах КР;
- оценку вероятности исполнения движения по разрешению коллизий (полученную на упрощенной модели), связанной с ошибкой по точности в динамике;
- визуализацию зависимостей переменных состояния КР;
- получение данных для настройки системы критериев качества в задачах оптимизации.

3.4 Синтез имитационной модели энергопотребления промышленного робота на базе аппроксимирующей нейронной сети.

При решении задачи оптимизации – минимизации энергетических затрат КРТП не всегда представляется возможным получить математическое описание СУЭП КР, это может быть связано, например, с использованием в ТП оборудования иностранного производства, которое не снабжается подробными схемами СУЭП.

Традиционно для моделирования СУЭП ПР используется численное интегрирование систем дифференциальных уравнений, однако использование этого метода возможно при условии наличия всех технических параметров объекта, что не всегда возможно на практике. Таким образом, существует проблема идентификации параметров «закрытых» роботизированных и мехатронных систем, используемых на промышленном производстве. В связи с чем возникает необходимость в разработке новых методов, моделей и алгоритмов идентификации параметров ПР. Решение подобного рода задач описано в работах [275, 289]. При этом согласно исследованию [362] наиболее часто авторы используют классические математические алгоритмы, а также эвристические и метаэвристические алгоритмы для решения задач идентификации и оптимизации.

В данной работе для решения задачи идентификации параметров СУЭП ПР предлагается использовать системы внешней сенсорики [351], а параметрический синтез модели реализовать с помощью интеллектуальных инструментов, например, математического аппарата нейронных сетей [34]. Преимуществом такого решения будет высокая скорость синтеза имитационной модели энергопотребления промышленного робота при низких затратах на синтез в условиях частичной нехватки или полного отсутствия данных о технических характеристиках ПР. Таким образом, в результате проведенных исследований предлагается методики синтеза нейросетевых имитационных моделей (НИМ) систем управления электроприводом (СУЭП) промышленного робота (ПР).

Методика была получена в ходе решения следующих научных задач:

- разработки общей структуры расчета энергопотребления промышленного робота;
- проведения эксперимента по измерению угловых и энергетических характеристик СУЭП при повороте каждой оси ПР на фиксированный угол;
- формирования обучающих выборок для нейронных сетей, где входными данными являются угол поворота, угловая скорость и угловое ускорение, а выходными – мгновенная мощность и энергопотребление;
- обучения и проверки адекватности нейросетевых имитационных моделей СУЭП ПР;
- интеграции синтезированных нейросетевых имитационных моделей в общую структуру процедуры расчета энергопотребления ПР.

Эксперимент проведен с использованием шестиосевого промышленного роботоманипулятора средней грузоподъемности KUKA KR10 R1100 sixx, который часто используется в задачах позиционирования деталей при сборке и сварке [34]. Угловая скорость, мгновенная мощность и время измеряется с помощью системы мониторинга динамических параметров и энергопотребления, представленной в работе [69]. Управляющая программа для проведения измерений составлена на языке программирования промышленного робота – Kuka Robot Language (KRL). Согласно управляющей программе и сценарию эксперимента осуществляется поочередный поворот каждой оси ПР на целевой угол (φ_z) с регистрацией мгновенных значений угловой скорости поворота (ω) и мощности (P), потребляемой СУЭП. Для общих расчетов и обучения нейросетевых моделей использованы усредненные значения по результатам серии экспериментов. Значения угла поворота и углового ускорения получены в результате интегрирования и дифференцирования, соответственно. Энергопотребление получено по формуле:

$$E = \int_0^t P \cdot dt.$$

Обучение нейросетевых модулей происходило с помощью алгоритма Левенберга-Марквардта. Данный алгоритм широко используется в задачах прогнозирования, а также показывает высокую результативность при обучении сетей типа многослойный персептрон [202, 226]. Проектируемая сеть содержит один скрытый слой, состоящий из 10 нейронов (рис. 3.21), такое количество нейронов позволяет обеспечить баланс между временем, необходимым для расчета НИМ, и качеством установленных функциональных зависимостей.

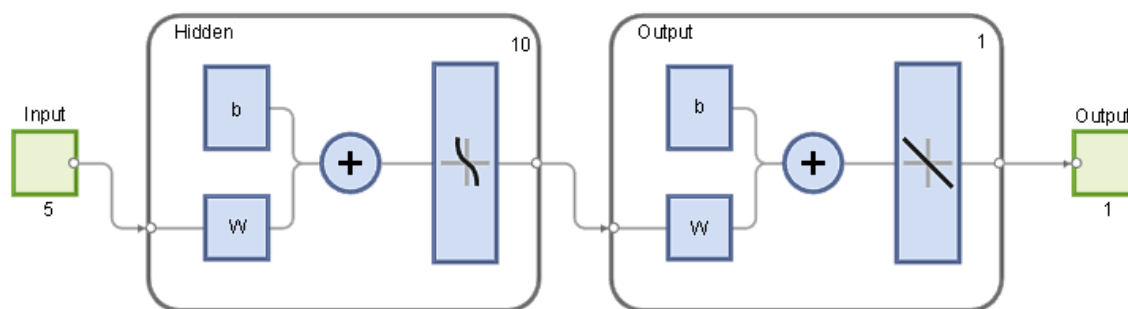


Рисунок 3.21 – Структура нейронной сети

Оценка качества модели проведена путем сравнения ее результатов и обучающих данных по коэффициенту детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{ESS}{TSS}, \quad (3.35)$$

где ESS – прогнозируемая сумма квадратов отклонений, TSS – общая сумма квадратов отклонений, а также с помощью среднего значения относительной погрешности результатов моделирования по отношению к экспериментальным данным.

В качестве программного обеспечения для обучения нейронных сетей использована среда разработки MATLAB (пакет Deep learning toolbox). Имитационная модель энергопотребления ПР реализована в среде MATLAB/Simscape Multibody.

Ключевыми этапами разработанной методики синтеза нейросетевых имитационных моделей СУЭП ПР являются:

- 1) формирование обучающих выборок для нейронных сетей;
- 2) обучение нейросетевых модулей, обеспечивающих имитацию изменения переменных состояния СУЭП;
- 3) анализ качества функционирования синтезированных нейросетевых имитационных моделей СУЭП ПР при расчете энергопотребления.

Общая схема расчета энергопотребления ПР представлена на рис. 3.22. Моделирование механической части ПР происходит в укрупненном блоке 1. Формирование блока 1 произведено с учетом параметров кинематической схемы и массогабаритных показателей звеньев манипулятора, а также ограничений по скорости и ускорению (линейных и угловых) [285], расчет кинематики и моделирование для шестиосевого робота представлены в работах [2] и [141].

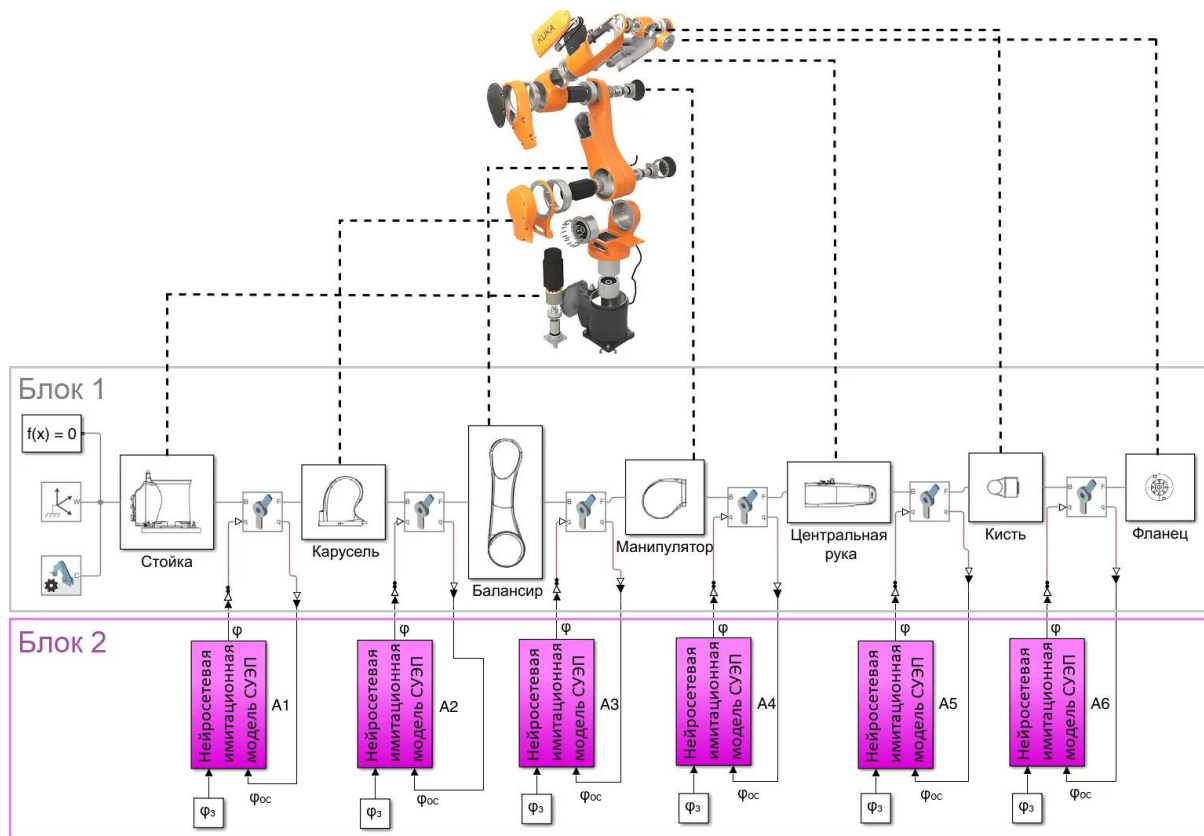


Рисунок 3.22 – Общая схема расчета энергопотребления ПР

В блоке 2 представлен набор НИМ СУЭП, отвечающих за вращение шарниров ПР. Для успешного синтеза НИМ необходима репрезентативная обучающая выборка, которая может быть получена в результате натурного эксперимента. Так, для каждого шарнира ПР (на физическом оборудовании) проведен эксперимент, в ходе которого осуществлялся мониторинг угловых скоростей перемещения осей и энергетических затрат на это перемещение с помощью измерительных устройств [69]. В эксперименте использованы следующие параметры:

- шаг изменения угла поворота каждой оси ПР $\varphi = 30^\circ$;
- диапазоны измеряемых углов поворота осей соответствуют допустимым значениям, указанным в инструкции по эксплуатации ПР [285];
- ограничения угловой скорости и углового ускорения осей составляют 50 % от максимальных значений [285].

Была сформирована база данных согласно структуре (табл. 3.10). Полученные в результате эксперимента данные использованы в качестве обучающей выборки для нейросетевых модулей:

- прогнозирования угловой скорости, где входными данными являются целевой угол и угол положения, а выходной величиной – угловая скорость;
- прогнозирования мгновенной мощности, где входными данными являются целевой угол, угловая скорость, угловое ускорение, энергопотребление, а также мгновенная мощность (на предыдущем шаге интегрирования); выходной величиной является мгновенная мощность.

Таблица 3.10 – Результаты эксперимента

Ось	Номер изм.	t	φ_3 , град	ε , град/с ²	ω , град/с	φ , град	P, Вт	E, Вт·с
A1	1	0	30	0	0	0	0	0
A1	2	0,02	30	0,02	0.05	0.02	268	5
...	...	...	...	...	...	...	...	...
A1	20	0.44	30	0,03	2	28,9	256	178
A1	21	0.46	30	0	0	30	250	184
...	...	...	...	...	...	...	...	...
A1	583	0	330	0	0	0	0	0
A1	584	0,02	330	0,04	0.07	0.03	265	11
...	...	...	...	...	...	...	...	...
A1	686	2.37	330	0,02	2	333.5	271	1128
A1	687	2.39	330	0	0	334	252	1134
...	...	...	...	...	...	...	...	...
A2	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...
A6	...	...	...	...	...	...	...	...

φ_3 – угол задания поворота оси; t– текущее время от начала движения; ε – угловое ускорение; ω – угловая скорость; φ – угол положения (фактический); P – мгновенная мощность СУЭП оси; E – энергопотребление СУЭП оси.

Общая структура нейросетевой имитационной модели системы управления электрическим приводом оси ПР представлена на рис. 3.23. Представленная модель включает два нейросетевых модуля, имитирующих функциональные зависимости $\omega(t)$ и $P(t)$, остальные переменные вычисляются согласно схеме.

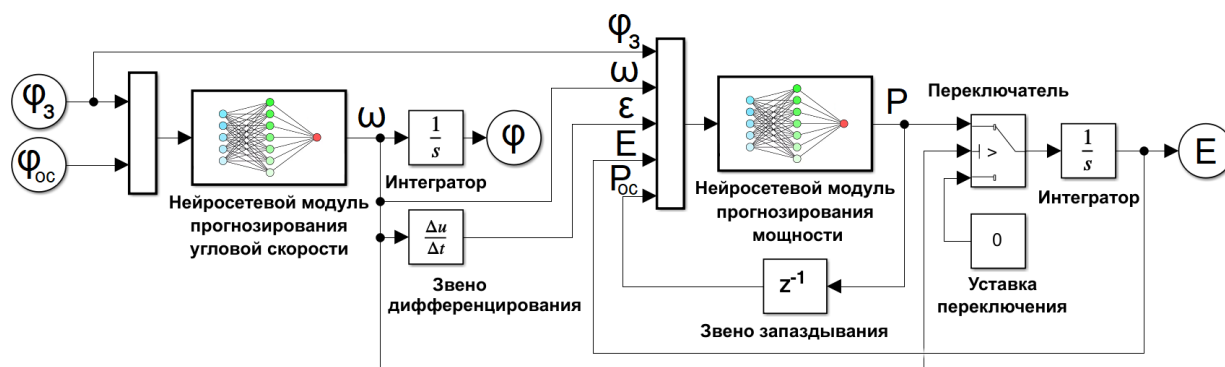


Рисунок 3.23 – НИМ СУЭП ПР, имитирующая изменение переменных состояния объекта, в частности, затраты энергии

Результаты расчета коэффициентов детерминации (R^2) для каждой из осей ПР представлены в табл. 3.11, согласно полученным значениям нейронная сеть достаточно точно аппроксимирует зависимость энергопотребления ПР.

Таблица 3.11 – Результаты оценки R^2 НИМ СУЭП осей ПР

Ось	A1	A2	A3	A4	A5	A6
R^2 (по ω)	0.92	0.96	0.99	0.99	0.99	0.99

С целью анализа качества функционирования разработанных нейросетевых моделей построены графики изменения угловой скорости, угла и энергопотребления (рис. 3.24 – 3.26). Здесь сравниваются переходные характеристики переменных состояния объекта и результатов имитации на НИМ, а также отмечены относительные погрешности (δ) результатов сравнения переменной энергопотребления (рис. 3.26). Как видно из графиков, модели в полной мере имитируют зависимости, воспроизводящие динамику исследуемых величин. Среднее значение относительной погрешности результата имитации переходных процессов по углу положения составило $\delta_\varphi \approx 0.2814 \%$, а по энергопотреблению $\delta_E \approx 2.351\%$.

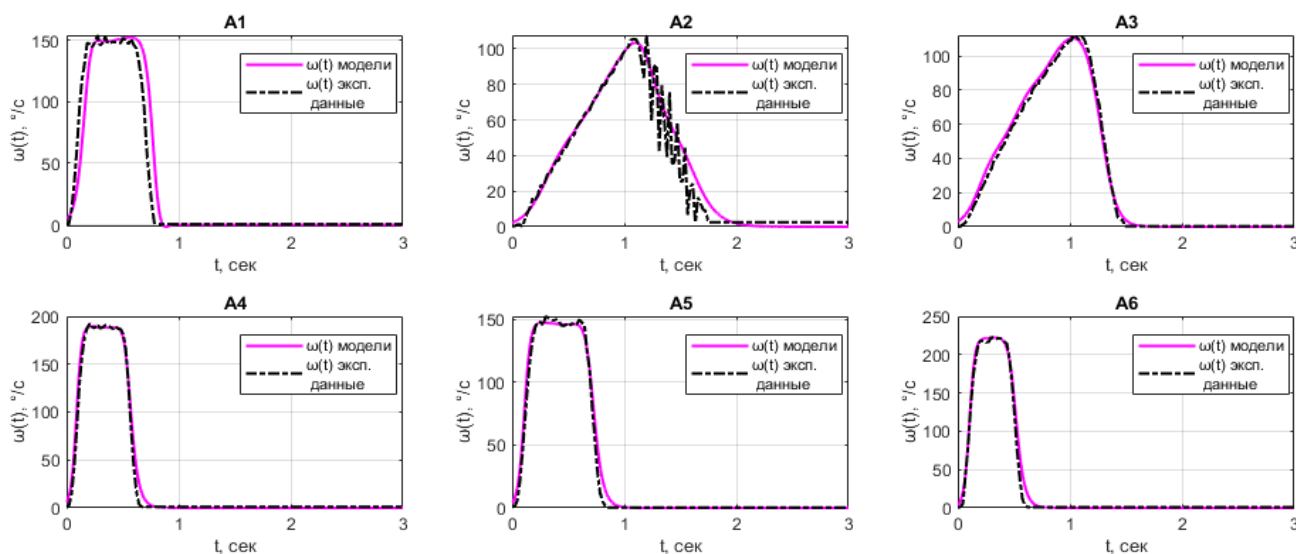


Рисунок 3.24 – Переходные процессы по угловой скорости каждого шарнира ПР ω

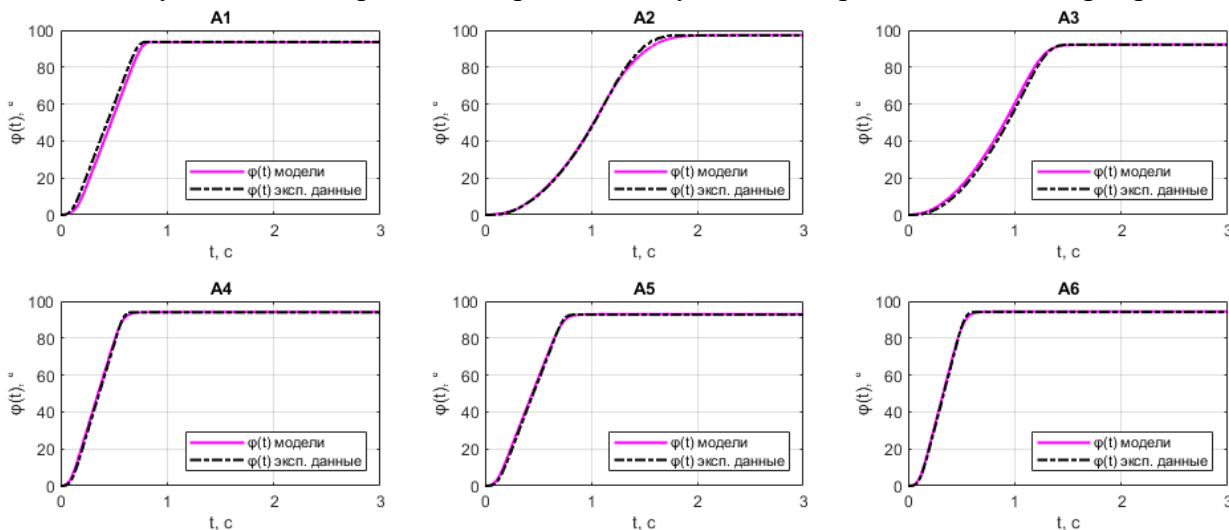


Рисунок 3.25 – Переходные процессы по углу положения каждого шарнира ПР φ

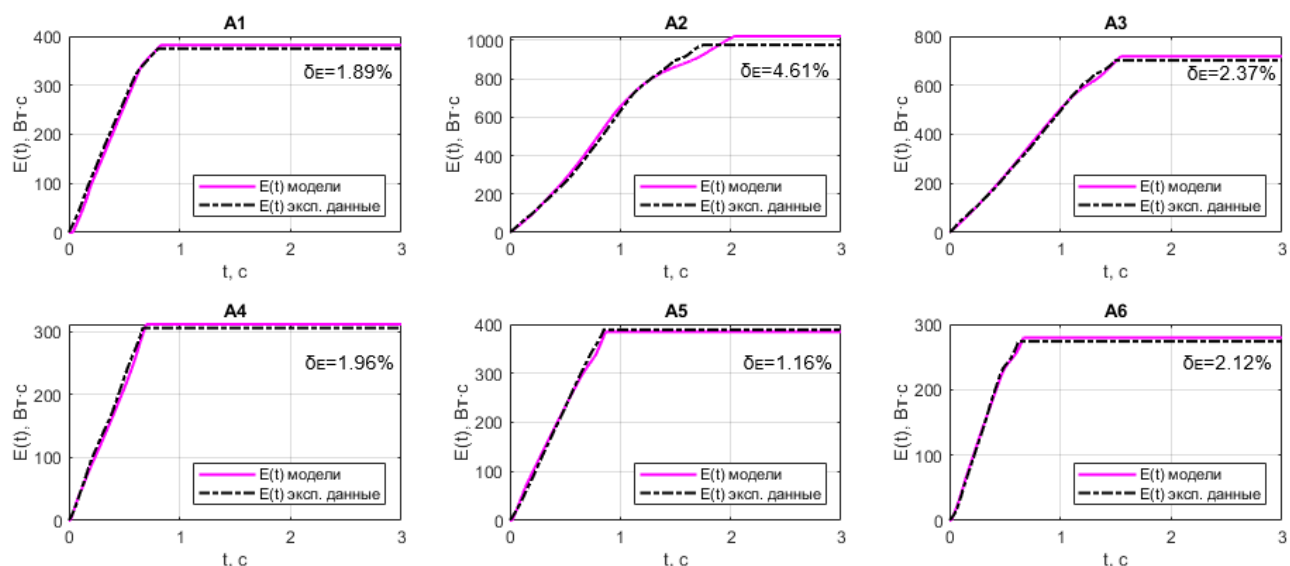


Рисунок 3.26 – Переходные процессы по энергопотреблению на поворот каждого шарнира ПР $E(t)$

Предложенная модель обеспечивает прогноз суммарного значения энергопотребления на реализацию движения и может быть использована в КРТК, для КР которого не представляется возможным получить полное математическое описание. Представленная процедура (методика) синтеза имитационной модели может быть адаптирована для ПР и КР с различными показателями грузоподъемности и для различных ТП за счет выбора: данных для обучения нейросетевых модулей; структур нейронных сетей; алгоритмов обучения нейронных сетей, а также необходимых метрик качества.

Отличительной особенностью, разработанной НИМ энергопотребления, является высокая скорость синтеза при минимуме информации о технических характеристиках ПР. Предложенная нейросетевая модель энергопотребления, а также разработанная оригинальная нейро-нечеткая модель, подробно рассмотренная в [108], являются элементами библиотеки моделей (ВМ), представленной в структурно-функциональной схеме в гл. 4, и задействованы в работе алгоритма управления моделями КРТП [255] в целях формирования управляющих воздействий для оптимизации движений КР.

Управление КРТП по модели с переменной структурой позволяет достигать заданного функционала качества, связанного интегральными показателями: производительностью, безопасностью и энергоэффективностью. Переменная структура модели концептуально представлена на рис. 3.27. Выбор модели осуществляется системой управления в зависимости от идентифицированных параметров поставленного технологического задания на ТО или часть ТО.

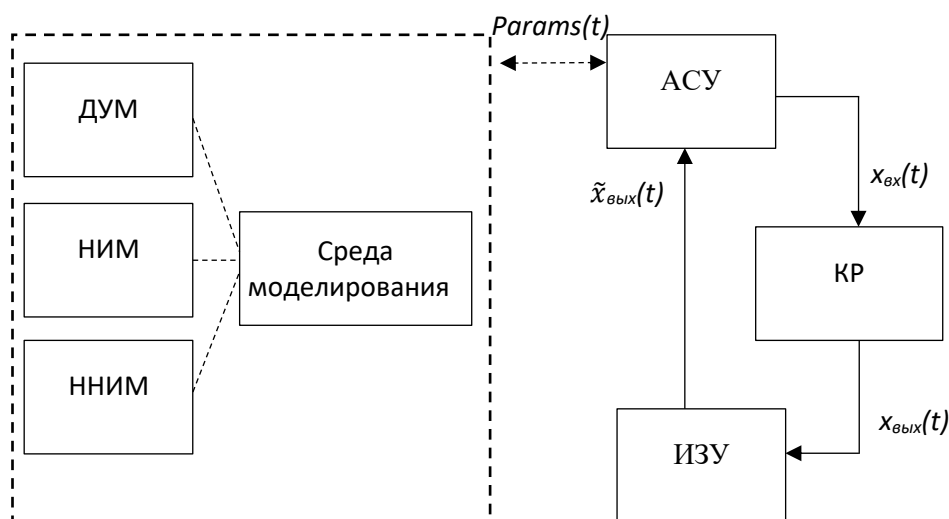


Рисунок 3.27 – Переменная структура модели энергопотребления (в блоке ВМ): НИМ – нейросетевая модель; ННИМ – нейро-нечеткая модель; ДУМ – модель на базе дифференциальных уравнений; ИЗУ – система измерительных устройств

При расчете энергоэффективности движений система управления может опираться на любой из классов тройки ДФУ, FIS или NN, а также в одной модели расчета энергопотребления КР использовать разные классы тройки ДФУ, FIS и NN для каждого электропривода в отдельности, принимая во внимание достоинства и недостатки каждого класса. Эффективность функционирования предложенных моделей была доказана при выполнении экспериментов в рамках ТП авиастроительного предприятия (см. прил. В).

Выводы

1) Предложена методика синтеза приближенной модели энергопотребления ПР за счет разработки нейросетевых модулей, имитирующих СУЭП, продемонстрирована высокая степень соответствия идентифицируемых зависимостей данным, получаемым со средств измерения параметров ПР (физического оборудования).

2) Полученные результаты демонстрируют возможность использования предложенной имитационной модели для прогноза энергозатрат в качестве целевой функции алгоритмами оптимизации КРТП при планировании движений, а также при разработке цифровых двойников роботизированных ячеек для отслеживания переменных состояния ТП в реальном времени, если получение полного математического описания не представляется возможным.

3.5. Модель логики управления технологическими операциями на базе теории конечных автоматов в реализации State-Flow

Для управления КРТП на уровне планирования и частей ТО (ТПд, ВП, РХ и ВХ) предлагается оригинальная дискретная модель автоматизированной системы управления ТО (АСУ ТО), координируемой управляющими командами из ДСМ и агрегирующей модели СУЭП. Управляемыми или наблюдаемыми объектами КРТП в модели являются:

- КР (основной робот, осуществляющий как ВП, так и ТПД);
- позиционер (ПР) (устройство, выполняющее только ВП, в работе в качестве позиционера рассматривается КР);
- модель оператора (данные о положении сочленений оператора либо считываются с системы распознавания [262], либо моделируются непосредственно АСУ ТО в зависимости от задач обращения к АСУ ТО);
- модель изделия;
- набор моделей инструмента и станции автоматической смены инструмента.

Движения КР и ПР определяются, исходя из задания на ТО и текущей ситуации – состояния окружения (Environment) (прил. Ж). Управление ТО реализуется через планирование и оптимизацию движений КР и ПР в результате управленческих решений, сформированных на основе анализа существенных параметров окружения и на основе алгоритмов, ассоциированных с соответствующими состояниями ключевых подсистем и компонентов комплекса.

Оптимизационный потенциал режимов управления в модели АСУ ТО обеспечивается организацией ситуационного управления на основе логико-трансформационных правил $\mathcal{A}_i$; $Q_j \xRightarrow{U_k} Q_l$ теории Д.А. Поспелова [118], где $\mathcal{A}_i$ – полная ситуация, Q_j и Q_l – текущая и новая ситуация соответственно, U_k – k -ое управленческое решение. Состояния ключевых подсистем (объектов модели АСУ ТО), которые в совокупности с данными и алгоритмами формируют основу БЗ, формализованы в виде машин конечных автоматов, в виде диаграмм состояния State Flow на основе обобщенного формализованного описания автомата в виде упорядоченной пятёрки элементов множеств:

$$A = (S, X, Y, \delta, \lambda), \quad (3.36)$$

где S – конечное множество состояний автомата, X, Y – конечные входной и выходной алфавиты соответственно; $\delta: S \times X \rightarrow S$ – функция переходов; $\lambda: S \times X \rightarrow Y$ – функция выходов.

Машину состояний дополняет набор модулей, идентифицирующих и характеризующих типичные и атипичные сценарии внутри рабочей зоны, требующие соответствующей реакции со стороны управляющей системы [300].

Центральным блоком ПО КРТП является автономная (standalone) машина StateFlow (SFX) (прил. 7), реализованная в соответствии с теорией конечных автоматов [81] в среде Simulink Matlab, совместимая с технологией автоматической генерацией C/C++ кода и обрабатываемая в цикле согласно листингу 3.2. Выходными управляющими сигналами SFX машины служат сообщения в формате ROS2 (Robot Operating System) для локальных систем управления СУЭП КР и ПР, содержащие закон управления $q(t)$ для каждого движения, реализующего части ТО.

Листинг 3.2

```
data_IIWA1 % загрузка значений параметров моделей роботов
% создание агрегирующего объекта имитационной модели
```

```

coordinator = CoordinatorSFClass('coordinator');
coordinator.ShowVisual=1; % установка флага визуализации
% инициализация поля объекта coordinator подготовленного машиной состояний,
% хранящейся в standalone sfx формате
coordinator.FlowChart = FlowDrill('coordinator', coordinator, '-animationDelay',5);
% создание узлов для Robot Operating System (ROS)
coordinator.ROS.node1=ros2node("/Node1");
pause(1);
coordinator.ROS.node2=ros2node("/Node2");
pause(1);
% создание объектов типа publisher, message и subscriber
coordina-
tor.ROS.pub=ros2publisher(coordinator.ROS.node1,"/CurentCMD","std_msgs/Float6
4MultiArray");
coordinator.ROS.msg=ros2message(coordinator.ROS.pub);
coordinator.ROS.sub=ros2subscriber(coordinator.ROS.node2,"CurentCMD",@FCallback);
% инициализация условия выхода из цикла обработки машины состояния
coordinator.FlowChart.finish=0;
i=0; % инициализация счетчика переходов в модели
% цикл обработки машины состояний
while coordinator.FlowChart.finish~=1
    i=i+1;
    % инициирование запуска
    if i==1
        coordinator.FlowChart.SwitchOn
    end
    step(coordinator.FlowChart)
end
%% Функция обратного вызова для получения требуемого формата информации на
стороне subscriber
function FCallback(message)
    % переформатирование сообщения: 8 строк, 1-7 - векторы угловых
    % координат для соответствующих шарниров КР, 8 - вектор временных интервалов
    reshape(message.data,[8 (size(message.data,1))/8]);
end

```

Верхний уровень SFX машины включает 2 состояния SwitchOn1 и Main1, переход из состояния SwitchOn1 в Main1 осуществляется по условному переходу, содержащему триггерное событие SwitchOn1. Состояние Main1 агрегирует в себе семь состояний (табл. 3.12), при этом процессы (функционирующие в соответствующих состояниях) имеют параллельную временную декомпозицию.

Таблица 3.12 – Состояния верхнего и второго уровня машины состояний

ID декомпозиции	Наименование состояния	Основной функционал состояния/процесса
1	SwitchOn	Технологическая операция (ТО) в деактивированном состоянии
2	Main	Управление и мониторинг ТО в активном состоянии
2.1	CommandReader	Интерпретация команд (по ТО или оператора)

Продолжение таблицы 3.12

ID декомпозиции	Наименование состояния	Основной функционал состояния/процесса
2.2	Operator	Управление и мониторинг имитационной моделью оператора
2.3	Robot	Управление и мониторинг имитационной моделью ведущего робота, отправка управляющих команд на контролеры физического оборудования посредством ROS
2.4	Robot2	Управление и мониторинг имитационной моделью вспомогательного робота (позиционера), отправка управляющих команд на контролеры физического оборудования посредством ROS
2.5	Tool	Управление и мониторинг состоянием технологической оснастки (инструмента). Актуализация состояния имитационной модели
2.6	Workpiece	Управление и мониторинг состоянием изделия. Актуализация состояния имитационной модели
2.7	Environment	Управление и мониторинг состоянием всех объектов коллизий в рабочей зоне. Актуализация состояния имитационной модели

Состояние CommandReader (процесс получения команд задания). Состояние CommandReader (рис. 3.28) принадлежит первому приоритету исполнения параллельных процессов.

Вложенное состояние CommandReader.Initialization является первым подсостоянием, активируемым по безусловному переходу в момент передачи управления процессу (состоянию) CommandReader, и используется для инициализации структуры модели КРТП, в том числе, варианта абстракции человеческого фактора – имитационной модели или данных мониторинга системы мультимодального контроля действий и поведения человека. В текущем исполнении модели КРТП настройки установлены в режиме использования имитационной модели оператора, на базе кинематической модели робота 'valkyrie' [363].

Переход во вложенное состояние CommandReader.CommandReading осуществляется при срабатывании защитного условия – события Start, создаваемого по завершении процесса инициализации (состояние Operator.Initialization МЧФ методом startProcess(coordinator) агрегирующего объекта coordinator).

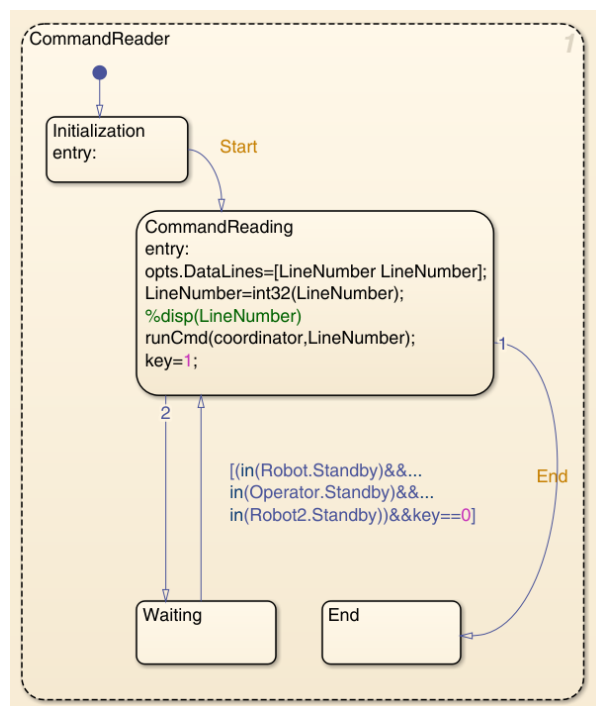


Рисунок 3.28 – Состояние CommandReader

Интерпретация и маршрутизация команды осуществляется методом `runCmd(coordinator,LineNumber)` (описание используемых АСУ ТО программных методов представлено в гл. 6, в частности на диаграмме классов) агрегирующего объекта `coordinator` на основе библиотеки команд для трех групп моделей: основного робота – КР, робота-позиционера ПР, МЧФ. При чтении команд (в случае реализации абстракции человеческого фактора имитационной моделью) используется структура, определяющая порядок чтения из файла строковых переменных `coordinator.FlowChart.opts` из файла `cmd.txt` (диаграмма артефактов, рис. 3.29).

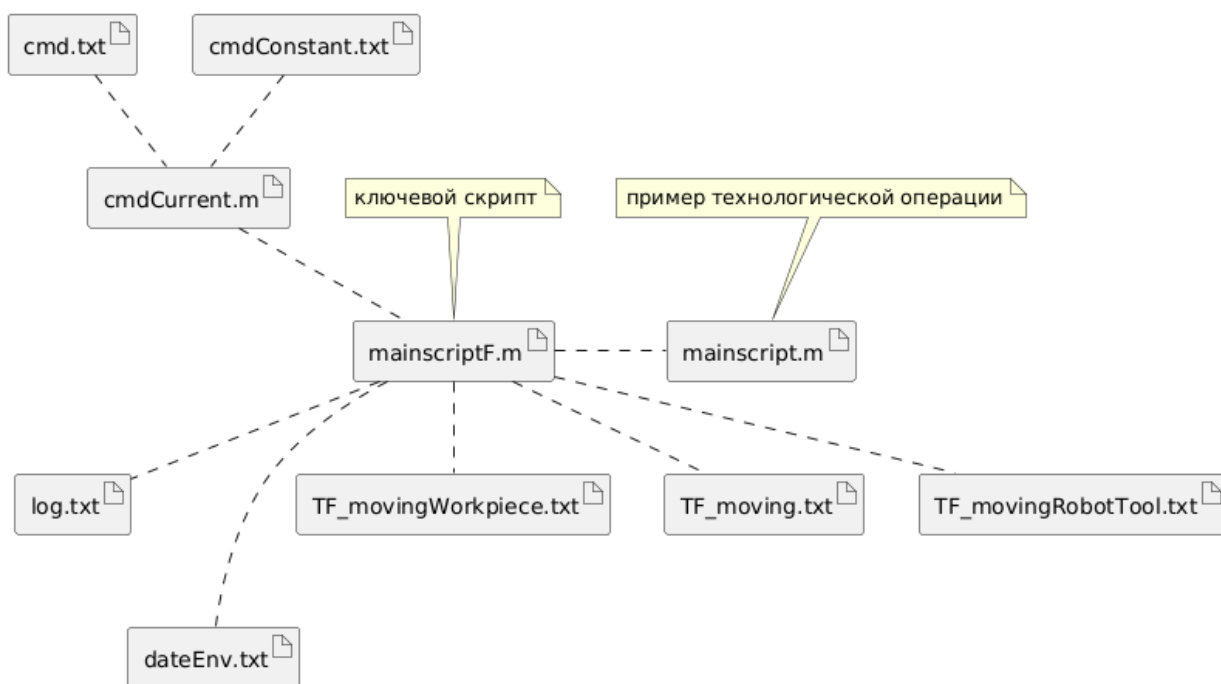


Рисунок 3.29 – Фрагмент диаграммы артефактов ПО АСУ

При получении команд (в случае реализации абстракции человеческого фактора массивом данных мониторинга системой мультимодального контроля действий и поведения человека) распознавание команды происходит согласно методам, изложенных в [47].

Обобщенные команды абстракций ТПД и ВП сверления для имитационных моделей `Robot` и `Operator` представлены в табл. 3.13, задание значений атрибутов определит единственным образом необходимое движение КР или ПР.

По завершении исполнения кода текущего состояния осуществляется безусловный переход в состояние `CommandReader.Waiting`, которое будет активным до тех пор, пока во вложенных моделях роботов и оператора не будут спланированы и оптимизированы соответствующие заданию траектории.

После срабатывания защитного условия

[in(Robot.Standby)&&in(Operator.Standby)&& in(Robot.Standby)&&key==0]

состояние `CommandReader.CommandReading` вновь активизируется и запускается следующая итерация отработки задания; так происходит до тех пор, пока не будет принята команда `End`, переводящая все модели машины автоматов в терминальное состояние `CommandReader.End`.

Таблица 3.13 – Обобщенные команды абстракций ВП и ТПД ТО

№	Команда	Исполняющая модель (описание)	Реализующие методы
1.	TakeWorkpiece	Operator (взять изделие определённым хватом в определенной позиции)	<i>moveToWorkpiece(...)</i> <i>takeUnit(...)</i>
2.	MoveWorkpiece	Operator (передвинуть деталь в заданную позицию)	<i>moveOnly(...)</i>
3.	ShowPoint	Operator (указать маркером точку сверления, используя вторую свободную руку)	<i>holdUnitAndMarker(...)</i>
4.	StopShowing	Operator (остановить указание точки)	<i>StopMarkeringAndEscape(...)</i>
5.	TakeTool	Robot (взять инструмент определённым хватом в определенной позиции в магазине инструментов)	<i>moveToTool(...)</i> <i>takeUnit(...)</i>
6.	Drill	Robot (выполнить комплекс движений, состоящих из вспомогательных и технологического перехода с целью сверления отверстия по указанию оператора)	<i>moveToDrill(...)</i> <i>drilling(...)</i> <i>reverseStroke(robotObj)</i>
7.	PutTool	Robot (отсоединить инструмент в определенной позиции в магазине инструментов)	<i>moveOnly(...)</i> <i>putUnit(...)</i>
8.	Move	Robot, Operator (переместить ЦТИ в заданную позицию)	<i>moveOnly(...)</i>
9.	End	Переход всех моделей в терминальное состояние	-
10.	MoveHand	Operator (переместить руку в заданную позицию)	<i>moveHand(...)</i>
11.	TakeRWorkpiece	Robot2 (взять изделие определённым хватом в определенной позиции в магазине инструментов)	<i>moveToWorkpiece (...)</i> <i>takeUnit(...)</i>
12.	PutRWorkpiece	Robot2 (отсоединить инструмент в определенной позиции в магазине инструментов)	<i>moveOnly(...)</i> <i>putUnit(...)</i>

Состояние Operator (имитационная модель человеческого фактора). Состояние Operator (прил. II) принадлежит второму приоритету исполнения параллельных процессов. Вложенное состояние Operator используется для имитации человеческого фактора в КРТП. Моделирование движений оператора базируется на кинематической модели антропоморфного робота 'valkyrie' библиотечной системы 'Robotics'.

лиотеки пакета Robotics System Toolbox Matlab, загружаемой в объединенном формате описания робототехники URDF [363] в объекте класса `rigidBodyTree`. Управление моделью осуществляется посредством пользовательского класса `OperatorClass` – наследника суперкласса `RobotClass`.

`Operator.Initialization` является первым подсостоянием, активируемым по безусловному переходу в момент передачи управления процессу (состоянию) `Operator`. Процесс инициализации осуществляется посредством вызова конструктора класса `OperatorClass` с последующим заданием первоначальных параметров для модели оператора, в частности, методом *`shiftModel(...)`*, специфичным для текущей ТО, и в соответствии со структурой организации совместной рабочей зоны, расположения объектов коллизий, ориентации в пространстве и т.п. После завершения процесса инициализации запускается метод *`startProcess(coordinator)`* агрегирующего объекта `coordinator`, метод порождает событие `Start`, являющееся триггером для запуска активности всех встроенных моделей.

Для модели `Operator` таким подсостоянием является подсостояние ожидания `Operator.Standby`, содержащее код на вывод служебной информации в командную строку и в log файл, а также запускающее метод *`show(coordinator)`* агрегирующего объекта `coordinator`. Метод порождает событие `Show`, являющееся триггером для состояния `Environment`, отвечающего за оперативное отображение графики и сохранение графических фреймов в базе данных. Метод ограничен защитным условием проверки на существование непустого массива объектов окружения и активации ключа передачи управления процессу визуализации (`key==0`).

Из события `Operator.Standby` возможны 4 перехода в зависимости от интерпретации команды процессом `CommandReader`.

Первый переход осуществляется по команде `TakeWorkpiece` в подсостояние `Operator.WorkpieceCapturingProcess.MovingTo`, содержащее метод класса `OperatorClass` *`moveToWorkpiece(...)`*, вызываемого с обязательным указанием 4-х атрибутов:

- 1) `operatorObj` – текущей модели оператора, активного объекта класса `OperatorClass`;
- 2) `workpieceObj` – обрабатываемого изделия, активного объекта класса `WorkpieceClass`;
- 3) `'leftPalm'` – имени звена, являющегося захватом в текущем переходе (в данном случае используется кисть левой руки) объекта `coordinator.FlowChart.operatorObj.Model`;
- 4) `side` – параметра стороны захвата (поле `WorkpieceClass`).

Функционал метода сводится к расчету ОЗК в условиях ограничений для позиции и ориентации ЦТИ (в данном случае `'leftPalm'`) в точке захвата, расположенной в рабочей зоне детали. Метод возвращает вектор состояния угловых координат суставов модели оператора в позиции захвата детали. Далее управление по безусловному переходу передается состоянию `Operator.WorkpieceCapturingProcess.WorkpieceCapturing`, в котором с помощью метода класса `OperatorClass` *`takeUnit(...)`* происходит интеграция модели изделия в кинематическую модель `rigidBodyTree` оператора в качестве звена, включая вложенные атрибуты объекта коллизии и визуа-

лизации, в свою очередь из объектов коллизий окружения модель изделия удаляется. После успешного планирования точки назначения и модернизации объекта `rigidBodyTree` выводится служебная информации и устанавливается ключ `key=0`, далее по безусловному переходу активизируется опять состояние `Operator.Standby` для ожидания последующих заданий.

Второй переход из состояния `Operator.Standby` осуществляется по команде `MoveWorkpiece` в подсостояние `Operator.Moving`, содержащее метод класса `OperatorClass` `moveOnly(...)`, вызываемого с обязательным указанием трех атрибутов:

- 1) `operatorObj` – текущей модели оператора, активного объекта класса `OperatorClass`;
- 2) `'workpiece'` – имени звена, относительно которого будет решаться ОЗК (в данном случае – изделия, присоединенного к руке модели оператора);
- 3) `TF_movingWorkpiece` – матрицы трансформации для ЦТИ в точке назначения, получаемой со средств системы мультимодальной сенсорики (системы распознавания) либо определяемой исходя из технологической инструкции по выполнению операции (в случае, если в качестве абстракции человеческого фактора используется имитационная модель); матрица считывается из файла `TF_movingWorkpiece.txt` (см. рис. 3.29).

Функционал метода сводится к расчету ОЗК в условиях ограничений для позиции и ориентации ЦТИ (в данном случае `'workpiece'`), определенных матрицей `TF_movingWorkpiece`. Метод возвращает вектор состояния угловых координат суставов модели оператора в позиции точки назначения для перемещения изделия. После успешного планирования точки назначения выводится служебная информации и устанавливается ключ `key=0`, далее по безусловному переходу активизируется состояние `Operator.Standby` для ожидания последующих заданий.

Третий переход из состояния `Operator.Standby` осуществляется по команде `ShowPoint` в подсостояние `Operator.PointMarkering` содержащее метод класса `OperatorClass` `holdUnitAndMarker (...)`, вызываемый с обязательным указанием трех атрибутов:

- 1) `operatorObj` – текущей модели оператора, активного объекта класса `OperatorClass`;
- 2) `workpieceObj` – обрабатываемого изделия, активного объекта класса `WorkpieceClass`;
- 3) `mode` – режима локализации точек сверления (поддерживается три варианта: по координатам из команды или из файла, по произвольной точке на поверхности фигуры, по центру верхней поверхности детали).

Функционал метода сводится к расчету ОЗК в условиях ограничений для позиции и ориентации ЦТИ маркера, удерживаемого оператором в свободной руке. Метод возвращает вектор состояния угловых координат суставов модели оператора в позиции маркировки изделия, при этом деталь, удерживаемая другой рукой, меняет позицию и ориентацию незначительно (возможное смещение организовано целенаправленно для придания естественности поведения модели оператора). После успешного планирования точки назначения выводится служебная ин-

формации, актуализируются параметры визуализации и устанавливается ключ `key=0`, далее по безусловному переходу активизируется состояние `Operator.Standby` для ожидания последующих заданий.

Четвертый переход по событию `End` выполняется в терминальное состояние до момента перезапуска модели в рамках следующей ТО.

Состояние Robot (имитационная модель основного КР). Состояние `Robot` (прил. К) принадлежит третьему приоритету исполнения параллельных процессов. Вложенное состояние `Robot` используется для имитационного моделирования, планирования и оптимизации движений КР и формирования управленческих команд, передаваемых посредством ROS на физическое оборудование КР, функционирующего в рамках ТП. Моделирование движений КР базируется на кинематической модели 'kukaIwa7' библиотеки пакета `Robotics System Toolbox Matlab`, загружаемой в объединенном формате описания робототехники URDF [97] в объекте класса `rigidBodyTree`. Управление моделью осуществляется посредством пользовательского класса `RobotClass`. Все методы класса `RobotClass`, связанные с организацией движения КР, оснащены функционалом планирования движения, оптимизации движения, разрешения коллизий всеми алгоритмами, рассмотренными в работе. Выходными аргументами методов организации движения класса `RobotClass` среди прочих являются структуры `Q` и `D`, содержащие исчерпывающую информацию по кинематике и динамике движения соответственно.

`Robot.Initialization` является первым подсостоянием, активируемым по безусловному переходу в момент передачи управления процессу (состоянию) `Robot`. Процесс инициализации осуществляется посредством вызова конструктора класса `RobotClass` с последующим заданием первоначальных параметров для модели робота, в частности ограничений угловых координат (структура `RobotLimits`) в соответствии с паспортными характеристиками КР (листинг 3.3):

Листинг 3.3

```
robotObj.RobotLimits.TorqueLim=([176 176 110 110 110 40 40]);  
robotObj.RobotLimits.VelocityLim=(deg2rad([98 98 100 130 140 180 180]));  
robotObj.RobotLimits.AcelLim=([ 8.5 8.5 8.7 11.3 12.2 15.7 15.7 3]);  
robotObj.RobotLimits.angleLim=deg2rad([170 120 170 120 170 120 175]);
```

а также дополнительных ограничений степеней подвижности, связанных с необходимостью удержания приемлемых для ТП поз КР, специфичных для текущей ТО сверления (листинг 3.4):

Листинг 3.4

```
robotObj.Model.Bodies{1, 4}.Joint.PositionLimits= [-0.01 0.01];  
robotObj.Model.Bodies{1, 6}.Joint.PositionLimits= [-0.01 0.01];
```

После завершения процесса инициализации и при наличии события `Start`, порождённого методом `startProcess(coordinator)` агрегирующего объекта `coordinator`, состояния `Operator`, осуществляется переход в состояние `Robot.Standby`, содержащее код на вывод служебной информации в ко-

мандную строку и в log файл, а также запускающее метод *show(coordinator)* агрегирующего объекта *coordinator* (по аналогии с алгоритмом, указанным в описании состояния *Operator.Standby*).

Из события *Robot.Stanby* возможны 5 переходов в зависимости от интерпретации команды процессом *CommandReader*, ведущих (помимо терминального состояния) в две группы состояний, характеризующих РХ (состояние *Robot.ManufacturingStep*) и ВХ (состояние *Robot.AuxiliaryStep*) ТО сверления.

Первый переход осуществляется по команде *Drill* в подсостояние *Robot.ManufacturingStep.MovingToDrill*, содержащее метод класса *RobotClass* *moveToDrill(...)*, вызываемый с обязательным указанием трех атрибутов:

- 1) *robotObj* – текущей модели КР, активного объекта класса *RobotClass*;
- 2) *operatorObj* – текущей модели оператора, активного объекта класса *OperatorClass*;
- 3) *workpieceObj* – обрабатываемого изделия, активного объекта класса *WorkpieceClass*.

Функционал метода сводится к планированию движения инерциальным способом или решением ОЗК в условиях ограничений для позиции и ориентации ЦТИ (в данном случае 'tool') в точке начала РХ (согласно требованиям, предъявляемым к циклу сверления (см. гл. 2). Метод возвращает вектор состояния угловых координат шарниров модели КР в точке начала РХ.

Далее для пары конфигураций КР в КП {*startConfig*, *endConfig*}, определяющей точку начала и точку назначения ВХ ТПд, должна быть спланирована траектория с учетом трех факторов, возможности исполнения, безопасности (отсутствия коллизий), энергоэффективности (минимизации энергозатрат на ВХ) или минимизации времени исполнения. Для этих целей состояние *Robot.ManufacturingStep.MovingToDrill* подкрепляется комплексом внешних функций и базы данных, реализующих интеллектуальные алгоритмы планирования, проверки достижимости решения и его оптимизации, в частности функцией:

$$IPIDtech(robotObj.Model,(endConfig)',(startConfig)',1.12,1).$$

В результате отработки функций формируется сообщение ROS для передачи управляющих команд на контроллеры физического оборудования КР:

$$\begin{aligned} coordinator.ROS.msg.data &= [coordinator.Q.q; coordinator.Q.tSamples]; \\ &sendMsgCmd(coordinator); \end{aligned}$$

На стороне подписчика ROS при получении сообщения *std_msgs/Float64MultiArray* функцией обратного вызова (см. листинг 3.2) данные *coordinator.ROS.msg.data* для реализации управления преобразуются в формат: $\begin{bmatrix} Q \\ t \end{bmatrix}$, где Q – матрица угловых координат КР размерностью $7 \times n$; t – вектор временных значений, соответствующих изменением угловых координат, размерностью $1 \times n$. Данные передаются на исполнение оборудованием КР.

После успешного планирования движения КР выводится служебная информация и обновляются параметры визуализации, далее по безусловному переходу активизируется состояние

Robot.ManufacturingStep.Drilling предназначенного для планирования движения соответствующего РХ сверления. Поиск конечной точки назначения осуществляется методом `drilling(robotObj,workpieceObj)`, вызываемый с обязательным указанием двух атрибутов:

- 1) `robotObj` – текущей модели КР, активного объекта класса `RobotClass`;
- 2) `workpieceObj` – обрабатываемого изделия, активного объекта класса `WorkpieceClass`.

Функционал метода сводится к планированию движения инерциальным способом или решением ОЗК в условиях ограничений для позиции и ориентации ЦТИ (в данном случае 'tool') в точке окончания РХ. Метод возвращает вектор состояния угловых координат шарниров модели КР в точке окончания РХ.

Далее для пары конфигураций КР в КП {startConfig, endConfig}, определяющем точку начала и точку назначения РХ ТПд, должно быть спланировано движение с учетом трех факторов: возможности исполнения, безопасности (отсутствия коллизий), энергоэффективности или максимизации производительности (только в случае соблюдения режима сверления, отраженного в технологической инструкции). Для этих целей состояние `Robot. ManufacturingStep.Drilling` подкрепляется комплексом внешних функций и базой данных, реализующих интеллектуальные алгоритмы планирования, проверки достижимости решения и его оптимизации.

В результате отработки функций формируется сообщение ROS для передачи управляющих команд на контроллеры физического оборудования КР по аналогии с алгоритмами работы ROS состояния `Robot. ManufacturingStep.MovingToDrill`. После успешного планирования движения выводится служебная информация и обновляются параметры визуализации, далее по безусловному переходу активизируется состояние `Robot.ManufacturingStep.ReverseStroke`, предназначенное для планирования движения соответствующего ВХ (обратному ходу сверления). Поиск конечной точки назначения осуществляется методом `reverseStroke(robotObj)`.

Функционал метода сводится к перепланированию движения РХ в реверсивном порядке, массив конфигураций остается прежним, однако динамические показатели могут измениться, если в технологической инструкции ограничения для обратного хода более мягкие, чем для РХ.

В результате отработки функций формируется сообщение ROS для передачи управляющих команд на контроллеры физического оборудования КР по аналогии с алгоритмами работы ROS состояния `Robot. ManufacturingStep.MovingToDrill`. После успешного планирования движения выводится служебная информации и обновляются параметры визуализации, далее по безусловному переходу активизируется состояние ожидания `Robot.Standby`.

Второй переход из состояния `Robot.Standby` осуществляется по команде `Move` в подсостояние `Robot.AuxiliaryStep.Moving`, описывающее один из вариантов ВП – свободный ход (свободное перемещение), не сопровождающийся преднамеренным взаимодействием ни с одним объектом окружения, содержащего метод класса `RobotClass` `moveOnly(...)`. Набор вход-

ных аргументов и функционал метода аналогичен одноименному методу класса `OperatorClass`. Естественным отличием является вызов текущего метода с параметрами модели КР 'kukaIiwa7', а также взаимодействие с выделенным файлом `TF-moving.txt` (см. рис. 3.29), в котором помещается и хранится актуальная матрица трансформации, характерная для планируемого перемещения.

Далее по аналогии с алгоритмом, представленным при описании состояния `Robot.ManufacturingStep.MovingToDrill`, формируется движение, отражающее ВП, оптимизированное по заданному критерию, и свободное от коллизий. Данные упаковываются в сообщение ROS и передаются на контроллеры физического оборудования КР. После успешного планирования движения выводится служебная информации, затем по безусловному переходу активизируется состояние ожидания `Robot.Standby`.

Третий переход из состояния `Robot.Standby` осуществляется по команде `TakeTool` в подсостояние `Robot.AuxiliaryStep.ToolCapturingProcess.MovingTo`, описывающее один из вариантов ВП – свободный ход в позицию захвата инструмента, расположенного в автоматической станции, с последующим его захватом. Состояние содержит метод класса `RobotClass` `moveToTool(...)`, вызываемый с обязательным указанием двух атрибутов:

- 1) `robotObj` – текущей модели КР, активного объекта класса `RobotClass`;
- 2) `toolObj` – требуемого для выполнения последующего ТПд инструмента, активного объекта класса `ToolClass`.

Функционал метода сводится к планированию движения инерциальным способом или решением ОЗК в условиях ограничений для позиции и ориентации ЦТИ (в данном случае "iiwa_link_ee_kuka") в точке захвата инструмента. Метод возвращает вектор состояния угловых координат шарниров модели КР в точке захвата инструмента. Далее по аналогии с алгоритмом, представленным при описании состояния `Robot.ManufacturingStep.MovingToDrill`, формируется движение, отражающее ВП для захвата инструмента, оптимизированное по заданному критерию и свободное от коллизий. Данные упаковываются в сообщение ROS, и передаются на контроллеры физического оборудования КР.

После успешного планирования движения выводится служебная информации, далее по безусловному переходу активизируется состояние `Robot.AuxiliaryStep.ToolCapturingProcess.ToolCapturing`, содержащее метод `takeUnit(...)` класса `RobotClass`. Набор входных аргументов и функционал метода (представленного при описании состояния `Operator.WorkpieceCapturingProcess.WorkpieceCapturing`) аналогичен одноименному методу класса `OperatorClass`. Естественным отличием является вызов текущего метода с параметрами модели КР 'kukaIiwa7', а также интеграция модели инструмента в кинематическую модель `rigidBodyTree` робота в качестве звена, включая вложенные атрибуты объекта коллизии и визуа-

лизации. В свою очередь из объектов коллизий окружения модель инструмента удаляется. После успешной модернизации объекта `rigidBodyTree` данные упаковываются в сообщение ROS и передаются на контроллеры физического оборудования КР, управление в модели по безусловному переходу передается состоянию ожидания `Robot.Standby`.

Четвертый переход из состояния `Robot.Standby` осуществляется по команде `PutTool` в подсостояние `Robot.AuxiliaryStep.ToolDisconnectingProcess`. `GoTakingToolConfiguration`, описывающее один из вариантов ВП, – свободный ход в позицию возврата инструмента в автоматическую станцию. Состояние содержит описанный ранее метод класса `RobotClass` `moveOnly(...)`, алгоритмы которого формируют движение, отражающее ВП для возврата инструмента. Движение оптимизируется по заданному критерию и свободно от коллизий. Данные упаковываются в сообщение ROS и передаются на контроллеры физического оборудования КР.

После успешного планирования движения выводится служебная информации, далее по безусловному переходу активизируется состояние `Robot.AuxiliaryStep.ToolDisconnectingProcess.ToolDisconnecting`, содержащее метод `putUnit(...)` класса `RobotClass`. Метод `putUnit(...)` выполняет действия обратные действиям метода `takeUnit(...)`, модернизируя объект `rigidBodyTree` модели КР и актуализируя массив окружения и визуализации. После успешной модернизации объекта `rigidBodyTree` данные упаковываются в сообщение ROS и передаются на контроллеры физического оборудования КР, управление в модели по безусловному переходу передается состоянию ожидания `Robot.Standby`.

Пятый переход из состояния `Robot.Standby` по событию `End` ведет в терминальное состояние.

Состояние Robot2 (имитационная модель КР позиционирующего/удерживающего изделие). Состояние `Robot2` принадлежит четвертому приоритету исполнения параллельных процессов. Вложенное состояние `Robot2` используется для имитационного моделирования движений коллаборативного робота-позиционера и формирования управленческих команд, передаваемых посредством ROS на физическое оборудование робота, функционирующего в рамках ТП. Функционирование процессов вложенного состояния `Robot2` для ПР (реализованного в виде КР) аналогично функционированию процессов для состояния `Robot` в случае исполнения их как ВП, так и ТПд. Если ПР используется только для реализации ВП, связанных с изделием, но состояние `Robot2` может иметь несколько упрощенный вид (рис. 3.30).

Состояние Tool (имитационная модель инструмента/массива инструментов). Состояние `Tool` (рис. 3.31, а) принадлежит пятому по порядку исполнения параллельному процессу. Вложенное состояние `Tool` используется для имитационного моделирования изменений во времени пространственных, качественных и технических характеристик используемого в ТО инструмента (на рис. 3.31 отражен мониторинг пространственных характеристик – положения и ориентации в пространстве, факт захвата и отсоединения инструмента), учета объектов колли-

зий (CollisionObject) и визуализации (PatchObj)). Управление моделью инструмента осуществляется посредством пользовательского класса ToolClass наследника UnitClass.

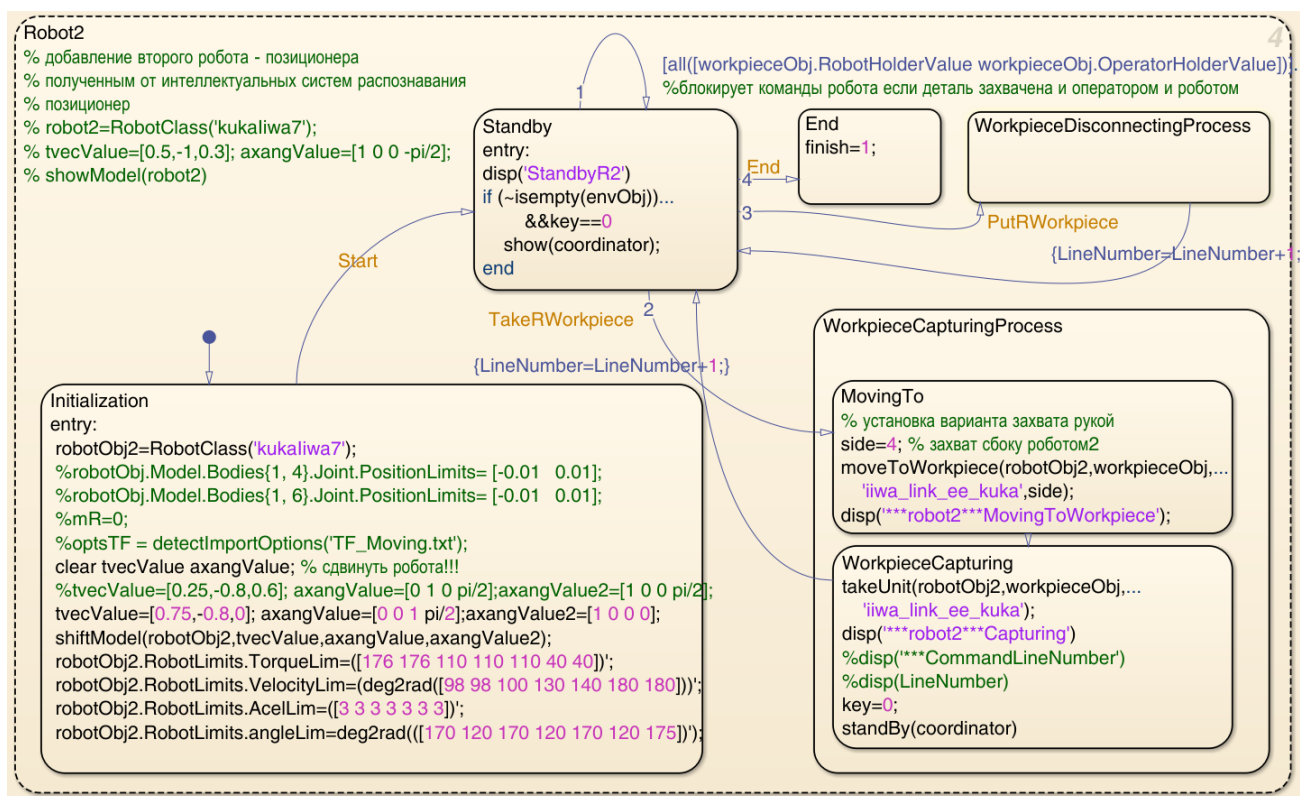


Рисунок 3.30 – Состояние Robot2 – имитационная модель КР позиционирующего/ удерживающего изделие

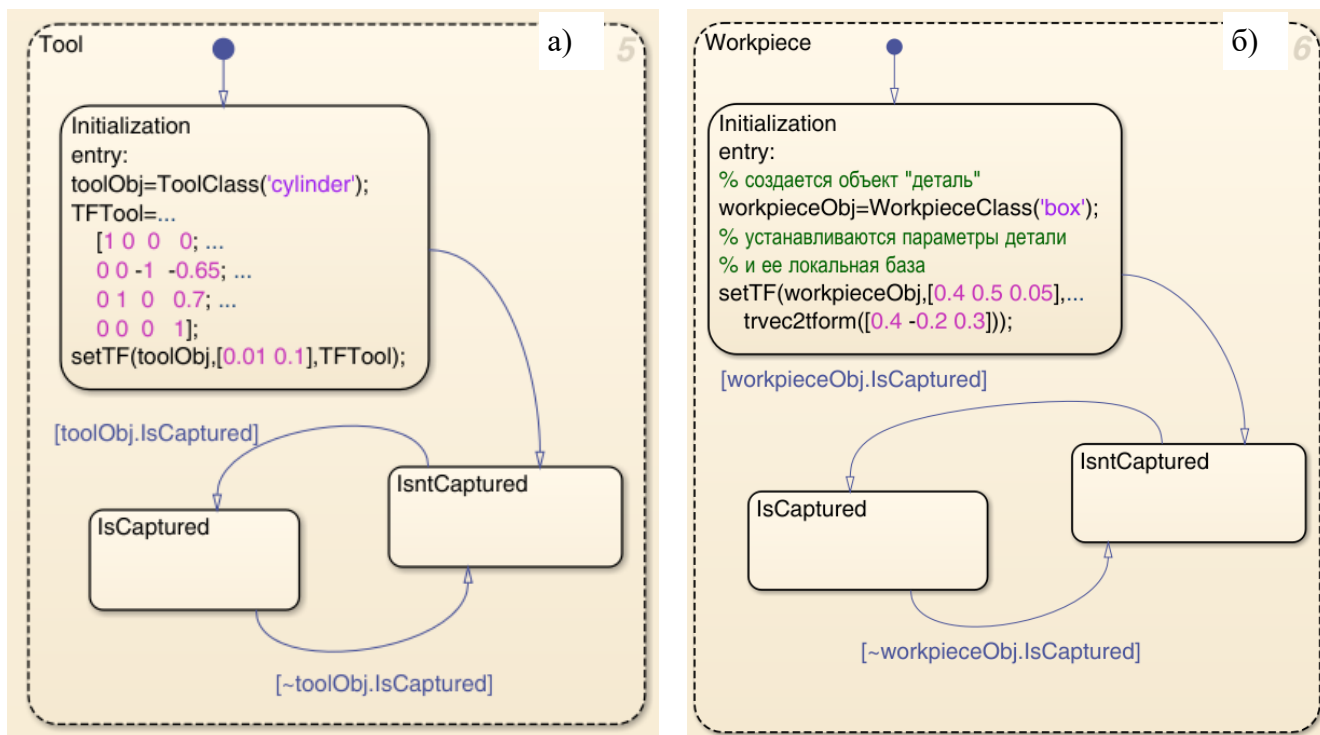


Рисунок 3.31 – Имитационная модель: а – Tool – состояния инструмента/массива инструментов; б – Workpiece – состояния изделия

Tool.Initialization является первым подсостоянием, активируемым по безусловному переходу в момент передачи управления процессу (состоянию) Tool. Процесс инициализации осуществляется посредством вызова конструктора класса ToolClass с последующим заданием первоначальных параметров методом *setTF()* для модели инструмента, в частности матрицы трансформации (матрица может быть получена из предустановленной структуры данных, например, при захвате инструментов из стационарной позиции – гнезда автоматической станции подачи, либо с системы мультимодальной сенсорики). В случае оперирования набором инструментов по аналогии с процессом создания единичного объекта инструмента создается массив, обрабатываемый в цикле. Кроме подсостояния Tool.Initialization состояние Tool содержит еще два мониторинговых подсостояния Tool.IsCaptured и Tool.IsntCaptured, отражающих факт захвата или отсоединения инструмента. Переходы между ними ограничены защитными условиями по значению параметра объекта toolObj.IsCaptured.

Состояние Workpiece (имитационная модель изделия). Состояние Workpiece (см. рис. 3.31, б) принадлежит шестому по порядку исполнения параллельному процессу. Вложенное состояние Workpiece используется для имитационного моделирования изменений во времени пространственных, качественных и технических характеристик обрабатываемого изделия (на рисунке отражен мониторинг пространственных характеристик – положения и ориентации в пространстве, факт захвата и отсоединения изделия оператором/моделью оператора), учета объектов коллизий (CollisionObject) и визуализации (PatchObj)). Управление моделью инструмента осуществляется посредством пользовательского класса WorkpieceClass наследника UnitClass. Workpiece.Initialization является первым подсостоянием, активируемым по безусловному переходу в момент передачи управления процессу (состоянию) Workpiece.

Процесс инициализации осуществляется посредством вызова конструктора класса WorkpieceClass с последующим заданием первоначальных параметров методом *setTF()* для модели изделия, в частности матрицы трансформации. Подсостояния Workpiece.Initialization выполнены по аналогии с состоянием Tool.

Состояние Environment (имитационная модель объектов коллизий рабочей зоны/окружения). Состояние Environment (рис. 3.32) принадлежит седьмому приоритету исполнения параллельных процессов. Алгоритмы вложенного состояния Environment осуществляют обработку данных обо всех объектах коллизий рабочей зоны. Состояние предназначено для отслеживания стационарных и нестационарных объектов рабочей зоны КРТП, изменений во времени их пространственных и качественных характеристик с целью отображения в реальном времени и архивирования фреймов графических объектов (визуальных абстракций объектов коллизий либо визуальных эффектов, например, таких как пятно лазера-указателя). Управление моделью инструмента осуществляется посредством пользовательского класса EnvironmentClass.

Environment.Initialization является первым подсостоянием, активируемым по безусловному переходу в момент передачи управления процессу (состоянию) Environment. Процесс инициализации осуществляется посредством вызова конструктора класса Environment Class, в результате чего объект envObj получает дескрипторы (handle) моделей КР и оператора (robotObj, operatorObj, robot2Obj).

Далее вызывается метод *setEnv(...)*, создающий из файла dataEnv.txt (полученная по технической документации расположения объектов рабочей зоны либо с использованием мультимодальной системы сенсорики) массив envObj.Env стационарных объектов коллизий. При нормальных условиях течения ТО объекты, отслеживаемые в указанном массиве, не должны менять свое пространственное положение. Нестационарные объекты коллизий учитываются в массиве envObj.EnvD и обрабатываются при взаимодействии группы объектов – operatorObj, robotObj, robot2Obj и envObj в зависимости от физики и логики образования динамики параметров положения нестационарного объекта.

В случае активации защитного условия отображения графики в состоянии Environment.Initialization последовательным вызовом методов, отраженных в листинге 3.5, визуализируется и архивируется первый фрейм рабочей зоны, включающий все графические объекты:

В случае активации защитного условия отображения графики в состоянии Environment.Initialization последовательным вызовом методов, отраженных в листинге 3.5, визуализируется и архивируется первый фрейм рабочей зоны, включающий все графические объекты:

Листинг 3.5

```
showAllEnv(envObj);
showWorkpiece(workpieceObj);
showTool(toolObj);
drawnow
coordinator.F(i)=getframe;
```

Далее по ходу планирования переходов ТО внутри состояния Environment осуществляется переключение между подсостояниями Environment.Waiting (- состоянием ожидания) и Environment.Show (- состоянием отображения обновленного фрейма рабочей зоны в случае фикса-

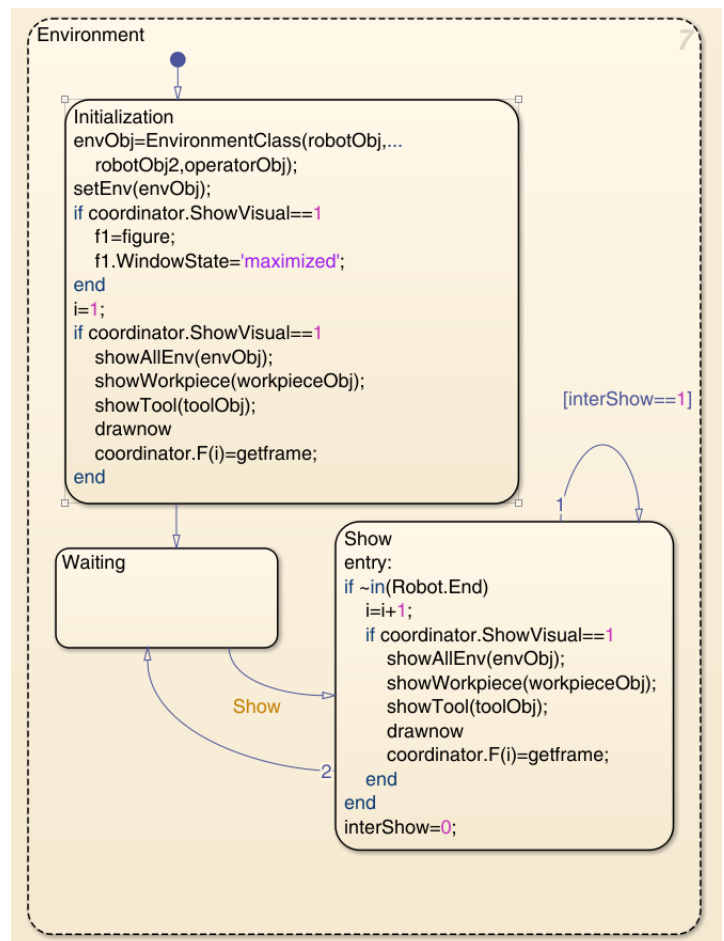


Рисунок 3.32 – Состояние Environment – имитационная модель объектов коллизий рабочей зоны/окружения

ции события Show, т.е. по факту изменения пространственного состояния любого из отслеживаемых объектов). Процедура вызова методов отображения в состоянии Environment.Show аналогична процедуре отображения фрейма в состоянии Environment.Initialization.

Разработанная модель снабжена инструментами визуализации, которые можно использовать как в режиме моделирования, так и в режиме мониторинга при работе модели в рамках цифрового двойника. Пример команд на исполнения частей ТО представлен в листинге 3.6:

Листинг 3.6

```
TakeWorkpiece → MoveWorkpiece → MoveWorkpiece → MoveWorkpiece → ShowPoint →
TakeTool → Drill → PutTool → Move → TakeRWorkpiece → MoveWorkpiece → Show-
Point → TakeTool → Drill → PutTool → StopShowingTool → Move → End
```

Изображения рабочей сцены модели АСУ ТО для моментов времени представлены на рис. 3.33.

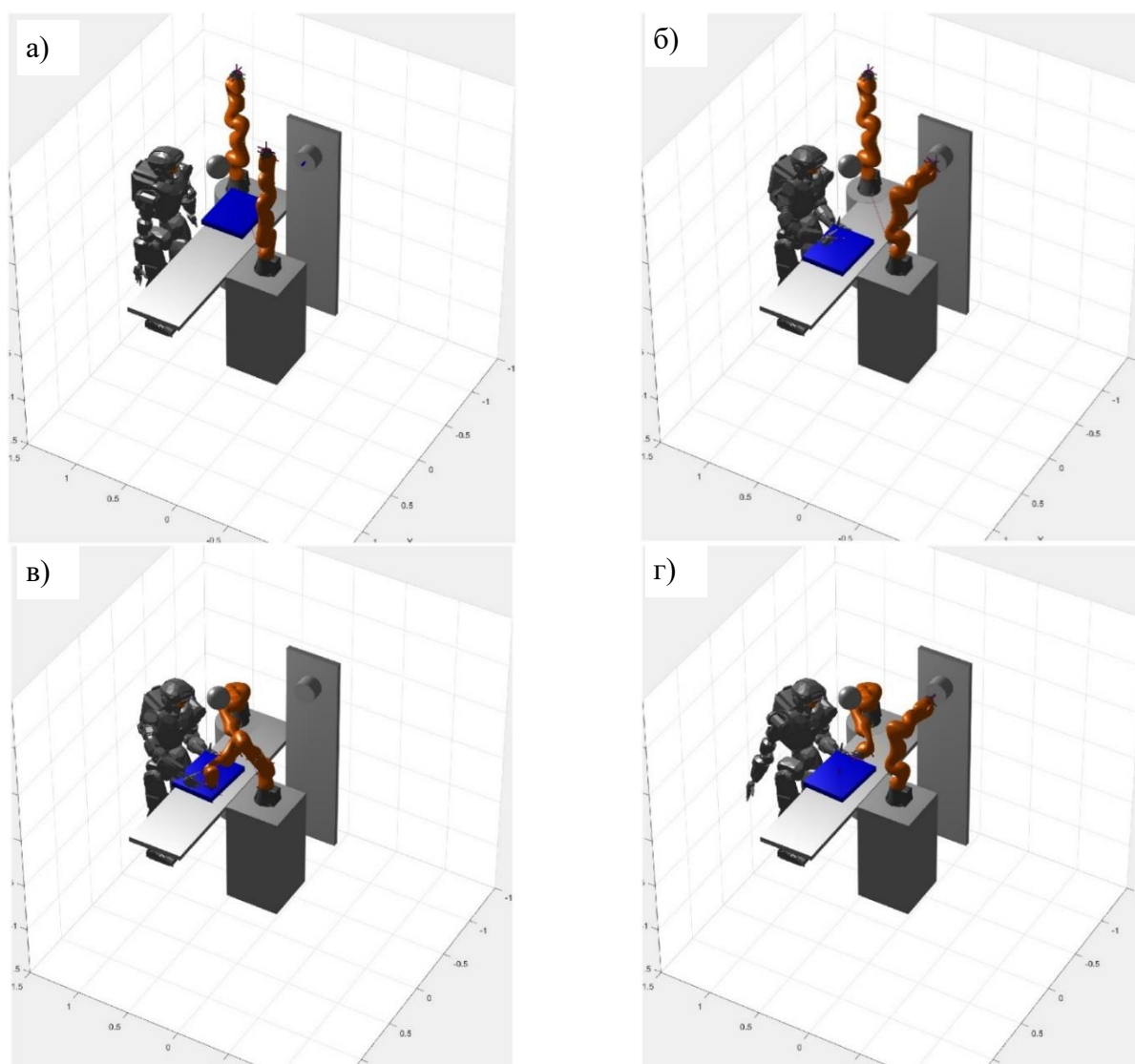


Рисунок 3.33 – Изображения рабочей сцены модели АСУ ТО для некоторых моментов времени а – начало; б – захват оператором изделия, указание точки начала РХ и захват инструмента КР; в – удержание позиционером изделия и выполнения РХ КР; г – смена инструмента КР

Выводы

1) Разработана оригинальная дискретная модель АСУ КРТК для реализации ТО, координируемая управляющими командами из ДСМ и агрегирующая модели локальных СУЭП КР; модель идентифицирует КРТП (характеризующийся высокой степенью вовлеченности человека), имеет интеграционные связи с вышестоящей АСУ и ЛСУ и может являться математической и технической основой для разработки ЦД КРТП широкого профиля.

2) В ходе описания дискретной модели АСУ ТО предложены технологии и средства построения АСУ КРТП, представлено алгоритмическое и программное обеспечения в объектно-ориентированном стиле; комплекс машин SFX и библиотека классов в полной мере предоставляют архитекторам, инженерам и программистам прототип ПО с привязкой к промышленному оборудованию, включая КР, для разработки промышленных образцов ПАК ТП, в частности механообработки и позиционирования.

3.6 Моделирование человеческого фактора в системе управления коллаборативным роботизированным процессом

В современных производствах наблюдается тенденция перехода от промышленной робототехники к коллаборативной в рамках функционирования социо-киберфизических систем [70, 239, 368]. Интеллектуальные системы, обеспечивающие управление и координацию таких коллабораций, отличаются высокой степенью комплексности, способностью работать в недетерминированной среде и в экстремальных условиях. Несмотря на значимые достижения ученых и инженеров в области проектирования таких систем [334], тем не менее остаются существенные пробелы в части получения адекватных моделей и интеграции самого слабодетерминированного элемента социо-киберфизической системы – человеческого фактора [181]. Некорректная или неадекватная МЧФ может полностью нивелировать все возможности ИСУ, значительно сократить ритм выпуска изделий, снизить качество конечного результата или привести к полной остановке ТП. Отдельные и вполне успешные результаты, полученные учеными в области интеграции МЧФ в имитационные модели ИСУ, не позволяют тем не менее сформировать общей методологии построения прикладных социо-киберфизических АСУ ТП на базе продвинутых МЧФ. Отсутствие общей методологии и детализированных методик существенно тормозит внедрение КР на промышленных предприятиях, что в перспективе может серьезно сказаться на конкурентоспособности выпускаемой продукции. Также если низкое качество социо-киберфизических систем, может быть компенсировано за счет объема при массовом или крупносерийном производстве, то для предприятий, ориентированных на выпуск штучных изделий или мелких партий, например, предприятий авиационной промышленности, нереализованность потенциала коллаборативных систем может определить решение топ-менеджмента в сторону отказа от инновационных изменений.

В рамках исследования, ставятся задачи формирования теоретических основ, методологий и прикладных реализаций, направленных на увеличение привлекательности коллаборативных решений для промышленных предприятий, повышения их автономности, эффективности, универсальности, снижения ресурсозатратности при производстве, наладке и внедрении. Предлагается формализация динамических аспектов поведения системы – МЧФ, как кооперации реактивных объектов, реализующих требуемые варианты использования.

Поскольку одним из ключевых факторов, определяющих эффективность функционирования КРТП, является адекватность и гибкость имитационных моделей, то целесообразно применять объектно-ориентированный подход к моделированию. Одним из наиболее ярких языков моделирования для концептуализации МЧФ и интеграционных взаимосвязей внутри социо-киберфизических систем [274] согласно [194] видится UML и его диалекты, например SySML. В частности, в предлагаемой работе приводятся элементы диаграмм вариантов использования как инструмента структурного моделирования, и диаграммы состояний, отражающие поведенческие аспекты реактивных объектов. Организация поведения в МЧФ, представлена при помощи механизмов теории конечных автоматов, а именно гибридных автоматов (комбинаций машин Мура и Мили), инструментальными средствами пакета Stateflow среды Matlab. Функции, методы, определяющие переходы между состояниями и деятельность внутри состояния реализованы в зависимости от решаемой задачи на высокоуровневых языках программирования C++/Matlab. В качестве инструментария, непосредственно реализующего интеллектуальные алгоритмы, в качестве основных приняты стандартные модификации нейронных сетей и систем нечеткого логического вывода.

Технологические процессы на базе КР предназначены для решения нетривиальных задач. В условиях обозначенной специфики задач в ходе взаимной деятельности КР и человека не всегда может гарантировать достижение требуемых конечных результатов или обеспечить повторяемость ключевых показателей качества конечной продукции, иногда конечная цель и вовсе неизвестна. В работе рассматривается только то подмножество задач, которые могут быть решены с требуемыми показателями качества конечного результата, тогда задачи рассматриваемой ИСУ будут сводиться к оптимизационным решениям, направленным на сокращение затрат ресурсов в ходе исполнения ВП и обеспечение четкого выполнения всех запланированных ТПд.

При этом обобщенный функционал качества КРТП с учетом представленных ограничений можно представить:

$$EF_{TP} = f_1(EF_{TS}, EF_{HS}, EF_{OS}) \rightarrow \max, \quad (3.37)$$

при $Par_{TP} = \{Par_{TP_1} \dots Par_{TP_n}\} \in TR$, где TR – множество допустимых параметров ТП; EF_{TP} – эффективность ТП; EF_{TS} – эффективность технологической системы; EF_{HS} – эффективность человеческого фактора; EF_{OS} – эффективность организационной системы.

Человеческий фактор можно представить как:

$$EF_{HC} = f_2(S, B, HC, TK, CA) \rightarrow \max, \quad (3.38)$$

где S – состояние человека; B – поведение человека; HC – приведенная компетентность (которая может быть получена согласно методикам работ [28, 32, 38]); TK – поставленные задачи перед человеком; CA – корректирующие воздействие.

Очевидно, что повышение эффективности функционирования каждой из трех вложенных функций: эффективности технической, социальной и организационной систем, при стабильном состоянии остальных ведет к росту эффективности КРТП в целом. Многочисленные исследования, направленные на развитие технической части коллаборативной системы [191, 334, 368] организационной части [204], а также работы, представляющие интерес в изучении специфики социальной части [204, 303, 307], недостаточно внимание уделяют именно интеграционным взаимосвязям между тройкой разнородных систем. Так, в случае, убывания одной из функций, возрастание другой, не только может не стабилизировать целевую функцию, но и, наоборот, вызвать ее убывание. Одним из наиболее ярких примеров может являться сценарий снижения активности оператора в результате астенического состояния с одновременным форсированием по быстрдействию системы управления КР. Данный сценарий, приведет, как минимум к потере ритмичности процесса, возрастанию потенциальных коллизий и увеличению длительности ВП, как максимум к аварийной остановке или браку изделия. Таким образом, видится целесообразным в первую очередь обеспечивать неубывание всех трех функций, но, если это невозможно и одна из функций объективно начинает убывать, необходимо иметь в наличии механизмы изменения локальных функционалов остальных функций (или механизмы переключения режимов) с целью избегания процесса разбалансировки и формирования большого уровня дифференциации. Техническая система в рамках временного отрезка ТП, как правило, обладает в разы более параметрически стабильным состоянием чем социальная. Тогда кратко алгоритм взаимосвязей тройки функций можно сформулировать следующим образом: оценить состояние социальной подсистемы с помощью МЧФ; с учетом результатов моделирования (оценки общего состояния оператора) и требованиям к ТП подобрать наиболее производительные модели функционирования технической и организационной систем (с этими схемами новичку будет очень сложно); далее производить мониторинг социальной подсистемы, и в случае снижения ее эффективности, одновременно снижать производительность моделей технической и организационной систем (или наоборот, если состояние улучшилось), итерационно выполнять процедуру до завершения ТП или возникновения аварийного сценария.

Демонстрация набора вариантов использования и ролей системы моделирования человеческого фактора представлена в соответствии со стандартом языка UML в обобщенном виде на диаграмме вариантов использования (рис. 3.34). Ключевыми ролями являются «Оператор», яв-

ляющийся источником данных для МЧФ, а также ИСУ на основе распределенной архитектуры в составе «ИСУ» (Intelligent control system серверная часть) и «Smart ЛСУ» (Smart Local Control System (LCS)). Благодаря «Аутентификации» становятся доступными варианты использования «Инициализация данных, получение данных», «Моделирование» и «Коррекция...».

Кооперация, реализующая вариант использования «Инициализация данных, получение данных», инициализирует поля соответствующих экземпляров классов через интерфейсы доступа к статическим (структуре цифрового профиля, социального портрета, цифрового паспорта задачи и т.д.) и динамическим данным [268] (оперативной информации со средств измерения и оценки реального времени).

Агент «ИСУ», имея доступ к кооперациям, реализующим варианты использования «Моделирование» и «Интерпретация», благодаря своему функционалу может оптимизировать алгоритмы управление КР и всей АСУТП в целом, обеспечивая максимизация функционала (см. форм. 3.37) в условиях возникновения проблем в социальной подсистеме.

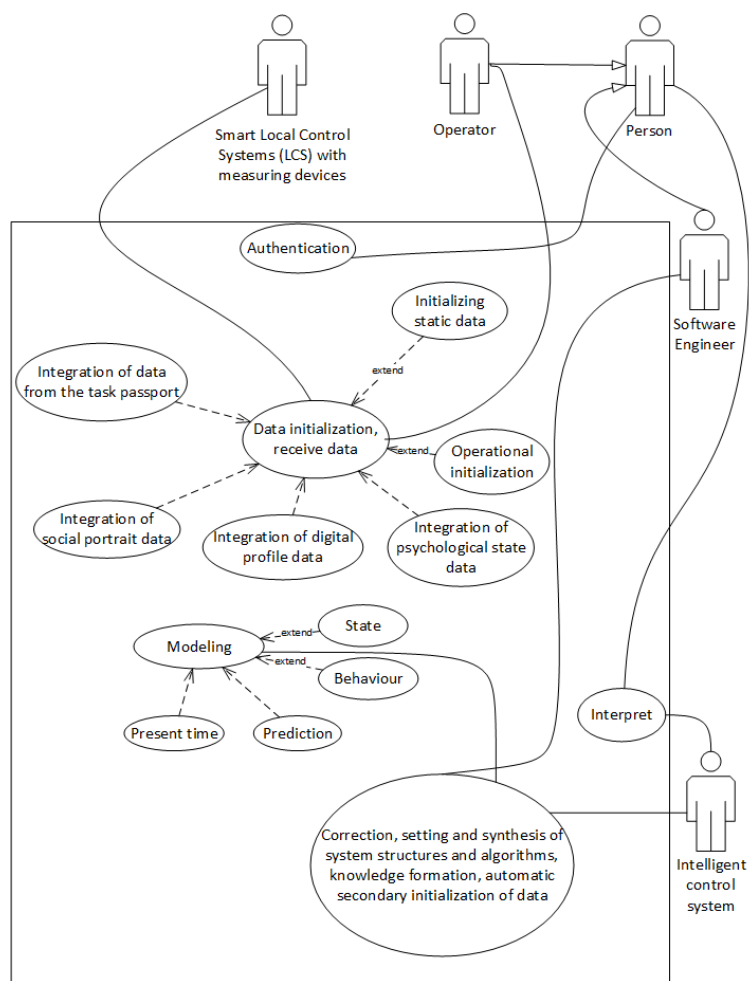


Рисунок 3.34 – Диаграмма вариантов использования, отражающая подсистему, моделирующую человеческий фактор

Важным моментом при проектировании предлагаемой системы является необходимость проведения дополнительных исследований на стыке наук кибернетики и социологии, поскольку методы реагирования ИСУ не только направлены на оптимизацию законов управления технической и организационной системами, но и на коррекцию поведения человека, выражаясь в определенных видах:

- мотивировании/стимулировании – побуждении человека к определённой модели (эффективной для ТП, безопасной и т.д.) поведения;
- манипулировании – изменении восприятия или поведения человека с помощью скрытого воздействия.

Мотивационные и манипуляционные схемы становятся доступны благодаря наличию расширенной, в том числе и по времени, информации об операторе (ЦД человека) в рамках инструментов социального/психологического портрета [53, 86, 88], цифрового профиля [17] и истории успеха выполнения технологических задач, а также возможности ее интеграции в информационное пространство корпоративной социальной сети.

Поведение человека обусловлено его особенностями, которые системно возможно рассмотреть через структуру личности и формализовать в цифровом формате. Структура личности оператора, которая непосредственно может влиять на течение ТП, представляется как:

- физиологические качества человека (темперамент); определяют работоспособность и выносливость, стрессоустойчивость, состояние здоровья и т.д.;

- психические свойства личности: характер, интеллект, эмоции, воля, мышление, память, воображение и т.д.; влияют на предрасположенность к творческой или рутинной деятельности, к управленческой работе или работе исполнителя, к открытой или закрытой коммуникации, к возможности работать в команде; являются основаниями для качеств в профессиональной деятельности (ответственность, скорость, кропотливость, внимательность и т.д.);

- свойства, относящиеся к деятельностным составляющим личности: опыт, навыки, умения – основа профессионализма;

- составляющие, которые можно отнести к сфере социального, это совокупность потребностей, интересов, притязаний, ценностей, ценностных ориентаций, идеалов, убеждений и т.д.

Выбор шаблона поведения в той или иной ситуации, при выполнении повседневных технологических задач или задач внештатной ситуации будет определен «переменными» представленной структуры. В контексте взаимодействия человек-КР часть рассмотренных данных о человеке возможно получать на постоянной основе при непосредственном выполнении задач ТП (физиологическое и психоэмоциональное состояние, особенности поведения в повседневных практиках и т.д.), часть – при проведении тестирования, опроса, изучения документов и информационных ресурсов, анализа «цифрового следа».

Если ИСУ владеет рассмотренной информацией о человеке и интегрирует ее в информационное корпоративное пространство, то это предоставляет неограниченные возможности управления на всех трех уровнях организационной системы:

- на уровне человек – КР возможен выбор оптимальных условий для эффективной работы человека, причем с учетом постоянно получаемой ИСУ КР информации о физиологическом и психоэмоциональном состоянии оператора;

- на уровне гетерогенных коллективов (люди – КР) возможно формирование эффективных команд с учетом физиологического и психоэмоционального состояния, компетенций и профес-

сиональных качеств каждого сотрудника, их психологической совместимости/несовместимости для выполнения конкретных технологических задач;

- на уровне организации/корпорации возможно создание эффективных систем мотивации/стимулирования персонала, эффективных условий прохождения технологических и организационных процессов, нивелирование системных рисков «человеческого фактора», определение программ обучения и программ психоэмоционального восстановления или сопровождения и т.д.

На рис. 3.35 представлена диаграмма компонента HumanFactor – МЧФ. Компонент предоставляет два интерфейса, первый из них HFState определяет результаты моделирования комплексного состояния оператора (участника КРТП), второй – ControlPoints определяет временные метки переходов между состояниями (в формате событий или сообщений). Оба интерфейса запрашиваются ИСУ для оптимизации параметров технической и организационной систем согласно критерию (см. форм. 3.37). Кроме того, компонент запрашивает два интерфейса: первый – Time определяет временные структуры, в том числе модельное время; второй – IMVRec определяет первично обработанную, параметризированную информацию о кадрах сцены, в том числе с результатами распознавания и их точностью.

Прототип модели компонента представлен на рис. 3.36. Модель построена в программной среде MATLAB/Simulink с использованием пакетов Fuzzy Logic Toolbox, Stateflow, Computer Vision Toolbox.

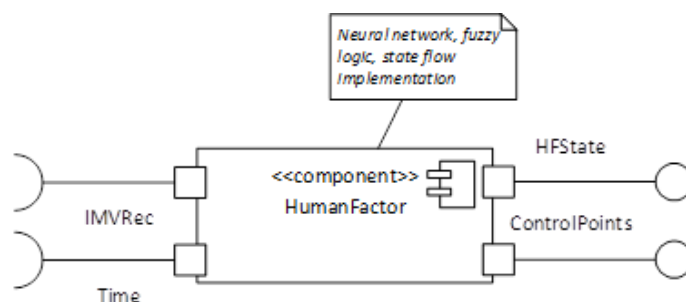


Рисунок 3.35 – Диаграмма компонента МЧФ

Упрощенная модель содержит 5 выходов и 6 входов:

- flag – соответствует интерфейсу HFState и характеризует текущее устойчивое состояние МЧФ (активизируется в связи с многократным повторением индикаторов состояния – триггерных кадров сцены, «многократность» определяется настройками алгоритма), используется ИСУ для выбора подходящего режима управления технической и организационной системой;

- A1, A2, A21, A22 – соответствуют интерфейсу ControlPoints и сигнализируют о смене мгновенного состояния МЧФ (минимальная длительность нахождения в мгновенном состоянии может быть более шага модельного времени или равна ему);

- Time и Model Step – соответствуют интерфейсу Time и представляют собой модельное время и шаг модельного времени;

- s1, s2, ac1 и ac2 – соответствуют интерфейсу IMVRec, s1 и представляет собой сигнал, имитирующий видеопоток, который является основой для идентификации трех состояний опе-

ратора (нормального, стенического и астенического), s2 – видеопоток, по которому дифференцируются подсостояния положительного и отрицательного возбуждения астенического состояния; ac1 и ac2 – сигналы, имитирующие степень зашумленность кадров сцен для сигналов s1 и s2 соответственно, сигналы генерируются блоками IMVRec_Signal и IMVRec_Signal21.

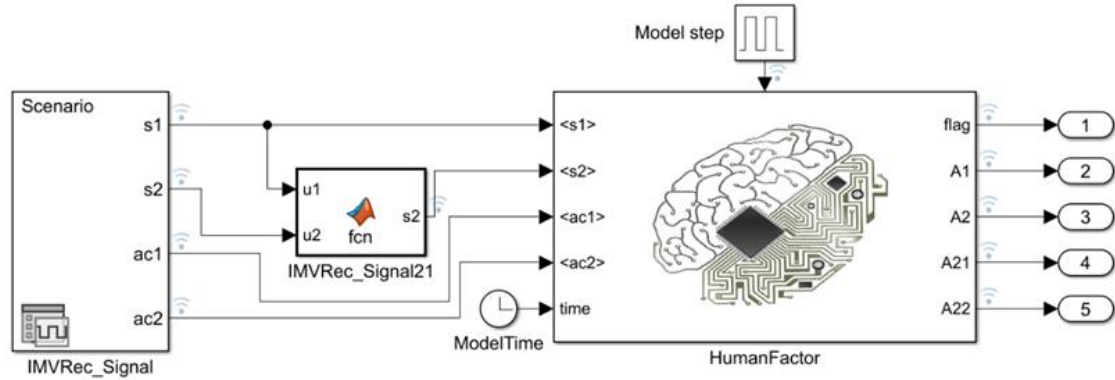


Рисунок 3.36 – Прототип компонента МЧФ

На рис. 3.37 представлен автомат HC_reliability, характеризующий внутренние состояния МЧФ в упрощенном виде (отражены только комплексные состояния верхнего уровня групп, характеризующие нормальные (эффективные), стенические и астенические сценарии поведения человека. Автомат HC_reliability и автомат, описывающий поведение ИСУ (на рисунке не показан) являются ортогональными. HC_reliability определяет 3 вложенных состояния: Normal (effective state), Fatigue (sthenic condition) и Excitement (asthenic condition), последнее имеет еще два вложенных состояния: Pos и Neg, характеризующих эмоции «положительной» и «отрицательной группы» соответственно. Общий набор возможных состояний и эмоций оператора представлен в [225]. Автомат построен по гибриднему принципу и сочетает в себе машины Мура и Мили. Переходы между состояниями определяются интеллектуальными методами $f(\dots)$ и $fis(\dots)$ (реализованы с помощью нейронных сетей), направлены на распознавание установленных паттернов (в текущем примере согласно состояниям автомата) и осуществляют классификацию состояния оператора.

Функции на переходах определяют мгновенное состояние МЧФ, функции внутри состояний ($f1(\dots)$, $f2(\dots)$, $f21(\dots)$, $f22(\dots)$) вычисляют возникновение текущего устойчивого состояния МЧФ, которое в качестве выходного аргумента flag передается ИСУ для коррекции режима работы. Обобщенная функция, характеризующая устойчивое состояние Ss (группа функций $f1(\dots)$, $f2(\dots)$, $f21(\dots)$, $f22(\dots)$) представляется как:

$$S_s = f(D, \overline{Ac}_{min}), \quad (3.39)$$

где $D = \frac{t_s}{t_{sc}}$ – отношение общего суммарного времени, соответствующего триггерным кадрам состояния, к общему времени нахождения МЧФ в устойчивом состоянии; $\overline{Ac}_{min}$ – минимальная средняя точность распознавания триггерных кадров.

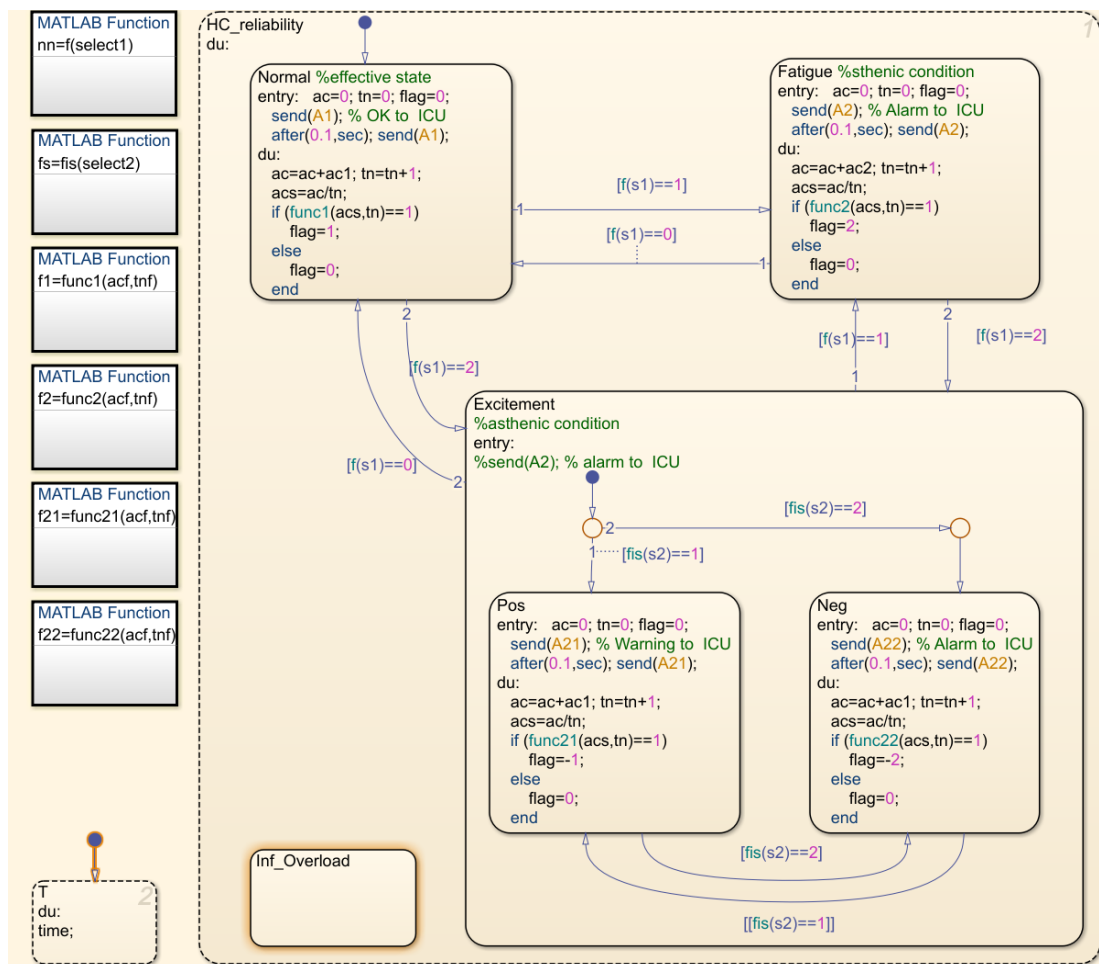


Рисунок 3.37 – Автомат центрального объекта, реализующего логику переключения состояний МЧФ

Вариант визуализация работы логики переключения состояний автомата представлен на рис. 3.38. Автомат обрабатывает имитацию сигналов, адекватную сигналам с Smart устройств распознавания. Сигналы группы R_ являются результатом классификации сигналов s1, s2, ac1 и ac2. Сигнал flag, характеризующий смену устойчивых состояний МЧФ, может использоваться ИСУ для оптимизации режимов работы технической и организационной систем. Индикаторы смены мгновенных состояний МЧФ (A1, A2, A21, A22) могут использоваться ИСУ в качестве предупреждающих сигналов для обеспечения плавного и своевременного переключения режимов.

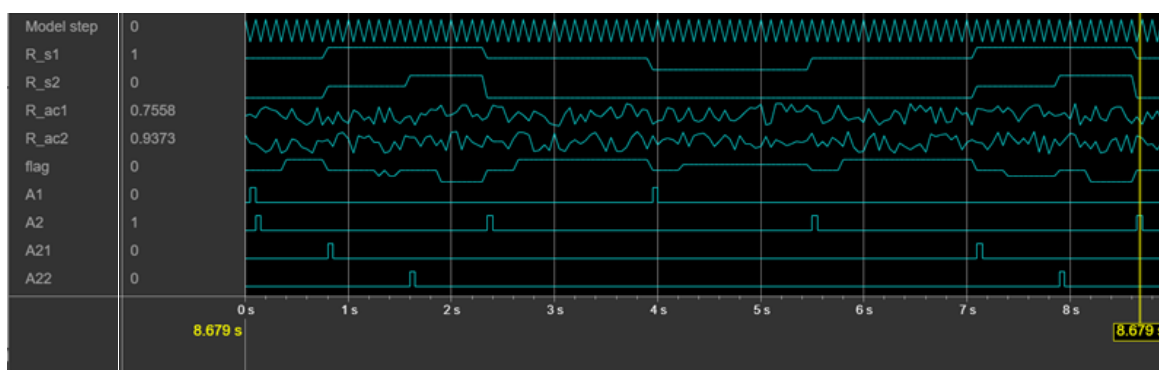


Рисунок 3.38 – Визуализация обработки автоматом входных тестовых сигналов (имитация)

В табл. 3.14 приводятся возможные сценарии реагирования ИСУ на появление препятствия (например, руки оператора [58]) по ходу перемещения КР по оптимальной траектории (рис. 3.39) с учетом текущего устойчивого состояния МЧФ в разрезе трех глобальных режимов функционирования ИСУ (безопасность, энергоэффективность и производительность).

Таблица 3.14 – сценарии реагирования ИСУ на появление препятствия по ходу перемещения КР по первоначальной траектории, учитывающие состояние оператора

Состояния МЧФ	Режимы работы ИСУ		
	<i>Безопасность</i>	<i>Энергосбережение</i>	<i>Производительность</i>
Normal	Команда оператору / обход по предустановленному режиму, при многократном игнорировании команд сигнал системе верхнего уровня	Команда оператору / обход по предустановленному режиму, при многократном игнорировании команд сигнал системе верхнего уровня, выключение оборудования	Обход по предустановленному режиму
Fatigue	Команда оператору / обход по предустановленному режиму, при многократном игнорировании команд пауза и сигнал системе верхнего уровня	Команда оператору / обход по предустановленному режиму, при многократном игнорировании команд пауза и сигнал системе верхнего уровня, выключение оборудования	Обход по предустановленному режиму
Excitement (Pos)	Команда оператору / пауза, сигнал системе верхнего уровня	Команда оператору / пауза, сигнал системе верхнего уровня, выключение оборудования	Команда оператору / пауза, переход в безопасный режим
Excitement (Neg)	Команда оператору / уход в Home Point, сигнал системе верхнего уровня	Команда оператору / пауза, сигнал системе верхнего уровня, выключение оборудования	Команда оператору / пауза, переход в безопасный режим, сигнал системе верхнего уровня

На рис. 3.39 представлены четыре траектории перемещения КР: плановая в отсутствии препятствия, скорректированная по критерию «энергоэффективность», скорректированная по критерию «безопасность», скорректированная по критерию «производительность». Планирование движений осуществляется с учетом модели планирования (модулей энергопотребления, разрешения коллизий и оптимизации) [138].

Очевидно, что расширенная МЧФ схемы рисунка 3.40 способствует повышению качества ТП с учетом обобщенного функционал качества КРТП:

$$\left\{ \begin{array}{l} u = f_u(t) = \{\varphi(t)\}: Tech = \{Params_1 \dots Params_n\} \rightarrow const; \\ E = f_E\left(\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}, \dots, M_{type}, V, \frac{N_e}{N_a}, t_s, t_c \dots\right) \rightarrow min; \\ N_c = f_N(P_{N_c}, FS, HS, DIF) \rightarrow min; \\ D_s = f_D(V_{TCP}, N_c, T_{tool}) \rightarrow min; \end{array} \right. \quad (3.40)$$

где $\varphi(t)$ – вектор углов положения шарниров КР; $Tech$ – множество значений параметров ТП; M_{type} – тип шаблона движения; V – вектор линейных скоростей звеньев КР; N_e – количество незапланированных движений, связанных с разрешением коллизий; N_a – количество запланированных движений по ТО; t_s – общее время исполнения ТО; t_c – общее время, затраченное на разрешение коллизий; N_c – количество коллизий; FS – уровень организации рабочей зоны (например, по 5С); HS – уровень организованности человека (на основе данных о мотивации, компетенции, опыте и т.п.) [31]; DIF – уровень сложности ТП; D_s – безопасность ТП; V_{TCP} – вектор линейных скоростей ЦТИ КР; T_{tool} – тип инструмента.

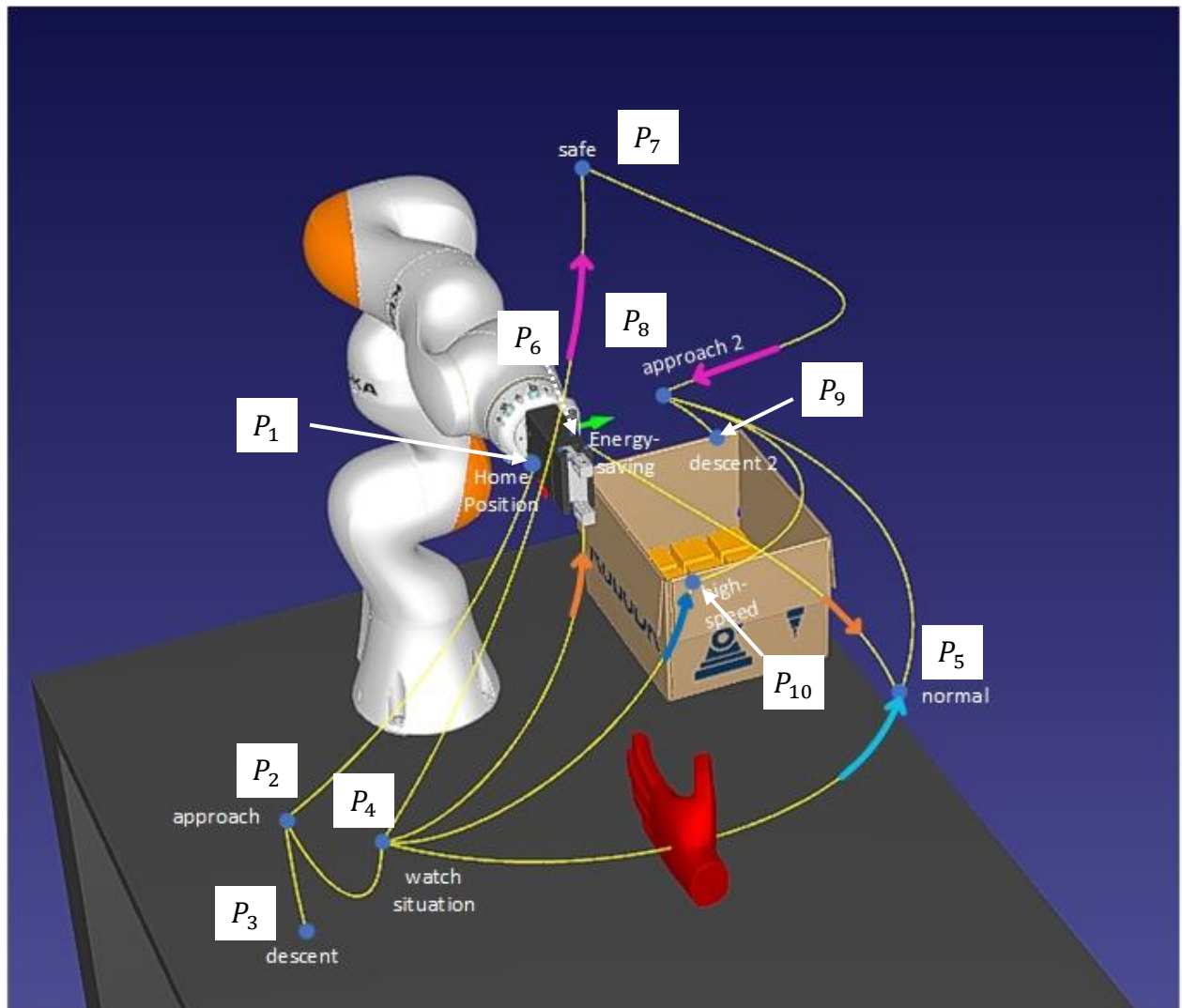


Рисунок 3.39 – Графическая интерпретация сценариев реагирования ИСУ при возникновении препятствия ($P_1P_2P_3P_2P_4P_5P_8P_9$ – стандартное движение КР, $P_1P_2P_3P_2P_4P_{10}P_8P_9$ – траектория быстрого движения, $P_1P_2P_3P_2P_4P_6P_5P_8P_9$ – траектория энергоэффективного движения, $P_1P_2P_3P_2P_4P_7P_8P_9$ – самая безопасная траектория)

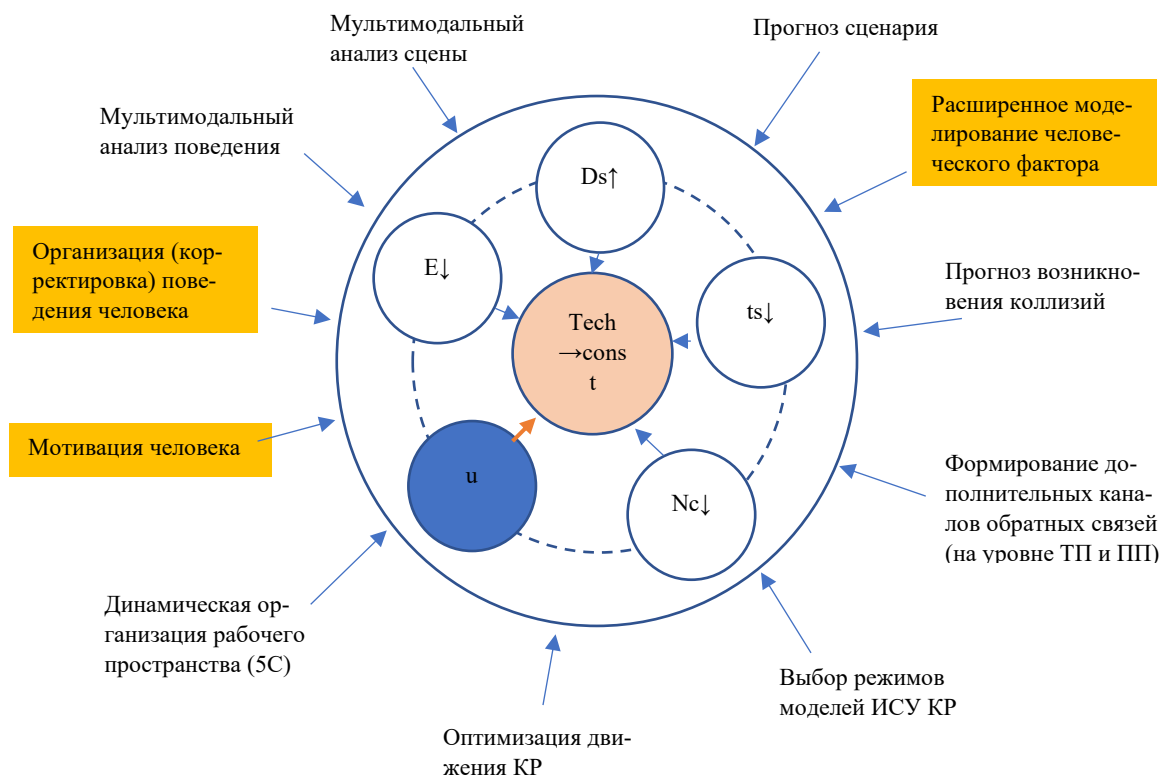


Рисунок 3.40 – Схема расширенной МЧФ (механизмы повышения эффективности КРТП)

Выводы

1) В ходе анализа результатов исследования отечественных и зарубежных авторов сделан вывод об перспективности исследований в области выстраивания более детализированных интеграционных взаимосвязей между подсистемами социо-киберфизической системы, наличие которых может значительно повысить синергетический эффект функционирования КРТП. При этом выявлено отсутствие единой методологии разработки социо-киберфизических систем, особенно в рамках МЧФ, что значительно затрудняет встраивание КР в производственные процессы промышленных предприятий.

2) Предложена идея, заключающаяся в построении социо-киберфизической системы на основе МЧФ в контексте «субъект-субъектного» взаимодействия, позволит делегировать больше управленческих функций ИСУ и обеспечит большую гибкость интеллектуального управления ТП и повышенную степень робастности к неблагоприятному проявлению состояния и поведения человека.

3) Предложена концептуальная МЧФ и прототип модели взаимодействия робота и оператора, базирующаяся на объектно-ориентированном программном обеспечении, сочетающем в себе классические конструкции гибридных машин состояния и интеллектуальных модулей на базе нейронных сетей и нечеткой логики. Математическая модель позволит не просто идентифицировать коллизию, но и учесть текущее состояние оператора при проектировании движения

по разрешению коллизий, поддерживая качество совместного производственного процесса оператора и робота на высоком уровне.

4) Представленные элементы архитектуры ПО в соответствии со стандартом UML и процедура организации режимов функционирования ИСУ позволяют уточнить механизмы адаптации интеллектуальных технологий и алгоритмов поиска оптимальных комплексов движений КР по критериям минимизации длительности операций, максимизации энергоэффективности, минимизации столкновений в ходе человеко-машинного взаимодействия.

Выводы по главе 3

Обоснована необходимость синтеза комплексных многоуровневых математических моделей, идентифицирующих КРТП на всех уровнях управления от планирования задач в рамках ТО до исполнения и контроля исполнения движения по ТПд и ВП. Наличие таких моделей предоставит ИСУ КРТП широкий спектр возможностей по синтезу оптимальных законов управления при реализации специфичных частей ТО, обеспечивая повышение уровня синергетического эффекта в КРТП и вышестоящих производственных процессах.

Предложены специализированные теоретические основы, формализованное описание и методы моделирования элементов технологических процессов роботизированной обработки изделий в коллаборативной среде:

- 1) на уровне локальных СУЭП:
 - в виде линеаризованных моделей, необходимых для оперативного планирования и оптимизации движений, реализующих части ТО,
 - в виде детализированных нелинейных имитационных моделей с управлением на базе ПИД и силовой частью на основе ШИПД предназначена для исследования и оценки качества результатов планирования движений алгоритмами планирования, оптимизации и разрешения коллизий (функционирующих на упрощенных моделях), а также для валидации результатов автоматизированного синтеза законов управления для КР, реализующего части ТО,
 - в виде приближенных моделей - на основе универсальных аппроксиматоров (нейронных сетей), в частности, для прогноза энергозатрат в качестве целевой функции алгоритмами оптимизации КРТП при планировании движений, а также при разработке цифровых двойников роботизированных ячеек для отслеживания переменных состояния ТП в реальном времени, если получение полного математического описания не представляется возможным;

2) на уровне планирования ТО и частей ТО. Разработана оригинальная дискретная модель автоматизированной системы управления КРТК для реализации ТО, координируемая управляющими командами из ДСМ и агрегирующая модели локальных СУЭП КР. Модель идентифицирует КРТП (характеризующийся высокой степенью вовлеченности человека), имеет интеграцион-

ные связи с вышестоящей АСУ и ЛСУ и может являться математической и технической основой для разработки цифровых двойников КРТП широкого профиля. В ходе описания дискретной модели предложены технологии и средства построения АСУ КРТП, представлено алгоритмическое и программное обеспечения в объектно-ориентированном стиле. Комплекс машин SFX и библиотека классов в полной мере предоставляют архитекторам, инженерам и программистам прототип ПО с привязкой к промышленному оборудованию, включая КР, для разработки промышленных образцов ПАК ТП, в частности механообработки и позиционирования;

3) на уровне управления КРТП. Предложена оригинальная ДСМ, обладающая широким функционалом, направленным на организацию процессов управления и оптимизации ключевых переменных состояния КРТП в рамках АСУТП, включает в себя компоненты имитации исполнения ТО, интеграции АО и ПО, коммуникации и маршрутизации информационных и материальных потоков.

В ходе анализа результатов исследования отечественных и зарубежных авторов сделан вывод об перспективности исследований в области выстраивания более детализированных интеграционных взаимосвязей между подсистемами социо-киберфизической системы, наличие которых может значительно повысить синергетический эффект функционирования КРТП. При этом выявлено отсутствие единой методологии разработки социо-киберфизических систем, особенно в рамках МЧФ, что значительно затрудняет встраивание КР в производственные процессы промышленных предприятий.

Предложена идея, заключающаяся в построении социо-киберфизической системы на основе МЧФ в контексте «субъект-субъектного» взаимодействия, что позволит делегировать больше управленческих функций ИСУ, обеспечит большую гибкость интеллектуального управления ТП и повышенную степень робастности к неблагоприятному проявлению состояния и поведения человека. Предложена концептуальная МЧФ и прототип модели взаимодействия робота и оператора, базирующиеся на объектно-ориентированном программном обеспечении, которое сочетает в себе классические конструкции гибридных машин состояния и интеллектуальных модулей на базе нейронных сетей и нечеткой логики. Математическая модель позволит не просто идентифицировать коллизию, но и учесть текущее состояние оператора при проектировании движения по разрешению коллизий, поддерживая качество совместного производственного процесса оператора и робота на высоком уровне.

Глава 4. Разработка методов оптимизации функциональных подсистем АСУ коллаборативными роботизированными технологическими процессами в условиях стационарности параметров рабочей зоны

Полученные в результате системного анализа и синтеза научно обоснованные модели (гл. 4, 5) демонстрируют существенный потенциал возможности повышения эффективности производства за счет внедрения КРТП в формате СНС. Тем не менее возникновение синергетического эффекта в ходе человеко-машинного взаимодействия достижимо при наличии высокоэффективных ИСУ КР и КРТП. При этом функционал систем управления не может быть ограничен только синтезом целевых законов управления, определенных ТО, например, при позиционном управлении минимизацией статической ошибки положения, при траекторном – минимизацией динамической ошибки положения. Необходимо также наличие встроенных в ИСУ дополнительных оптимизационных механизмов, позволяющих обеспечить эффективное функционирование КР с человеком в недетерминированной среде с учетом текущей ситуации в рабочей зоне. Безопасность человека, сохранность оборудования, производительность ТО, энергоэффективность КР и всего КРТК становятся неотъемлемыми интегральными переменными при синтезе управления в ИСУ.

Настоящая глава посвящена:

- математической формализации однокритериальных и многокритериальных задач оптимизации, формирующей теоретические основы при создании алгоритмического и программного обеспечения для КРТК, а также систем управления ими;
- разработке подхода, элементов БЗ и методов оптимизации режимов управления движением КР для достижения целей ТО, обеспечивающих технологическую и энергетическую эффективность КРТП.

Решения, предложенные в главе, призваны обеспечить формирование качественно новых алгоритмов и методов управления в ИСУ КРТК, способствуя повышению эффективности КРТП.

4.1. Постановка задач оптимизации

Динамику манипуляторов и робототехнических систем целесообразно представить в виде уравнения Эйлера-Лагранжа в каноническом виде для многомерных механических систем:

$$M(q)\ddot{q} = -C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q) - J^T(q)F_{EXT} + \tau, \quad (4.1)$$

где $q(t) \in R^n$, $\dot{q}(t) \in R^n$, $\ddot{q}(t) \in R^n$ – векторы обобщенных координат, скоростей и ускорений; $M(q)$ – $[n \times n]$ – матрица инерции; $C(q, \dot{q})\dot{q}$ – $[n \times 1]$ – вектор кориолисовых и центробежных сил; $G(q)$ – $[n \times 1]$ – вектор гравитационных моментов и сил; τ – $[n \times 1]$ – вектор обобщенных сил и моментов; $J^T(q)$ – транспонированная Якобиева матрица, связывающая пространственные силы и моменты внешних воздействий с внутренними усилиями звеньев.

В форме записи вход-состояние-выход описание (4.1) может быть представлено как:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = f(x) + g(x) \cdot u, \quad (4.2)$$

где $x = [x_1, x_2]^T = [q, \dot{q}]^T$; $f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ -M^{-1}(x_1)[c(x_1, x_2) + g(x_1)] \end{bmatrix}$; $g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}(x_1) \end{bmatrix}$,
 u – вектор управления.

Соответствующая структурная схема, используемая для имитационного моделирования КР с 7-ю степенями свободы представлена на рис. 4.1.

При этом каждое со-
 членение КР приводится в
 движения в результате функ-
 ционирования автономной
 СУЭП, структурная схема
 которой в общем виде отра-
 жена на рис. 4.2.

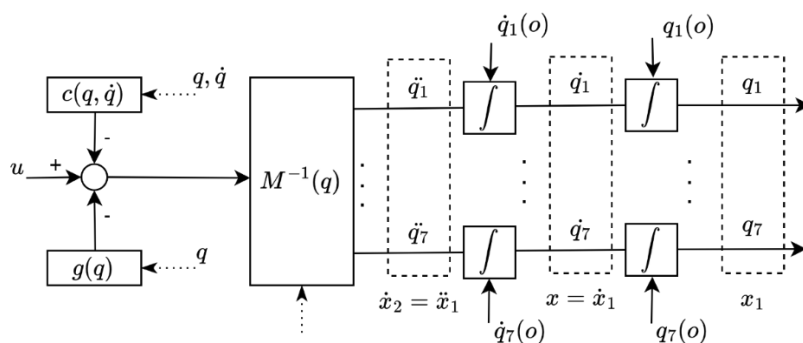


Рисунок 4.1 – Структурная схема КР с 7-ю степенями свободы

Уравнение объекта то-
 гда согласно [71] представляется в виде:

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (4.3)$$

В данном случае вектор состояния x включает
 в себя переменные механической и электрической
 частей:

$$x = (\varphi, \omega, \varepsilon, \tau, I \dots),$$

где φ – угол положения; ω – угловая скорость; ε –
 угловое ускорение; τ – момент; I – сила тока.

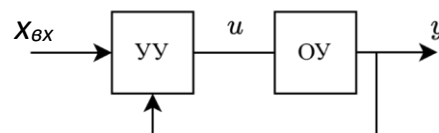


Рисунок 4.2 – структурная схема СУЭП

В подавляющем большинстве случаев КРТК на промышленных предприятиях оснащаются КР с встроенными СУЭП. Предположительно регуляторы СУЭП уже включают оптимальные законы управления; а техническая реализация, как правило, представлена в виде ПИД регуляторов. В общем виде задача оптимизации, решаемая ЛСУ, формулируется следующим образом: *при заданных математическом описании уравнения объекта (4.3), ограничениях на управление $u(t) \in U_t$, фазовом векторе $x(t) \in X_t$ и краевых условиях $x(t_o) \in X_o$, $x(t_f) \in X_f$ определить такое программное управление $u^*(t)$ или управление с обратной связью $u^*(x(t), t)$ и фазовую траекторию $x^*(t)$, при которых критерий оптимальности: $J = J[x(t_o), x(t_f); u(t), x(t)]$ принимает минимальное значение.*

Если принять во внимание предназначение и функционал КР как ключевых подсистем КРТК, очевидна целесообразность настройки регуляторов ЛСУ на оптимум по быстродей-

ствию, например, в формулировке задачи Майера [71]. Данная настройка позволяет обеспечить максимизацию производительности ТО, выполняемой КР. С другой стороны, для мобильных роботов или ПР с автономным источником питания задача оптимального управления для ЛСУ может быть сформулирована как задача Лагранжа – задача минимизации расхода энергии. Также регуляторы ЛСУ могут быть настроены на любые другие комплексные критерии, определяемые спецификой дальнейшего использования КР. Далее в работе будут рассматриваться объекты (КР), имеющие в своем составе ЛСУ электроприводами с оптимальными по быстродействию ПИД-регуляторами.

Необходимо акцентировать внимание на том, что задача оптимизации движения ПР при рассмотрении объектов (роботов) с интегрированной СУЭП, очевидно, не может включать в себя структурно-параметрический синтез оптимальных регуляторов ЛСУ. Тогда с учетом форматов интерфейсов управления современными КР оптимальное управление, обеспечивающее движение робота по оптимальной траектории, может быть представлено массивом шаблонных команд с параметрами, например, на языке KRL из кортежа $\{LIN, PTP, CIRC...\}$ [120] или методом программного управления [139] путем задания $\varphi_3(t)$. Второй вариант представляется более предпочтительным ввиду меньшего по сравнению с форматом шаблонных команд набора ограничений, накладываемых на процедуры планирования и оптимизации движений, и обеспечивает более высокий уровень качества решения. При этом отклонение фактической траектории от заданной (при задании оптимального управления в виде $\varphi_3(t)$) за счет высокого быстродействия и точности интегрированных ЛСУ, а также коррекции динамики движения ($\varphi_3(t)$, $\dot{\varphi}_3(t)$ и $\ddot{\varphi}_3(t)$) сводится к уровню допустимых ТП отклонений. Далее в работе оптимальное управление определяется заданием $\varphi_3(t)$ для унификации характеристик динамических процессов.

По заданию $\varphi_3(t)$ и по шаблонным командам с параметрами, равными предельно допустимым, форма профиля графика функции $\dot{\varphi}_3(t)$ чаще всего принимается как трапецеидальная или полиномиальная, в том случае если планируемый путь представлен только двумя точками – точкой начала движения и точкой назначения (позиционное управление).

Принимая во внимание наличие соглашения о совместном движении электроприводов (синхронное и асинхронное во времени движение), сформулируем задачу оптимизации с учетом специфики рассматриваемых ТП для ВП и некоторых ВХ ТПд, для которых не свойственно наличие ограничений на переменные состояния в промежуточных точках траектории. Подробно специфика ТО и процессов представлена в гл. 2.

Итак, если в ОП задана задача, классифицируемая как ВП либо неограниченный в промежуточных точках ВХ, в формате необходимого преобразования $TF_o \rightarrow TF_f$ при условии, что $TF_o \cong F_{FK}(\varphi_o)$, где F_{FK} – функция решения прямой задачи кинематики (ПЗК), обеспечивающая преобразование состояние объекта в КП в состояние в ОП для конкретной локальной системы

координат; φ_o – вектор состояния углов положения осей КР в текущем положении; TF_o – матрица трансформации для системы координат ЦТИ в ОП, и выполняются два условия:

1) $\varphi(t)$ не ограничен никаким дополнительным образом, кроме как техническими ограничениями углов поворота шарниров КР;

2) желаемое состояние углов положения $\varphi_f = F_{IK}(\varphi(0), TF)$ определено при $\varphi(0) = \varphi_o$ и $TF = TF_f$, где F_{IK} – функция решения ОЗК, обеспечивающая преобразования состояния объекта в ОП в состояние в КП;

то необходимо найти такое управление $u(t) = \varphi_3(t)$, что $\varphi(t) \cong \varphi_f$ при $t = t_f$, $|\varphi(t_f) - \varphi_f| \leq \Delta\varphi$, $|\varphi(t) - \varphi_3(t)| \leq \Delta(t)$ (в случае, если движение реализует ТПД, то добавляются условия на промежуточные состояния в ОП), где φ_f – конечное положение объекта; t_f – время окончания движения; $\Delta\varphi$ – абсолютная ошибка рассогласования; $\Delta(t)$ – функция ошибки рассогласования и условия: $|\dot{\varphi}(t)| \in \{0, \varepsilon_{max}\}$, $|\tau(t)| \leq \tau_{max}$, где $\omega_{max}, \varepsilon_{max}, \tau_{max}$ – предельно допустимые значения переменных состояния объекта, при этом $u(t) = \varphi_3(t)$ должно быть оптимальное по одному из следующих критериев и с учетом дополнительных ограничений.

Задача 1, максимизация быстродействия – (задача Майера [71]). Согласно обобщенному функционалу качества $J = g_0[x(t_o), x(t_f), t_o, t_f]$ или, в частности с ограничениями:

$$J = t_f - t_o, \quad J \rightarrow \min \quad (4.4)$$

$$\varphi(t_o) = \varphi_o, \quad \varphi(t_f) = \varphi_f, \quad \dot{\varphi}(t_f) = 0;$$

оптимизация обеспечивает максимизацию производительности перехода.

Задача 2. Минимизация расхода энергии (задача Лагранжа) согласно обобщенному функционалу качества:

$$J = \int_{t_o}^{t_f} f_o(x, u, t) dt \rightarrow \min$$

или, в частности, с ограничениями:

$$J = \int_{t_o}^{t_f} u^2 dt, \quad J(u, t_f) \rightarrow \min \quad (4.5)$$

при неизвестных $u(t) = \varphi_3(t) - \varphi(t)$, t_f , и $\varphi(t_o) = \varphi_o$, $\dot{\varphi}(t_f) = 0$, следовательно $[\varphi_3(t), t_f] = \operatorname{argmin}(J)$. Необходимо уточнить то, что рассмотрение модели линейной системы без учета дополнительных потребителей КРТК приведет к тому что $J \rightarrow \min$, если $t_f \rightarrow \infty$, что в рамках реальных ТП выглядит нереалистично. Введение в модель нелинейностей, например, трения, ограничит t_f , но всё равно её значение будет (большое) несоизмеримое со значением времени, выделяемого на типовой переход: соответственно целесообразно дополнить функционал путем введения функции $J_2 = \int_0^{t_f} P_{wr}^{add}(t) dt$, где $P_{wr}^{add}(t)$ – функция мгновенной мощности

дополнительных потребителей КРТК (например, шпинделя при механообработке или лазера при резке и т.п.), тогда (4.5) можно дополнить:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} u^2 dt + k \int_{t_0}^{t_f} |P_{wr}^{add}(t)| dt, J \rightarrow \min \quad (4.6)$$

где, k – коэффициент пересчета в $\text{рад}^2 \cdot \text{с/Вт}$.

Задача 3. Минимизация нагрузки на вычислительные мощности (минимизация времени планирования движения) согласно функционалу качества:

$$J = n, J \rightarrow \min \quad (4.7)$$

в условиях ограничений:

$$|J_p(u_n(t), t_{fn}) - J_p(u^*(t), t_f)| \leq \Delta_f^n, \quad (4.8)$$

где J_p – функционал по быстродействию (4.4); $u^*(t)$ – оптимальное управление по критерию быстродействия, t_f – время исполнения оптимального движения; $u_n(t)$ – найденное по критерию (4.7) управление; t_{fn} – соответствующее время исполнения движения; Δ_f^n – допустимое отклонение (ошибка относительно решения по критерию (4.4); $\{u_1(t), t_{f1}; \dots u_n(t), t_{fn}\}$ – кортеж, содержащий результаты итерационного решения по поиску $u(t)$ и t_f размерности $1 \times n$, где $n \in [1, 2, \dots \infty]$; тогда в разрезе времени исполнения ограничение (4.8) выглядит как $t_f - \delta \leq t_{fn} \leq t_f + \delta$, т.е. задача сводится к нахождению решения $u_n(t), t_{fn}$, отличающегося от решения, оптимального по быстродействию в пределах ошибки Δ_f^n ; в лучшем случае $n = 1$, так, например, происходит для решения задачи 3 и 2 для нахождения оптимального движения для пути, заданного только двумя точками (позиционное управление) без ограничений по промежуточным точкам, например, как для движения РТР из P_0 и P_1 , (см рис. 2.5).

Задача 4. Обеспечение безопасности. Задача сводится к следующему: нахождению $u(t)$ и t_f таких, что $t_f \leq t_{lim}$ (t_{lim} – ограничение на время исполнения перехода), $\varphi(t_f) \cong \varphi_3$, и $S_{Ri} \cap S_{Hi} \cap S_{OBi} = 0$ (S – shell, оболочка), для всех $i = 1 \dots n$, где n – число дискрет времени; $\frac{t_f}{n}$ – шаг дискретизации; t_i – рассматриваемый момент времени, $t_i \in [t_0, t_f]$, при этом геометрическая огибающая поверхность оболочек КР при движении определяется как функция от обобщенных координат, кинематической и геометрической модели КР, т.е. S_{Ri} определяется как $F_{surf}^R(\varphi(t_i), Model_R)$; поверхность модели тела человека (S_{Hi}) как $F_{surf}^H(\{TF_{H1}^i, \dots TF_{Hm}^i\}, Model_H)$; где $\{TF_{H1}^i, \dots TF_{Hm}^i\}$ – массив матриц трансформации локальных баз звеньев модели оператора; $Model_H$ – геометрическая и кинематическая модели оператора; поверхность S_{OBi} определяется как функция $F_{surf}^{OB}(\{TF_{OB1}^i, MD_{OB1}\} \dots \{TF_{OBj}^i, MD_{OBj}\} \dots \{TF_{OBL}^i, MD_{OBL}\})$, где L – количество объектов коллизий, MD_{OBj} – кинематическая модель j -го объекта; TF_{OBj}^i – его матрица трансформации.

Задача 5. безопасность с прогнозом. Задача возникает в ситуации исполнения ТО, предусматривающей движение какого-либо из объектов коллизий кроме КР, например, при одновременном управлении КР и позиционирующим устройством (роботом манипулятора или мобильным роботом). Если скорость движения объектов находится в допустимых пределах, то траектории движений во времени должны быть спрогнозированы, а КР должен получить задание на движение с учетом результатов прогноза изменения положения подвижных объектов. Задача является расширением **задачи 4**, где условие отсутствия пересечения геометрических огибающих поверхностей модели КР, оператора и объектов коллизий для всех рассматриваемых моментов времени представляется в виде

$$\left((S_{R_i} \cap S_{H_i} \cap S_{OB_i}) \cup (S_{R_{i+1}} \cap S_{R_{i+1}} \cap S_{OB_{i+1}}) \dots \cup (S_{R_k} \cap S_{R_k} \cap S_{OB_k}) \right) = 0$$

при этом $k \in [i \dots n]$; $[i \dots i + 1, \dots k]$ и t_k – глубина прогноза.

Представленные задачи оптимизации следует сгруппировать следующим образом: задачи **1 – 3**, решаются при сокращении затрат ресурсов, в частности временных и энергетических, задачи **4 – 5** – при предотвращении коллизий с объектами рабочей зоны, т.е. обеспечение безопасности. Очевидно, что в реальном ТП при планировании движения должны решаться параллельно две задачи: одна из группы **1–3**, вторая из **4–5**. То есть, при отсутствии гарантий безопасности исполнения движения алгоритмы оптимизации должны решать многокритериальную задачу. Если же такие гарантии имеются, например отсутствуют подвижные объекты в рабочей зоне и движение по траектории $[\varphi_0, \varphi_1 \dots \varphi_i \dots \varphi_n]$, где n – число точек траектории, не вызывает коллизии, то может быть решена задача из группы **1–3** отдельно.

Важным обстоятельством при постановке задачи оптимизации для каждой конкретной части ТО является необходимость учета параметров технического задания на ТО. Таким образом, техническое задание конкретизирует желаемое движение ПР в рамках части ТО, в том числе определяя (автоматически формируя) частную задачу оптимизации.

Технологическая операция, выполняемая КР, представляется последовательностью частей $Part_i$ одного из типов, представленных в кортеже $P_{type} = (Aux.Step, TechStep.AuxStroke, TechStep.WorkStroke)$, что соответствует «ВП», «ТПд:ВХ» и «ТПд:РХ» соответственно. При этом каждая часть ТО сопряжена с определенным действием и сопровождается движением КР в КП $Q = \{q_1(t) \dots q_7(t)\}$ (при этом положение ЦТИ в ОП может и не изменяться, может меняться только ориентации), т.е. $TO_j = [Part_1 \dots Part_i \dots Part_n]$, где $Part_i.Type \in P_{type}$; а $Part_i.Type$ – тип i -го движения; n – количество частей операций; j – порядковый номер ТО в рамках задания по ТП.

Программно $Part_i$ целесообразно реализовать с использованием типа данных «структура» или «объект» [87]. Таким образом, TO_j параметризует структуры данных и процедуры этапов планирования движения КР в ТП и состоит конкретно из этапов:

- планирования задачи (Task planning);
- планирования пути (Path planning);
- планирования траектории (Trajectory Planning);
- реализации и контроля траектории (Trajectory control).

Структура, характеризующая ТО, может содержать следующие поля: пространственное положение ЦТИ в конечных точках, динамику объекта ($\varphi, \omega, \varepsilon$ и т.п.) режимы движения, критерии оптимизации, режимы синхронизации по времени электроприводов (синхронных или асинхронный) и т.п. При этом недетерминированность положения в пространстве объектов рабочей зоны ведет к необходимости постоянного мониторинга и коррекции результатов этапов «Планирование пути» и «Планирование траектории».

В гл. 2 для уточнения и конкретизации задач оптимизации **1 – 5** представлено математическое описание ТП, ТО, этапов планирования режимов движения, типов переходов и режимов синхронизации электроприводов.

Выводы

1) Предложена математическая постановка однокритериальных и многокритериальных задач оптимизации для КРТП, формирующая теоретические основы при создании алгоритмического и программного обеспечения для технологических комплексов на базе ПР и КР, а также систем управления ими.

2) Представлена концепция приоритетности выбора критериев оптимизации в рамках организованной кооперации или коллаборации оператора и КР, создающая предпосылки для проектирования технологических методов оптимизации движений ПР и КР в рамках исполнения частей ТО.

4.2 Метод снижения размерности задач оптимизации в операционном и конфигурационном пространстве

Эффективность КРТП определяется способностью системы управления КР оперативно и адекватно реагировать на изменения переменных состояния совместного пространства комплекса [267]. Изменения могут быть связаны как с необходимостью исполнения заданной последовательности частей ТО, так и с недетерминированностью рабочей зоны, вызванной изменением положения объектов коллизий во времени [345]. Исполнение роботом ТПд и ВП как частей ТО реализуется посредством движения ЦТИ КР в ОП. При этом специфика движения зависит от допустимого и применённого режима управления [71]. Использование режимов контурного и траекторного управ-

ления при реализации ТПД, особенно при ограниченных режимах подачи инструмента, оставляют узкий диапазон варьирования параметрами движения при проведении оптимизационных процедур. Разрешение коллизий в ходе исполнения движения, реализующего ТПД без нарушения технологического режима, не представляется возможным [35]. С другой стороны, режим позиционного управления при реализации ВП предоставляет широкие возможности оптимизации параметров движения. При исполнении ВП в случае необходимости разрешения коллизий возможен переход на режимы траекторного и контурного управления, допустимы полная остановка КР, перемещение в предустановленные позиции или перемещение в предустановленные зоны.

Отсутствие жёстких ограничений для режима позиционного управления, с одной стороны, расширяет возможность и упрощает возможность применения типовых методов планирования движения, таких как инерциальный способ с использованием предустановленных шаблонов траекторий (прямых, частей окружности, сплайнов и др.), ОЗК без ограничений, ОЗК с ограничениями, разрешаемых нелинейными решателями [211, 217–218], с другой стороны, может привести к выходу КР из технологически эффективных подмножеств КП, что может отражаться в виде неэффективных поз КР в ОП, либо вообще визуально не наблюдаться в ОП, при этом запас углового перемещения по некоторым осям может оказаться критически малым. Получение в точке назначения очередного движения (точке окончания пути) технологически неэффективной конфигурации КР в большинстве случаев приведёт к невозможности осуществления траекторного и контурного управления, высоким затратам вычислительных ресурсов (в силу сложности задачи оптимизации нелинейного решателя), а также занятию значительного объёма рабочей области ОП при реализации движения. Тогда становится актуальной задача разработки механизма (в рамках технологического метода оптимизации движений КР), позволяющего при осуществлении последовательной серии движений в целях исполнения ТО обеспечить нахождение КР в приемлемом для текущей ТО объёме КП. Основные положения подхода отражены далее.

Задание точки назначения ВП осуществлялось наиболее удобным для оператора образом – в виде матрицы однородного преобразования для ЦТИ относительно глобальной системы координат КР. Планирование движения [261] по заданной матрице трансформации в моделях было реализовано как посредством инерциального способа, при этом переход от ОП к КП осуществлялся с помощью псевдообратной матрица Якобиана (для избыточного КР), вычисляемой согласно методу Мура–Пенроуза [245, 312], так и классическим решением ОЗК для точки назначения в условиях ограничений и без них. Искомая точность решения была установлена в пределах стандартных допусков для КР, определялась количеством времени, выделяемым на решение задачи оптимизации, и сама по себе не ставилась в работе в качестве критерия для оптимизации ТП. При исследовании работоспособности предлагаемых решений опорные конфи-

гурации использовались как параметр для нелинейного решателя ОЗК. Движения, реализующие ВП, не сопровождалось коллизиями.

В качестве основной идеи исследования была выдвинута гипотеза, что любому классу ТО КРТП, включающей повторяющиеся ТПД, может быть поставлено в соответствие ограниченное дискретное КП (Q^{red}), такое, что для любой точки k начала РХ для ТПД, определённой в ОП матрицей трансформации (TF_k), может быть найдена такая конфигурация Q_k , что

$$Q_k = F_{IK}(TF_k, Q_j^{red}), \quad (4.9)$$

где Q_j^{red} – наиболее подходящий элемент из Q^{red} , используемый в функции F_{IK} в качестве входного параметра, начальное предположение конфигурации в точке назначения для алгоритма оптимизации BFGS, при этом Q_k останется эффективной технологической конфигурацией, обеспечивающей эффективную технологическую позу КР. Условием технологической эффективности будет являться то, что фактическая матрица трансформации

$$\widetilde{TF}_k = F_{FK}(Q_k) \cong TF_k \quad (4.10)$$

будет определяться в пределах допустимой погрешности Δ (рассчитанной, с помощью метрик NRMSE, RMSE или MAD), и если

$$V_{Rk} \subset V_R,$$

здесь

$$V_{Rk} = \{X \subset R^3 | \partial X = S_{Rk}\};$$

$$V_R = \{Y \subset R^3 | \partial Y = S_R^{Q^{red}}\},$$

∂X и ∂Y – границы множеств, замыкающие объёмы соответствующих пространств. То есть выполняются следующие условия: для V_{Rk} , если $x_0 \in X$, то для $\forall$ окрестности $U \ni x_0$ справедливо $U \cap X \neq 0$ и $U \cap X^C \neq 0$, для V_R , если $y_0 \in Y$, то для $\forall$ окрестности $W \ni x_0$ справедливо $W \cap Y \neq 0$ и $W \cap Y^C \neq 0$, X^C, Y^C – дополнения множества X и Y соответственно;

$$S_{Rk} = F_{surf}^R(Q_k, Model_R), \quad (4.11)$$

это множество точек в декартовом пространстве, определяющих внешнюю оболочку поверхности 3 –D модели КР;

$$S_R^{Q^{red}} = \bigcup_{i=1}^n (F_{surf}^R(Q_i, Model_R)), \quad (4.12)$$

это множество точек в декартовом пространстве, определяющих внешнюю оболочку n поверхностей моделей КР для всех конфигураций из Q^{red} , где $i \in \overline{1, n}$; n – мощность множества Q^{red} ; $Model_R$ – модель робота KUKA LBR IIWA 7 R800 в URDF формате [252].

Для подтверждения гипотезы был поставлен численный эксперимент на имитационной модели и физический эксперимент на соответствующем промышленном оборудовании в лабораторных условиях. В качестве компонентов ПАК в эксперименте, помимо основного оборудо-

вания и управляющего ПО, выступала разработанная база данных с системой управления, содержащая набор редуцированных конфигурационных пространств (РКП) и признаков выбора конкретного РКП по спецификации (характеристикам частей ТО) соответствующей ТО.

РКП формировались на основании следующих требований, связанных с конкретной ТО:

- тип ТО (рассматривались ТО сверления, построчного фрезерования, окрашивания изделий с радиусом кривизны более 1 м и др.);
- диапазон вариаций параметров локальной системы координат изделия в глобальной системе координат КР (вариации локализации обрабатываемой плоской поверхности или касательной плоскости в случае наличия кривизны обрабатываемой поверхности, например, окрашивание или шлифование);
- требуемая ориентация ЦТИ относительно обрабатываемой поверхности, определяющая матрицу ориентации для ЦТИ в глобальной системе (нормаль к поверхности или заданный угол наклона);
- геометрические ограничения рабочей зоны (локализация объектов коллизий);
- ограничения для ВХ и ВП из операционного описания ТО.

Условиями исполнения ТО были приняты: индифферентность к углу проворота инструмента относительно оси аппликат 7-й оси вращения при ТО механообработки и значительный диапазон вариации угла поворота при ТО окрашивания. Количество повторений ТПД в ТО для разных положений начала РХ в эксперименте было принято не ниже 4-х при сохранении одинаковой ориентации ЦТИ относительно плоскости поверхности обработки.

Для ТО сверления изделия, расположенного в горизонтальной плоскости с отклонением нормали к поверхности обработки (оси аппликат локальной базы изделия) от оси OZ глобальной системы координат КР не более 0,2356 радиан, математическое описание РКП может быть представлено в следующем виде:

$$Q^{red} = F_{IK}^a(TF), \quad TF = F_{TF}(pose, \alpha_{rot}, \alpha_{tilt}), \quad (4.13)$$

где $pose, \alpha_{rot}, \alpha_{tilt}$ – массивы положений ЦТИ, угла поворота ЦТИ и угла наклона ЦТИ относительно 7-й оси вращения КР соответственно. При этом при проведении эксперимента ограничения переменных составили: $\alpha_{rot} \in [-\frac{175 \cdot \pi}{180}; \frac{175 \cdot \pi}{180}]$, $\alpha_{tilt} \in [0; \frac{3 \cdot \pi}{40}]$; массив векторов в декартовой системе координат представляется как $pose = f(r(R, \theta), \theta, \varphi)$, где $\{R, \theta, \varphi\}$ – координаты соответствующей сферической системы координат, $r = R \cdot \sin(\theta)$ – проекция радиус-вектора $R = 0,9$ на плоскость сечения сферы по параллели, проходящей через текущую точку сферической системы. Ограничения зенитного угла $\theta \in [\frac{2 \cdot \pi}{9}; \frac{7 \cdot \pi}{18}]$, ограничения азимутального угла $\varphi \in [-\frac{\pi}{4}; \frac{\pi}{4}]$, ограничения для $\{R, \theta, \varphi\}$ приняты исходя из технических характеристик КР KUKA LBR IIWA 7 R800.

Тогда итоговое выражение формирования закона управления в обобщённых координатах для движения КР будет выглядеть так:

$$q(t) = \{u(t) \mid q(t_f) = q_k = F_{IK}(TF_k, Q_j^{red}) \text{ и } \min(RMSE(TF_k, TF_j)), j \in \overline{1, n}\}. \quad (4.14)$$

Для иллюстрации изложенного (рис. 4.3, а) представлен ограниченный набор пространственных расположений КР, соответствующих конфигурациям из РКП:

- 1) для операций сверления плоской поверхности (ось вращения седьмого звена направлена вниз к плоскости XOY глобальной системы КР);
- 2) для операций фрагментарного окрашивания изделия с дугообразным изгибом в вертикальной плоскости (ось вращения седьмого звена направлена перпендикулярна оси OZ глобальной системы КР).

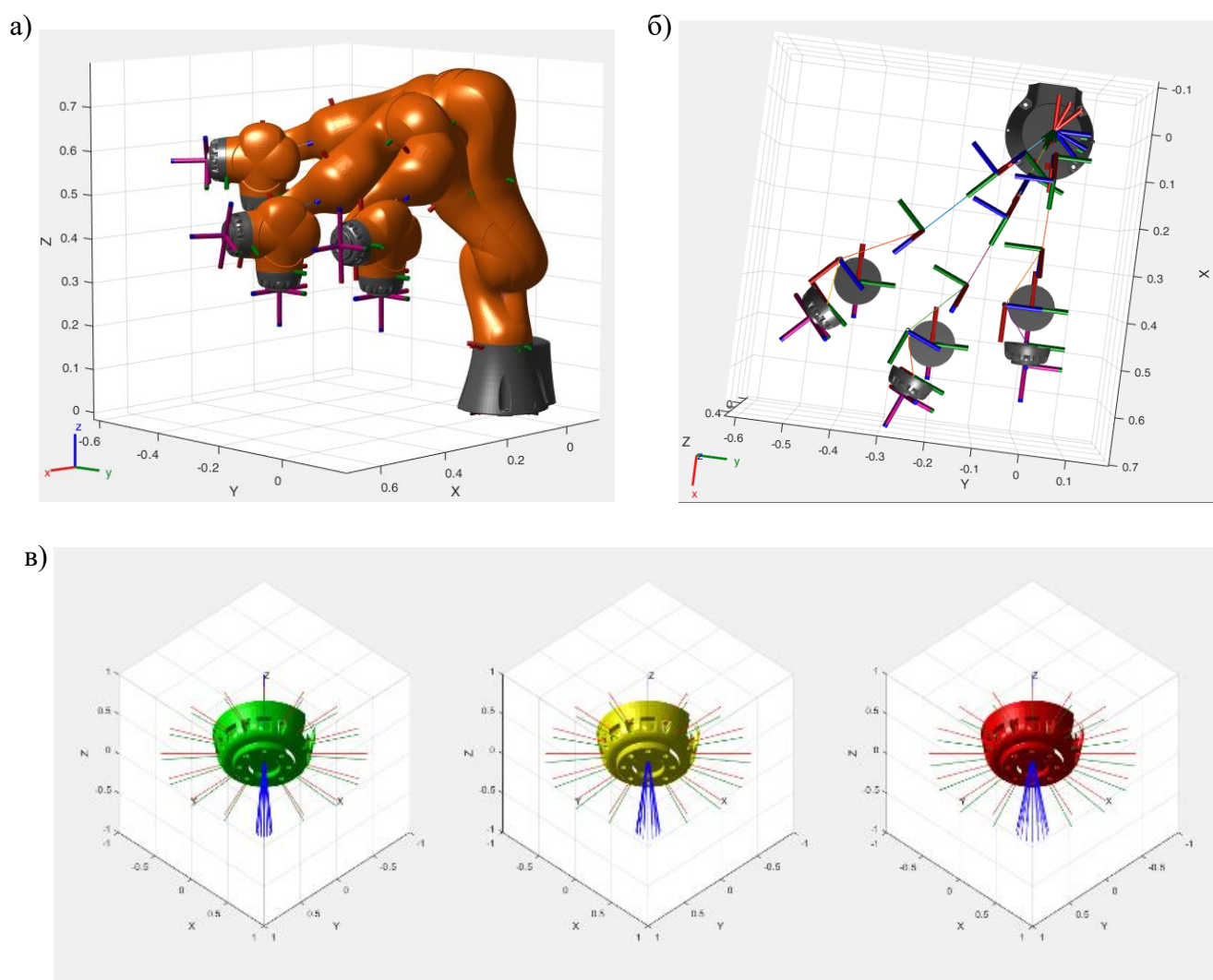


Рисунок 4.3. – Визуализация моделей КР и его звеньев в пространственных расположениях, соответствующих экземплярам конфигураций из РКП: а – графические модели КР; б – геометрическая интерпретация кинематических моделей КР; в – возможные отклонения локальных систем координат седьмого звена КР

На рис. 4.3, б представлены те же пространственные расположения КР, вид сверху, при этом звенья, кроме 7-го, и базы скрыты для обеспечения возможности визуализации рамок ло-

кальных систем координат звеньев КР. На рис. 4.3, в представлены примеры возможных отклонений локальной базы 7-го звена КР от первоначальной как по углу наклона α_{tilt} (4.13) оси OZ, так и по углу вращения α_{rot} (4.13) локальной системы координат относительно оси OZ, слева отображено минимальное отклонение по углу наклона, посередине – среднее отклонение, справа – существенное. Все позы КР в ОП и, соответственно, конфигурации в редуцированном КП по условию (по механизму построения редуцированного КП) технологически эффективны – КР заходит к изделию сверху, все звенья максимально удалены от обрабатываемой поверхности, отсутствует проваливание 2–5-го звеньев в нижнюю рабочую зону КР.

Реализация предложенного способа управления (4.14) и базы знаний (БЗ) РКП для планирования движений, реализующих части ТО, на имитационных моделях и физическом оборудовании показало справедливость положенной гипотезы, а именно сохранение технологически эффективных поз КР в ОП.

На рис. 4.4 представлен пример схемы визуализации движений, реализующих ТО, состоящую из одного ВП (расположения 3–5) и двух ТПд (расположения 1–3 и 5–7), с поддержкой БЗ РКП (рис. 4.4, б) и без поддержки БЗ (см. рис. 4.4, а) соответственно. На схеме жёстко ограниченные части ТО – РХ для ТПд не представлены, так как соответствующие движения реализуются в режиме траекторного управления по шаблону отрезка прямой и выполняются инерциальным способом без решения ОЗК. Отчётливо видна (см. рис. 4.4, а) неэффективная технологическая поза (существенный «провал» звеньев в нижнюю часть рабочей зоны), возникшая ввиду накопившейся ошибки смещения конфигураций, а также два потенциально опасных перемещения инструмента в направлении рабочей зоны оператора. Во втором случае (управление с использованием БЗ РКП) эффективность поз сохраняется, перемещение инструмента при смене происходит через верхнюю часть рабочей зоны КР, не представляя опасности для оператора. Кроме того, использование предусмотренных конфигураций для поиска закона управления движением в большинстве случаев позволяет сократить общую длину траектории перемещения КР в КП для ТО по сравнению с вариантом без использования БЗ РКП в среднем на 7 %. Так, для представленного примера длина траектории варианта (см. рис. 4.4, а) составила 6,7912 радиан, а для второго варианта (см. рис. 4.4, б) – 6,3641 радиан.

Сокращение длины траектории в КП с учётом неизменности общего времени исполнения ТО ведёт к различиям и в показателях динамики, оставляя преимущество за вторым вариантом (использование БЗ РКП) в части максимальных угловых ускорений и рывков шарниров, в отдельных случаях снижение максимальных ускорение и рывков достигает 15 – 20 %.

На рис. 4.5 представлена диаграмма потребления энергии КР в разрезе шести частей ТО (6 движений) и график потребления энергии КР накопленным итогом для двух представленных вариантов реализации ТО – без использования БЗ РКП (БЗ-) и с использованием БЗ РКП (БЗ+).

На диаграмме замечен значительный перерасход энергии для движений 3 и 4 в варианте 2, что связано с перемещением инструмента в верхней (безопасной) рабочей зоне КР, в итоге за всё время реализации ТО общее потребление энергии для варианта 2 увеличилось незначительно. При этом бóльшие затраты энергии в шестой части для варианта 1 связаны с потерей технологической эффективности позы в позиции 5 (см. рис. 4.4, а).

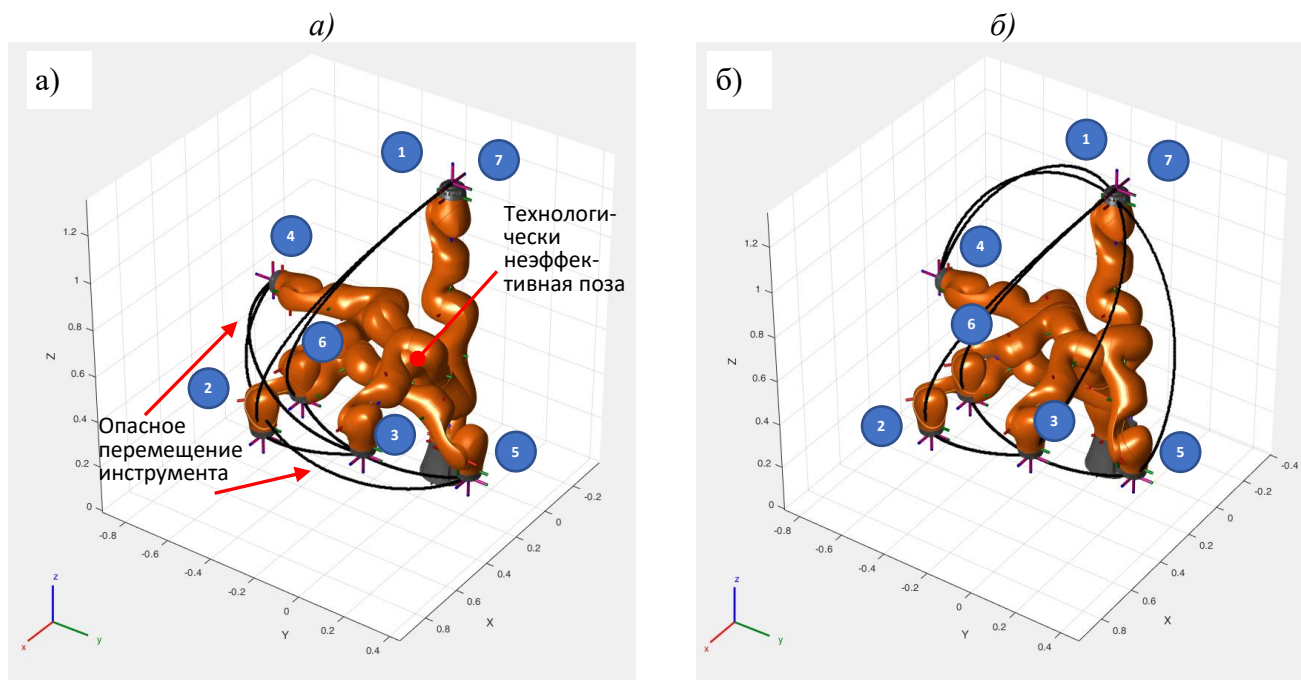


Рисунок 4.4. – Визуализация моделей КР и его звеньев в пространственных расположениях:
а – без БЗ РКП; б – с БЗ РКП

Избыточность [325], являясь одним из основных преимуществ КР с семью и более степенями свободы, определяет его универсальность в вариантах реализации технически сложных движений, но, с другой стороны, усложняет задачи планирования движений для частей ТО, технически тривиальных.

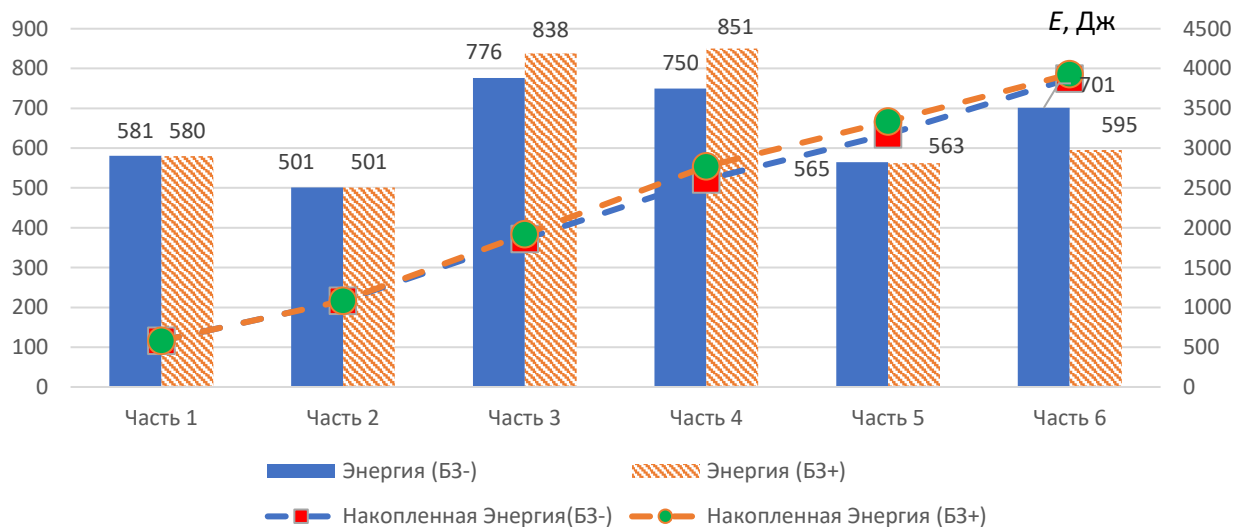


Рисунок 4.5 – Потребление энергии КР при реализации ТО в разрезе шести частей и накопленным итогом для двух вариантов сравнения

Анализ разнообразия КРТП показал, что в большинстве случаев в рамках ТО преобладают технически тривиальные части, для которых можно гораздо проще спланировать и реализовать движения, ограничив пространство переменных состояния КР. Тогда становится целесообразным, имея инструменты выбора ограничений, для каждой спецификации ТО ставить в соответствие набор ограничений или использовать полное пространство для КР, подключая актуальные наборы из БЗ. В частности, в качестве одного из набора инструментов следует использовать РКП. Собрать БЗ, включающую РКП под каждый класс технологических задач для каждого конкретного КРТП, не представляется сложным, тогда реальным становится обеспечение механизмов планирования движений массивом опорных конфигураций, что облегчает поиск оптимальных движений. В случае неперекрывания БЗ РКП конкретного массива частей ТО всегда есть возможность скорректировать положение изделия [94] в рекомендуемую позицию при помощи автоматического позиционера либо действиями оператора, т.е. подвести спецификацию частей ТО под актуальное РКП.

Выводы

1) Был предложен механизм, обеспечивающий нахождение КР в технологически эффективных позах при осуществлении последовательной серии движений в целях исполнения ТО. Принцип действия заключается в выборе актуальных предустановленных параметров для модулей системы планирования и контроля исполнения движений в режиме позиционного управления с решением ОЗК оптимизационными методами. Предустановленный параметр Q_j^{red} с помощью средств классификации извлекается из БЗ РКП в качестве первоначальной догадки для алгоритмов решения ОЗК. Полученные при этом движения не образуют конфигурации и соответственно пространственные расположения КР, выходящие за рамки технологически эффективных.

2) Эксперимент на имитационных моделях и физическом оборудовании продемонстрировал преимущества предложенного решения, в том числе подтвердив общее сокращение длины траекторий КР в КП и повышение плавности движений (снижения значений рывков).

4.3. Анализ и исследование алгоритмов интерполяции траекторных перемещений коллаборативного робота при исполнении технологических операций

В ходе проведенных исследований в области планирования и оптимизации движений КР, реализующих жестко ограниченные части ТО в КРТП, в том числе РХ, было выявлено существенное влияние факта выбора конкретного алгоритма интерполяции и его настроек на качественные показатели движения в режиме траекторного управления. Результаты исследования получены на примере РТП покраски, характеризующегося высокой степенью вариативности алгоритмов планирования движений, связанной с частой сменой технических заданий, сложностью траектории движения и непостоянством рабочего пространства роботизированного участка. Частые остановки на переналадку вызваны большой номенклатурой окрашиваемых деталей

и мелкосерийностью производства. Центральным вопросом рассмотрения выступает обоснованный выбор алгоритмов интерполяции траектории, обеспечивающий максимизацию функционала качества ТО, с учетом обеспечения требуемой динамики движения для равномерности нанесения лакокрасочных материалов (ЛКМ).

После получения траектории (массива точек в ОП) перемещения ЦТИ КР в ОП производится преобразование координат в КП. Преобразование осуществлялось на базе системного объекта *generalizedInverseKinematics System object (Matlab)*, использующего набор кинематических ограничений для вычисления конфигурации соединения по заданной модели, выраженной объектом *rigidBodyTree*. Объект *generalizedInverseKinematics* использует нелинейный решатель для удовлетворения ограничений или достижения наилучшего приближения. В качестве набора ограничений использовались следующие: *constraintPositionTarget* – ограничение положения ЦТИ; *constraintAiming* – ограничение ориентации оси Z ЦТИ (ориентация осей X и Y в рассматриваемом ТП может быть произвольная и поэтому для упрощения решения ОЗК не учитывается в качестве ограничений); *constraintJointBounds* – ограничение изменения угловой координаты шарнира при переходе от текущей точки траектории к следующей, контроль за этим ограничением необходим для обеспечения плавности движения и устранения выхода за пределы требуемой ТП траектории. Параметры ограничений, установленные для приведенных в работе вычислений представлены в листинге 4.1.

Листинг 4.1

```
positionTgt = constraintPositionTarget(
    get("iwa_link_ee_kuka");
    positionTgt.TargetPosition=[X(i) Y(i) Z(i)];

    aimConst = constraintAiming("iwa_link_ee_kuka");
    aimConst.TargetPoint=[ vX(i) vY(i) vZ(i)];

    limitJointChange = constraintJointBounds(lbr);
    lowBound= initialGuess(i)+ones(1,7)*(-0.1);
    highBound = initialGuess(i)+ones(1,7)*(0.1);
    limitJointChange.Bounds=([lowBound; highBound])';
```

Здесь $[X(i) \ Y(i) \ Z(i)]$ – положение ЦТИ в текущей точке траектории; $[vX(i) \ vY(i) \ vZ(i)]$ – вектор нормали к обрабатываемой поверхности в текущей точке траектории; *initialGuess* – начальное предположение конфигурации в точке назначения (в текущей точке), полученное как результат решения ОЗК в предшествующей точке (*i-1*).

Введение ограничений изменения угловых координат шарниров принципиально, поскольку их отсутствие может привести к непредсказуемым результатам во время автоматического синтеза программ, например, в случае (рис. 4.6), когда в ходе движения по контуру детали наблюдается два схода с траектории, сопровождающиеся образованием траекторных петель.

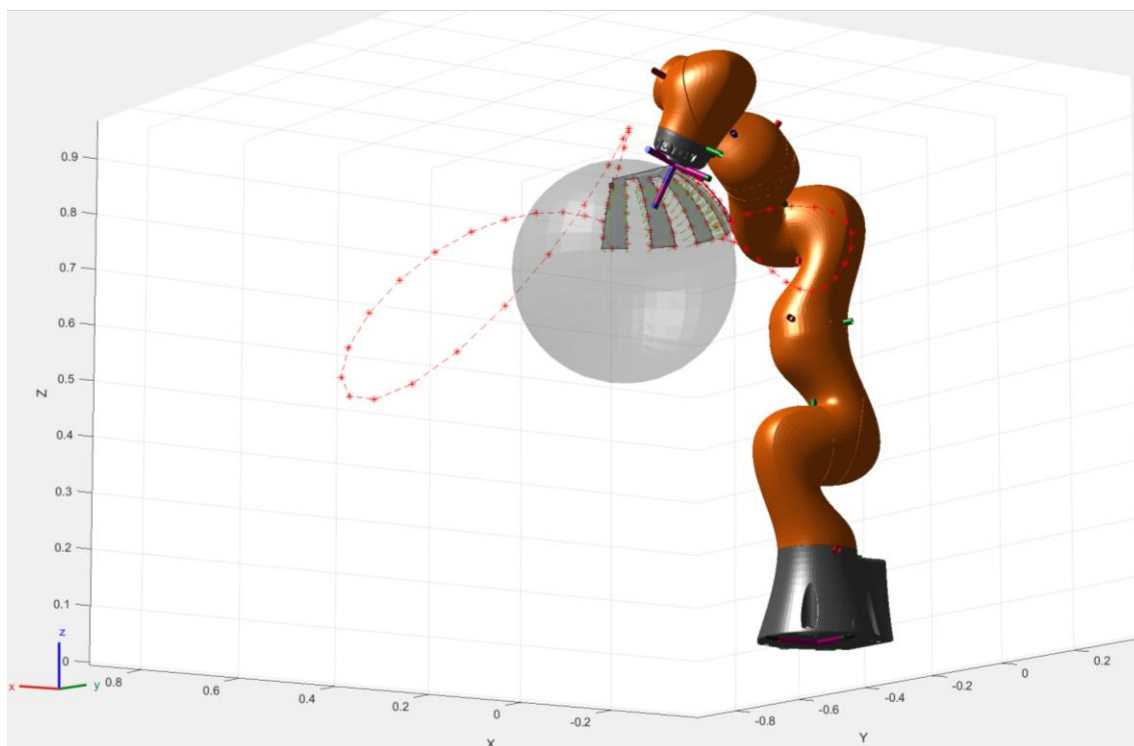


Рисунок 4.6 – Визуализация движения ЦТИ КР при формировании траектории перемещения решателем ОЗК без ограничений `constraintJointBounds`

При формировании итоговой траектории в работе исследовались возможности интерполяции данных кусочно-полиномиальным методом (полиномами третьей и пятой степеней) [248]:

$$f_1(x)=a(x-x_1)^3+b(x-x_1)^2+c(x-x_1)+d;$$

$$f_2(x)=a(x-x_1)^5+b(x-x_1)^4+c(x-x_1)^3+d(x-x_1)^2+e(x-x_1)+g;$$

на интервале $[x_1, x_2]$,

с применением и без применения алгоритмов сглаживания всей траектории:

1) *spline (Spline interpolation)* [227], – интерполяции данных кубическими сплайнами, обеспечивающей сглаживание первой и второй производных по всей кривой [290];

2) *makima (Modified Akima piecewise cubic Hermite interpolation)* [198–199], – интерполяции на основе модифицированного алгоритма Акима для кубической интерполяции полиномами Эрмита; этот алгоритм интерполяции основан на применении кусочной полиномиальной функции степени (не выше трех) [332];

3) *pchip (Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial)* [248, 282] – кусочного кубического интерполяционного полинома Эрмита – алгоритма интерполяции, сохраняющей форму с гладкой первой производной [236].

В табл. 4.1 представлены все рассматриваемые в эксперименте варианты алгоритмов интерполяции. Для расчета и анализа кинематики использовалась модель робота KUKA LBR PWA 7 R800 в формате *.urdf [97]. Обратная задача динамики решалась на основе метода Ньютона-Эйлера [244, 310]. Различия между результатами использования методов интерполяции оценивались на основе вычислительного эксперимента на имитационной модели. Исследование

проводилось в рамках РТП покраски детали с кривизной поверхности, близкой к сферической. На рис. 4.6 обозначена маска детали (сама деталь расположена на некотором удалении от маски и на рисунке не приводится), ЦТИ (в имитационном эксперименте – фланец КР) должна пройти последовательно по траектории, обозначенной штрих-пунктирной линией. В ходе прохождения траектории осуществляется нанесение ЛКМ на изделие.

Таблица 4.1 – Варианты алгоритмов интерполяции эксперимента

Вариант алгоритма	Профиль скорости перемещения между опорными точками	Способ интерполяции полученной траектории
<i>trap/spline</i>	Трапецеидальный вид; в опорных точках угловая скорость равна нулю	-
<i>cubic/spline</i>	Кубический полином; в опорных точках угловая скорость равна нулю	-
<i>quintic/spline</i>	Полином пятой степени; в опорных точках угловая скорость равна нулю	-
<i>cubicSmooth/spline</i>	Кубический полином; в опорных точках угловая скорость не равна нулю	<i>Spline</i>
<i>cubicSmooth/makima</i>	Кубический полином; в опорных точках угловая скорость не равна нулю	<i>Makima</i>
<i>cubicSmooth/pchip</i>	Кубический полином; в опорных точках угловая скорость не равна нулю	<i>Pchip</i>
<i>quinticSmooth/spline</i>	Полином пятой степени; в опорных точках угловая скорость не равна нулю	<i>Spline</i>
<i>quinticSmooth/makima</i>	Полином пятой степени; в опорных точках угловая скорость не равна нулю	<i>Makima</i>
<i>quinticSmooth/pchip</i>	Полином пятой степени; в опорных точках угловая скорость не равна нулю	<i>Pchip</i>

Траектория контуров маски детали определяется в ОП для ЦТИ согласно листингу 4.2.

Листинг 4.2

```

r=0.2;
NumPoints=10;
for i=1:NumPoints
    phi=pi/2+pi/8+((pi-pi/4)/NumPoints)*i;
    %theta=pi/2;
    for j=1:NumPoints
        theta=pi/8+((pi/4)/NumPoints)*j;
        x(i,j)=r*sin(theta)*cos(phi);
        y(i,j)=r*sin(theta)*sin(phi);
        z(i,j)=r*cos(theta);
    end
    if mod(i,2)==0
        x(i,1:NumPoints)=x(i,NumPoints:-1:1);
        y(i,1:NumPoints)=y(i,NumPoints:-1:1);
        z(i,1:NumPoints)=z(i,NumPoints:-1:1);
    end
end
X=reshape(x',[ ],1)+0.4;
Y=reshape(y',[ ],1)+0;
Z=reshape(z',[ ],1)+0.6;

```

Здесь r – постоянный радиус кривизны поверхности, м; ϕ – полярный угол сферической системы координат, рад; θ – зенитный угол в сферической системе координат; $NumPoints * NumPoints$ – количество опорных точек траектории в ОП; $[X(i) \ Y(i) \ Z(i)]$ – положение ЦТИ в текущей точке траектории в ОП; $[0.4 \ 0 \ 0.6]$ координаты центра сферы, определяющей кривизну поверхности маски детали; вектор нормали n в каждой точке траектории определяется как разность $[0.4 \ 0 \ 0.6] - [X(i) \ Y(i) \ Z(i)]$.

Планирование движения в КП выполнялось при помощи нелинейного решателя *generalizedInverseKinematics* в условиях ограничений, согласно программному коду, фрагмент которого представлен в листинге 4.3.

Листинг 4.3

```
gik = generalizedInverseKinematics('RigidBodyTree', lbr,...
                                   'ConstraintInputs',{ 'position' 'aiming'
                                   'joint'});
initialGuess=[1.38      -0.14 -0.84 -1.26 -0.60 1.86  7.26e-14];
for i=1: NumPoints^2
    configSol(i,:) =
    gik(initialGuess,positionTgt,aimConst,limitJointChange);
    initialGuess=configSol(i,:);
end
```

Здесь *gik* – системный объект нелинейного решателя; *initialGuess* – конфигурация КР, используемая в качестве начального предположения конфигурации в точке назначения в алгоритмах BFGS или Левенберга-Маквдрта [202]; *configSol* – массив размерностью $7 * (NumPoints^2)$, представляющий собой траекторию перемещения в КП.

Расчет динамики перемещения по заданной траектории для выбранной модели КР осуществлялся методом Ньютона-Эйлера по критерию максимизации производительности операций, т.е. минимизации времени исполнения движения в условиях ограничений угловых координат (перемещения, скорости, ускорения и момента согласно загруженной модели КР). Критерий был принят как наиболее востребованный на промышленных предприятиях, нацеленных на рост темпов производства продукции. При выборе данного критерия также необходимо учитывать технологические параметры операций нанесения ЛКМ, при которых могут существовать предельные значения угловых и линейных координат движения инструмента (в частности, распылителя краски), ограничивающие динамику движения более жестко, чем технические характеристики КР. Тогда в качестве ограничений необходимо брать именно технологические ограничения.

При выполнении кусочно-полиномиальной интерполяции массива точек траектории, представленной в КП, с учетом синхронного движения электроприводов КР динамика определялась по шарниру, угловое перемещение на текущей части траектории которого имело максимальное значение. То есть минимальное время прохождения j -ой части траектории будет определяться по шарниру с максимальным угловым перемещением и с учетом установленных технологических или технических ограничений динамики.

Поэлементно разделив массив, содержащий максимальные изменения угловой координаты среди всех шарниров для каждой части траектории, на общую сумму элементов массива, представляется возможным получить массив, содержащий относительные значения максимальной длины каждой части траектории по отношению к длине всей траектории. Умножив полученный массив на заданное значение времени исполнения движения, можно получить временные интервалы для исполнения каждой части траектории или временные отрезки завершения каждой части траектории. Код, формирующий массив относительных значений, представлен в листинге 4.4.

Листинг 4.4

```
for j=1:(size(wpts,2)-1)
    tptsPath(j)=max(abs(wpts(:,j+1)-wpts(:,j)));
end
tpts(1)=0;
for j=2:size(wpts,2)
    tpts(j)=tptsPath(j-1)/sum(tptsPath)+tpts(j-1);
end
```

Здесь *wpts* = *configSol*; *tptsPath* – массив максимальных угловых перемещений среди всех шарниров по каждой части траектории; *tpts* – массив относительных значений максимальных угловых перемещений среди всех шарниров по каждой части траектории, отнесенных к общей длине траектории по максимальным угловым перемещениям.

Алгоритм нахождения минимального времени исполнения траекторного перемещения, интерполяции и сглаживания представлен в листинге 4.5.

Листинг 4.5

```
while all((abs(qd)-(VelocityLim))<0, 'all')&&all((abs(qdd)-(AcelLim))<0, 'all')
    tSamples=0:timeLim/(tsmp-1):timeLim;
    if smoothType=='spline'
        smoothPP = spline(tpts*timeLim,wpts);
    elseif smoothType=='makima'
        smoothPP = makima(tpts*timeLim,wpts);
    elseif smoothType=='pchip1'
        smoothPP = pchip(tpts*timeLim,wpts);
    else
        disp('Wrong value')
    end
    pp=smoothPP;
    smoothVelPP =
mkpp(smoothPP.breaks,polCoefDeriv(smoothPP.coefs),size(wpts,1));
    smoothVelPoly = ppval(smoothVelPP,tpts*timeLim);
    boundaryVel = zeros(size(smoothVelPoly));
    boundaryVel(:,2:end-1) = smoothVelPoly(:,2:end-1);
    smoothAcelPP =
mkpp(smoothPP.breaks,polCoefDeriv(smoothVelPP.coefs),size(wpts,1));
    smoothAcelPoly = ppval(smoothAcelPP,tpts*timeLim);
    boundaryAcel = zeros(size(smoothAcelPoly));
    boundaryAcel(:,2:end-1) = smoothAcelPoly(:,2:end-1);
```

```

[q,qd,qdd] = cubicpoly-
traj(wpts,tpts*timeLim,tSamples,VelocityBoundaryCondition=boundaryVel, Ac-
celerationBoundaryCondition=boundaryAcel);
end

```

Здесь *spline*, *makima*, *pchip* – функции получения полиномиальной структуры для частей траектории по угловым координатам; *polCoefDeriv* – функция нахождения производной входного аргумента (в данном случае положения, а затем угловой скорости) по полиномиальной структуре; *mkpp* – функция генерации кусочно-полиномиальной структуры; *ppval* – функция получения вектора значений переменной из соответствующей полиномиальной структуры; *cubicpolytraj* – функция построения интерполированной траектории перемещения с учетом ограничений угловых скоростей и ускорений.

В результате для девяти представленных вариантов алгоритмов (см. табл. 4.1) в рамках обозначенной технологической задачи были исследованы результаты планирования движения и соответствующие траектории. Выборочно представлена визуализации отдельных переменных состояния КР и состояния рабочей зоны для варианта trap/spline (рис. 4.7, 4.8) и cubicSmooth/makima (рис. 4.9, 4.10). На рис. 4.8 и 4.10 представлены графики изменения переменных состояния КР в разрезе каждой оси в соответствии с конкретным алгоритмом получения движения.

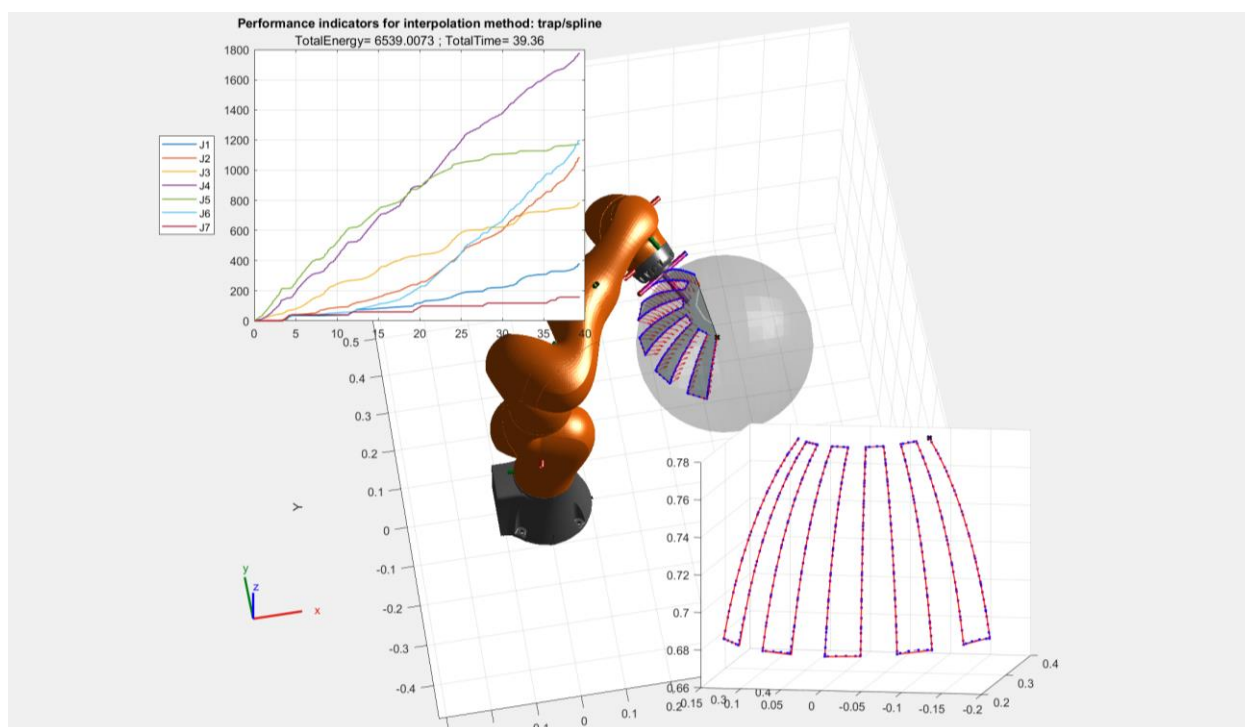


Рисунок 4.7 – Визуализация рабочей зоны КР при формировании траектории перемещения методом trap/spline РТП нанесения ЛКМ

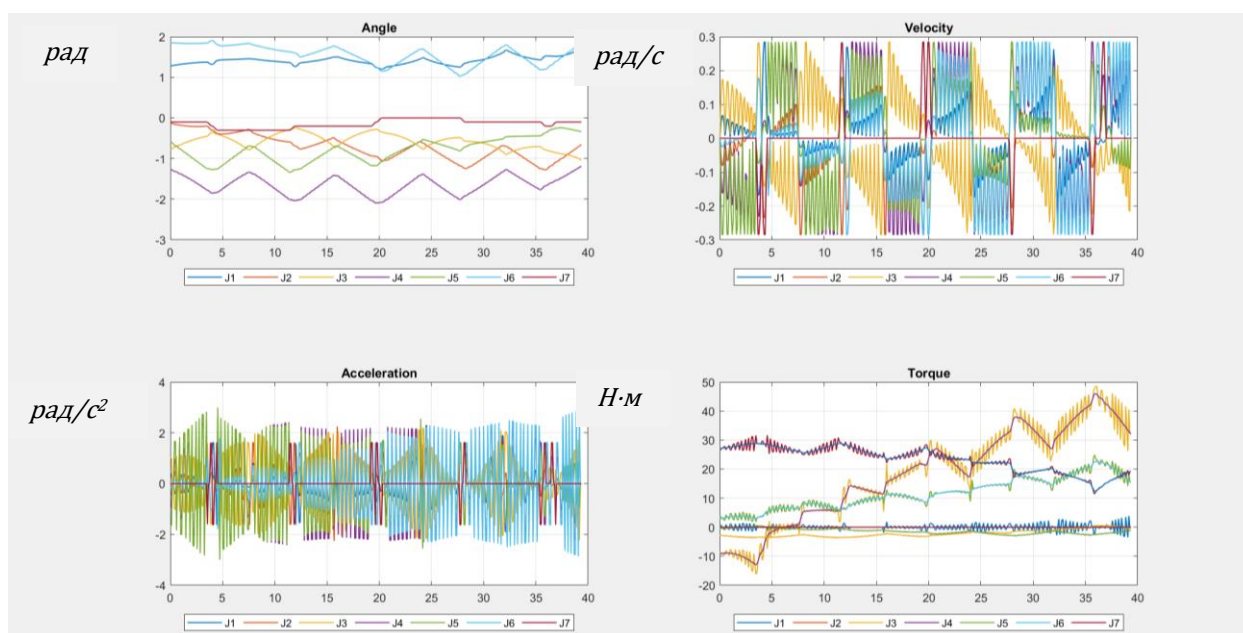


Рисунок 4.8 – Изменение переменных состояния КР по каждой оси при прохождении траектории, полученной методом trap/spline

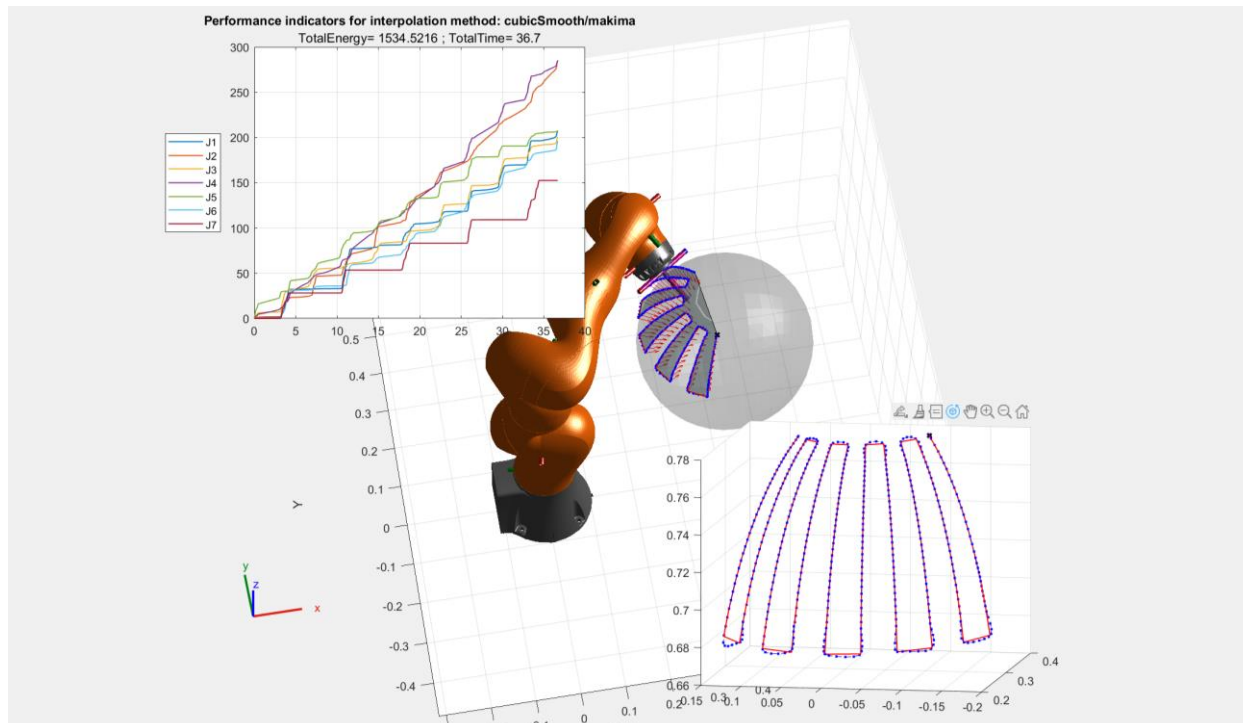


Рисунок 4.9 – Визуализация рабочей зоны КР при формировании траектории перемещения методом cubicSmooth/makima РТП нанесения ЛКМ

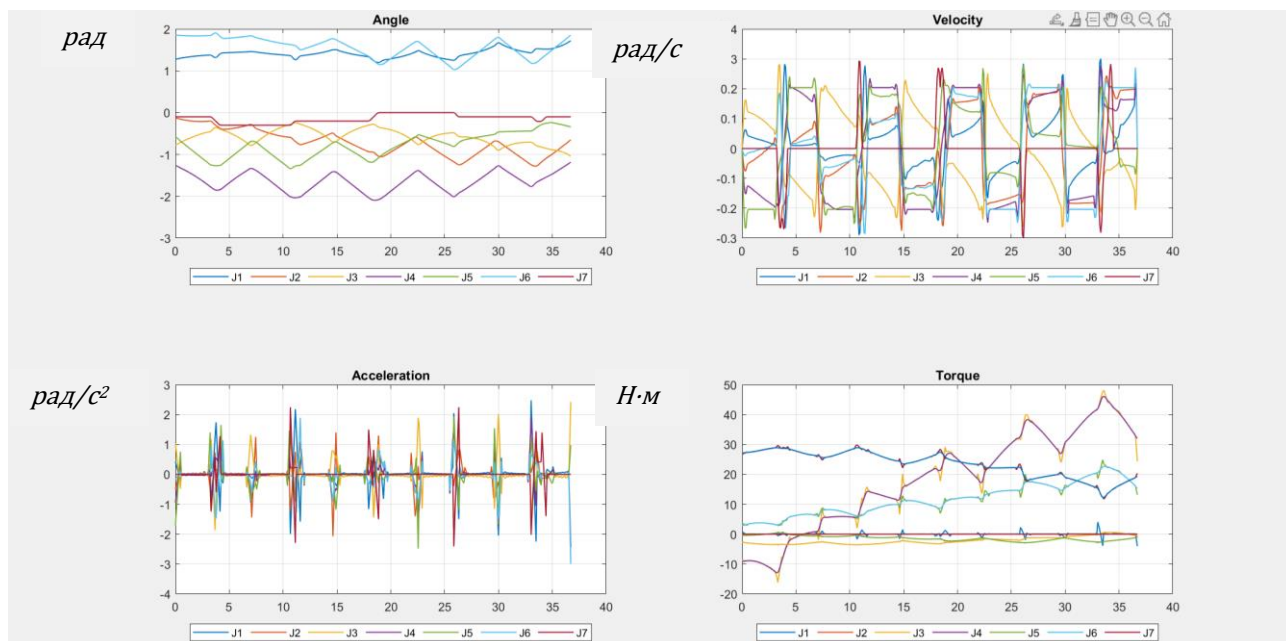


Рисунок 4.10 – Изменение переменных состояния КР по каждой оси при прохождении траектории, полученной методом cubicSmooth/makima

Необходимо отметить, что результаты представлены при соотношении объема массива исходных данных, полученных в ходе решения ОЗК, к выходному массиву интерполяции с соотношением 1/4.

Исследования позволяют сделать вывод о существенном различии некоторых интегральных показателей:

1) для методов группы cubicSmooth:

- общее энергопотребление – медианное значение составило 1534 Дж, максимальное 1647 Дж, минимальное 1415 Дж (лучший результат – cubicSmooth/spline); отклонение от медианного значения составляет $[-7,8\%; 7,74\%]$, при том, что временные интервалы исполнения траекторий равны с точностью до 0.01;

- отклонение от опорной траектории в ОП – 0.5435, 0.6194 и 0.6374 для методов cubicSmooth/spline, cubicSmooth/makima и cubicSmooth/pchip соответственно (расчет проводился методом Dynamic Time Warping по 400 точкам траектории);

- доли энергопотребления каждого электропривода в общем значении энергопотребления (рис. 4.11) для реализации движения отличаются, что говорит о существенном различии траекторий в КП, и в случае модели КР с электроприводами разной установленной мощности данный момент может оказать существенное влияние на общее энергопотребление и время исполнения траектории;

2) для методов группы quinticSmooth:

- общее энергопотребление – медианное значение составило 2020 Дж, максимальное – 2266 Дж, минимальное 1621 Дж (лучший результат – quinticSmooth/spline); отклонение от ме-

дианного значения составляет $[-19.75\%; 12.18\%]$, при том, что временные интервалы исполнения траекторий равны с точностью до 0.01;

- отклонение от опорной траектории в декартовом пространстве – 0.5446, 0.6697 и 0.7026 для методов quinticSmooth/spline, quinticSmooth/makima и quinticSmooth/pchip соответственно (расчет проводился методом Dynamic Time Warping по 400 точкам траектории);

- доли энергопотребления электроприводов в общем значении энергопотребления (рис. 4.12) для реализации движения отличаются, что говорит о существенном различии траекторий в КП, и в случае модели КР с электроприводами разной установленной мощности данный момент может оказать существенное влияние на общее энергопотребление и время исполнения траектории.

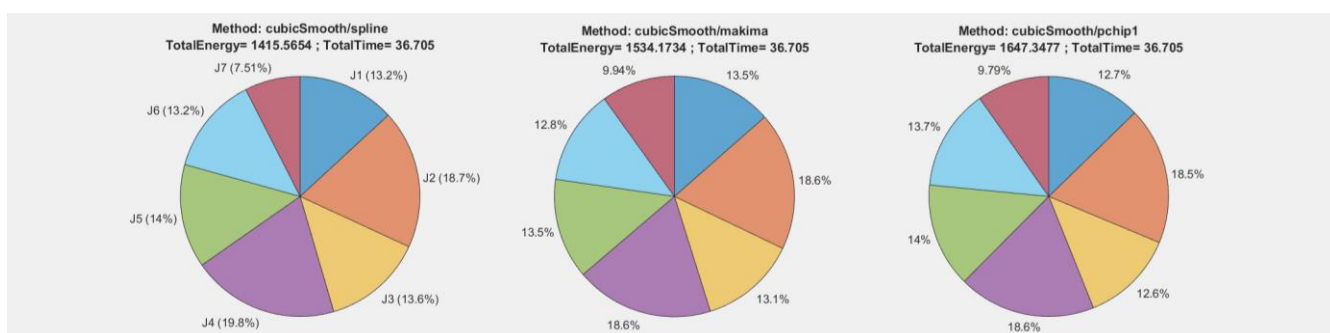


Рисунок 4.11 – Относительное энергопотребление электроприводов КР (J1 – J7 – соответствующие шарниры КР) для методов группы cubicSmooth

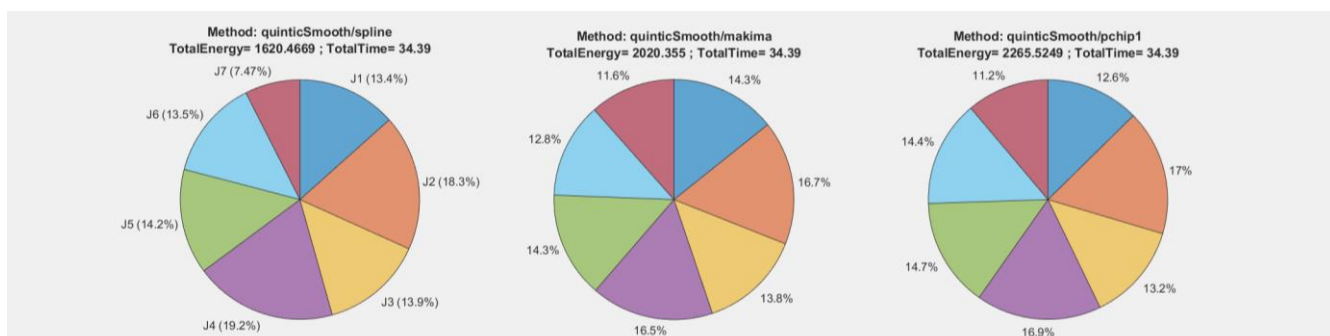


Рисунок 4.12 – Относительное энергопотребление электроприводов КР (J1 – J7 – соответствующие шарниры КР) для методов группы quinticSmooth

Как и ожидалось для группы методов без сглаживания эксперимент показал самые низкие результаты по всем интегральным показателям, поэтому данные по ним не приводятся.

Сравнивая результаты исследования по двум группам методов интерполяции, возможно заключить, что траектории, полученные интерполяцией методом из группы quinticSmooth, обеспечат более высокую производительность ТО (34,9 против 36,71 с), тогда как полученные методом из группы cubicSmooth обеспечат более высокую энергоэффективность операций (1415 Дж против 1621 Дж).

Выводы

1) Результаты экспериментальных исследований демонстрируют важность выбора актуального в условиях специфики конкретного КРТП алгоритма интерполяции траекторных пере-

мещений КР. Правильный выбор обеспечит минимизацию отклонения траекторных перемещений от заданных, а также позволит существенно сократить энергозатраты.

2) Отмечена целесообразность и необходимость наличия в современной АСУТП на базе КР механизмов, реализующих алгоритмы классификации ТО в части выбора наиболее целесообразного метода интерполяции и сглаживания.

4.4 Автоматизация выбора наиболее эффективного алгоритма интерполяции траекторий перемещения коллаборативного робота в технологическом процессе сверления

При штатном планировании типовых или групповых ТП на базе ПР имеются достаточные объемы временных ресурсов, что позволяет не только обеспечить исполнение ТО в соответствии с режимами обработки, но и выполнить оптимизационные мероприятия в целях максимизации дополнительных критериев эффективности ТП [206, 250, 342] (производительность, ритм выпуска, энергоэффективность и т.п.).

При запуске комплекса ТО на исполнение в таких процессах рабочая зона КР, как правило детерминирована, периметр безопасности закрыт, все траектории предварительно проверены на этапах отладки, ожидаемые результаты и затраты на производство predeterminedены и могут быть не достигнуты лишь в случае аварийных событий. То же самое нельзя сказать о КРТП, задачи которых смещаются в сторону изготовления продукции в рамках единичных ТП и групповых ТП с высокой степенью дифференциации форм изделий и факторов неопределенности. Так, части ТО могут быть заранее не определены и задаваться последовательно человеком в реальном времени; рабочая зона робота может быть не детерминирована (контур безопасности не закрыт или отсутствует), поскольку оператор имеет возможность занимать произвольное положение в пространстве, обрабатываемое изделие может перемещаться оператором (например, с целью обеспечения доступа к обрабатываемым поверхностям) и т.п.

Таким образом, все этапы проектирования движений КР, должны быть выполнены в оперативном режиме после получения от оператора задания на ТПд, что влечет за собой значительную нагрузку на системы управления процессом и требует наличия параллельных вычислений задач исполнения текущей траектории и проектирования следующей. Очевидно, что наиболее благоприятным результатом будет являться отсутствие или минимизация технологических пауз для обеспечения задач проектирования последующих движений. Такие паузы не только снижают общую производительность ТП, но и существенно увеличивают затраты электроэнергии, потребляемой электроприводами КР, установленной оснасткой и вычислительными устройствами систем управления.

Среди задач планирования движений КР в автоматическом режиме от интерпретации задания оператора до планирования динамики переменных состояния взаимосвязанных электро-

приводов [272, 332] важнейшей является задача интерполяции траекторий движения КР, свободных от коллизий. Значимость задачи интерполяции обусловлена одновременным влиянием результатов ее решения на ключевые факторы эффективности процесса: затраченное время на расчет, время исполнения движения, энергоэффективность движения. Другими словами, инструментарий выбора актуального при данных условиях алгоритма интерполяции является необходимым модулем системы автоматического планирования и оптимизации движений КР в совместном с человеком пространстве.

В разделе рассматриваются ТО сверления в совместном пространстве с человеком. В качестве изделий определены экземпляры с поверхностями обработки, расположенными в одной или нескольких горизонтальных плоскостях либо в плоскостях, позиционированных с небольшим отклонением от горизонтальной плоскости (см. рис. 2.5). Этот вид операций широко распространен в производственных процессах изготовления малогабаритной каркасной продукции (например, элементов корпуса изделий, люков, элементов оснастки и др.), изготовления опытных образцов, ремонта и др. [203, 233, 235, 343]. Кроме того, полученные результаты могут быть без существенных модификаций использованы при проектировании алгоритмов АСУ любыми ТО, в которых для ВХ не установлены дополнительные требования к ограничению геометрии или динамики движений КР. Необходимо отметить, что при рассмотрении ТП сверления изделия, расположенного в горизонтальной плоскости, одной из тактических задач является удержание позы КР в некоторых пределах от эталонной как при выполнении ТПд, так и при выполнении ВП. Успешное решение этой задачи ведет к ряду положительных эффектов, которые в зависимости от конкретики ТП могут серьезно влиять на производительность, безопасность и эффективность процесса.

При выполнении ТО оператор использует БЗ предустановленных РКП (как было предложено ранее) либо определяет одну или несколько поз КР, которые являются эталонными при принятии решения ИСУ в случае необходимости перепланирования предустановленных траекторий движения, например, при возникновении коллизий либо при задании новых точек сверления в оперативном режиме (рис. 4.13).

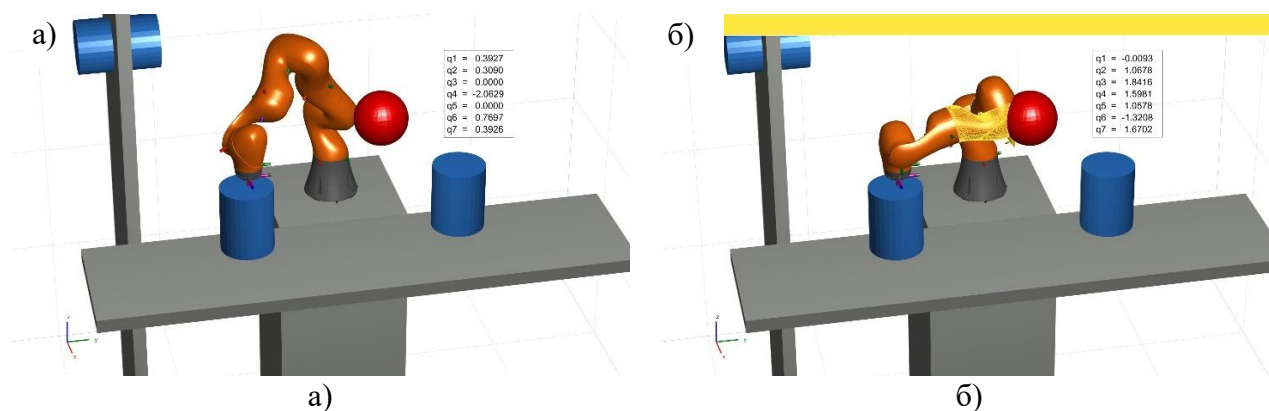


Рисунок 4.13 – Примеры поз КР при обработке деталей: а – эталонная поза; б – произвольная поза (КР в коллизии с объектом)

Очевидные преимущества эталонной позы:

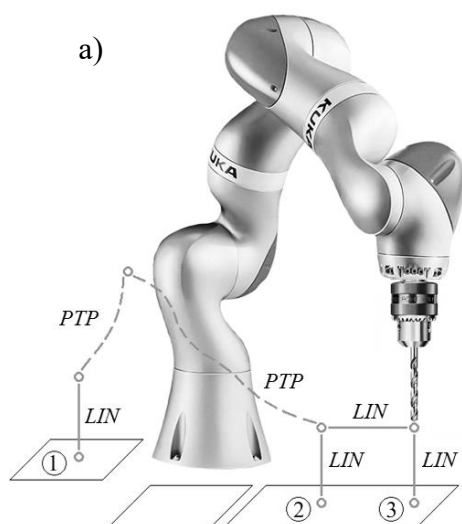
- вспомогательный переход к точке сверления реализуется сверху вниз, что при стандартной организации совместного рабочего пространства КР и человека сводит к минимуму вероятность возникновения коллизий (наиболее распространёнными для представленного ТП являются коллизии с руками человека, которые, как правило, подводятся из нижней зоны рабочей области КР, что определяется физиологией человека);
- частичное ограничение подвижности осей (в частности, второй и четвертой) в некоторых пределах делают траектории перемещения между точками сверления более предсказуемыми;
- полное ограничение движения осей (например, третьей или пятой) позволяет устранить избыточность движения при перемещении между точками сверления.

Грамотное планирование движений, в том числе с учетом удержания поз КР в некоторых пределах от эталонных, может заметно повысить количество выполняемых ТО в единицу времени, сократить энергетические затраты (за счет исключения избыточных движений), а также снизить вероятность возникновения коллизий, что, во первых, напрямую повысит степень безопасности, производительности и энергоэффективности, а во вторых, снизит нагрузку на вычислительные системы, обслуживающие задачи перепланирования траекторий по положительному прогнозу столкновений. В тоже время планирование траекторий с учетом удержания поз КР в некоторых пределах от эталонных, несмотря на сокращение степеней свободы КР, не ведет к упрощению поиска требуемых конфигураций для перемещения ЦТИ в точку назначения с определенной ориентацией, а напротив, дополнительно требует затрат вычислительных ресурсов. Это связано с тем, что сокращение подвижности КР достигается за счет «программной блокировки» отдельных шарниров, а это создает необходимость решать ОЗК в условиях ограничений (стабилизируя положение «программно заблокированных» шарниров).

В общем случае порядок организации исполнения ТО выглядит следующим образом. Оператор задает следующий ТПд для операции сверления в виде функционального набора, согласно схемам (рис. 4.14 и 4.15):

$$\{StartPoint, SDIS, DP, RDIS, DirV\},$$

где *StartPoint* – координаты точки начала сверления в ОП (в КРТП определяются автоматически с помощью системы распознавания, после указания оператором конкретной точки маркером, лазером или иным способом); *SDIS* – расстояние от точки *StartPoint* до нижней точки отверстия определяет точку начала РХ, задается каждый раз оператором либо устанавливается по умолчанию; *DP* – глубина сверления; *RDIS* – расстояние от точки завершения сверления до плоскости перпендикулярной направляющему вектору сверления *DirV*, определяет точку начала отвода инструмента и отключения режима РХ.



б)

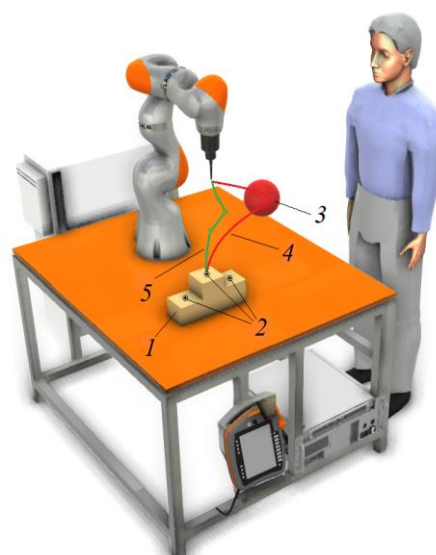


Рисунок 4.14 – Пример типовых траекторных перемещений в КРТП сверления вертикальных отверстий: 1 – деталь; 2 – набор точек сверления; 3 – объект коллизии; 4 – траектория с коллизией; 5 – траектория, свободная от коллизии

Далее должен быть спланирован ВХ из точки, в которой КР находится в текущий момент, до точки *SDISPoint* (*SDIS*). Поскольку для такого хода устанавливать ограничения технологических режимов (кроме режимов работы, определяемых характеристиками оборудования) нецелесообразно, то именно он содержит существенный потенциал по оптимизации.

В разделе представлены результаты исследования эффективности группы методов интерполяции движений КР по критериям минимизации времени исполнения движения, максимизации энергоэффективности и минимизации времени расчета движения (в отдельности) без ухудшения иных интегральных показателей качества КРТП [8, 1].

Среди исследований выделяется работа [222], в которой авторы за счет формирования плавной траектории перемещения ЦТИ ПР обеспечивают минимальные значения углов поворота осей, времени или энергии для достижения целей ТП. В исследовании [332] продемонстрирован метод построения непрерывных траекторий КР для формирования трехмерной модели кабины самолета. Для обеих работ характерно использование интерполяционных полиномов с целью получения гладких траекторий, отвечающих выбранным критериям.

В задачах оптимизации движения КР, функционирующих совместно с человеком в единой технологической среде, чаще всего ученые рассматривают следующие показатели эффективности оптимизационных решений:

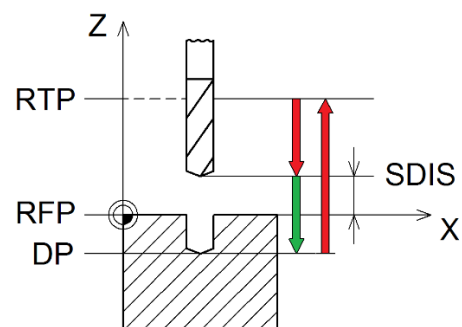


Рисунок 4.15 – Обозначения положений ЦТИ для операций сверления (*RTR* – плоскость отвода; *RFP* – базовая плоскость)

- время исполнения движения (t_{End});
- энергетическую эффективность движения (E_{Ef});
- время расчета движения / комплекса движений (t_{Calc}).

При этом соответствующие критерии эффективности могут быть представлены в следующем виде:

$$t_{End} \rightarrow \min; E_{Ef} \rightarrow \max; t_{Calc} \rightarrow \min. \quad (4.15)$$

Сверление осуществляется по пошаговому указанию координат точек сверления оператором, присутствующим в совместной рабочей зоне (необходимость совместной работы может быть обусловлена, например, выполнением ремонтных работ в оперативном режиме, изготовлением опытного образца изделия, изготовлением штучной оснастки, подгонкой деталей по месту, рассверливанием отверстий и др.).

Цикл сверления согласно [309] в ТПД включает РХ – прямолинейное перемещение по направляющему вектору и ВХ – позиционирование инструмента из текущей точки в точку назначения (начало РХ) с заданной ориентацией инструмента (см. рис. 2.5 и 4.14). Движение, определяющее РХ, частично поддается оптимизации в пределах технологических ограничений режима сверления, отдельные аспекты оптимизации рассматриваются в [4]. Движение, определяющее ВХ, как правило, свободно от ограничений режимов, поскольку в цикле сверления реализуется переход в следующую зону сверления. При отсутствии коллизий наиболее целесообразным является реализация ВХ движением в режиме позиционного управления *Point-to-Point (PTP)* [120] в КП в синхронном режиме. Если же прогноз коллизий по данной траектории положительный, то осуществляется разрешение коллизий, например, алгоритмом *Rapidly-Exploring Random Tree (RRT)* [369], алгоритмом *Covariant Hamiltonian Optimization for Motion Planning (CHOMP)* [222], гибридным алгоритмом на основе конфигураций редуцированного КП или другими, в этом случае генерируется ломаная траектория, которая должна быть интерполирована и сглажена. Выбор алгоритма интерполяции при разрешении коллизии может существенно повлиять на интегральные показатели качества движения: скорость исполнения, энергопотребление и время расчета. Как следствие, задача выбора наиболее целесообразного метода интерполяции при разрешении коллизий представляет особый научный интерес.

Для повышения быстродействия алгоритмов разрешения коллизий использовалась БЗ РКП, найденная альтернативная траектория движения интерполировалась выбранным методом. При этом стоит учитывать, что для достижения отдельных критериев оптимизации целесообразно формирование гладких траекторий перемещения, сопровождающихся минимальными значениями ускорений [215, 281, 316]. В связи с этим использование таких алгоритмов интерполяции, как метод ближайшего соседа и линейная интерполяция, не является целесообразным и не рассматривается в предлагаемом исследовании.

Анализ эффективности методов интерполяции траекторий движений по разрешению коллизий проводился для вариантов алгоритмов (см. табл. 4.1), полученные движения сравнивались с оригинальным движением, синтезированным по шаблону РТР (трапецеидальный профиль скорости – *trap(original)*). Экспериментальные исследования проведены на базе разработанной имитационной модели КР в среде *MATLAB* [24] (см. гл. 3).

Исследования реализованы согласно следующему алгоритму:

- 1) поиск опорных точек для обхода препятствия роботом из БЗ РКП;
- 2) интерполяция траектории движения по опорным точкам выбранным алгоритмом;
- 3) обеспечение требуемой динамики движения по заданной траектории (задача обеспечения максимального быстродействия № 1 (см. гл. 2));
- 4) расчет и анализ параметров движения;
- 5) составление рейтинга алгоритмов интерполяции по заданному критерию эффективности.

Следует отметить, что вариант, заключающийся в последовательной проверке результатов интерполяции рассматриваемыми алгоритмами и выборе наиболее целесообразного алгоритма, в режиме оперативного управления невозможен ввиду технологических ограничений в виде отсутствия технологических пауз либо их минимизации. В таком случае автоматизированная система управления при планировании интерполированной траектории обхода должна обладать определенными предустановками, для сокращения временных затрат на расчет.

Данные численных экспериментов обработаны в соответствии с методологией математической статистики. Использованы показатели медианного значения (*Me*) и интерквартильного размаха, представляющего собой порядковую статистику, численно равную разности между первым (*Q1*) и третьим (*Q3*) квартилями распределения или 25-м и 75-м процентилями, т.е. половину выборки, центрированной относительно медианы. Моделирование и обработка результатов экспериментов произведена на компьютерном оборудовании со следующими характеристиками: процессор *11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 @ 2.40GHz 2.42 GHz*; оперативная память *GDDR 16,0 ГБ*; тип операционной системы 64-разрядная.

Для получения статистических данных, позволяющих сделать выводы по эффективности исследуемых методов интерполяции внутри рабочей зоны робота, отведенной под выполнение ТО сверления, были произвольно заданы 100 перемещений, имитирующих ВХ ТПд цикла сверления. Для каждого перемещения была сформирована траектория типа *РТР*, динамика движения была определена на основе критерия минимизации времени исполнения с учетом ограничений значений линейных и угловых переменных состояния КР. Имитация объекта коллизии была выполнена объемной фигурой – сферой, объект позиционировался в средней части траектории перемещения КР. Алгоритмом *basePoints* (гл. 5) был сформирован обход (путь в ОП) объекта коллизии на базе предустановленных опорных точек в декартовой системе координат. На

следующем шаге были спланированы движения обхода препятствия с применением последовательно алгоритмов интерполяции от одного до девяти (см. табл. 4.1) с динамикой, определенной на основе критерия минимизации времени исполнения.

В качестве примера визуализация рабочей зоны КР при формировании оригинальной траектории и траектории, свободной от коллизий, алгоритмом *cubicSmooth/makima* (вариант алгоритма 5) представлена на рис. 4.16. Для каждого движения был произведен расчет значений параметров движения, в соответствии со структурой данных (табл. 4.2 и 4.3) для переменной угла положения (q_{path}), энергии, потребленной двигателем каждого шарнира (E_{ngy}), общей потребленной энергией (E_{total}), времени исполнения движения (t_{end}), времени расчета движения (t_{calc}) и удельного энергопотребления (SpecificEnergy, Дж/рад); представлены максимальные значения за весь цикл движения для переменных производных угла ($\dot{q}, \ddot{q}$), моментов (T , обозначения представлены в гл. 3), тока (I_a) и мощности (P_{wr}).

Performance indicators for original trajectory (tE):
TotalEnergy= 1235.6234 ; TotalTime= 1.18 ; SpecificEnergy= 774.4377

Performance indicators for interpolation method: cubicSmooth/makima
TotalEnergy= 950.9485 ; TotalTime= 3.58 ; SpecificEnergy= 299.2738

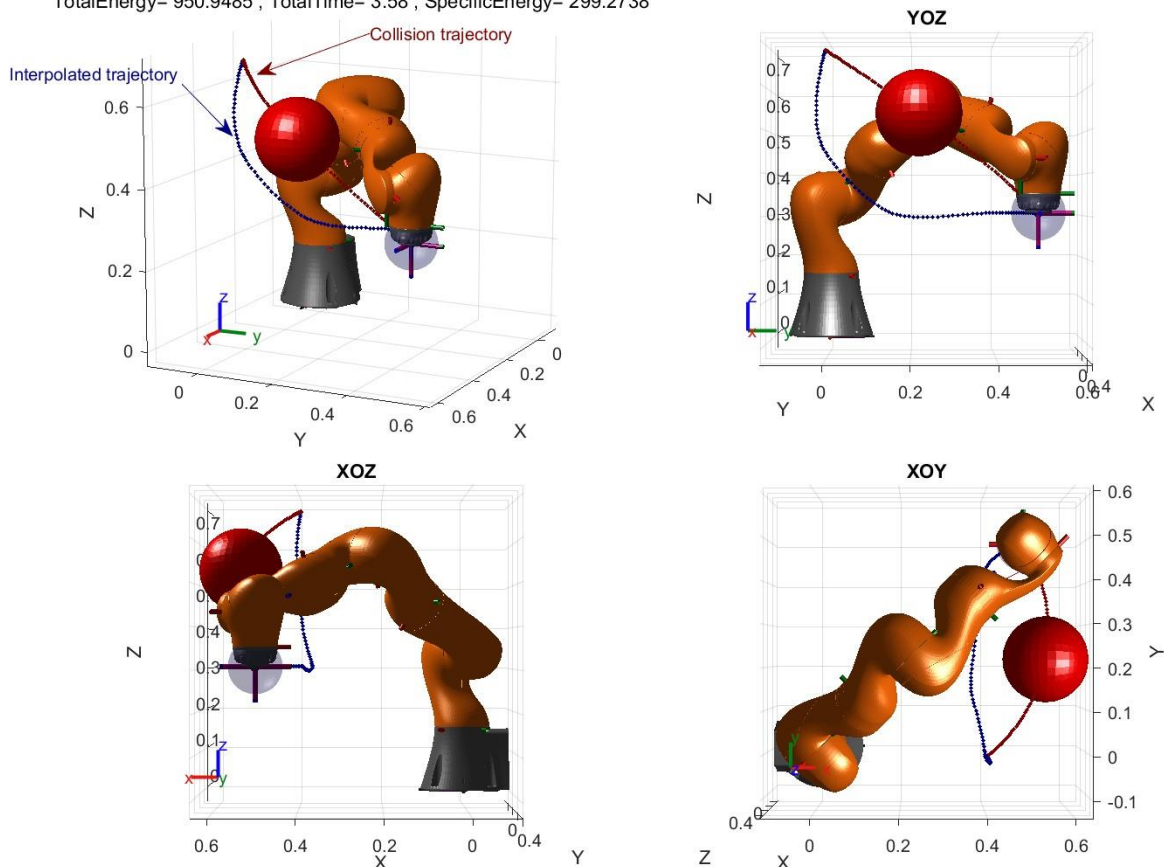


Рисунок 4.16 – Визуализация рабочей зоны КР при формировании движения, свободного от коллизий алгоритмом *cubicSmooth/makima* (вариант алгоритма 5 см. табл. 4.1): Collision trajectory – траектория с коллизией; Interpolated trajectory – интерполированная траектория; TotalEnergy – потребленная электроэнергия, Дж; SpecificEnergy – удельные энергозатраты, Дж/рад

Таблица 4.2 – Параметры движения шарниров КР (оригинальная траектория)

Номер шарнира	q_{path}	$\dot{q}$	$\ddot{q}$	T_j	T_{fr}	T_{mech}	T_{dyn}	T_s	T_R	I_a	P_{wr}	E_{ngy}
1.	0,79	1,00	2,54	11,31	0,58	0,23	13,67	0,00	14,43	7,22	747,99	296,01
2.	0,93	1,18	3,01	87,95	0,67	1,76	16,20	76,07	17,86	8,93	991,58	411,88
3.	0,00	0,00	0,00	6,59	0,19	0,13	0,00	1,46	0,31	0,16	0,01	5,85
4.	0,39	0,49	1,24	31,71	0,32	0,63	6,70	29,84	7,53	3,77	191,91	80,42
5.	0,00	0,00	0,00	2,48	0,19	0,05	0,00	1,83	0,17	0,08	0,00	5,84
6.	0,55	0,69	1,76	0,62	0,43	0,01	9,50	0,00	9,92	4,96	357,20	144,10
7.	0,79	1,00	2,54	0,00	0,58	0,00	13,67	0,00	14,25	7,12	738,02	291,52
General Indicators												
E_{total}			1235,62									
t_{end}			1,18									
t_{calc}			0,34									

Таблица 4.3 – Параметры движения шарниров КР (вариант алгоритма cubicSmooth/makima)

Номер шарнира	q_{path}	$\dot{q}$	$\ddot{q}$	T_j	T_{fr}	T_{mech}	T_{dyn}	T_s	T_R	I_a	P_{wr}	E_{ngy}
1.	0,97	0,67	1,57	2,18	0,41	0,04	8,47	0,00	8,76	4,38	171,48	136,63
2.	0,93	0,43	1,18	77,65	0,30	1,55	6,37	76,07	7,73	3,87	69,30	71,68
3.	0,00	0,00	0,00	2,42	0,19	0,05	0,00	1,46	0,22	0,11	0,01	0,01
4.	1,80	0,78	2,24	29,42	0,47	0,59	12,07	29,84	11,84	5,92	200,66	345,21
5.	0,00	0,00	0,00	1,75	0,19	0,04	0,00	1,83	0,16	0,08	0,00	0,01
6.	1,44	0,78	3,00	0,16	0,47	0,00	16,16	0,04	16,03	8,01	254,50	261,46
7.	0,97	0,67	1,57	0,00	0,41	0,00	8,47	0,00	8,73	4,36	170,70	135,94
General Indicators												
E_{total}			950,95									
t_{end}			3,58									
t_{calc}			0,68									

В прил. Л представлена визуализация динамики интегральных переменных и переменных состояния КР по линеаризованной модели (см. гл. 3) при реализации оригинального движения и движения по разрешению коллизии вариантом алгоритма *cubicSmooth/makima* в разрезе 7-ми шарниров КР ($J1 - J7$). Упрощенная модель позволяет выполнять расчет и оптимизацию движения по разрешению коллизии в максимально сжатое время. На рис. 4.17 – 4.22 представлена визуализация динамики интегральных переменных и переменных состояния нелинейной модели КР (см. гл. 3) при реализации оригинального движения и движения по разрешению коллизии вариантом алгоритма *cubicSmooth/makima* для 1-го, 2-го и 4-го шарниров КР ($J1$, $J2$ и $J4$). Реализован метод программного управления, в качестве объекта управления выступает нелинейная модель, а сигнал задания сформирован на основе линеаризованной модели. Полученные графики зависимостей демонстрируют наличие динамической ошибки угла положения, ошибка находится в пределах допусков.

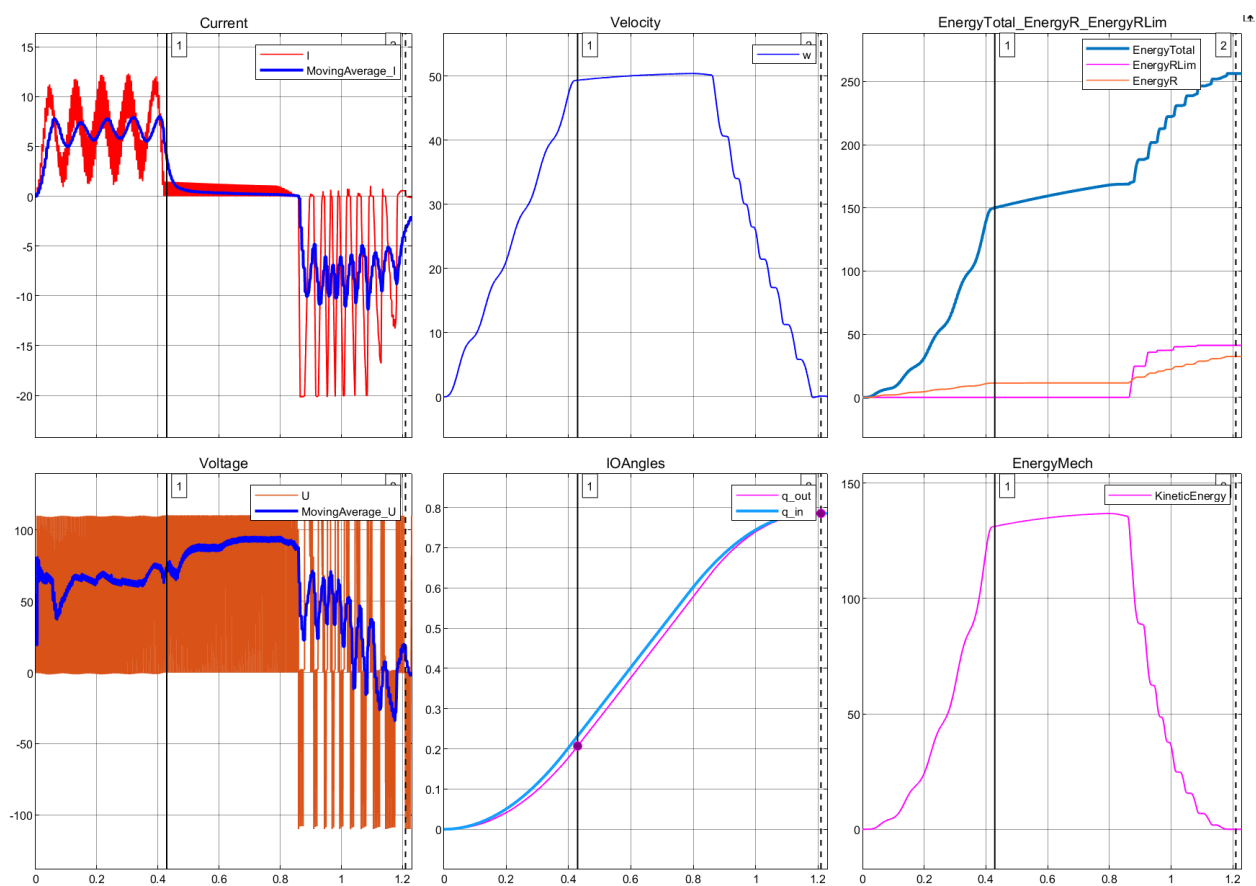


Рисунок 4.17 – Визуализация переменных нелинейной модели КР при реализации оригинального движения для первого шарнира

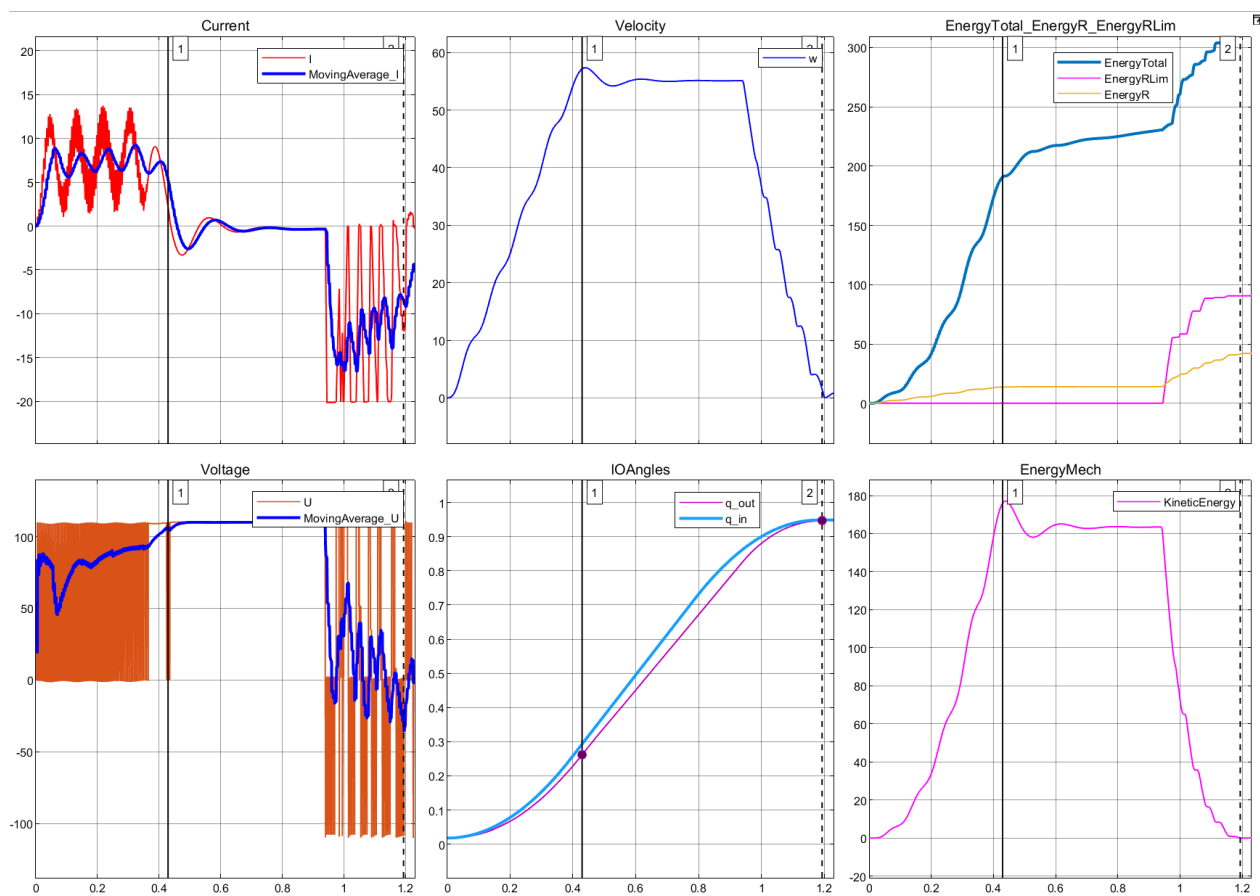


Рисунок 4.18 – Визуализация переменных нелинейной модели КР при реализации оригинального движения для второго шарнира

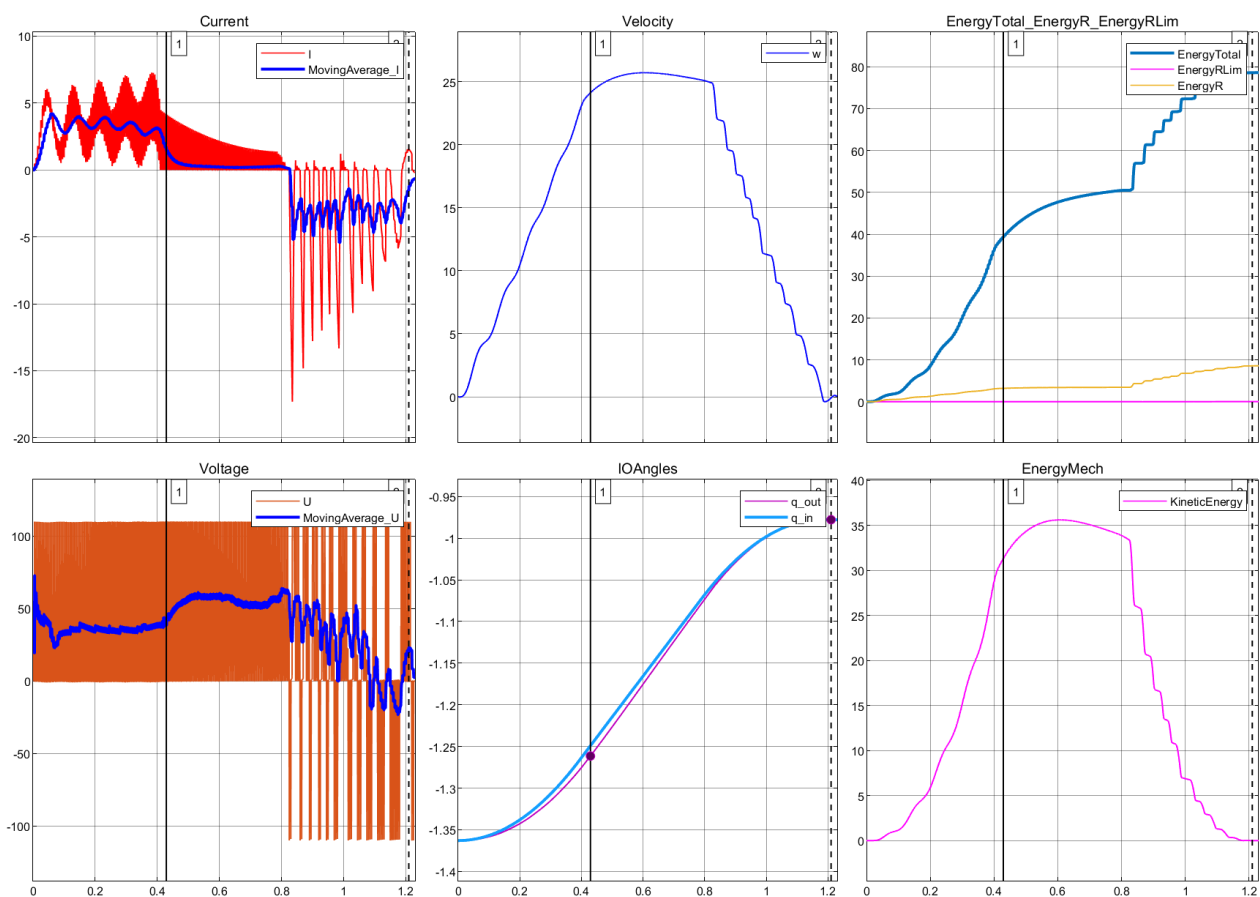


Рисунок 4.19 – Визуализация переменных нелинейной модели КР при реализации оригинального движения для четвертого шарнира

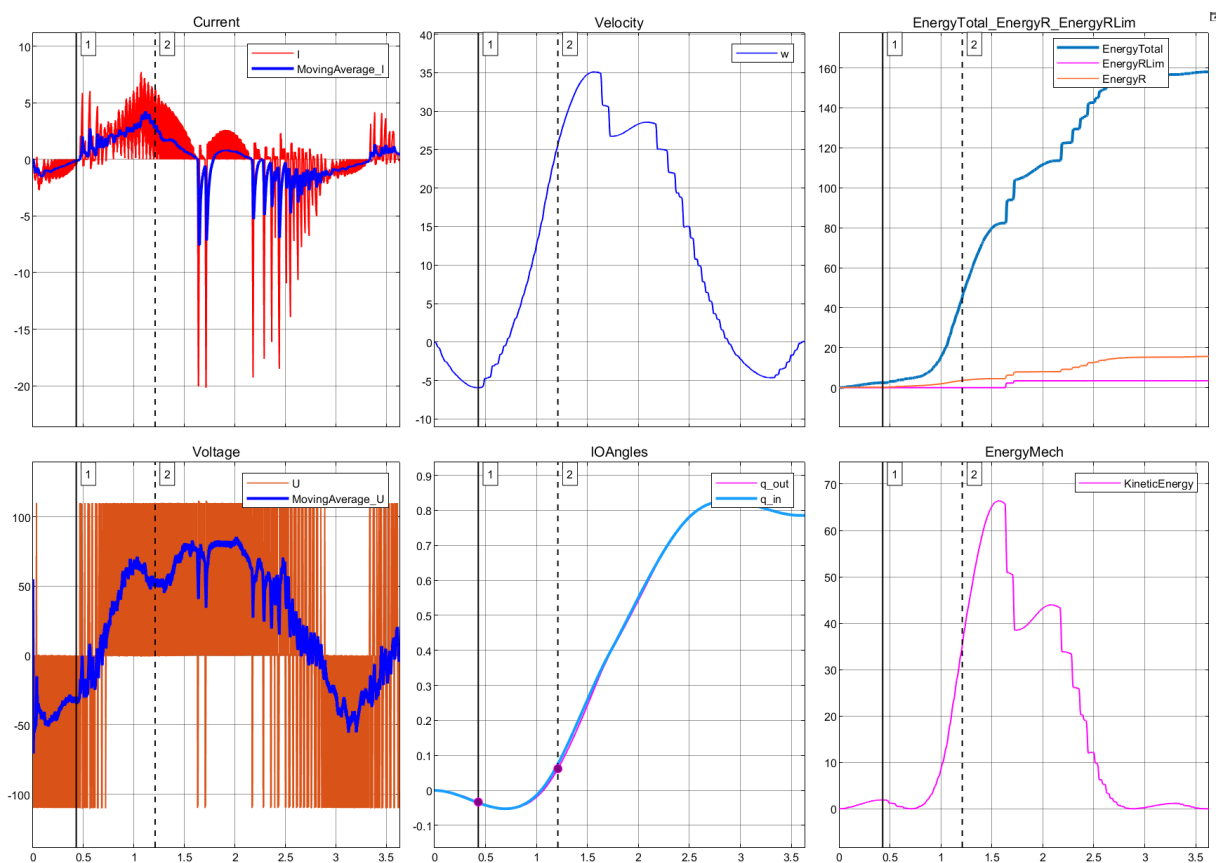


Рисунок 4.20 – Визуализация переменных нелинейной модели КР при реализации движения по разрешению коллизии вариантом алгоритма cubicSmooth/makima для первого шарнира

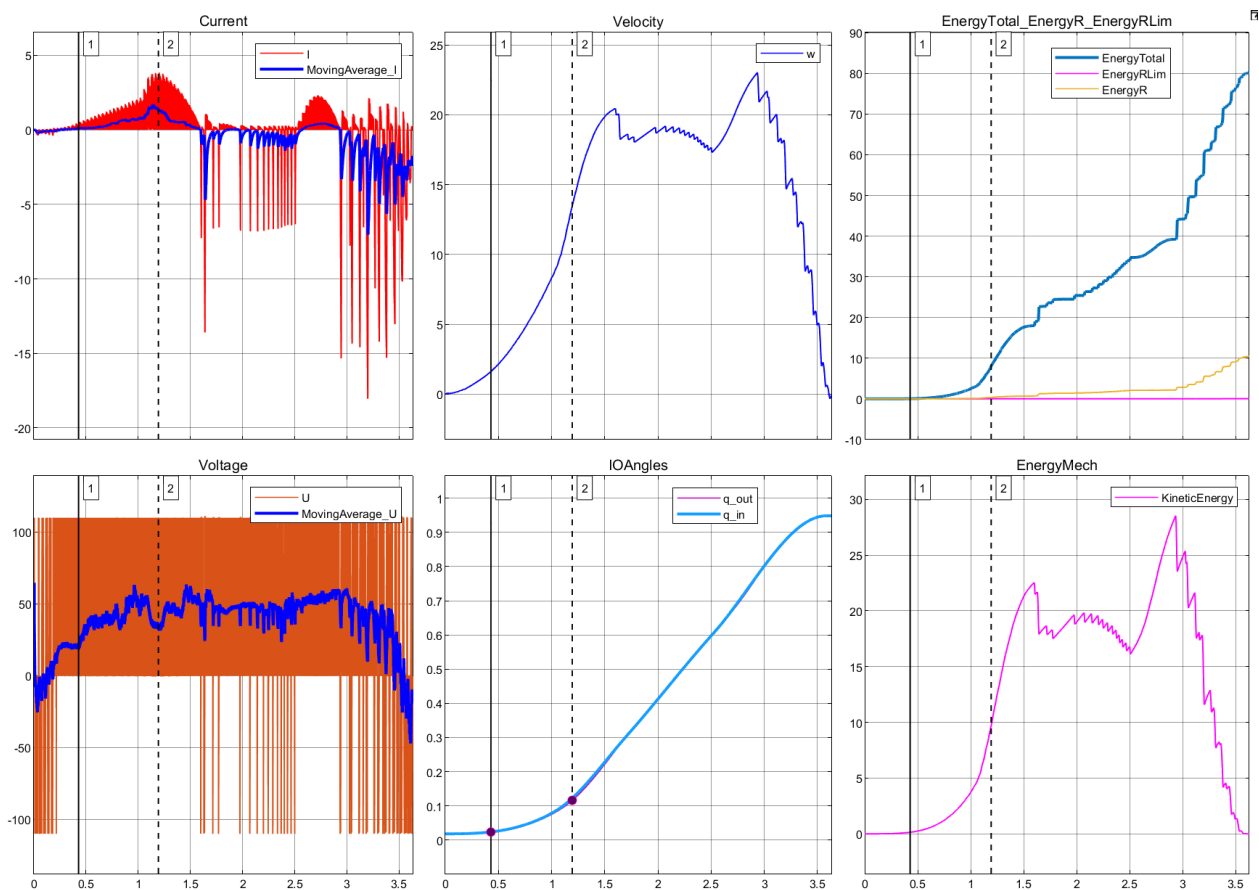


Рисунок 4.21 – Визуализация переменных нелинейной модели КР при реализации движения по разрешению коллизии вариантом алгоритма cubicSmooth/makima для второго шарнира

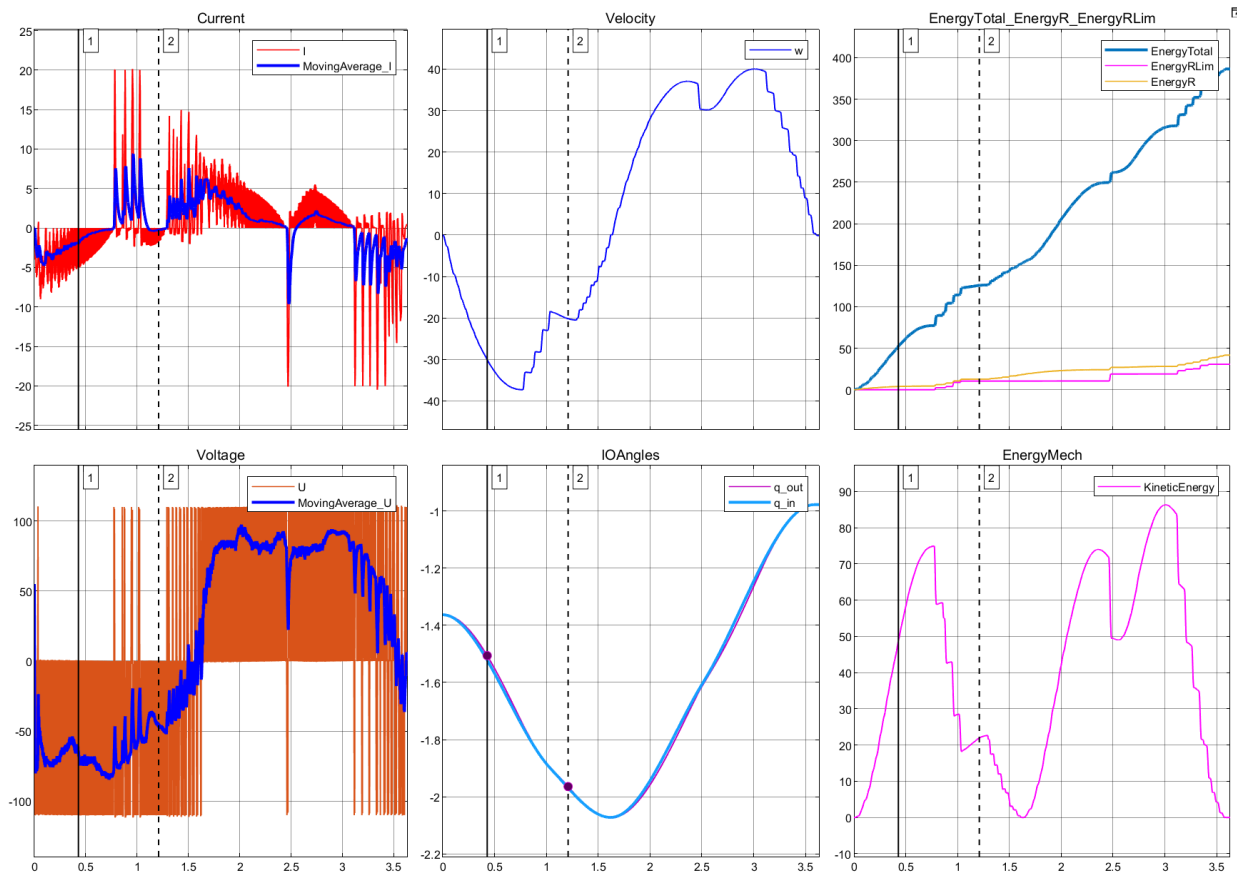


Рисунок 4.22 – Визуализация переменных нелинейной модели КР при реализации движения по разрешению коллизии вариантом алгоритма cubicSmooth/makima для четвертого шарнира

Представленные шаги были повторены для всех 100 движений, полученные данные были обработаны в соответствии с методами математической статистики и представлены на рис. 4.23. В результате проведенного эксперимента на имитационной модели (демонстрирующего существенные различия результатов интерполяции) были получены данные, позволяющие предложить некоторые рекомендации для выбора алгоритма интерполяции траекторных перемещений КР, связанных с необходимостью разрешения коллизий. На рис. 4.23 и в табл. 4.4 – 4.7 отражены значения статистических показателей по обновленным траекториям перемещения, полученные 9-ю вариантами алгоритмов интерполяции (*trap*, *cubic*, *quintic*, *cubicSpline*, *cubicMakima*, *cubicPchip*, *quinticSpline*, *quinticMakima*, *quinticPchip*) в сравнении с первоначальной траекторией (*trap(original)*), позиция 10 (рис. 4.23)). А также представлены характеристики для рассматриваемых переменных ТО:

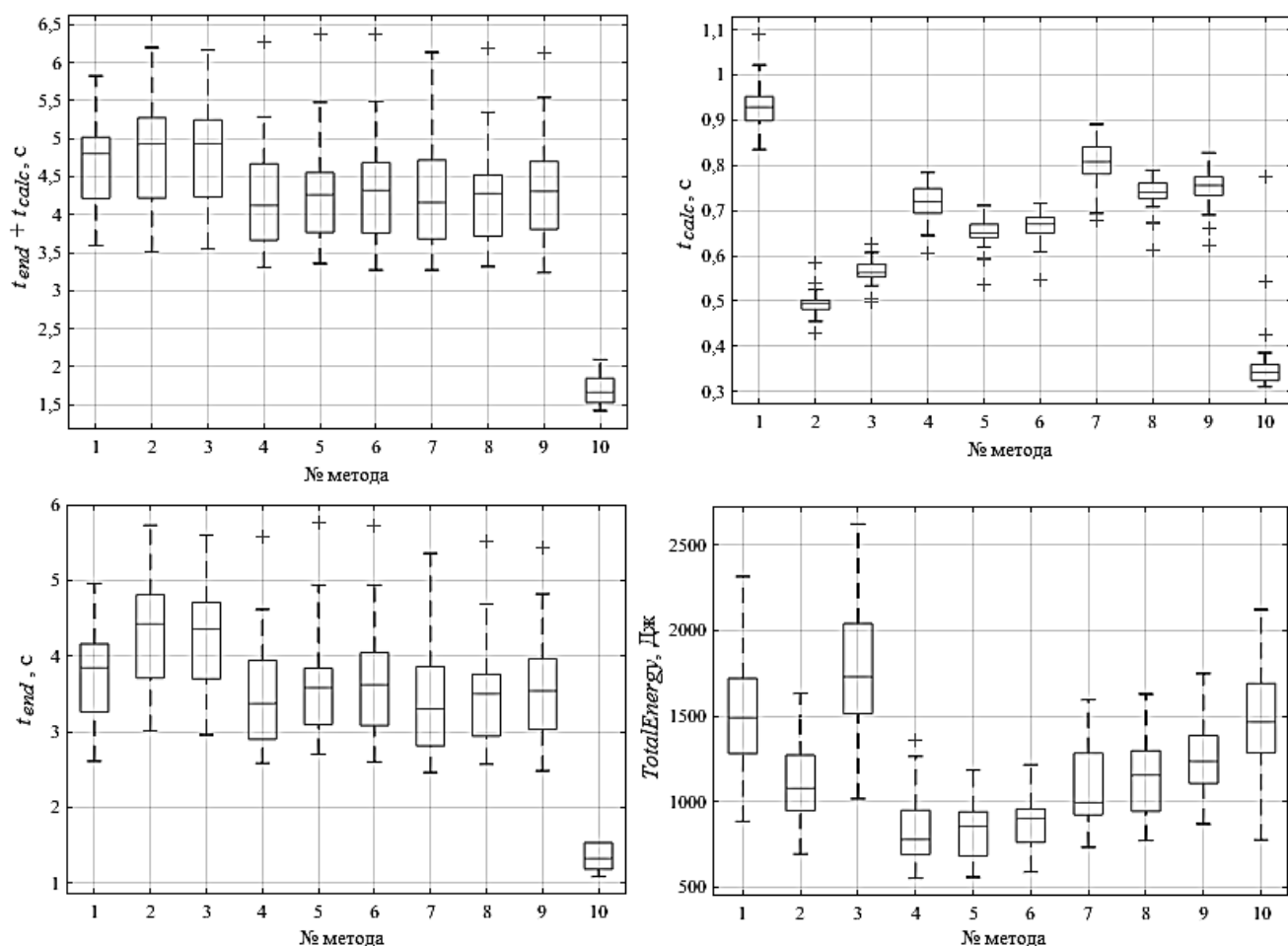


Рисунок 4.23 – Временные и энергетические характеристики движений КР по обновленным траекториям перемещения в разрезе физических и статистических показателей

- времени, требуемого для пересчета новой траектории перемещения (t_{Calc}), в секундах (данное время зависит от мощностей вычислительного устройства);
- времени, затрачиваемого исполнительным механизмом (КР) для реализации нового перемещения (t_{End}), в секундах;

- общего времени, требуемого для расчета и реализации нового перемещения ($t_{All} (t_{Calc} + t_{End})$), в секундах;
- энергии, требуемой для реализации нового перемещения (E_{ip}), Дж.

Таблица 4.4 – Статистические показатели для переменной t_{End}

№	Method's name	Statistical indicators					
		min	max	Me	[Q3, Q1]	IQR	Outlier number
1.	<i>trap</i>	2,61	4,96	3,845	[3.26;4.16]	0,9	1
2.	<i>cubic</i>	3,01	5,73	4,425	[3.71;4.81]	1,1	3
3.	<i>quintic</i>	2,96	5,6	4,355	[3.7;4.71]	1,01	3
4.	<i>cubicSpline</i>	2,58	5,59	3,37	[2.9;3.94]	1,04	1
5.	<i>cubicMakima</i>	2,7	5,77	3,58	[3.09;3.84]	0,75	3
6.	<i>cubicPchip</i>	2,6	5,73	3,62	[3.08;4.05]	0,97	1
7.	<i>quinticSpline</i>	2,46	5,36	3,3	[2.81;3.86]	1,05	1
8.	<i>quinticMakima</i>	2,57	5,52	3,5	[2.94;3.76]	0,82	3
9.	<i>quinticPchip</i>	2,48	5,44	3,54	[3.03;3.96]	0,93	2
10.	<i>trap(original)</i>	1,08	1,53	1,32	[1.18;1.53]	0,35	3

Таблица 4.5 – Статистические показатели для переменной t_{Calc}

№	Method's name	Statistical indicators					
		min	max	Me	[Q3, Q1]	IQR	Outlier number
1.	<i>trap</i>	0,84	1,09	0,93	[0.899;0.952]	0,05	1,00
2.	<i>cubic</i>	0,43	0,58	0,49	[0.481;0.502]	0,02	3,00
3.	<i>quintic</i>	0,50	0,63	0,56	[0.553;0.581]	0,03	3,00
4.	<i>cubicSpline</i>	0,61	0,78	0,72	[0.694;0.749]	0,05	1,00
5.	<i>cubicMakima</i>	0,54	0,71	0,65	[0.64;0.67]	0,03	3,00
6.	<i>cubicPchip</i>	0,55	0,72	0,67	[0.65;0.684]	0,03	1,00
7.	<i>quinticSpline</i>	0,68	0,89	0,81	[0.781;0.841]	0,06	1,00
8.	<i>quinticMakima</i>	0,61	0,79	0,74	[0.727;0.761]	0,03	3,00
9.	<i>quinticPchip</i>	0,62	0,83	0,76	[0.734;0.775]	0,04	2,00
10.	<i>trap(original)</i>	0,31	0,77	0,34	[0.324;0.36]	0,04	3,00

Таблица 4.6 – Статистические показатели для переменной $t_{All} (t_{Calc} + t_{End})$

№	Method's name	Statistical indicators					
		min	max	Me	[Q3, Q1]	IQR	Outlier number
1.	<i>Trap</i>	3,59	5,82	4,80	[4.21;5.02]	0,81	1,00
2.	<i>Cubic</i>	3,51	6,20	4,93	[4.22;5.27]	1,05	3,00
3.	<i>Quintic</i>	3,55	6,16	4,93	[4.23;5.24]	1,01	3,00
4.	<i>cubicSpline</i>	3,31	6,27	4,12	[3.66;4.67]	1,01	1,00
5.	<i>cubicMakima</i>	3,36	6,36	4,26	[3.77;4.55]	0,78	3,00
6.	<i>cubicPchip</i>	3,27	6,38	4,32	[3.75;4.68]	0,93	1,00
7.	<i>quinticSpline</i>	3,27	6,13	4,16	[3.68;4.72]	1,04	1,00
8.	<i>quinticMakima</i>	3,32	6,19	4,28	[3.72;4.52]	0,80	3,00
9.	<i>quinticPchip</i>	3,24	6,13	4,31	[3.81;4.7]	0,89	2,00
10.	<i>trap(original)</i>	1,42	2,09	1,66	[1.53;1.85]	0,32	3,00

Таблица 4.7 – Статистические показатели для переменной E_{ip}

№	Method's name	Statistical indicators					
		min	max	Me	[Q3, Q1]	IQR	Outlier number
1.	<i>trap</i>	884,74	2314,62	1488,10	[1.28e+03;1.72e+03]	438,28	0,00
2.	<i>cubic</i>	693,55	1630,83	1077,40	[946;1.27e+03]	326,05	0,00
3.	<i>quintic</i>	1017,17	2620,81	1728,35	[1.51e+03;2.04e+03]	526,79	0,00
4.	<i>cubicSpline</i>	552,79	1357,57	779,19	[690;949]	259,04	1,00
5.	<i>cubicMakima</i>	558,49	1183,56	854,99	[684;940]	256,34	0,00
6.	<i>cubicPchip</i>	589,71	1214,41	900,43	[762;958]	195,56	0,00
7.	<i>quinticSpline</i>	733,40	1595,09	993,14	[922;1.28e+03]	361,16	0,00
8.	<i>quinticMakima</i>	772,31	1627,71	1155,07	[944;1.3e+03]	353,37	0,00
9.	<i>quinticPchip</i>	869,19	1747,27	1234,73	[1.11e+03;1.39e+03]	279,38	0,00
10.	<i>trap(original)</i>	775,95	2121,76	1464,66	[1.28e+03;1.69e+03]	404,88	0,00

Результаты анализа данных эксперимента на имитационной модели позволяют выработать рекомендации по выбору конкретного алгоритма интерполяции при необходимости перепланирования траектории при положительном прогнозе возникновения коллизии. Необходимо отметить, что и оригинальная траектория, и перепланированные рассчитывались исходя из минимизации времени исполнения движения.

Минимизация времени исполнения. Анализ результатов эксперимента, приведенных в табл. 4.4 позволяет резюмировать, что минимальное время перемещения КР демонстрирует вариант алгоритма *quinticSpline* ($Me=3,3$), далее идет вариант алгоритма *cubicSpline* ($Me=3,37$) и *quinticMakima* ($Me=3,5$). При этом вариант алгоритма *quinticMakima* ($Me=3,5$) дает более стабильный результат $IQR = 0.82$ (*quinticMakima*), против $IQR = 1,04$ (*cubicSpline*) и $IQR = 1,05$ (*quinticSpline*), хотя и может сопровождаться выбросами.

Минимизация времени расчета нового движения. Анализ результатов эксперимента (см. табл. 4.5) позволяет резюмировать, что минимальное время расчета новой траектории затрачивается для варианта алгоритма *cubic* ($Me=0,49$), далее идет вариант алгоритма *quintic* ($Me=0,56$) и *cubicMakima* ($Me=0,65$). При этом для варианта алгоритма *cubicPchip* ($Me=0,67$) требуется большее время расчета, но выборка характеризуется минимальным количеством выбросов.

Необходимо отметить, что первые три варианта алгоритмов ввиду отсутствия процедур сглаживания частей траектории выполняют планирование движения с остановками КР в промежуточных точках, что негативным образом сказывается на энергопотреблении комплекса и приводит к потерям времени на исполнение движения. Эти варианты алгоритмов интерполяции могут использоваться в тех случаях, когда критически важно сократить время нахождения КР в стационарном состоянии в момент времени установки положительного прогноза коллизии. В качестве примера можно выделить нахождение инструмента КР в зоне воздействия больших температур или кислотной среды, либо, наоборот, нахождение разогретого инструмента КР

возле конструктивных элементов, не защищенных от воздействия температур, и т.п. В этом случае целесообразно в максимально сжатые сроки начать отвод ЦТИ КР из опасной позиции.

Минимизация общего времени (времени расчета и исполнения). Анализ результатов эксперимента (см. табл. 4.6) позволяет резюмировать, что минимальное общее время расчета и исполнения траекторного перемещения фиксируется для варианта алгоритма *cubicSpline* ($Me=4,12$), далее идет вариант алгоритма *quinticSpline* ($Me=4,16$) и *quinticMakima* ($Me=4,26$). При этом вариант алгоритма *quinticMakima* ($Me=4,26$) дает более стабильный результат $IQR = 0.78$ (*quinticMakima*), против $IQR = 1,01$ (*cubicSpline*) и $IQR = 1,04$ (*quinticSpline*), хотя и может сопровождаться выбросами. Данный вариант особенно актуален, когда производительность остается первостепенным критерием эффективности и текущая траектория оказалась с положительным прогнозом коллизии, т.е. КР остановлен в текущей точке в ожидании новой траектории.

Минимизация энергопотребления КР. Анализ результатов эксперимента (см. табл. 4.7) позволяет резюмировать, что минимальное энергопотребление электроприводами робота характерно для семейства траекторий, спланированных вариантами алгоритмов *cubicSpline* ($Me=779,19$), *cubicMakima* ($Me=854,99$) и *cubicPchip* ($Me=900,43$). При этом вариант алгоритма *cubicPchip* показал наилучшую стабильность – минимальный интерквартильный размах и отсутствие выбросов. Графическая интерпретация результатов анализа приведена на рис. 4.24, демонстрирующем рекомендации по выбору конкретного варианта алгоритма интерполяции при планировании нового движения КР в рамках конкретного РКП.

Таким образом, наличие БЗ, осуществляющих выбор актуального варианта алгоритма интерполяции, может обеспечить значительный технико-экономический эффект (табл. 4.8) в соответствии с установленным критерием эффективности. Продемонстрирован потенциал эффективности между лучшим результатом и замыкающим в тройке лучших, а также между лучшим и худшим результатом для четырех критериев эффективности. Так, по энергопотреблению потенциал экономии за одну операцию разрешения коллизий может достигать 48 %, по времени исполнения движения до 25 %, по общему времени (включая расчет новой траектории) до 16 %.

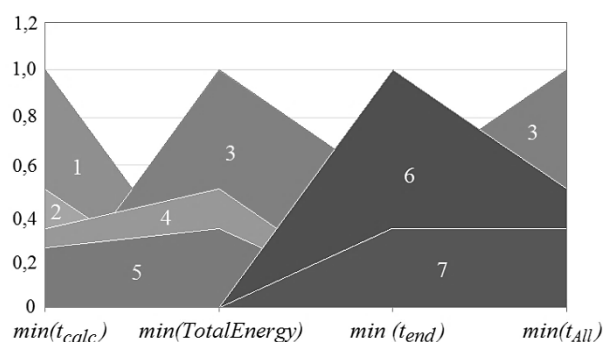


Рисунок 4.24 – Диаграмма оценки целесообразности использования варианта алгоритма в зависимости от установленного критерия эффективности (по оси ординат отмечен уровень приоритета выбора варианта алгоритма):
 1 – cubic; 2 – quantic; 3 – cubicSpline;
 4 – cubicMakima; 5 – cubicPchip;
 6 – quinticSpline; 7 – quinticMakima

Важно отметить также, что наряду с априорным увеличением времени исполнения перепланированного движения (в частности согласно данным табл. 4.4 – 25,4 %) энергопотребление

при этом может быть снижено (в частности, на 54,9 %, согласно данным табл. 4.7). Этот факт может быть использован при перепланировании движения в оптимизационных методах за счет создания функции ценности.

Таблица 4.8 – Потенциал эффективности при выборе метода интерполяции

№	Критерий	Лучший результат (Me_{min})	Замыкающий из трех лучших результатов ($Me_{max(1:3)}$)	Худший результат (Me_{max})	Потенциал эффективности $1 - \frac{Me_{min}}{Me_{max(1:3)}}$	Потенциал эффективности $1 - \frac{Me_{min}}{Me_{max}}$
1.	$\min(tEnd)$	3,30	3,50	4,42	0,06	0,25
2.	$\min(tCalc)$	0,49	0,65	0,93	0,25	0,47
3.	$\min(tAll)$	4,12	4,26	4,93	0,03	0,16
4.	$\min(TotalEnergy)$	779,19	900,43	1488,10	0,13	0,48

Представленная диаграмма (рис. 4.24) наглядно отражает приоритетность выбора варианта алгоритма интерполяции траектории движения в зависимости от выбранного критерия. Вариант алгоритма *quinticPchip* на диаграмме не приведен, поскольку продемонстрировал наихудшие результаты по выбранным критериям эффективности в данном конкретном РКП. Стоит также отметить, что по представленной диаграмме возможен выбор варианта алгоритма интерполяции в случае многокритериальной оптимизации по взвешенной системе критериев. Так, при использовании метода *cubicSpline* возможно достижение сразу двух важнейших критериев – минимального энергопотребления и минимального общего времени.

Для уточнения полученных результатов был проведен модернизированный эксперимент относительно всего КРТК, включающего, помимо СУЭП КР, дополнительные потребители энергии, такие как, оснащающее технологическое оборудование и вспомогательное оборудование КР (систему управления робота, систему охлаждения, систему оповещения, мониторинга и т.д.).

На рис. 4.25 представлены диаграммы, визуализирующие результаты имитационного моделирования для комплекса движений (состоящего из 42 экземпляров), сгенерированных с целью разрешения коллизии, прогнозируемой на предустановленной траектории шаблона РТР ВХ сверления. На гистограммах (рис. 4.25, а – в) представлены средние значения переменных $tEnd$, $tCalc$ и $TotalEnergy$ в разрезе девяти вариантов алгоритмов интерполяции (варианты алгоритмов 1 – 9), а также медианное значение для исходных движений (вариант 10). На рис. 4.25, г в пространстве $\{tEnd, tCalc, TotalEnergy\}$ представлены состояния для каждой пары «траектория-вариант алгоритма». На рис. 4.25, г четко прослеживается наличие кластеров, образованных за счет использования определенного варианта алгоритма интерполяции, центры кластеров, представленные как средние значения по выборке, обозначены в виде закрашенных окружностей.

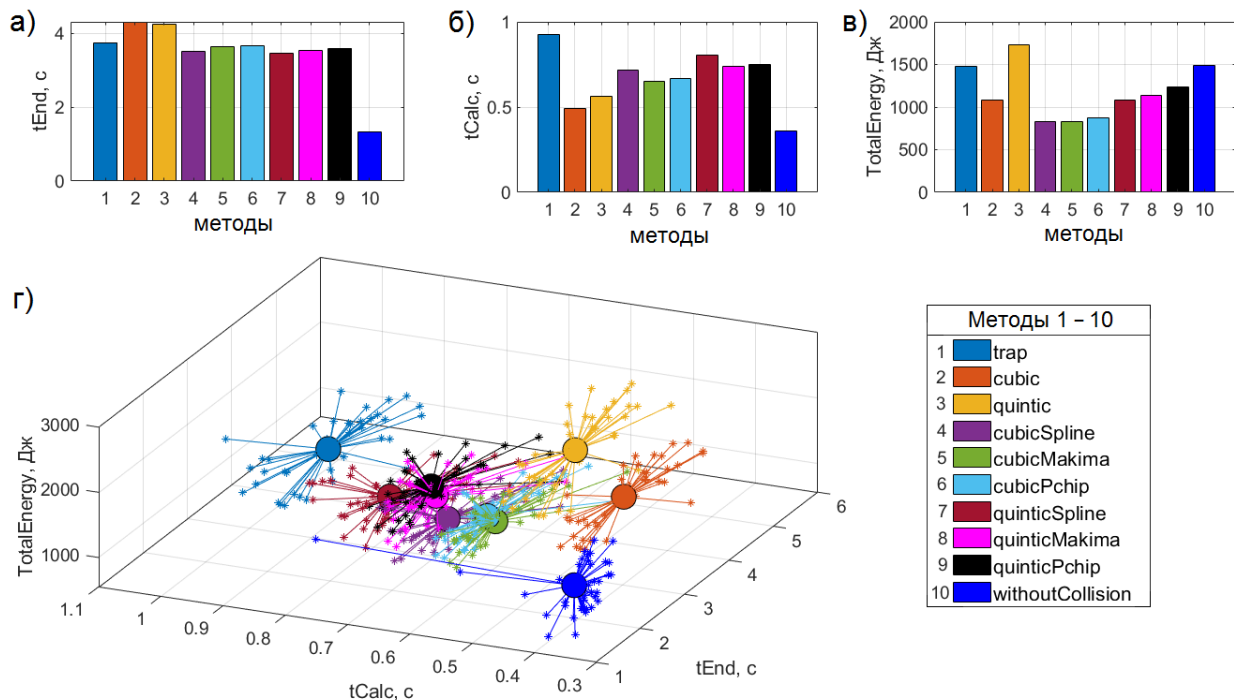


Рисунок 4.25 – Результаты моделирования для движений КР по заданным траекториям, созданных с целью обхода коллизии, прогнозируемой на предустановленной траектории

На рис. 4.26 в виде «тепловой» карты продемонстрирована зависимость значений энергопотребления КРТК от установленной мощности оснастки, задействованной в КРТП, в разрезе каждого из варианта алгоритма интерполяции траекторного перемещения:

$$TE_{ij} = Me_i(TotalEnergy) + Me_i(t_{Calc}) \cdot Pwr_{robot} + (Me_i(t_{End}) + Me_i(t_{Calc})) \cdot Peq_j,$$

где Me_i – математическое ожидание значения соответствующей переменной; Pwr_{robot} – мощность систем управления электрическим приводом КР (мощность, необходимая для работы контроллера и тормозных систем) принималась постоянной и при построении «тепловой» карты была определена равной 50 Вт; Peq_j – мощность оснастки ($Peq_{1-10} = \{50, 100 \dots 500\}$ в Вт).

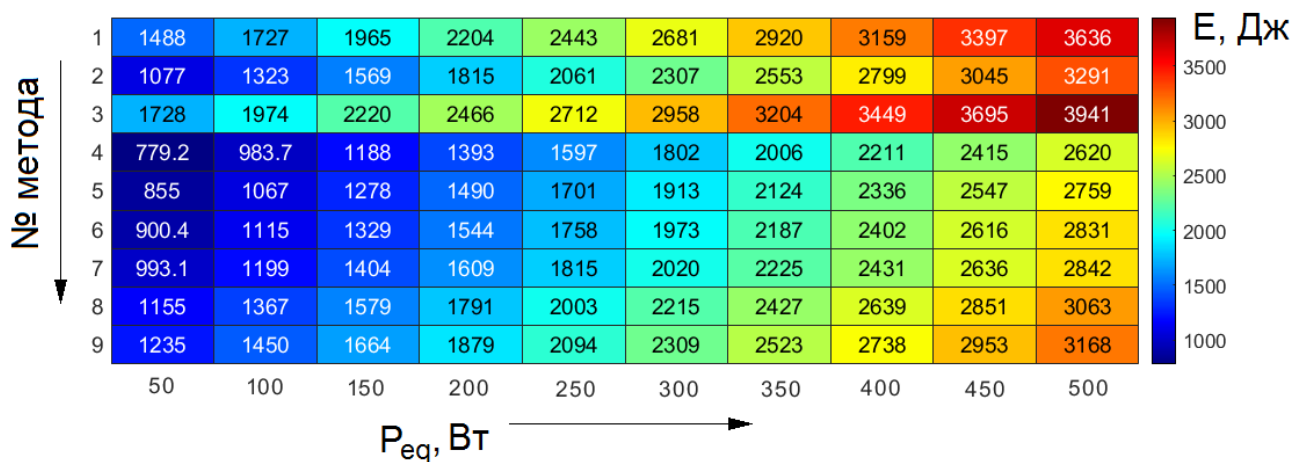


Рисунок 4.26 – Тепловая карта значений энергопотребления (TotalEnergy) КРТК в разрезе «вариант алгоритма – мощность потребителя» в режиме ожидания

Для получения математических выводов, позволяющих сформировать рекомендации по выбору варианта алгоритма интерполяции приводятся результаты сортировки статистических данных. Цель сортировки – выявить рейтинг целесообразности выбора варианта алгоритма интерполяции по критериям минимизации времени исполнения полученной траектории ($t_{End} \rightarrow min$), минимизации времени расчета ($t_{Calc} \rightarrow min$) и минимизации затрачиваемой на перемещение энергии ($TotalEnergy \rightarrow min$). Пример для переменной t_{End} :

Листинг 4.6

```
tEndTableRang=zeros(n,m);
for i=1:n
    [rowSorted,l]=sort(tEndTableRed(i,1:m));
    tEndTableRang(i,l)=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10];
end
```

Для полученных матриц $tEndTableRang$, $tCalcTableRang$, $TotalEnergyTableRang$ размерностью $[n \times m]$, где n – количество результатов измерений (равно количеству новых сгенерированных траекторий обхода); m – количество исследуемых вариантов алгоритмов (*trap*, *cubic*, *quintic*, *cubicSpline*, *cubicMakima*, *cubicPchip*, *quinticSpline*, *quinticMakima*, *quinticPchip*, (*trap(original)*)), были рассчитаны математические ожидания места в рейтинге приоритетности выбора, среднее квадратичное отклонение, а также доверительные интервалы:

$$M = \sum_{i=1}^n x_i \cdot p_i; \quad (4.16)$$

$$DX = \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot p_i - (\sum_{i=1}^n x_i \cdot p_i)^2; \quad (4.17)$$

$$\sigma = \sqrt{DX}; \quad (4.18)$$

$$P\left(\bar{X} - z_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + z_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha; \quad (4.19)$$

где M – математическое ожидание; DX – среднее квадратичное отклонение; σ – стандартное отклонение; α – уровень значимости; X – в общем виде дискретная случайная величина (в текущем расчете: t_{End} , t_{Calc} и $TotalEnergy$), принимающая значения $x_1, x_2, \dots, x_n$, и вероятность принятия случайной величиной значения $i = \overline{1, n}$ равна $p(X = x_i) = p_i$.

Распределения случайной величины (позиции в рейтинге эффективности вариантов алгоритмов) представлены в табл. 4.9. – 4.11 в количественном выражении и на рис. 4.27 – 4.29 в виде графиков.

Таблица 4.9 – Статистические показатели для переменной t_{End}

№	Метод	Статистические показатели			
		M	Доверительный интервал (M)	σ	Доверительный интервал (σ)
1.	trap	6,71	[6.1 7.4]	2,10	[1.7 2.7]
2.	cubic	9,81	[9.7 10]	0,51	[0.42 0.64]
3.	quintic	8,98	[8.8 9.2]	0,56	[0.46 0.72]
4.	cubicSpline	4,43	[3.9 5]	1,81	[1.5 2.3]
5.	cubicMakima	5,86	[5.3 6.4]	1,70	[1.4 2.2]
6.	cubicPchip	6,19	[5.7 6.7]	1,50	[1.2 1.9]
7.	quinticSpline	3,24	[2.7 3.8]	1,71	[1.4 2.2]
8.	quinticMakima	4,05	[3.6 4.5]	1,32	[1.1 1.7]
9.	quinticPchip	4,74	[4.2 5.3]	1,73	[1.4 2.2]
10.	trap(original)	1,00	[1 1]	0,00	[0 0]

Таблица 4.10 – Статистические показатели для переменной t_{Calc}

№	Метод	Статистические показатели			
		M	Доверительный интервал (M)	σ	Доверительный интервал (σ)
1.	trap	10,00	[10 10]	0,00	[0 0]
2.	cubic	1,98	[1.9 2]	0,15	[0.13 0.2]
3.	quintic	2,98	[2.9 3]	0,15	[0.13 0.2]
4.	cubicSpline	6,29	[6.1 6.5]	0,64	[0.52 0.81]
5.	cubicMakima	4,17	[4 4.3]	0,44	[0.36 0.56]
6.	cubicPchip	4,79	[4.7 4.9]	0,42	[0.34 0.53]
7.	quinticSpline	9,00	[9 9]	0,00	[0 0]
8.	quinticMakima	7,05	[6.8 7.3]	0,66	[0.54 0.84]
9.	quinticPchip	7,64	[7.5 7.8]	0,58	[0.47 0.74]
10.	trap(original)	1,12	[0.88 1.4]	0,77	[0.63 0.98]

Таблица 4.11 – Статистические показатели для переменной $TotalEnergy$

№	Метод	Статистические показатели			
		M	Доверительный интервал (M)	σ	Доверительный интервал (σ)
1.	trap	8,29	[8.1 8.5]	0,74	[0.61 0.95]
2.	cubic	4,93	[4.4 5.4]	1,57	[1.3 2]
3.	quintic	9,76	[9.6 9.9]	0,43	[0.35 0.55]
4.	cubicSpline	1,83	[1.5 2.2]	1,17	[0.96 1.5]
5.	cubicMakima	1,93	[1.7 2.2]	0,81	[0.67 1]
6.	cubicPchip	2,79	[2.5 3.1]	0,95	[0.78 1.2]
7.	quinticSpline	4,95	[4.5 5.4]	1,40	[1.1 1.8]
8.	quinticMakima	5,69	[5.3 6.1]	1,20	[0.99 1.5]
9.	quinticPchip	6,81	[6.5 7.1]	1,06	[0.88 1.4]
10.	trap(original)	8,02	[7.4 8.6]	1,99	[1.6 2.5]

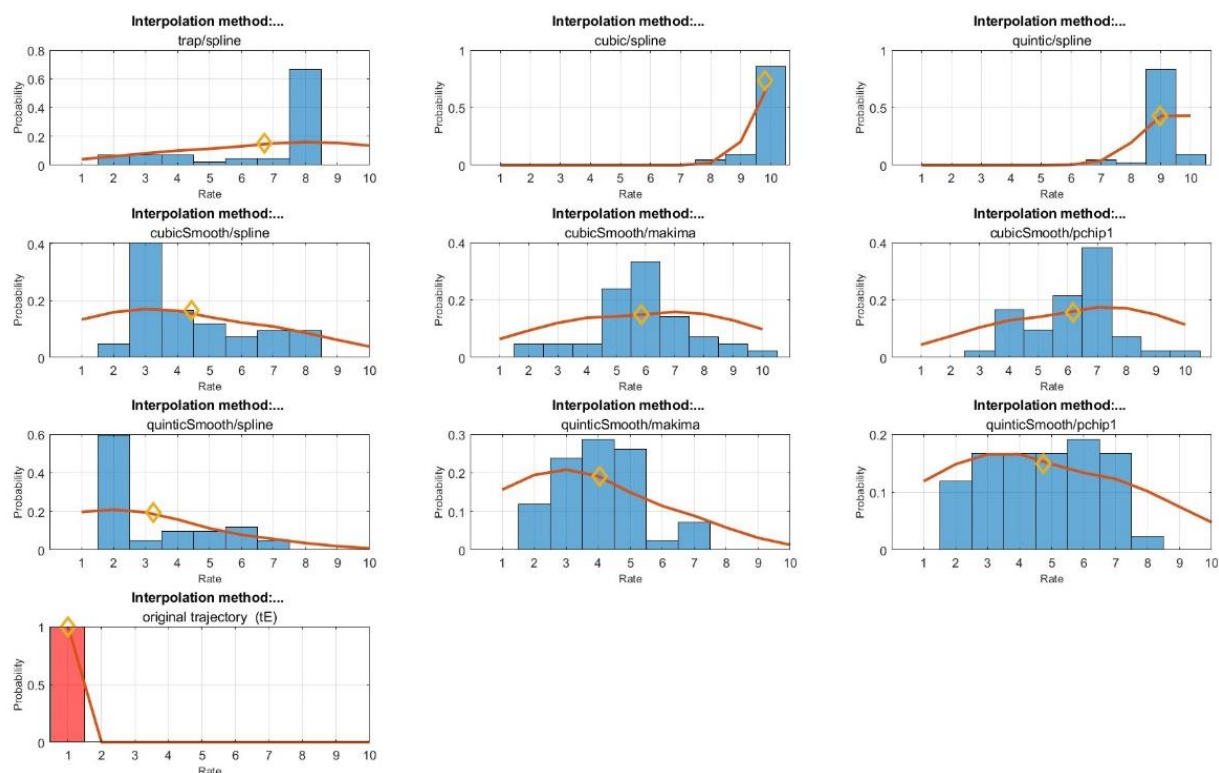


Рисунок 4.27 – Распределение вероятности рейтинга алгоритмов интерполяции по переменной t_{End} (ромбом отмечено математическое ожидание для соответствующего варианта алгоритма)

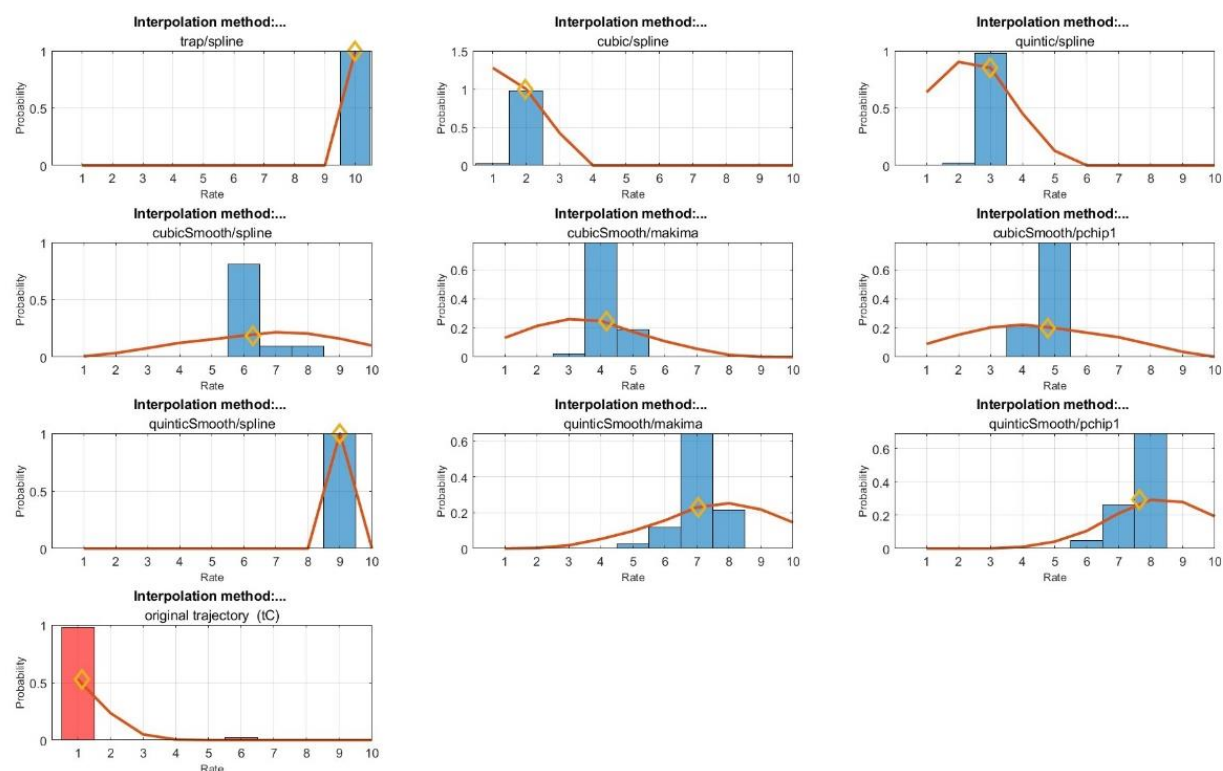


Рисунок 4.28 – Распределение вероятности рейтинга алгоритмов интерполяции по переменной t_{Calc} (ромбом отмечено математическое ожидание для соответствующего варианта алгоритма)

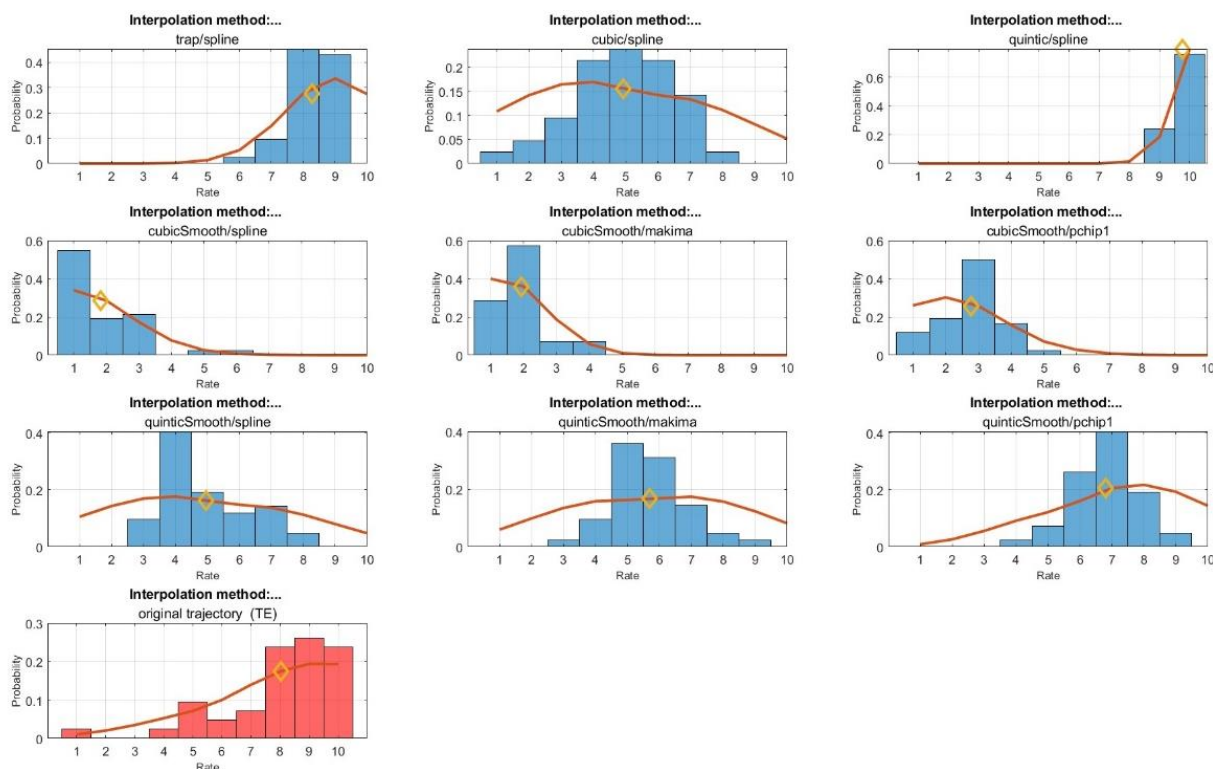


Рисунок 4.29 – Распределение вероятности рейтинга алгоритмов интерполяции по переменной *TotalEnergy* (ромбом отмечено математическое ожидание для соответствующего варианта алгоритма)

Результаты, представленные в виде графической интерпретации, демонстрируют превосходство одних вариантов алгоритмов над другими в зависимости от рассматриваемого критерия в конкретном РКП. Визуализация позволяет в более удобной и наглядной форме организовать интерфейс пользователя в системе поддержки принятия решения в задачах оптимизации параметров ТП, а также упрощает процедуру синтеза дискретных классификаторов, например, средствами нечёткой логики [175].

Рейтинг приоритетности вариантов алгоритмов интерполяции, полученный для каждого установленного критерия оптимизации и идентифицированного РКП, позволяет сформировать БЗ для ИСУ при выборе уставок для проведения оптимизационных процедур.

Выводы

1) Проведен сравнительный анализ алгоритмов интерполяции траекторий перемещения КР при осуществлении ВП и ВХ в КРТП сверления по трем интегральным показателям эффективности: 1) времени исполнения движения; 2) энергетической эффективности движения; 3) времени расчета движения. Результаты численных экспериментов на имитационной модели позволили сделать вывод о том, что не существует единого варианта алгоритма, обеспечивающего наилучшие характеристики по всем интегральным показателям, в частности:

– минимальное время исполнения движения характерно для варианта алгоритма *quinticSpline* ($Me=3,3$);

– минимальное время расчета движения достижимо при использовании варианта алгоритма *cubic* ($Me=0,49$);

– минимальное общее время расчета и исполнения движения фиксируется для варианта алгоритма *cubicSpline* ($Me=4,12$);

– минимальное энергопотребление КР характерно для семейства траекторий, спланированных вариантами алгоритмов: *cubicSpline* ($Me=779,19$), *cubicMakima* ($Me=854,99$) и *cubicPchip* ($Me=900,43$). При этом вариант алгоритма *cubicPchip* показал минимальный интерквартильный размах и отсутствие выбросов, что свидетельствует о высокой стабильности метода.

2) Рассчитан потенциал эффективности движения, реализующего ВП, связанный с обходом объекта коллизии:

- 48 % по энергопотреблению на перемещение;
- 25 % по времени исполнения движения;
- 16 % по общему времени (включая время реализации движения и время планирования).

По полученным данным численных экспериментов на модели для конкретного РКП построена диаграмма с областями (см. рис. 4.24), демонстрирующая приоритетность выбора варианта алгоритма интерполяции траекторного перемещения для достижения необходимого функционала. Так, для минимизации времени расчета (t_{Calc}) наиболее целесообразно использовать вариант алгоритма *cubic*, для минимизации времени исполнения траекторного перемещения (t_{End}) – *quinticSpline*, а при использовании варианта алгоритма *cubicSpline* могут быть достигнуты сразу два критерия – минимальное энергопотребление и минимальное суммарное время (t_{All}). Проведенные исследования и полученные на их основе выводы позволяют сформировать задел (БЗ) для последующей реализации управления в КРТП по выбранным критериям эффективности, что в свою очередь повысит производительность и сократит издержки на проведение роботизированных операций различной сложности.

4.5. Планирование и оптимизация движения коллаборативного робота в редуцированном конфигурационном пространстве в режиме позиционного управления без разрешения коллизий

В ТО КРТП с преобладанием ВП и ВХ в общем объеме частей ТО целесообразно использовать механизмы оптимизации движений, отличающиеся низкими требованиями к вычислительным ресурсам, что позволяет осуществлять перемещение ЦТИ в реальном времени с минимальными задержками на планирование траекторий и параметров перемещения. Целью раздела является разработка алгоритмов оптимизации движения КР по критериям производительности ТО и энергоэффективности при оперативном планировании ВП и ВХ. Предлагаемые решения опираются на БЗ РКП концепция построения и функциональность которых предложены ранее. При ра-

боте алгоритмов предполагается, что текущему классу ТО (в рамках которой выполняется ВП или ВХ) поставлено в соответствие РКП (Q^{red}). Тогда для каждой задачи перехода от постановки задачи движения в ОП в постановку задачи движения в КП имеются следующие уставки:

- эффективные начальные предположения конфигурации в точке назначения (Initial Guess) для решателя ОЗК в формате постановки нелинейной задачи оптимизации;
- опорные траектории перемещения в КП;
- параметры динамики движения (оптимизированные по критерию оптимальности) по организации перемещения вдоль опорной траектории;
- опорные конфигурации КР, которые могут быть использованы для выравнивания конфигурации КР в случае накопления ошибки состояния углов положения (приводящей к потере КР эффективной позы).

Каждому базовому пространственному расположению КР в ОП соответствует двумерный массив, содержащий конфигурации КР, отображающие каждое положение ЦТИ в опорной точке (*pose*), ОП и каждый случай пары $\alpha_{rot}, \alpha_{tilt}$ (формула 4.13). Пример визуализации опорных точек в ОП для ТО и соответствующих расположений КР в этих точках представлен на рис. 4.30.

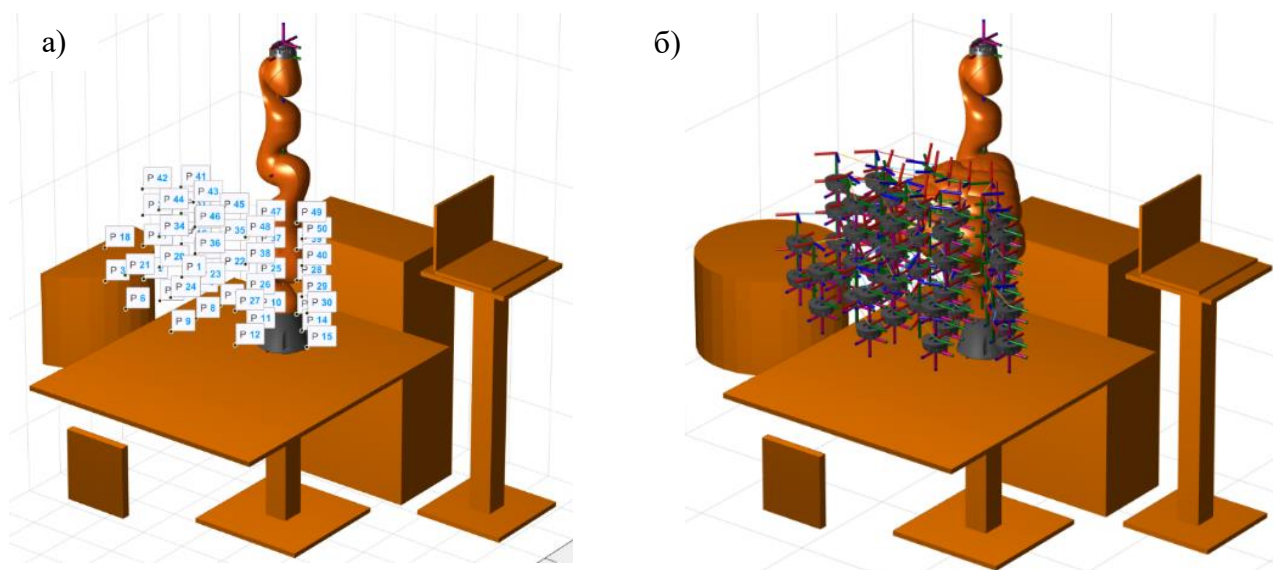


Рисунок 4.30 – Элементы визуализации отображения редуцированного КП в ОП: а – опорные точки положения ЦТИ в ОП; б – расположение ЦТИ КР в опорных точках ОП для стартовых углов наклона и поворота инструмента

Каждой паре элементов Q_i^{red} и Q_j^{red} , принадлежащих множеству Q^{red} , однозначно сопоставляется:

1) структура D :

$$\forall Q_i^{red}, Q_j^{red} \subset Q^{red}, \quad \exists (D, Q), \quad (4.20)$$

содержащая параметры оптимального (по установленному критерию) движения, полученного при решении ОЗД (для расчета ОЗД был разработан алгоритм (рис. 4.31 и 4.32) с учетом специфики рассматриваемого класса КРТП, алгоритм реализован программным обеспечением DE.m);

2) структура Q , содержащая параметры оптимального (по установленному критерию) движения, полученного при решении ОЗК и задачи интерполяции (формат структуры представлен в гл. 6, алгоритм поиска Q представлен на рис. 4.33 – 4.35, алгоритм реализован программным обеспечением IPID.m).

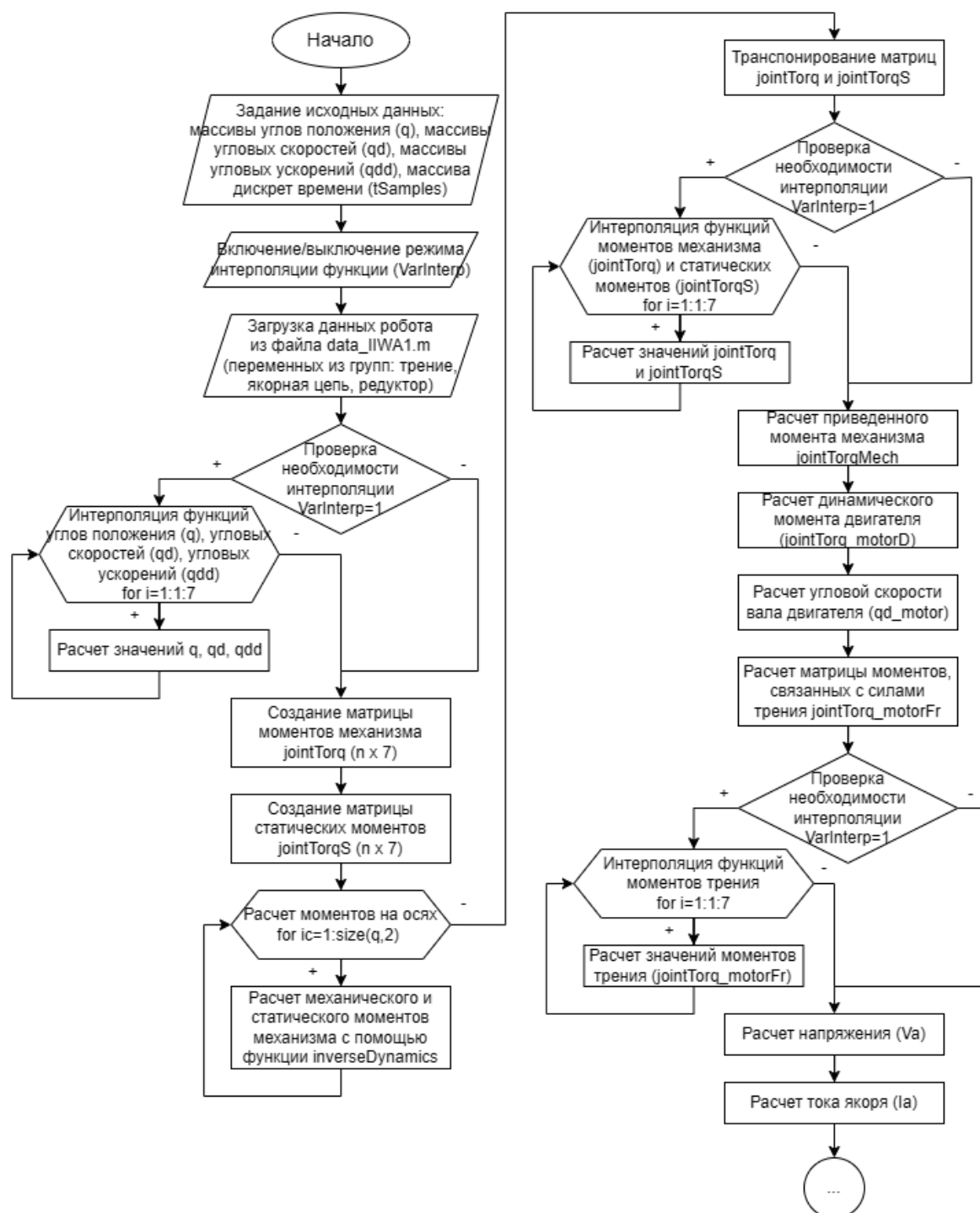


Рисунок 4.31 – Алгоритм работы функции DE (первая часть)

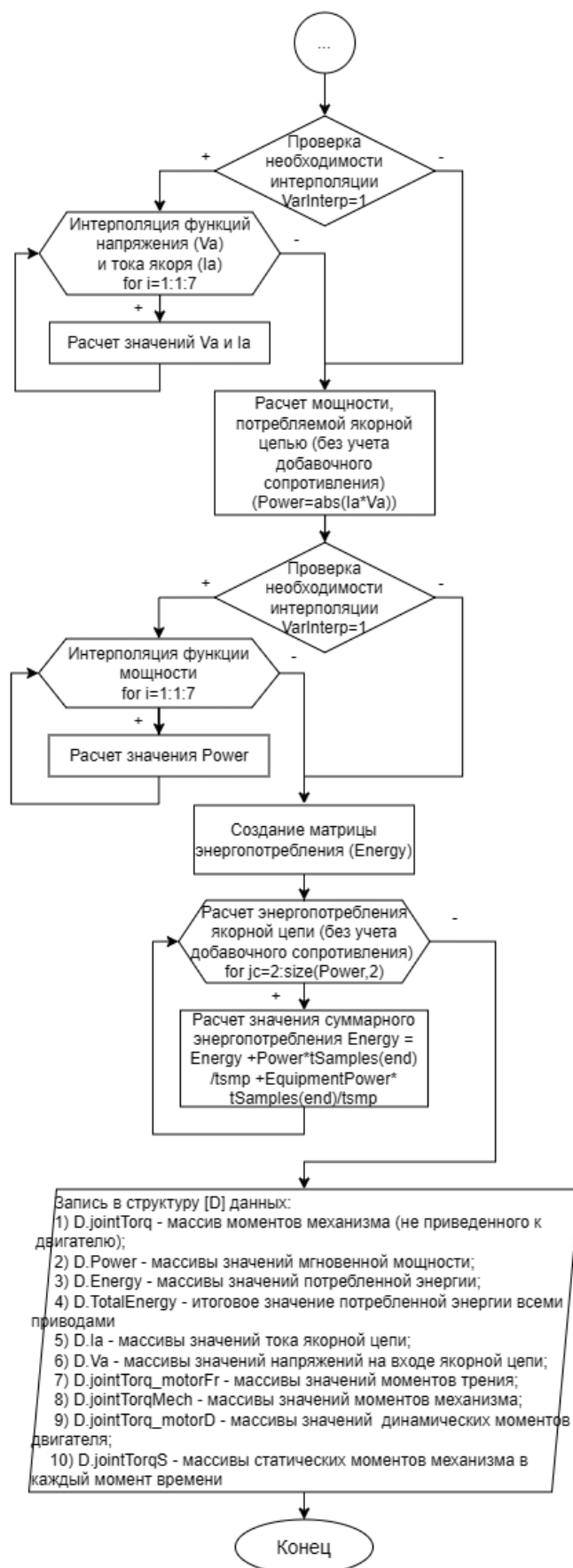


Рисунок 4.32 – Алгоритм работы функции DE (вторая часть)

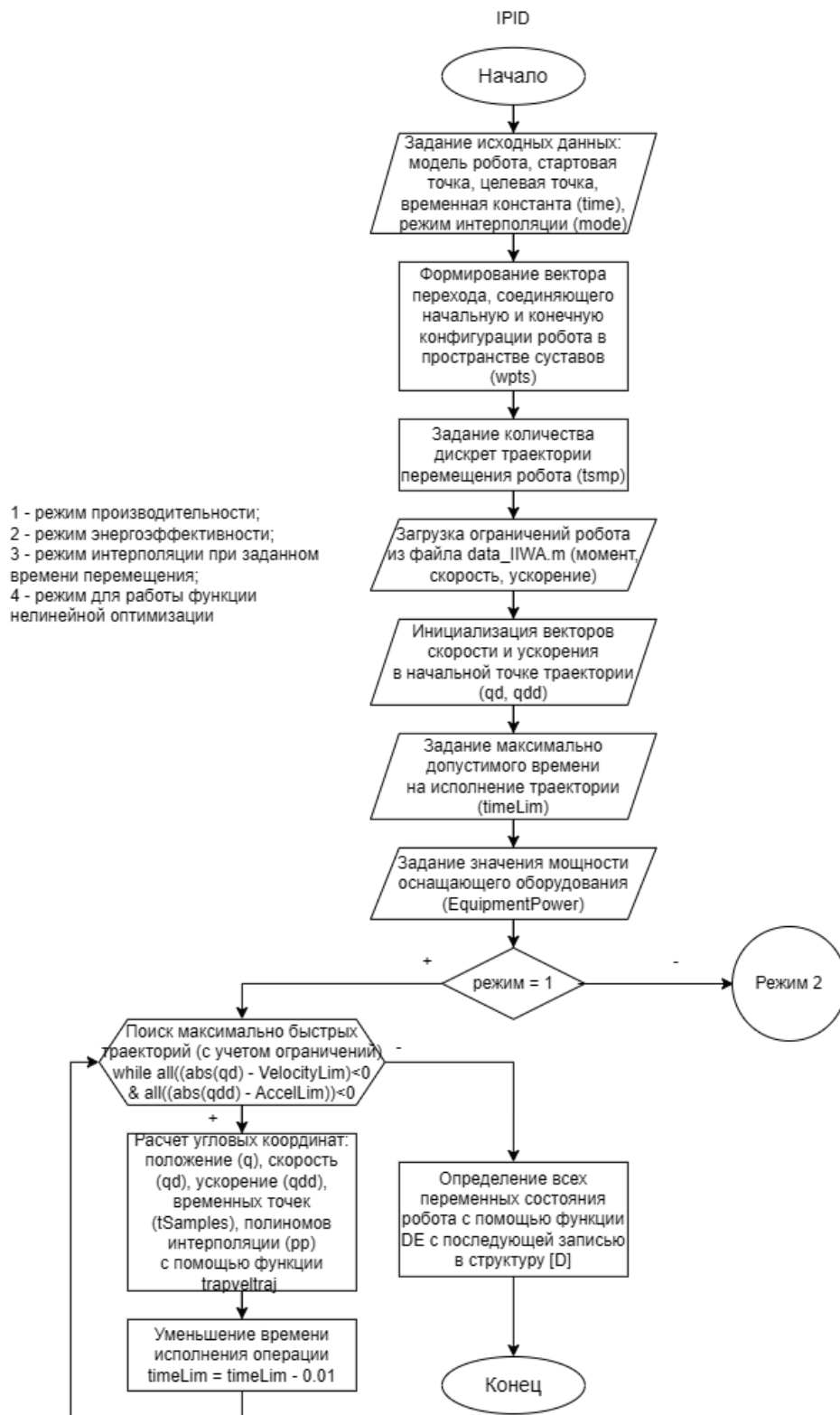


Рисунок 4.33 – Алгоритм работы функции IPID (первая часть)

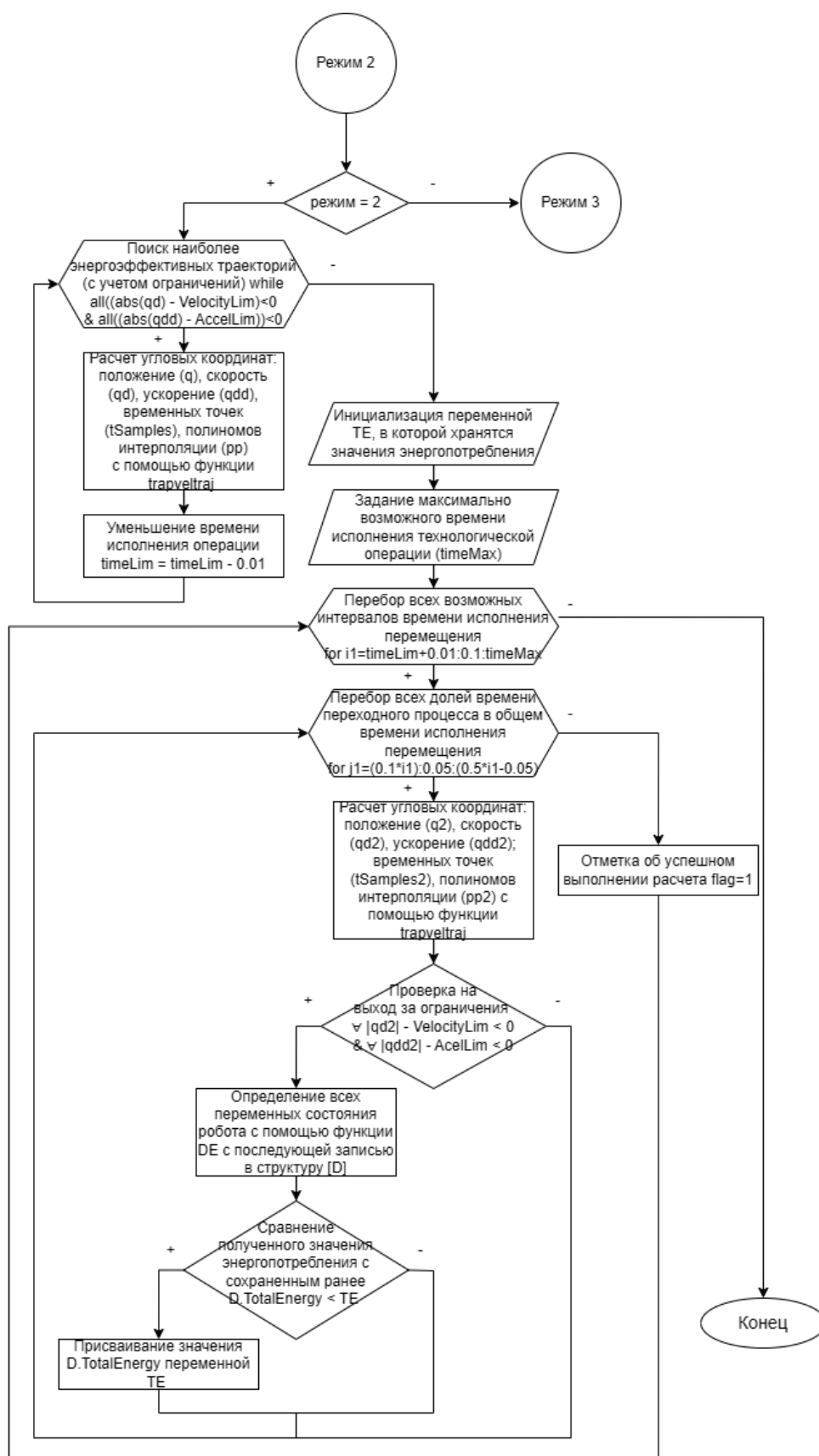


Рисунок 4.34 – Алгоритм работы функции IPID (вторая часть)

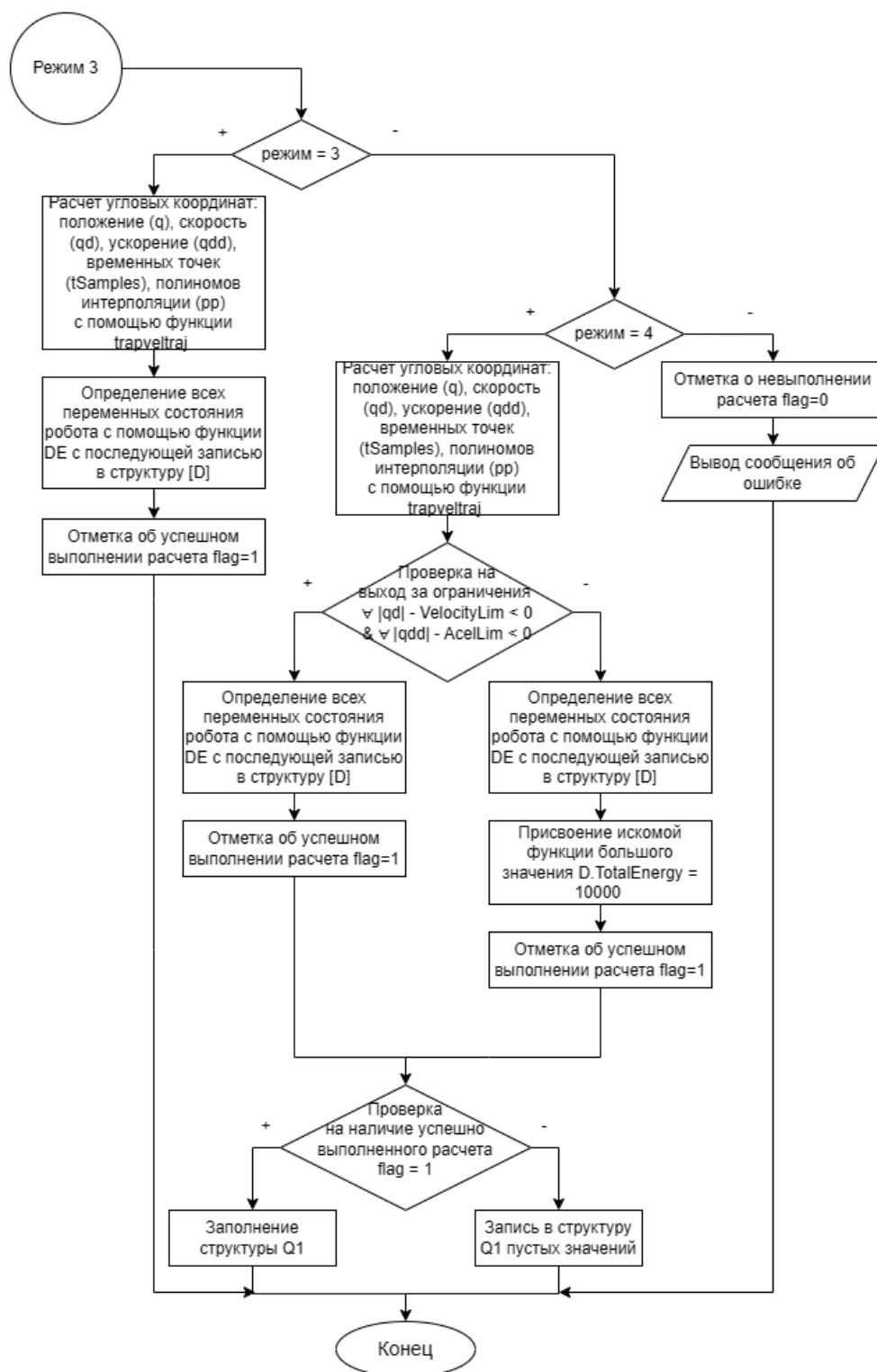


Рисунок 4.35 – Алгоритм работы функции IPID (третья часть)

Кроме этого, оценивается возможность достижения каждого пространственного расположения ЦТИ (с учетом выбранного шага дискретизации) (рис. 4.36, а), для каждой пары конфигураций определены оптимальные параметры движения по критериям «производительность» и «энергоэффективность». Пример карты энергетических затрат для объема «одна конфигурация – ко всем остальным» представлен на рис. 4.36, б.

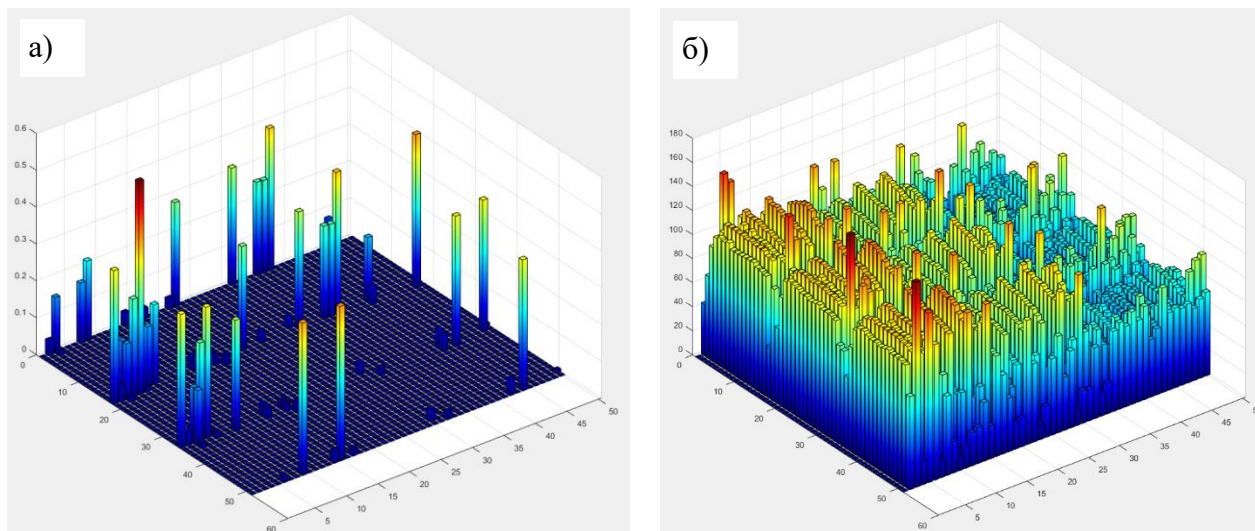


Рисунок 4.36 – Визуализация отдельных деталей структур РКП для объема движений «одна конфигурация – ко всем остальным»: а – карта минимальной ошибки при решении ОЗК (большие значения ошибки свидетельствуют о невозможности достижения требуемого пространственного расположения ЦТИ в данной опорной точке); б – карта энергетических затрат

Чтобы обеспечить возможность оптимизации КРТП (планирование оптимизированных движений) за счет организационных мероприятий, проводимых оператором (в частности, за счет эффективного размещения изделия либо локализации комплекса ключевых движений в определенной части рабочей зоны КР), согласно авторской методике [108] и в разработанном ПО [143]) оператору предоставляется графический интерфейс, интерпретирующий структуры D и Q по соответствующему РКП. На рис. 4.37 продемонстрирован фрагмент интерфейса, отображающий в виде цветовой схемы дифференциацию траекторий движений по сопряженным затратам электрической энергии КР при ограничении общего времени исполнения движения. Аналогичные карты могут быть предоставлены оператору по любому из заранее определенных критериев оптимизации, по которому были проведены расчеты для инициализации БЗ. Тогда оператор может еще жестче ограничить РКП, локализовав изделие либо комплекс ключевых движений в наименее энергозатратной зоне (или, например, в зоне с движениями, обеспечивающими наибольшую производительность). Такой подход и соответствующий интерфейс наиболее уместно использовать в ТО, РХ которого характеризуются необходимостью сохранять ориентацию ЦТИ, если же ориентация для каждого пространственного расположения уникальна либо ограничена диапазоном изменения $\alpha_{rot}, \alpha_{tilt}$ (формула 4.13), то оператору предоставляется интерфейс (рис. 4.38), демонстрирующий приоритетность движений по производительности и/или энергоэффективности.

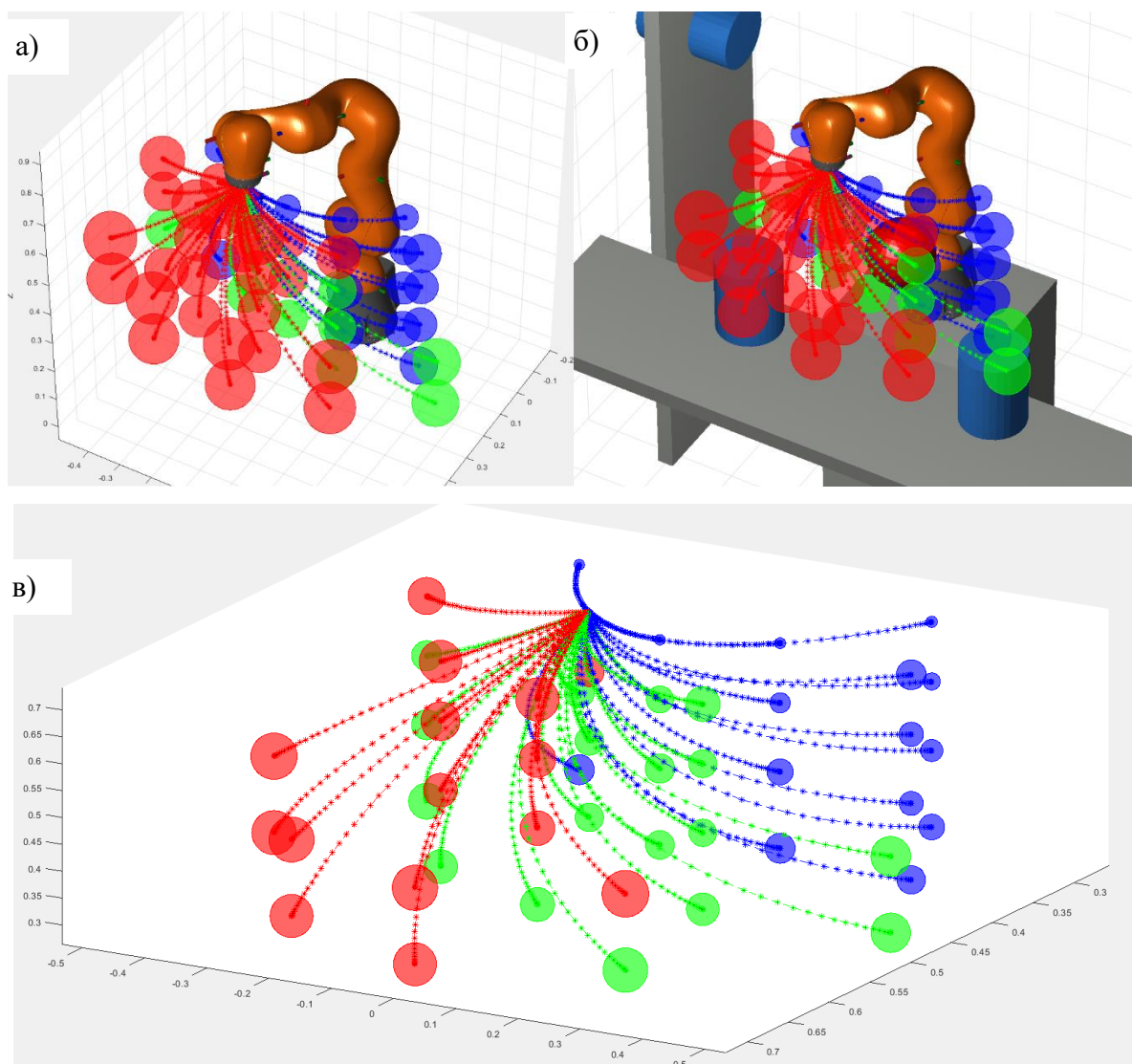


Рисунок 4.37 – Элементы пользовательского интерфейса оператора (оси соответствуют осям глобальной системы координат) а) классификация траекторий по сопряженным энергетическим затратам, совмещенная с моделью КР б) классификация траекторий по сопряженным энергетическим затратам с учетом объектов коллизий рабочей зоны в) классификация траекторий по сопряженным энергетическим затратам без модели КР

На рис. 4.38 карты построены с помощью пользовательской функции *polarbubblechartVis* (...). В полярной системе координат полярный угол соответствует углу вращения ЦТИ (α_{rot}), цвет пузырька соответствует углу наклона ЦТИ (α_{tilt}), а размер пузырька соответствует энергии, необходимой для перехода из точки начала движения в точку назначения с известным положением в ОП и ориентацией, определяемой указанными углами α_{rot} , α_{tilt} . Представлен фрагмент визуализации для 612 движений, определяемых одной точкой начала движения (текущей конфигурации), 12 точками положения в ОП и 51 вариантом ориентации, определенной согласно диапазону изменения углов α_{rot} , α_{tilt} (см. листинг 4.2).

При этом по каждому варианту движения по данным D и Q строятся графики изменения характеристики и переменных состояния каждого шарнира КР:

- для движений, отвечающих критерию максимизации производительности (КМП) ТО по линеаризованной модели (рис. 4.39 – 4.41) и с детализацией по нелинейной модели (для сокращение объема материала представлены графики по второму шарниру КР рис. 4.42 и 4.43);
- для энергоэффективных движений (критерий минимизации энергопотребления – КМЭ) по линеаризованной модели (рис. 4.44 – 4.46), по нелинейной модели (рис. 4.47 и 4.48).

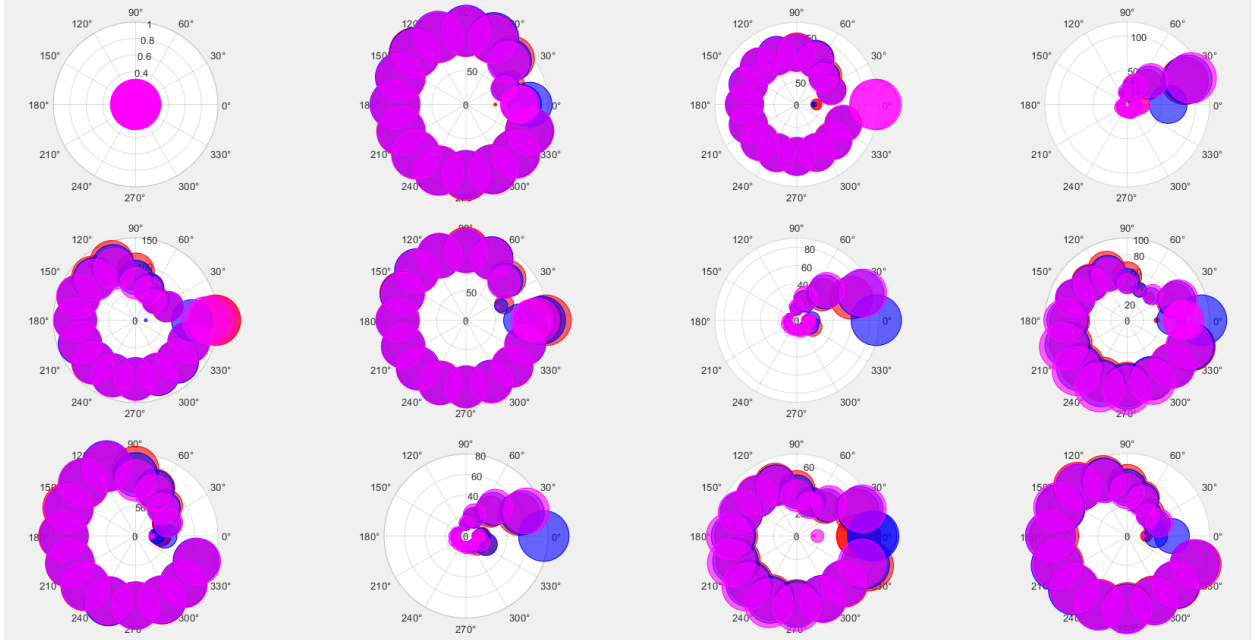


Рисунок 4.38 – Карта приоритетности движения по энергоэффективности с учетом математического описания точек назначения $TF = F_{TF}(pose, \alpha_{rot}, \alpha_{tilt})$

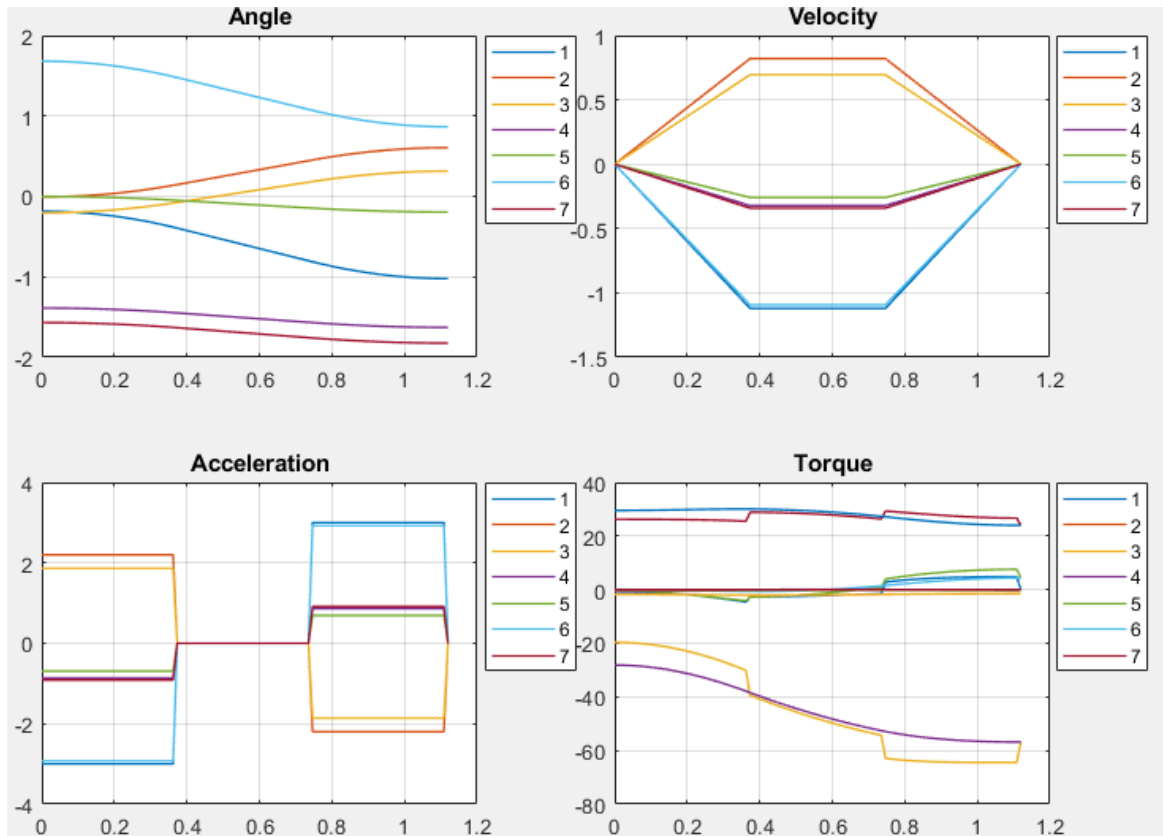


Рисунок 4.39 – Изменение углов положения, угловых скоростей, угловых ускорений и моментов шарниров КР, обозначенных от 1 до 7 (критерий эффективности – КМП)

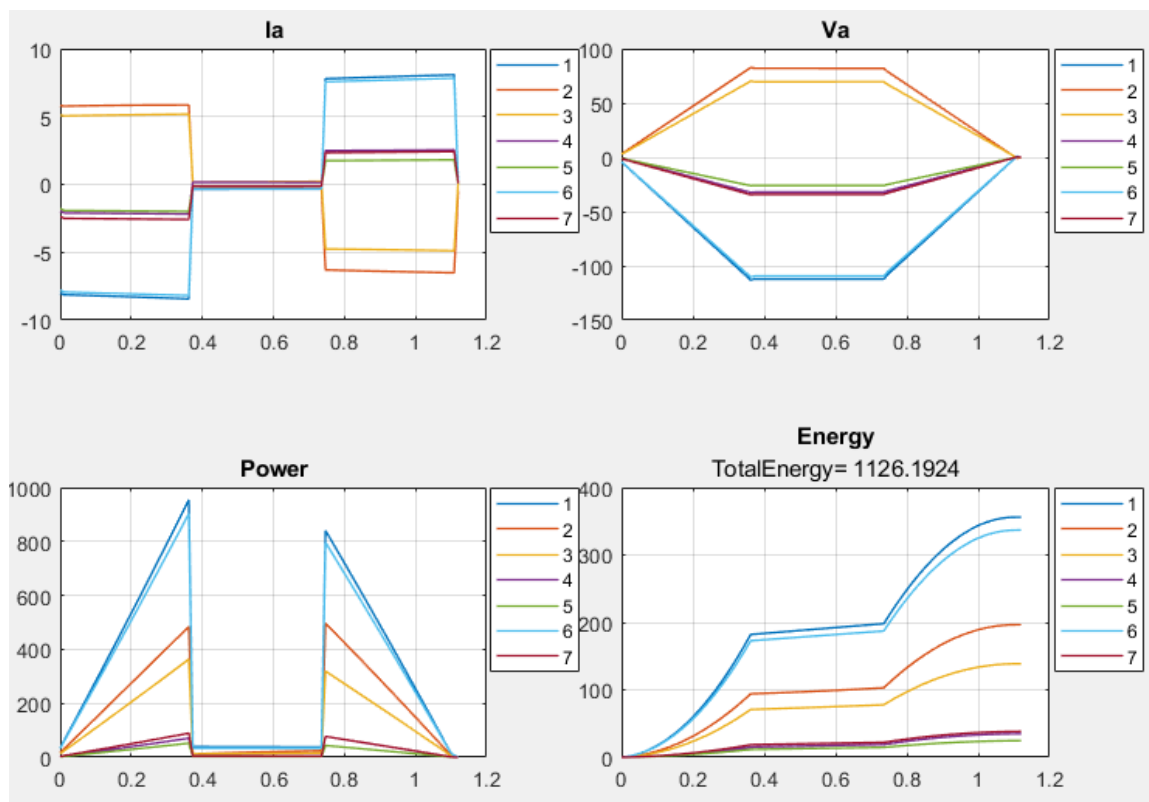


Рисунок 4.40 – Изменение токов якорных цепей, напряжений, мощностей и энергопотребления двигателей шарниров КР, обозначенных от 1 до 7 (критерий эффективности – КМП)

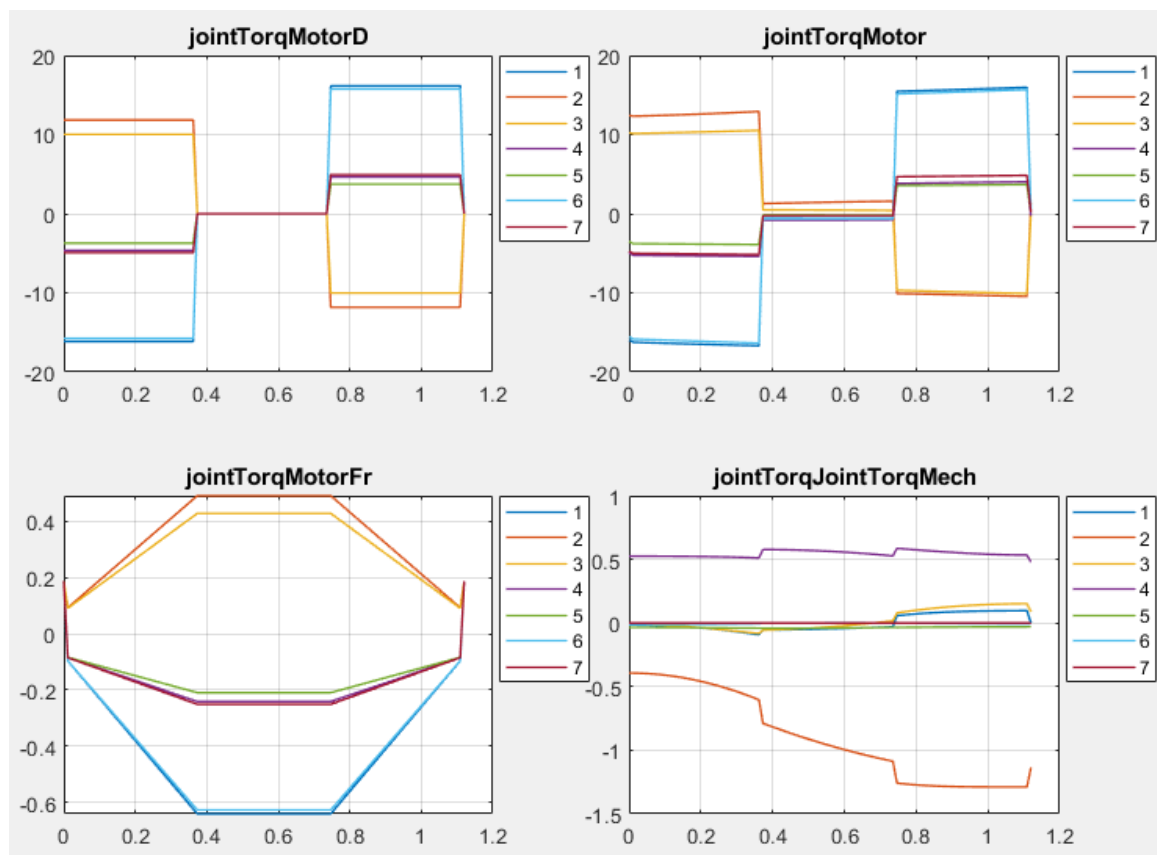


Рисунок 4.41 – Изменение динамических моментов двигателей, моментов механизма (приведенных к двигателям), моментов сил трения, моментов механизма (не приведенных к двигателям) шарниров КР, обозначенных от 1 до 7 (критерий эффективности – КМП)

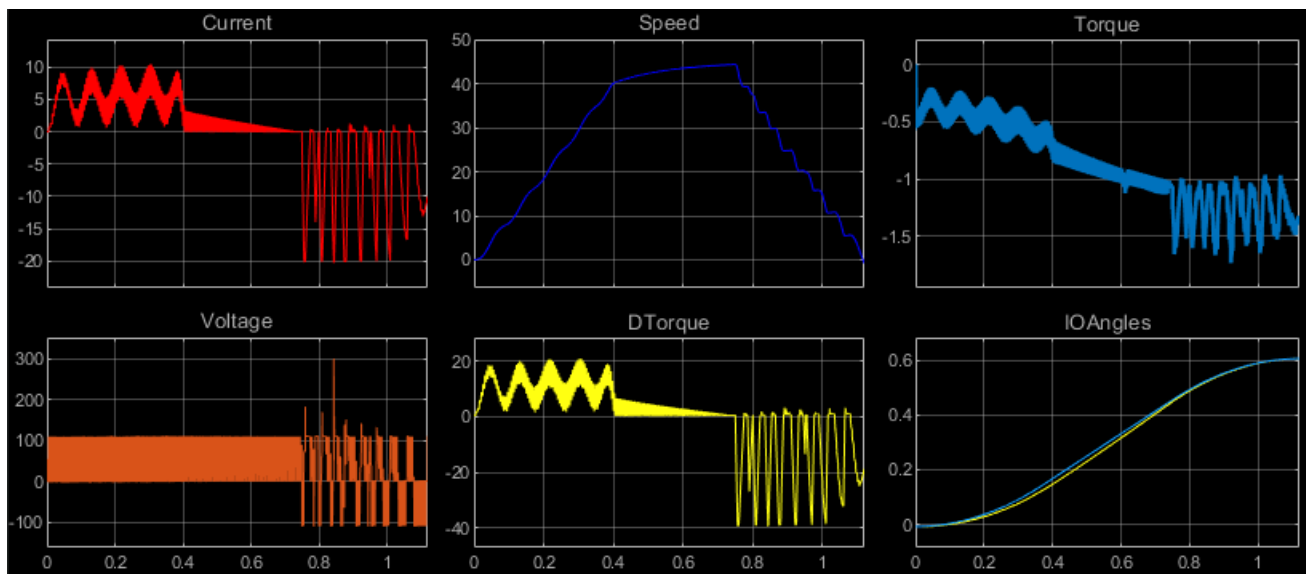


Рисунок 4.42 – Изменение тока, угловой скорости, момента механизма, напряжения, динамического момента и положения шарнира 2 (критерий эффективности – КМП)

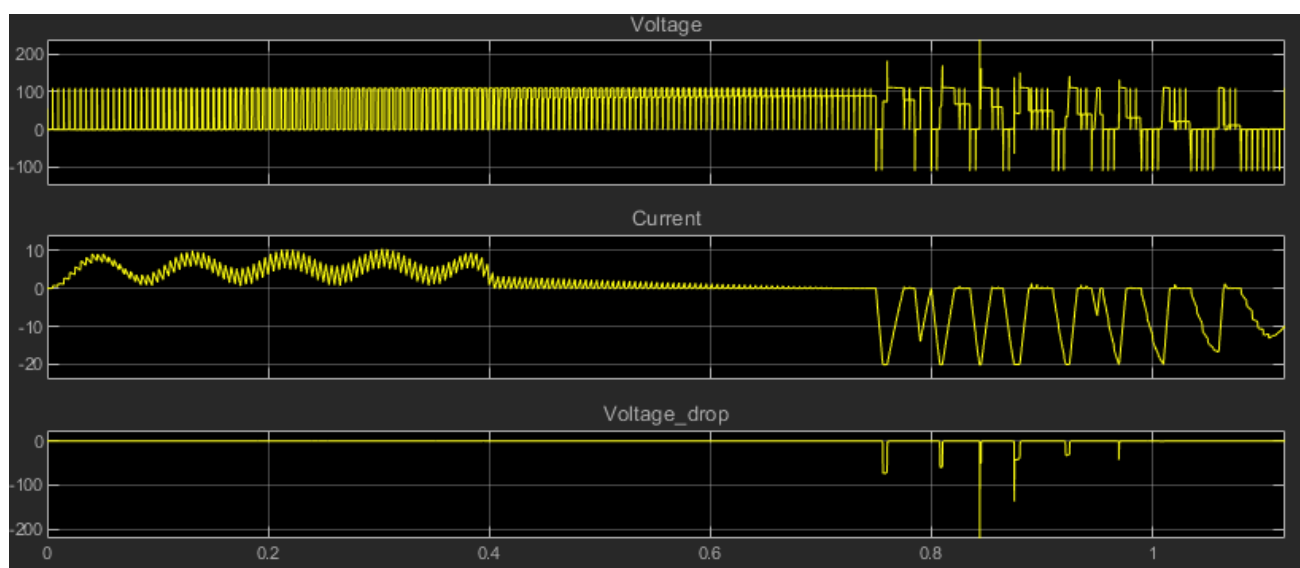


Рисунок 4.43 – Переходные процессы: напряжения питания, тока и падения напряжения на ограничивающем резисторе двигателя шарнира 2 (критерий эффективности – КМП)

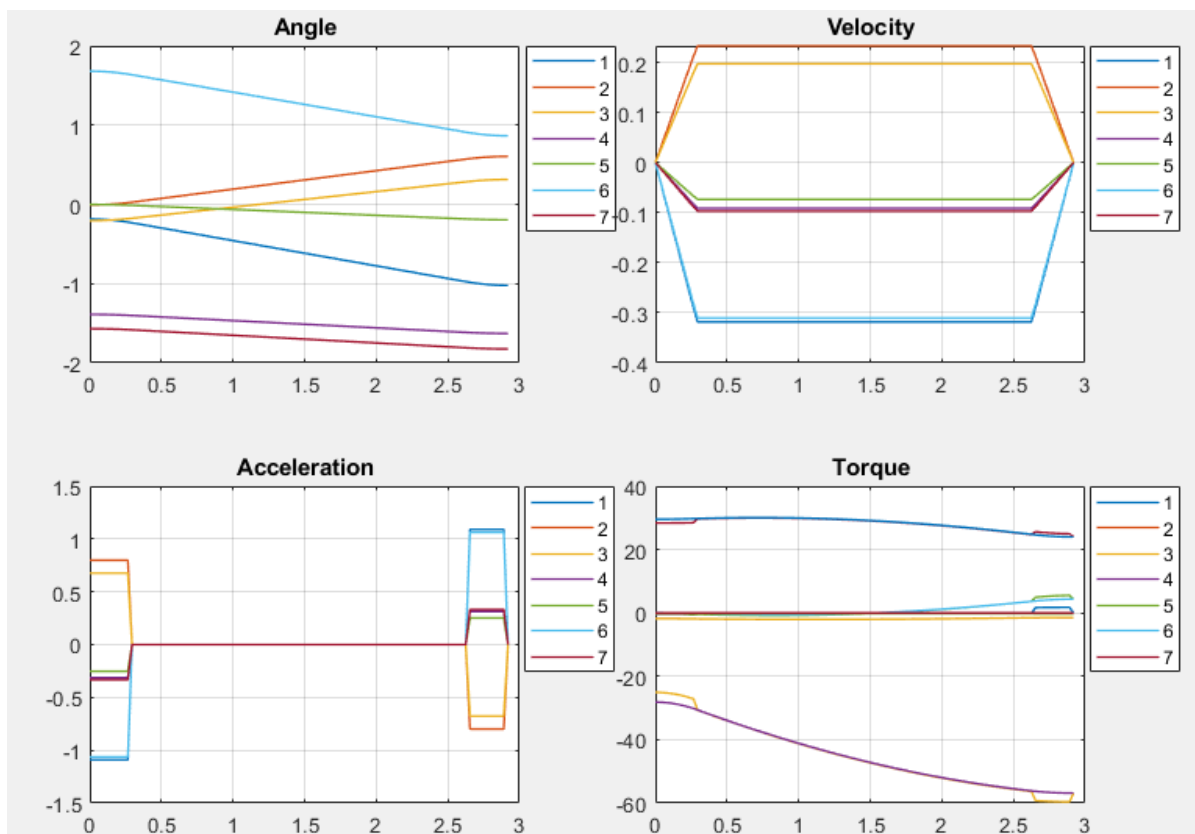


Рисунок 4.44 – Изменение углов положения, угловых скоростей, угловых ускорений и моментов шарниров КР, обозначенных от 1 до 7 (критерий эффективности – КМЭ)

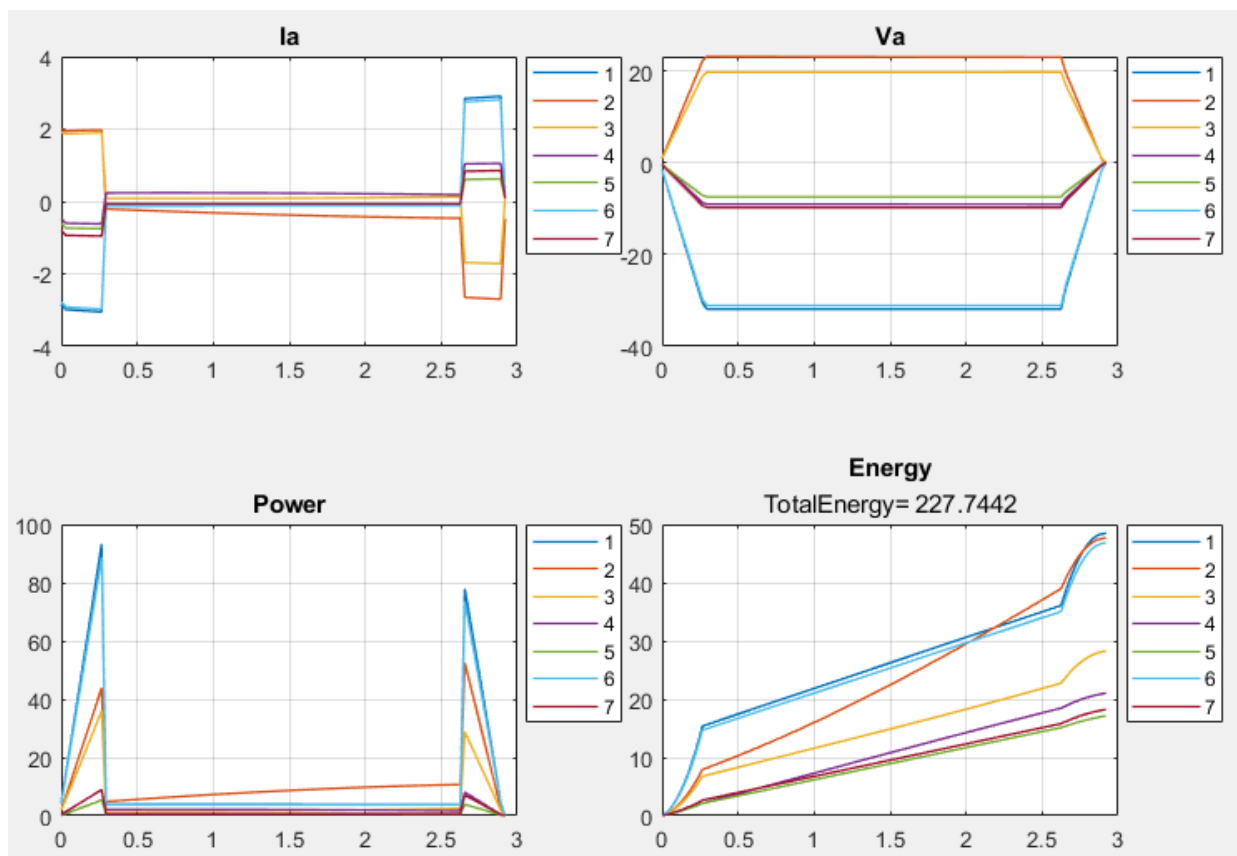


Рисунок 4.45 – Изменение токов якорных цепей, напряжений, мощностей и энергопотребления двигателей шарниров КР, обозначенных от 1 до 7 (критерий эффективности – КМЭ)

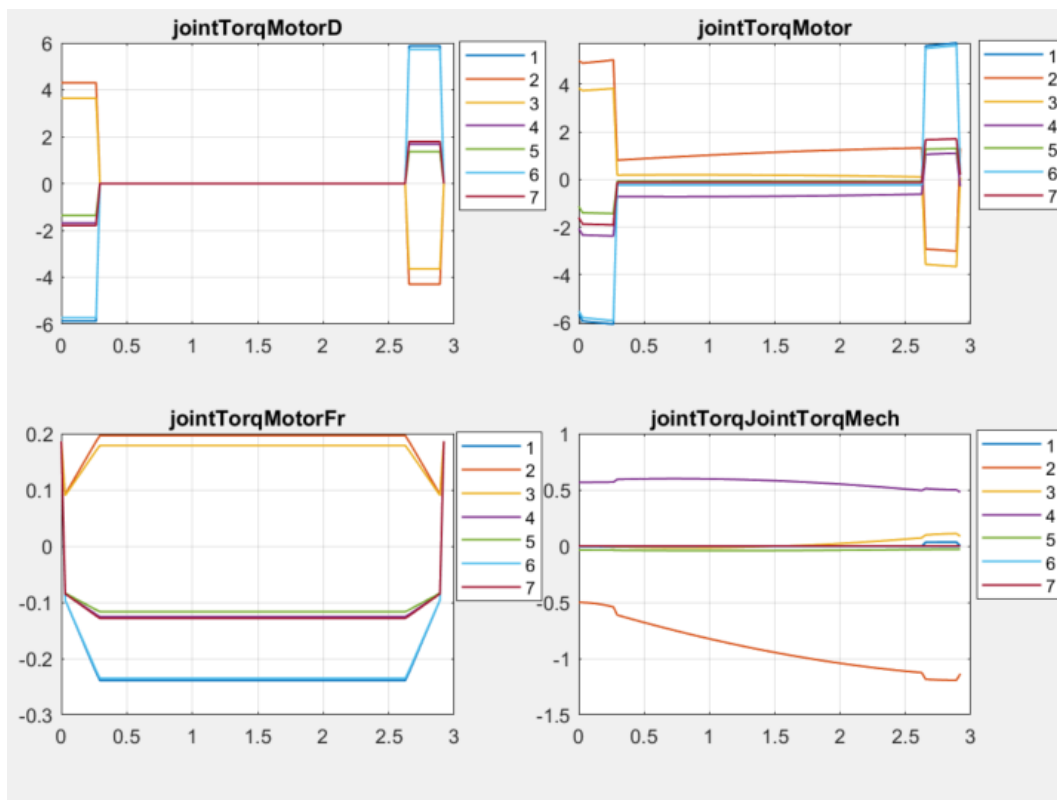


Рисунок 4.46 – Изменение динамических моментов двигателей, моментов механизма (приведенных к двигателям), моментов сил трения, моментов механизма (не приведенных к двигателям) шарниров КР, обозначенных от 1 до 7 (критерий эффективности – КМЭ)

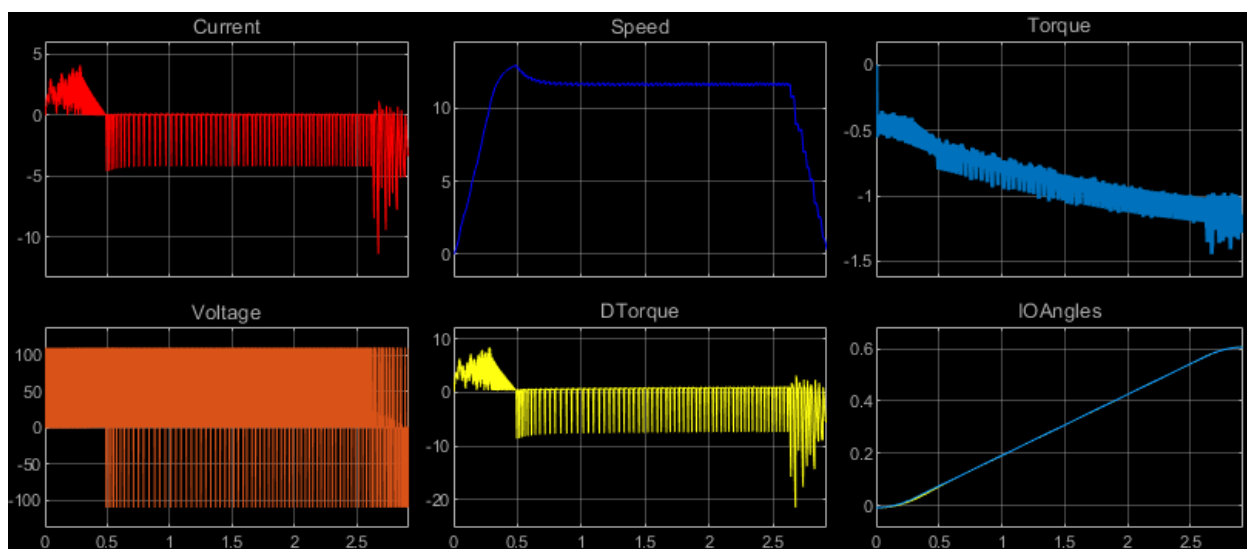


Рисунок 4.47 – Изменение тока, угловой скорости, момента механизма, напряжения, момента динамического и положения шарнира 2 (критерий эффективности – КМЭ)

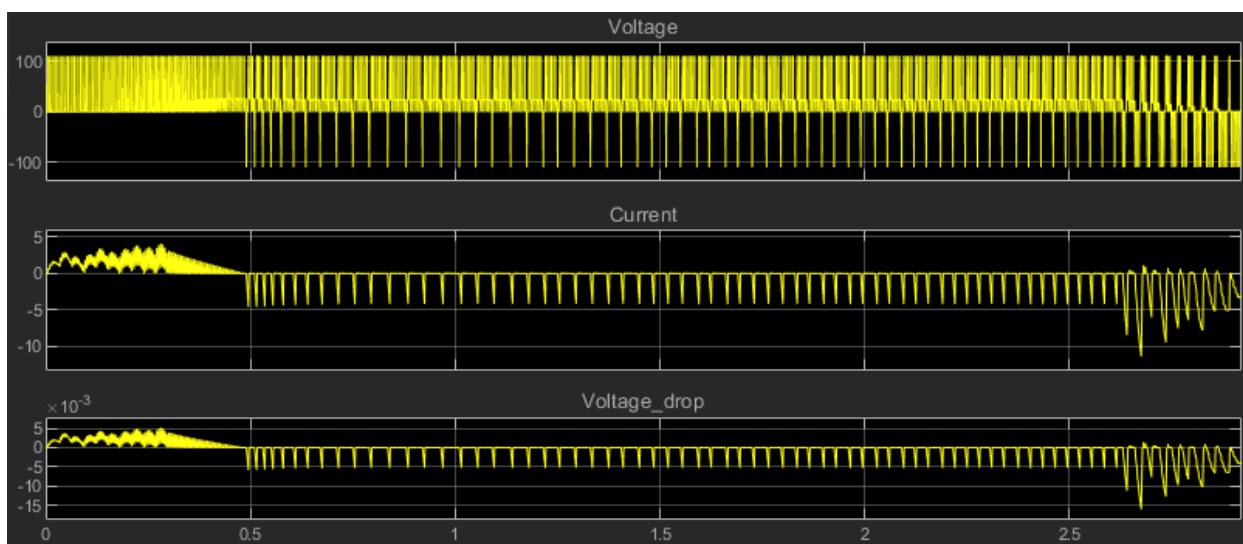


Рисунок 4.48 – Переходные процессы: напряжения питания, тока и падения напряжения на ограничивающем резисторе двигателя шарнира 2 (критерий эффективности – КМЭ)

При сравнительном анализе переходных характеристик для движений, оптимальных по КМП и КМЭ, очевидны значительные отличия по ключевым переменным состояния СУЭП КР и интегральным показателям. Так, для одной и той же пары начальной и конечной конфигурации для двух движений общее время исполнения отличается на $\sim 1,75$ секунды или в процентном отношении на 252 %, по энергии на ~ 899 Дж или в процентном отношении на 79 %, если взять за базу характеристики движения, соответствующего КМП. Значительный потенциал оптимизации доказывает целесообразность предложенных в разделе решений. Динамическая ошибка по положению при движении по КМП (см. рис. 4.41) связана с использованием в механизмах планирования и оптимизации линеаризованной (упрощенной) модели для повышения быстродействия. Тем не менее наличие динамической ошибки в поставленной задаче исполнения ВП и ВХ движениями в режиме позиционного управления без разрешения коллизии существенным образом не влияет на цель организации части ТО.

Согласно приведенному описанию алгоритм планирования и оптимизация движения КР в РКП в режиме позиционного управления без разрешения коллизий предлагается представить согласно схеме (рис. 4.49). Предложенный алгоритм совместим с алгоритмом оптимизации в траекторном и контурном режимах управления, реализуемых для исполнения РХ, который интегрируется в блок, обозначенный на схеме пунктиром. Таким образом, становится возможным разработать ПО КРТК, реализующего алгоритм оптимизации движения КР по критериям производительности ТО и энергоэффективности при оперативном планировании ВП и ВХ. Подробное описание соответствующего ПО представлено в гл. 6.

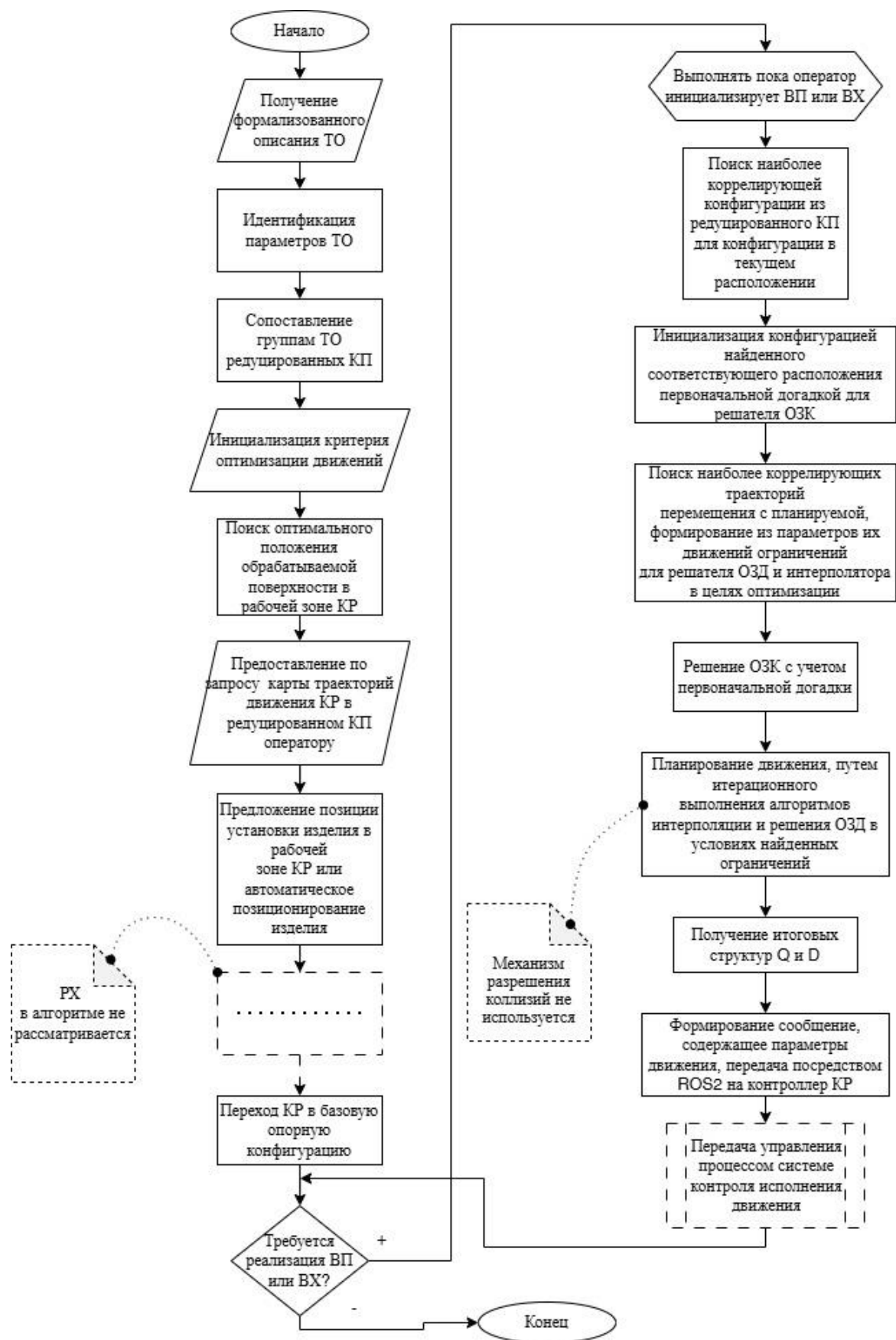


Рисунок 4.49 – Алгоритм планирования и оптимизация движения КР в РКП в режиме позиционного управления без разрешения коллизий

Выводы

1) Разработан алгоритм оптимизации движения КР по критериям производительности ТО и энергоэффективности при оперативном планировании ВП и ВХ, отличительной особенностью которого является использование БЗ редуцированных КП, содержащей уставки и дополнительные ограничения для решателей нелинейной задачи оптимизации. Использование предложенного алгоритма для оперативного планирования движений, реализующих ВП и ВХ, позволяет за счет снижения объема вычислений сократить общее время реакции системы управления на задание. Результативность предложенного алгоритма доказана в ходе численного эксперимента на имитационных моделях.

2) Предложен интерфейс оператора КРТП, позволяющий оператору в автоматическом или автоматизированном режиме провести организационно-технологические мероприятия по повышению эффективности процесса за счет выбора эффективного совместного размещения КР и обрабатываемого изделия.

4.6 Алгоритм поиска оптимальных параметров движения при прямолинейных технологических переходах коллаборативного робота

Процедура оптимизации интегральных параметров КРТП по критериям максимизации производительности (КМП), максимизации энергоэффективности (КМЭ) и максимизации степени безопасности (КБ), несмотря на детерминированность мехатронной части (КР, инструмент, оснастка и т.д.) [273], усложняется многовариантной алгоритмической составляющей стратегии и тактики планирования движений как реакций на задания оператора и ограничения рабочей зоны. Таким образом, целью раздела является исследование потенциала и разработка алгоритмов оптимизации КРТП по КМП и КМЭ применительно к прямолинейным РХ с сохранением заданной ориентации инструмента. В качестве входных аргументов оптимизационной задачи по КМП и КМЭ выступают параметры спланированного движения ЦТИ в ОП: $\vec{Pos}(t), \vec{v}(t), \vec{a}(t)$ – положение, скорость и ускорение. Также в качестве дополнительного входного аргумента использована постоянная составляющая мощности (P_{tool}) оснащающего оборудования (например, термического ножа, шпинделя и т.п.) при его наличии на фланце КР.

Предложенные алгоритмы исследовались на комплексе имитационных моделей, рассмотренных в гл. 3. Использованный решатель ОЗК пакета RST MATLAB, базируется на методах BFGS GradientProjection [294] и LevenbergMarquardt [344]. Планирование траектории движения ЦТИ осуществлялось в соответствии с типовыми требованиями технологических режимов, характерных для прямолинейного фрезерования, шлифования, сварки, трехмерной роботизированной печати [90] и т.п., в общем, выражающихся в необходимости поддержания скорости перемещения ЦТИ в пределах заданного трапецеидального профиля. В рамках стратегии плани-

рования траектории в ОП использовалась функция *trapveltraj(...)* [293]. Планирование траектории в КП по результатам решения ОЗК для промежуточных точек осуществлялось посредством метода Piecewise Cubic Hermite Interpolation Polynomial [248] одноименной функцией *pchp* (Interpolation/MATLAB). Реализуемость поз КП в соответствии со спроектированными конфигурациями проверялась программными функциями поиска коллизий RST MATLAB и посредством инструментов Inverse Kinematic Designer. Динамическая модель представлена в виде дифференциального уравнения [247], использовались алгоритмы расчета динамики [295]. Для объединения процедур и объектов применен смешанный стиль программирования на высокоуровневом языке, в частности, MATLAB.

В отличие от ТП на базе ПР, где операция линейного перемещения полностью детерминирована, а программа исполнения разработана заранее, неизменна и не корректируется, в КРТП часть параметров движения определяется в реальном времени. Как правило, заранее неизвестны координаты начальной и конечной точек (например, они могут быть указаны оператором с помощью маркеров и других средств непосредственно в процессе работы), что в свою очередь приводит к неопределенности ориентации ЦТИ в глобальной системе координат. Соответственно неизвестны как начальная и конечная точки конфигурации КП, так и промежуточные. То есть процедура планирования движения, включающая итерационное решение ОЗК, должна в таком случае выполняться в реальном времени. Кроме этого, результат должен быть получен в условиях технологических ограничений операции, для успешного исполнения которой требуется линейное перемещение, а также технических ограничений, определяемых конструктивными характеристиками КП (линейным максимальным ускорением (a_{max}), линейной максимальной скоростью (v_{max}), а также угловыми координатами).

Поскольку конфигурации КП заранее неизвестны, если есть коридор ограничений скорости и ускорения подачи ЦТИ, есть возможность выполнить ряд действий, для расчета и выбора оптимального профиля линейной скорости ЦТИ, позволяющих максимизировать либо производительность операции, либо ее энергоэффективность, либо совокупность взвешенных значений по КМП и КМЭ одновременно.

Исходными данными для задачи оптимизации являются:

1) $v_{lim} = [v_{lim_{min}}, v_{lim_{max}}]$ – вектор ограничений максимальной скорости v на участке равномерного движения ЦТИ в рамках трапецеидального профиля скорости;

2) $\vec{P_1P_2}$ – вектор перемещения, при этом обе точки определены для КП в ОП, т.е. известны $P_1 = \{x_1, y_1, z_1, A_1, B_1, C_1\}$, $P_2 = \{x_2, y_2, z_2, A_2, B_2, C_2\}$; или TF_1 и TF_2 , где $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2$ – координаты точек в глобальной системе координат, $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2$ – углы поворота вокруг осей OX, OY и OZ соответственно;

3) t_E – время выполнения РХ;

4) величина $1/d$ – доля времени на реализацию переходного процесса ускорения или торможения (в данном расчете время равноускоренного режима равно времени торможения) при трапецидальном профиле скорости линейного перемещения, при этом время равноускоренного движения равно времени торможения и равно $t_E \cdot (1/d)$; d может изменяться в интервале $(2; \infty)$;

Актуальный для решаемой задачи профиль скорости перемещения ЦТИ представлен на рис. 4.50.

С учетом трапецидального профиля скорости уравнение движения ЦТИ описывается как

$$S = \int_{t_0}^{t_1} \frac{v_{\max}}{t_1 - t_0} \cdot t dt + v_{\max} (t_2 - t_1) + \int_{t_2}^{t_E} \left(-\frac{v_{\max}}{t_E - t_2} \cdot t + \frac{v_{\max}}{t_E - t_2} t_2 + v_{\max} \right) dt \quad (4.21)$$

При $t_0 = 0$, $t_1 = t_E/d$; $t_2 = t_E - t_E/d$ и учитывая, что $S = |\vec{P_1 P_2}|$, формула зависимости t_E ($v_{\max}$, d) имеет вид:

$$t_E = \frac{|\vec{P_1 P_2}|}{v \left(1 - \frac{1}{d}\right)_{\max}}. \quad (4.22)$$

Учитывая (4.22) для $\forall v_{\max} \quad v \in [v_{\lim \min}, v_{\lim \max}]$ и $\forall d \in (2; \infty)$, представляется возможным вычислить t_E , принимая во внимание ограничения линейного ускорения КР

$$\max \left| \left(\frac{dv(t)}{dt} \right) \right|_0^{t_E} < a_{\max}, \quad (4.23)$$

определить достижимость t_E с исходными параметрами. Тогда задача максимизации производительности будет записываться как:

$$t_E(v, d) = \frac{|\vec{P_1 P_2}|}{v \left(1 - \frac{1}{d}\right)} \rightarrow \min; \quad (4.24)$$

с учетом ограничений $v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$, $2 < d < \infty$;

$$\max \left| \left(\frac{dv(t)}{dt} \right) \right| < a_{\max}, \text{ при } 0 \leq t \leq t_E.$$

Учитывая факт заранее неопределенной конфигурации КР в точках P_1 и P_2 , необходимо для всех достижимых параметров t_{Eij} , $v_{\max ij}$, d_{ij} найти соответствующее значение энергии (E).

Динамика линейного перемещения КР для каждой пары v_{ij} и d_{ij} (а также сопряженной с ними t_{Eij}) определяется с заданным шагом дискретизации, например, функцией *trapveltraj(...)* пакета RST MATLAB, позволяющей определить вместе с проекциями $v_{ij}(t)$ также проекции $a_{ij}(t)$ и $S_{ij}(t)$ на оси Ox , Oy и Oz глобальной системы координат КР. При этом происходит расчет значений времени $t = 0 : t_k : t_{Eij}$.

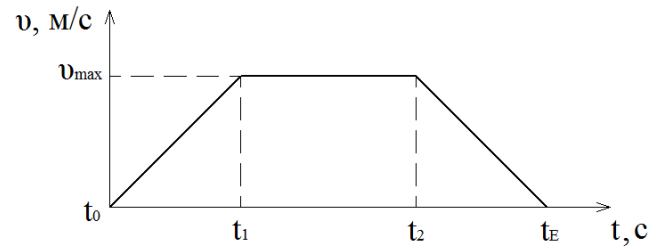


Рисунок 4.50 – Трапецидальный профиль скорости при выполнении РХ по шаблону прямолинейного перемещения

Далее выполняется решение ОЗК для полученных $S_{ij}(t)$, $v_{ij}(t)$ и $a_{ij}(t)$ при $t = 0 : t_k : t_{Eij}$ методом BFGS при $A, B, C \rightarrow \text{const}$, т.е. осуществляется переход в КП, с последующей интерполяцией значений по методу РСНР.

Результатом расчета являются угловые переменные $q_{ij}^r(t)$; $\omega_{ij}^r(t)$; $\frac{d\omega_{ij}^r}{dt}t$ (положение, угловая скорость и угловое ускорение), характерные для выбранного профиля линейного перемещения (для текущих значений v_{ij} и d_{ij}).

На следующем шаге осуществляется проверка выхода из ограничений по угловым скоростям, ускорениям и углам осей КР. В случае успешного прохождения проверки производится решение ОЗД согласно предложенному алгоритму (см. рис. 4.31 и 4.32).

После расчета динамических характеристик представляется возможным определить момент $\tau_{ij}^r(t)$, который также необходимо проверить на ограничения.

Следующим является определение значения механической энергии по формуле:

$$E_{ij} = \sum_{r=1}^7 \sum_{k=0}^{t_{Eij}} \tau_{ijk}^r(t) \cdot \omega_{ijk}^r(t), \quad (4.25)$$

т.е. работы механизма, совершенная в рамках трапецеидального профиля скорости линейного движения v_{maxij} , t_{Eij} , d_{ij} .

Определяя $\min(E_{ij} \dots)$ возможно найти минимальное значение энергии, требуемое для выполнения КР прямолинейного движения между двумя точками ($P_1 P_2$) с профилем скорости v_{ij} , t_{Eij} , d_{ij} при определенных на этапе решения ОЗК конфигурациях КР в P_1 и P_2 . Представленная процедура может быть описана в виде блок-схемы алгоритма оптимизации траектории перемещения КР в ОП по взвешенной сумме критериев максимизации производительности и энергоэффективности (рис. 4.51), соответствующее ПО представлено в работе [147].

Пример работы алгоритма оптимизации прямолинейного РХ. Для демонстрации представленного решения приведен пример моделирования реализации КР прямолинейного перемещения ЦТИ из точки P_1 в точку P_2 в двух вариантах, связанных с неоднозначностью решения ОЗК методом BFGS. Общие исходные данные для двух вариантов представлены в табл. 4.12.

Конфигурация КР в точке P_1 для двух вариантов была представлена согласно векторам $conf1_v1 = [0.2765 \quad 0.5070 \quad -2.2752 \quad 1.6816 \quad -0.4175 \quad -1.1491 \quad -1.8360]$ и $conf1_v2 = [0.0358 \quad 0.8099 \quad -1.7783 \quad 1.6816 \quad -0.8143 \quad -1.3442 \quad -1.5977]$ (значения представлены в радианах).

Итоговая конфигурация КР в точке P_2 для КР в варианте 1 была рассчитана как $conf2_v1 = [-0.4722 \quad -0.0912 \quad -2.5657 \quad 1.9325 \quad 0.0518 \quad -1.2861 \quad -3.0543]$, в варианте 2 как $conf2_v2 = [-1.1537 \quad 0.8659 \quad -1.1419 \quad 1.9325 \quad -0.7673 \quad -1.6378 \quad -2.1744]$.

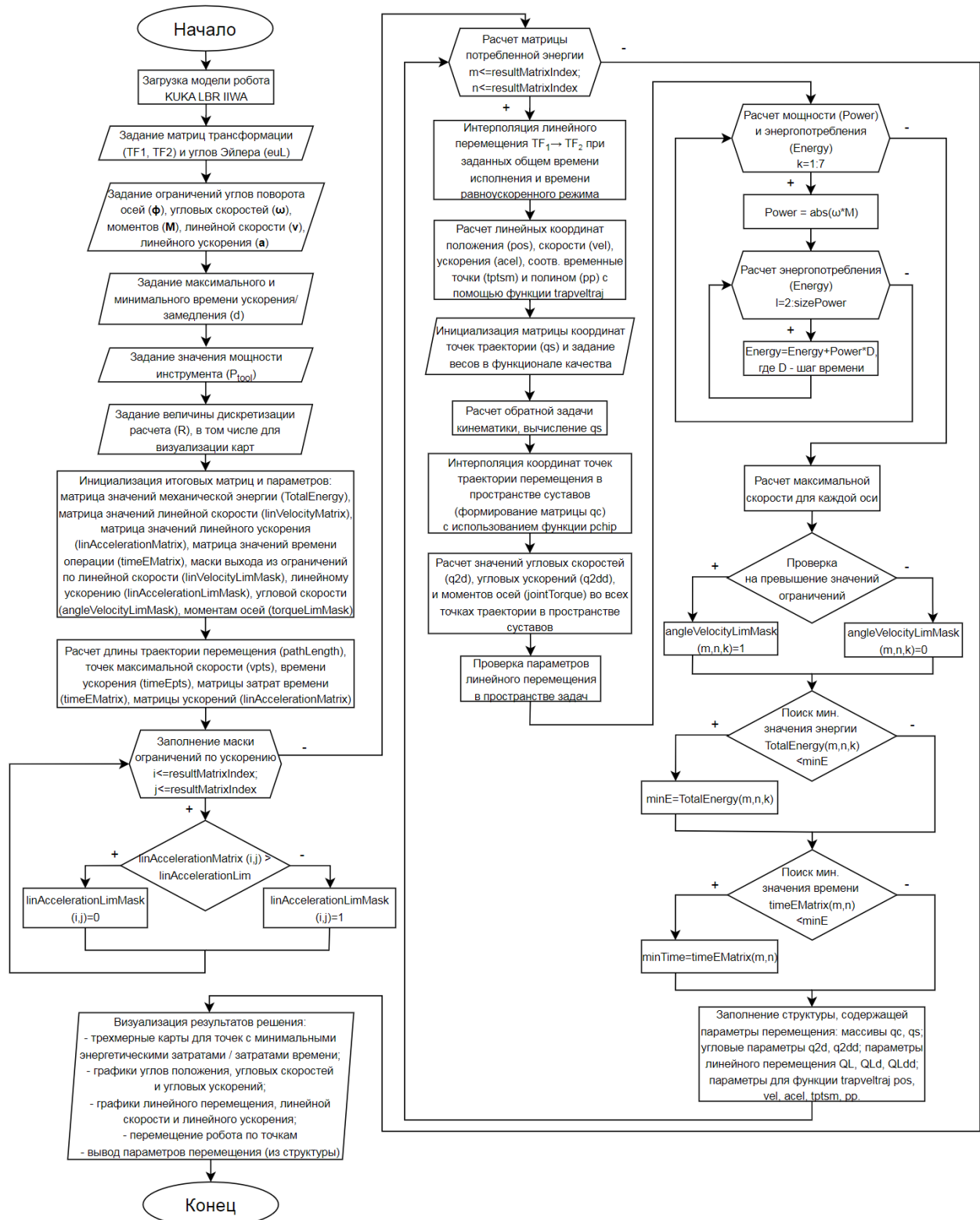


Рисунок 4.51 – Алгоритма поиска оптимальных параметров движения при реализации РХ по шаблону прямолинейного перемещения

Таблица 4.12 – Исходные данные для моделирования

Наименование переменной	Значение переменной
Позиция ЦТИ в точке P_1 в ОП	$[0.3 \ 0.4 \ 0.4]$ (X Y Z), м
Ориентация ЦТИ в точке P_1 в ОП	$[-\pi \ 0 \ -\pi]$ (X Y Z), рад
Позиция ЦТИ в точке P_2 в ОП	$[0.35 \ 0.05 \ 0.5]$ (X Y Z), м
Ориентация ЦТИ в точке P_2 в ОП	$[-\pi \ 0 \ -\pi]$ (X Y Z), рад
Ограничение максимальной линейной скорости ЦТИ	$[0.1 \ 0.6]$, м/с
Ограничение абсолютного максимального линейного ускорения ЦТИ	$[1]$, м/с ²
Ограничение угловых скоростей осей КР	$[98 \ 98 \ 100 \ 130 \ 140 \ 180 \ 180]$, °
Ограничение моментов осей КР	$[176 \ 176 \ 110 \ 110 \ 110 \ 40 \ 40]$, Н·м
Ограничение интервала равноускоренного движения	$[2.1 \ 5.1]$

Результаты моделирования для двух вариантов пар конфигураций представлены группой графиков (рис. 4.52 – 4.56). При этом записям *data 1...7* соответствуют указанные на графике переменные для каждого из семи шарниров КР.

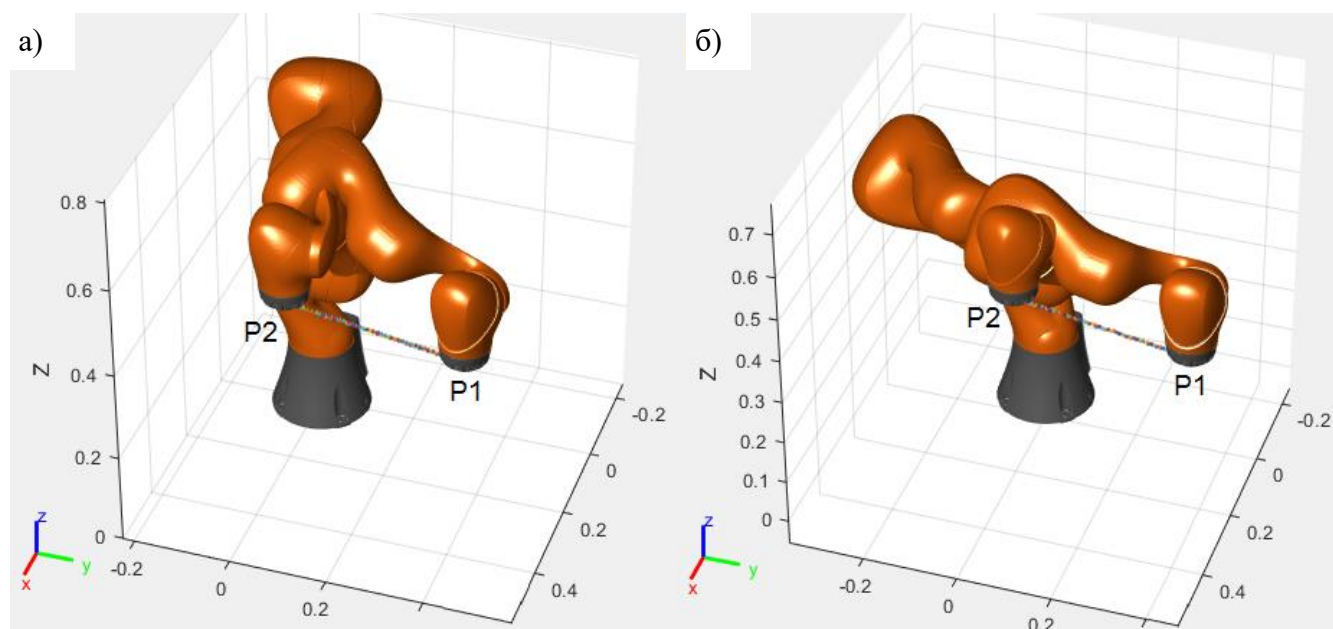


Рисунок 4.52 – Робот в точках P_1 и P_2 : а – вариант 1; б – вариант 2

Для учета влияния мощности, потребляемой инструментом, на общие показатели энергопотребления при выполнении прямолинейного РХ проведены исследования зависимостей (рис. 4.56) при наличии на фланце КР оборудования, потребляющего электрическую энергию. В результате получена серия графиков (рис. 4.57), иллюстрирующих суммарные энергетические затраты оборудования и КР при реализации прямолинейного РХ, согласно варианту конфигураций 2 (см. рис. 4.52).

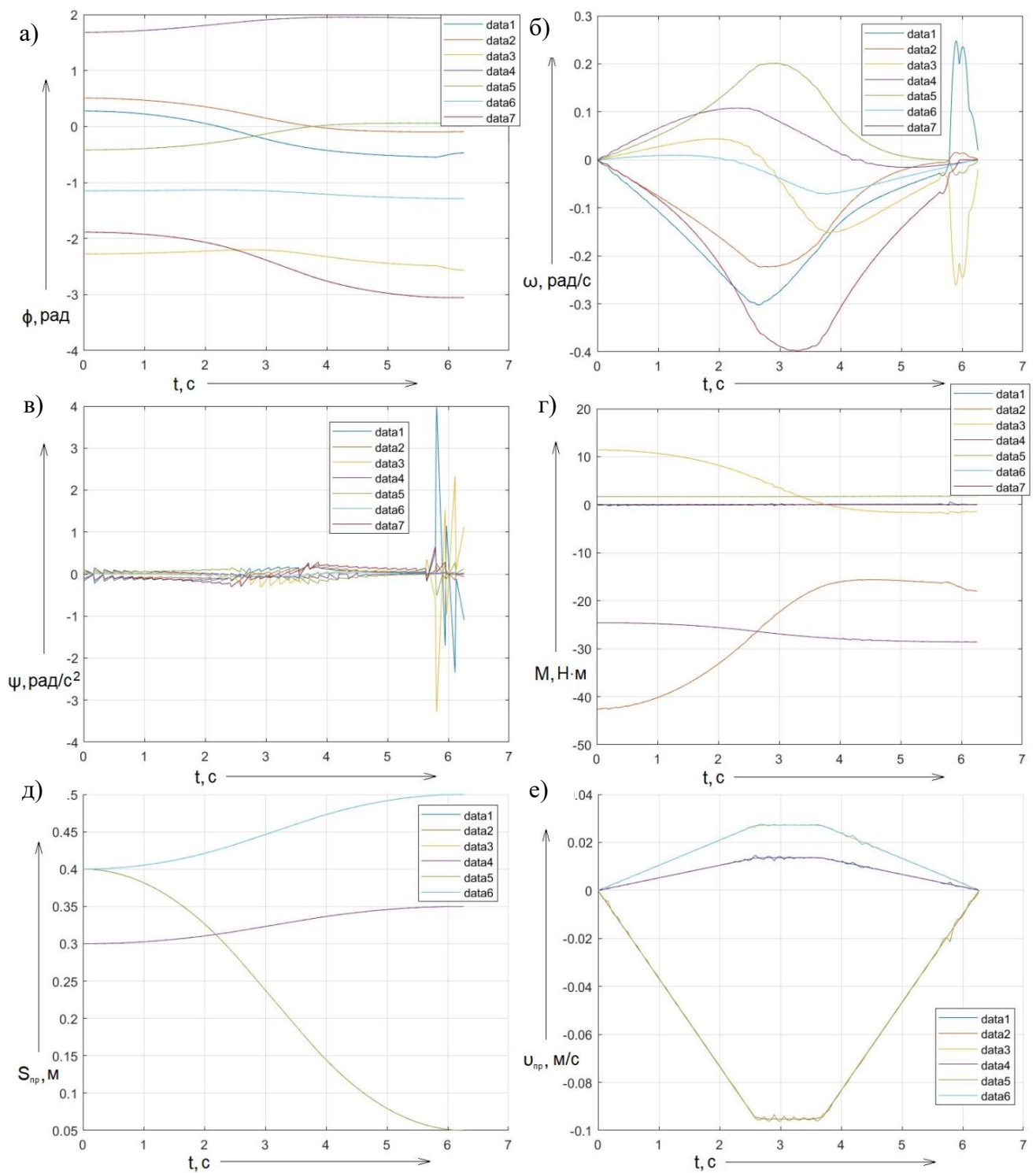


Рисунок 4.53 – Изменение ключевых переменных при РХ из точки P_1 в P_2 (вариант 1):
а – углов положения осей; б – угловых скоростей осей; в – угловых ускорений осей; г – моментов осей; д – проекций линейного перемещения; е – проекций линейных скоростей перемещения

Таким образом, по графикам (рис. 4.56 и 4.57) можно сделать вывод о том, что при отсутствии потребления электрической энергии оснащающим оборудованием ($P_{\text{tool}} = 0$ Вт) (например, разметочным карандашом, пневматическим захватом и т.д.) целесообразно выбирать низкие значения скорости и ускорения при формировании прямолинейного РХ. В том случае, если

оборудование также является потребителем электрической энергии, необходимо выбирать оптимальные значения скорости и ускорения по карте энергопотребления (рис. 4.57).

Согласно расчетам и визуализации рис. 4.55 – 4.57 в табл. 4.13 представлены искомые параметры движения LIN P₁P₂ в двух вариантах.

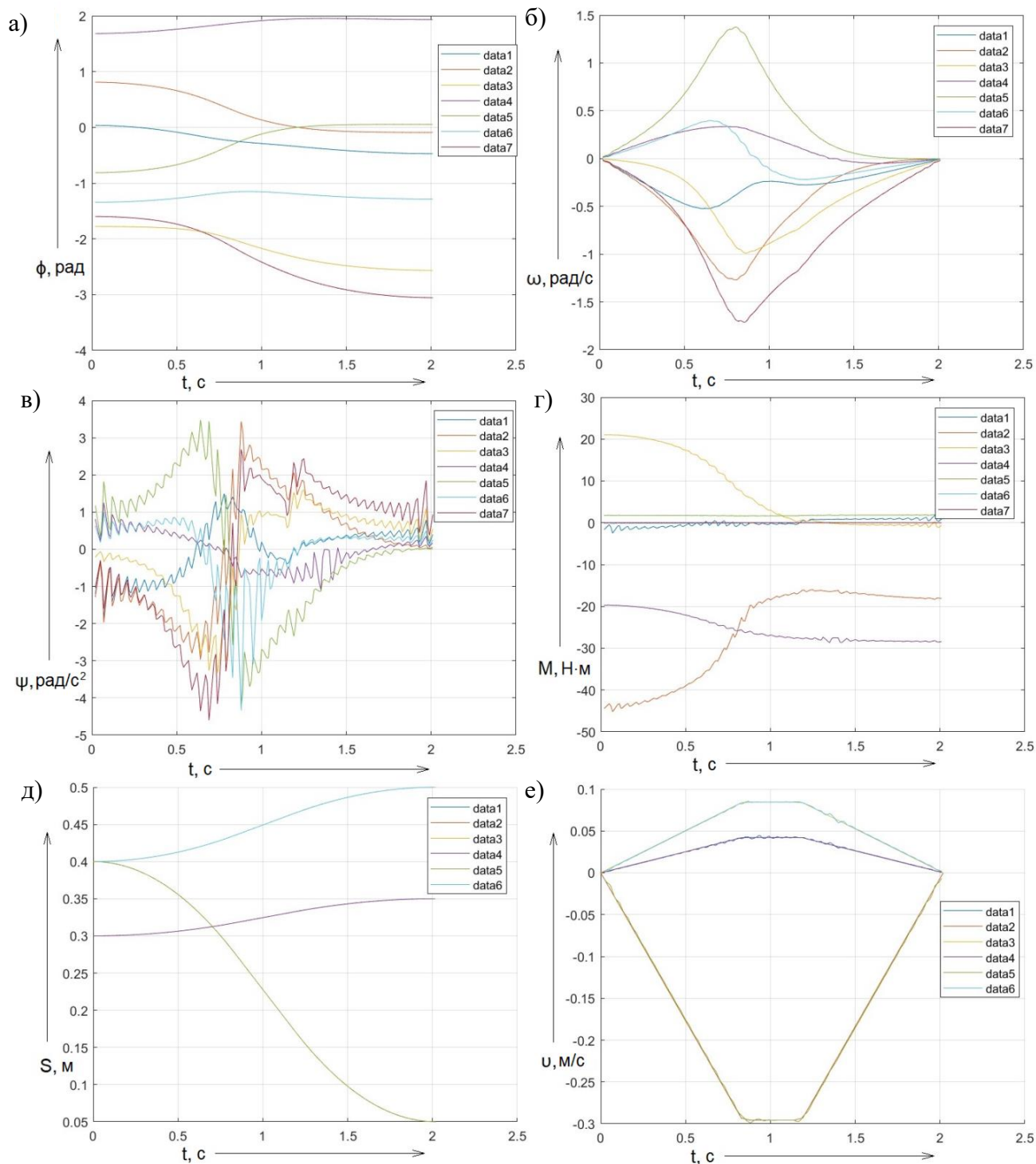


Рисунок 4.54 - Изменение ключевых переменных при РХ из точки P₁ в P₂ (вариант 2): а – углов положения осей; б – угловых скоростей осей; в – угловых ускорений осей; г – моментов осей; д – проекций линейного перемещения; е – проекций линейных скоростей перемещения

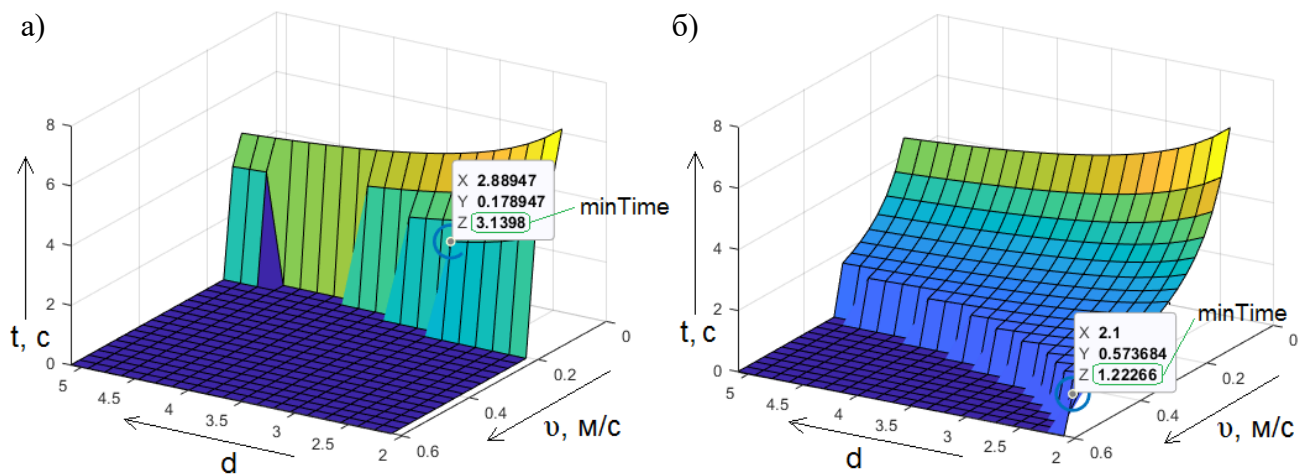


Рисунок 4.55 – Трехмерные графики функций зависимости $t_E(v_{max}, d)$ с учетом ограничений:
а – вариант 1; б – вариант 2

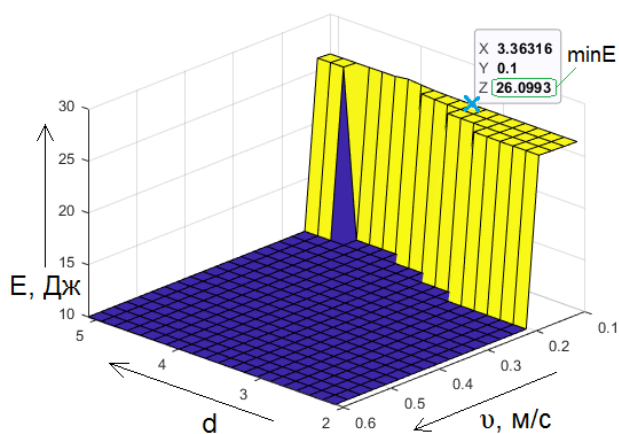


Рисунок 4.56 – Трехмерный график функции зависимости $E(v_{max}, d)$ с учетом ограничений (вариант 1)

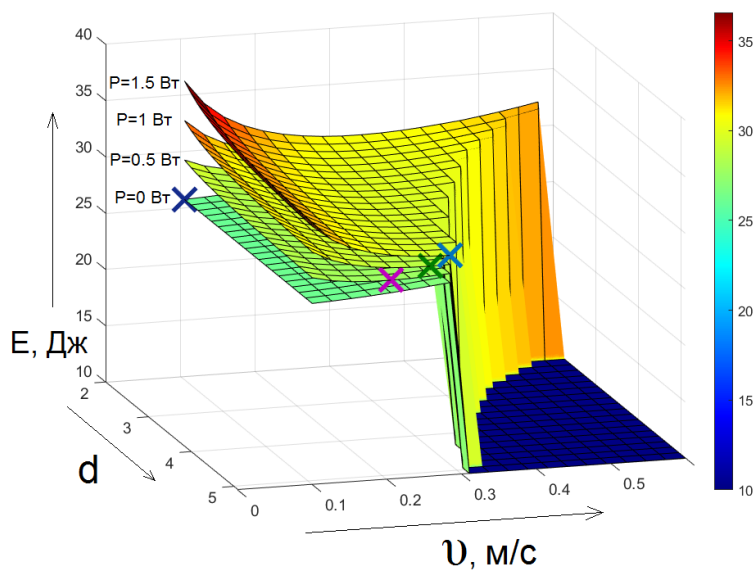


Рисунок 4.57 – Трехмерный график функции зависимости $E(v_{max}, d)$ при различных значениях мощности (P_{tool}) инструмента (вариант 2)

Таблица 4.13 – Параметры движения LIN P₁P₂

Мощность, потребляемая оборудованием, Вт	Наименование величины	Вариант 1		Вариант 2	
		$t_E \rightarrow \min$	$E \rightarrow \min$	$t_e \rightarrow \min$	$E \rightarrow \min$
0	t_E , с	3.1398	5.2288	1.2227	7.0142
0	E , Дж	26.2808	26.0993	30.6588	26.0517
0.5	t_E , с	3.1398	3.1398	1.2227	2.2265
0.5	E , Дж	27.8507	27.8507	31.2701	27.6618
1	t_E , с	3.1398	3.1398	1.2227	1.7721
1	E , Дж	29.4206	29.4206	31.8814	28.6615
1.5	t_E , с	3.1398	3.1398	1.2227	1.6080
1.5	E , Дж	30.9905	30.9905	32.4927	29.4918

Согласно данным табл. 4.13 был рассчитан потенциал энергосбережения в разрезе двух вариантов (двух итоговых конфигураций), а также соответствующий диапазон изменения производительности в процентах. Результаты расчетов представлены в табл. 4.14.

Таблица 4.14 – Оценка потенциала энергосбережения для выбранного движения при заданном критерии оптимизации ($E \rightarrow \min$, $t \rightarrow \min$)

Мощность, потребляемая оборудованием, Вт	Потенциал	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1 ($E_{\min}$) vs вариант 2 ($E_{\min}$)
0	Δt_E	66.53%	82.57%	25.45%
0	ΔE	0.695%	15.03%	0.18%
0.5	Δt_E	0%	45.08%	41.02%
0.5	ΔE	0%	11.54%	0.68%
1	Δt_E	0%	31%	43.56%
1	ΔE	0%	10.1%	2.58%
1.5	Δt_E	0%	23.96%	48.79%
1.5	ΔE	0%	9.24%	4.84%

В табл. 4.13 и 4.14 продемонстрирован имеющийся потенциал оптимизации показателей Δt_E и ΔE как в рамках одной конфигурации робота в точках P₁ и P₂, так и в пространстве всех возможных (в текущем примере двух произвольных) пар конфигураций в точках P₁ и P₂, ведущих к прямолинейному перемещению ЦТИ по вектору $\vec{P_1 P_2}$ при различных значениях мощности оснащающего инструмента.

Как следует из полученных результатов, достигнуть высоких показателей производительности и энергоэффективности возможно за счет:

а) выбора наиболее подходящих конфигураций манипулятора в точках P₁ и P₂ при проектировании прямолинейного перемещения;

б) выбора оптимальных значений скорости и ускорения для реализации прямолинейного перемещения.

Выводы

1) В ходе проведенных исследований был предложен оригинальный подход к оптимизации энергопотребления и затрат времени КР при выполнении прямолинейного РХ с учетом существующих ограничений линейной скорости и линейного ускорения. Согласно предложенному подходу, разработан алгоритм расчета времени выполнения ТО при прямолинейном пере-

мещении ЦТИ, а также сопряженных с движением затрат механической энергии в зависимости от выбора профиля графика изменения линейной скорости. Выявленные зависимости $t_E(v_{max}, d)$ и $E(v_{max}, d)$ позволили детерминировать задачи максимизации производительности и минимизации энергопотребления в рамках одной пары конфигураций КР при реализации перемещения типа LIN P₁P₂, а также задачу оптимизации при функционале качества $F(t_E, E) \rightarrow opt$.

2) Работоспособность предложенного подхода подтверждена результатами численного эксперимента на имитационной модели. Продемонстрирован имеющийся потенциал энергосбережения и увеличения производительности как в рамках одной пары конфигураций КР, так и в пространстве всех возможных конфигураций применительно к движениям типа LIN внутри ТО КРТП.

4.7 Разработка RL DDPG агента для планирования энергоэффективных траекторий коллаборативного робота по критерию минимизации затрат электрической энергии

Рассмотренные ранее варианты планирования и оптимизации движения КР с применением БЗ РКП являются расширением классических инструментов математического решения задач нелинейной оптимизации. Несмотря на ряд преимуществ, данные механизмы требуют значительных затрат вычислительных ресурсов в реальном режиме времени из-за высокой размерности задачи, что может привести к задержкам при оперативном планировании ВП или ВХ, в том числе в задаче разрешения коллизий. В таком случае видится целесообразным нахождение субоптимального решения с помощью универсального аппроксиматора, в частности нейронной сети. Решение задач оптимизации высокой размерности на базе нейронных сетей является актуальной задачей и рассматривается в научном сообществе [296, 241, 243], а также автором в работах [108, 206]. Перспективными являются вопросы оптимизации движений КР по критерию минимизации энергопотребления с помощью нейронной сети – агента, обученного с помощью технологии Reinforcement Learning (RL, обучение с подкреплением). Среди исследованных типов RL-агентов (табл. 4.15) в рассматриваемой задаче наилучшим образом себя показал rlDDPGAgent, подробные результаты исследования представлены в работе [258].

В модели внешней среды агента использовалось понятие и формализованное представление «опорной траектории» – ближайшей оптимальной (для своих установок начальной и конечной конфигураций) траектории к оптимизируемой (рис. 4.58). Информация о таких траекториях с параметрами соответствующего движения (оптимального по критерию энергоэффективности) содержится в заранее подготовленной БЗ РДП. База знаний формируется за счет итерационного решения оптимизационных задач рассмотренными механизмами для всех конфигураций соответствующего редуцированного КП, учитывающего ориентацию ЦТИ и позы КР.

Таблица 4.15 – Исследованные типы RL-агентов

Краткое обозначение агента	Наименование агента
rlQAgent	Q-learning reinforcement learning agent
rlSARSAAgent	SARSA reinforcement learning agent
rlDQNAgent	Deep Q-network (DQN) reinforcement learning agent
rlPGAgent	Policy gradient (PG) reinforcement learning agent
rlACAgent	Actor-critic (AC) reinforcement learning agent
rlPPOAgent	Proximal policy optimization (PPO) reinforcement learning agent
rlTRPOAgent	Trust region policy optimization (TRPO) reinforcement learning agent
rlDDPGAgent	Deep deterministic policy gradient (DDPG) reinforcement learning agent
rlTD3Agent	Twin-delayed deep deterministic (TD3) policy gradient reinforcement learning agent
rlSACAgent	Soft actor-critic (SAC) reinforcement learning agent

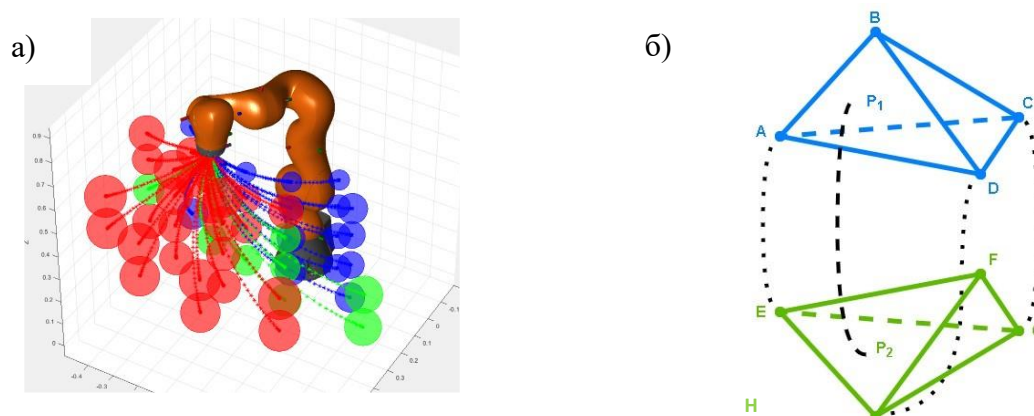


Рисунок 4.58 – Схематичное представление группы опорных траекторий: а – набор траекторий оптимизированных движений в РКП; б – опорные траектории AE, CG, DH для планируемой P_1P_2

Агенты DDPG используют алгоритм обучения, в котором обновляются модели «Actor Network» и «Critic Network» на каждом временном шаге. Настройка алгоритма обучения выполняется согласно следующим шагам [223]:

- 1) Инициализировать «Critic Network» $Q(S, A; \varphi)$ случайными значениями параметра φ и инициализировать целевые параметры φ_t теми же значениями: $\varphi_t = \varphi$;
- 2) Инициализировать «Actor Network» $\pi(S; \theta)$ случайными значениями параметров θ и инициализировать целевые параметры θ_t теми же значениями: $\theta_t = \theta$;
- 3) Для временных шагов обучения:
 - для текущего наблюдения S выбрать действие $A = \pi(S; \theta) + N$, где N – стохастический шум из модели шума;
 - выполнить действие A . Наблюдать за наградой R и следующим наблюдением S' ;
 - сохранить опыт (S, A, R, S') в буфер;

- выбрать случайную мини-партию из M событий (S_i, A_i, R_i, S_i') из буфера опыта;
- если S_i' является терминальным состоянием, установить для целевой функции значения y_i и значение R_i , в противном случае установить его в:

$$y_i = R_i + \gamma Q_t(S_i', \pi_t(S_i'; \theta_t); \phi_t); \quad (4.26)$$

- целью функции ценности является максимизация суммы вознаграждения за опыт R_i и дисконтированного будущего вознаграждения; чтобы вычислить совокупное вознаграждение, агент сначала вычисляет следующее действие, передавая следующее наблюдение S_i' из выборки опыта целевому актору. Агент находит совокупное вознаграждение, передавая следующее действие целевому критику;

- обновить параметры критики, минимизировав потери L для всех выбранных событий;

$$L = \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^M (y_i - Q(S_i, A_i, \phi))^2; \quad (4.27)$$

- обновить параметры субъекта, используя следующий выборочный градиент политики, чтобы максимизировать ожидаемое вознаграждение со скидкой;

$$\nabla_{\theta} J \approx \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M G_{ai} G_{ni}; \quad (4.28)$$

$$G_{ai} = \nabla_A Q(S_i, A_i, \phi) \text{ where } A = \pi(S_i, \theta); \quad (4.29)$$

$$G_{ni} = \nabla_{\theta \pi}(S_i, \theta); \quad (4.30)$$

где G_{ai} – градиент выхода «Critic Network» по отношению к действию, вычисленному сетью «Actor Network»; а G_{ni} – градиент выхода «Actor Network» по отношению к параметрам «Actor Network»; оба градиента оцениваются для наблюдения S_i ; J – стартовое распределение;

- обновить целевые параметры «Actor Network» и Critic в зависимости от целевого метода обновления.

Модель динамической среды rlDDPGAgent реализована в MATLAB/Simulink (рис. 4.59), функционал блоков модели представлен в табл. 4.16.

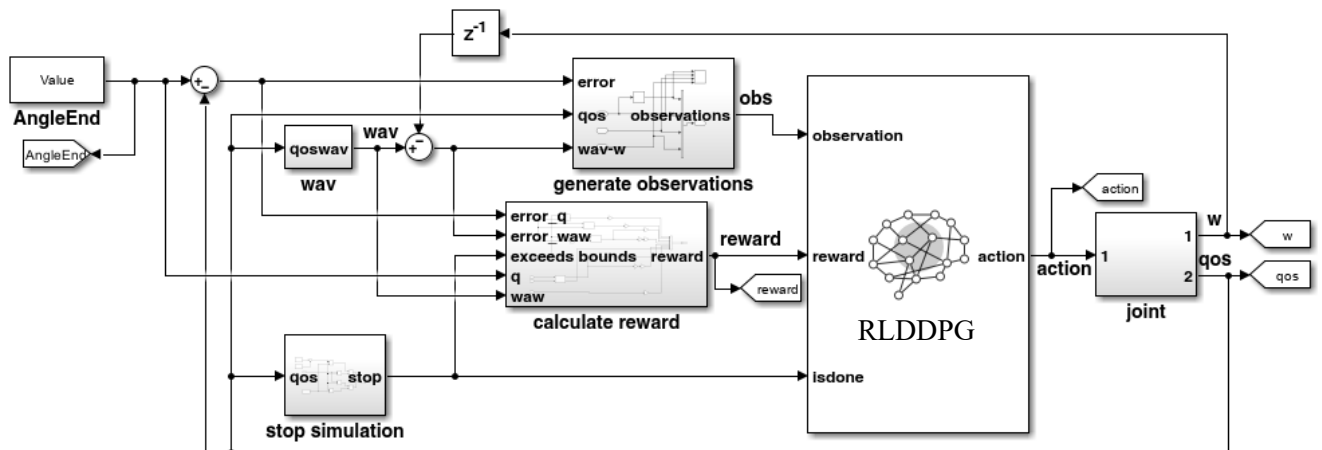


Рисунок 4.59 – Структура модели динамической среды rlDDPGAgent

Загрузка переменных внешней среды происходит из БЗ РКП. Каждой траектории в ней сопоставлено оптимизированное движение, т.е. структура динамики переменных состояния КР (в частности, угла положения и угловой скорости по каждому шарниру). В модели динамической среды происходит генерация промежуточных переменных, ключевой из которых является взвешенная усредненная опорная траектория (а именно, соответствующие переменные угла положения и скорости), формируемая в блоке “Wav” из 3 ближайших траекторий к оптимизируемой, то есть с минимальной ошибкой отклонения по углу.

Таблица 4.16 – Функциональность блоков модели динамической среды rlDDPGAgent

Наименование блоков	Функциональность
RLDDPG	Функциональность RL агента
Stop simulation	Функция, реализующая остановку эпизода симуляции, если удовлетворяется условие: $(qos \geq (constantE + 0.01)) AND ((constantE + 0.01) \geq constant1) OR$ $(qos \leq (constantE + 0.01)) AND ((constantE + 0.01) < constant1))$
Generate observation	Блок, генерирующий значения переменных, характеризующих внешнюю среду RL агента; входные переменные: а) интеграл ошибки; б) текущий угол положения; в) разница между опорной скоростью и текущей
Calculate reward	Ключевой блок, содержащий функцию расчета вознаграждения (предусмотрены подфункции положительного вознаграждения и штрафа)
Wav	Блок формирования опорного профиля переменной угловой скорости (приведенной к механизму i-го шарнира КР), предоставляемой RL агенту в качестве эталонного сигнала (рис. 4.60);
Joint	Блок, реализующий физическую природу переменных состояния q, ω, ε (или a);
AngleEnd	Блок-генератор угловой координаты соответствующего шарнира в точке назначения

Агент обучается, максимизируя вознаграждение по принципу уменьшения ошибки положения, но в пределах скоростных режимов средне взвешенной опорной траектории (движения), формируя политику энергоэффективного движения в заданное положение.

Общий алгоритм обучения RL агента и его использование в задаче планирования и оптимизации движения представлен на рис. 4.61. Тестирование предложенного решения показало, что при наличии РКП достаточной размерности субоптимальное решение получаемой RL-агентом находится в пределах отклонения [1.3 – 9.8 %] от оптимального решения при этом время расчета сокращается в 2 – 3 раза.

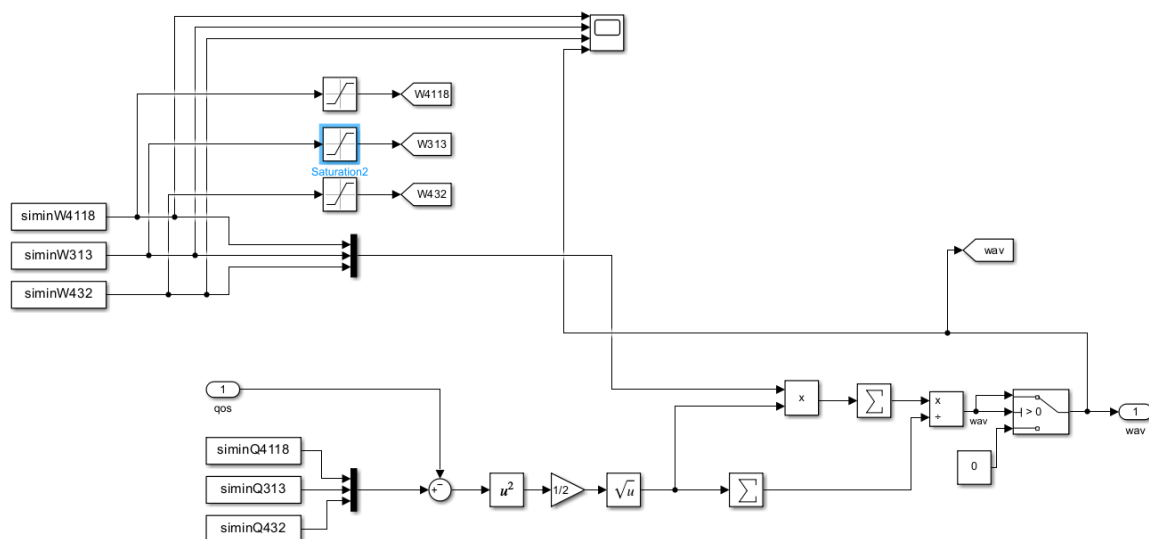


Рисунок 4.60 – Блок формирования опорного профиля угловой скорости

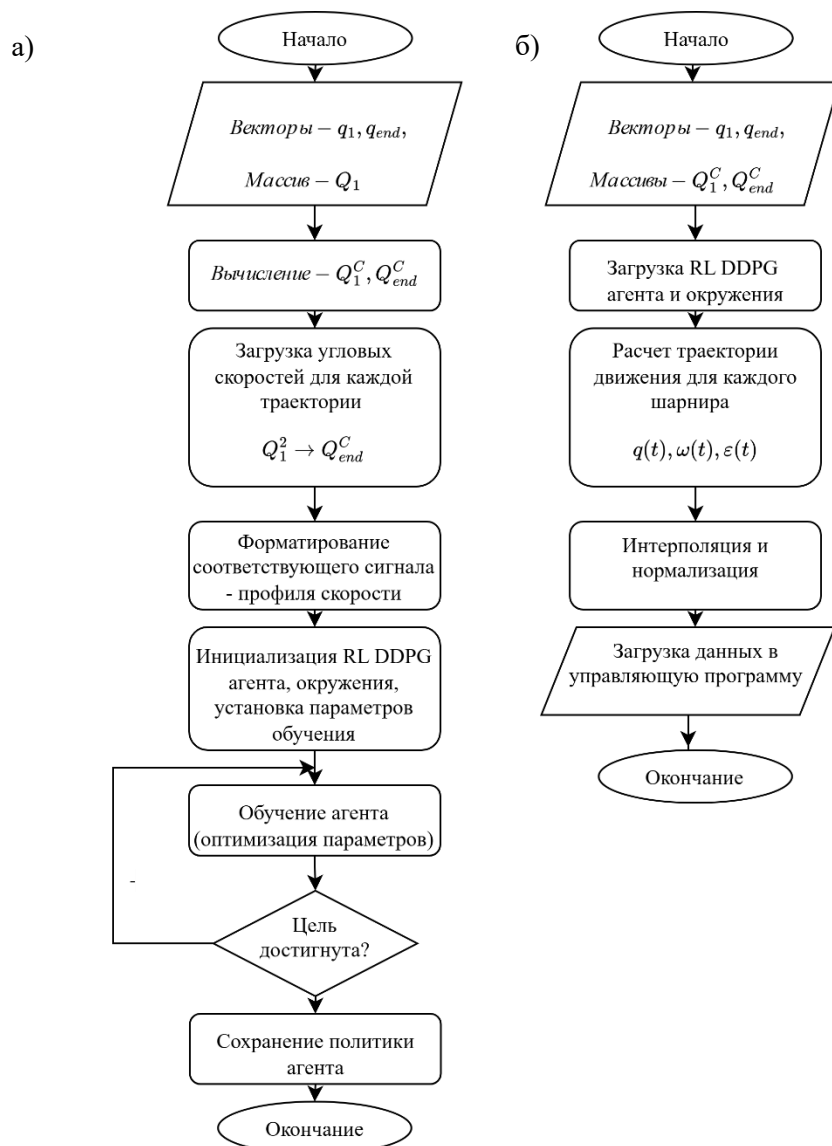


Рисунок 4.61 – Алгоритмы для RL DDPG агента: а – обучения; б – использования агента для оптимизации траектории по КМЭ

На рис. 4.62 представлен пример результатов планирования и оптимизации движения КР RL агентом, в табл. 4.17 – описание используемых на рисунке обозначений.

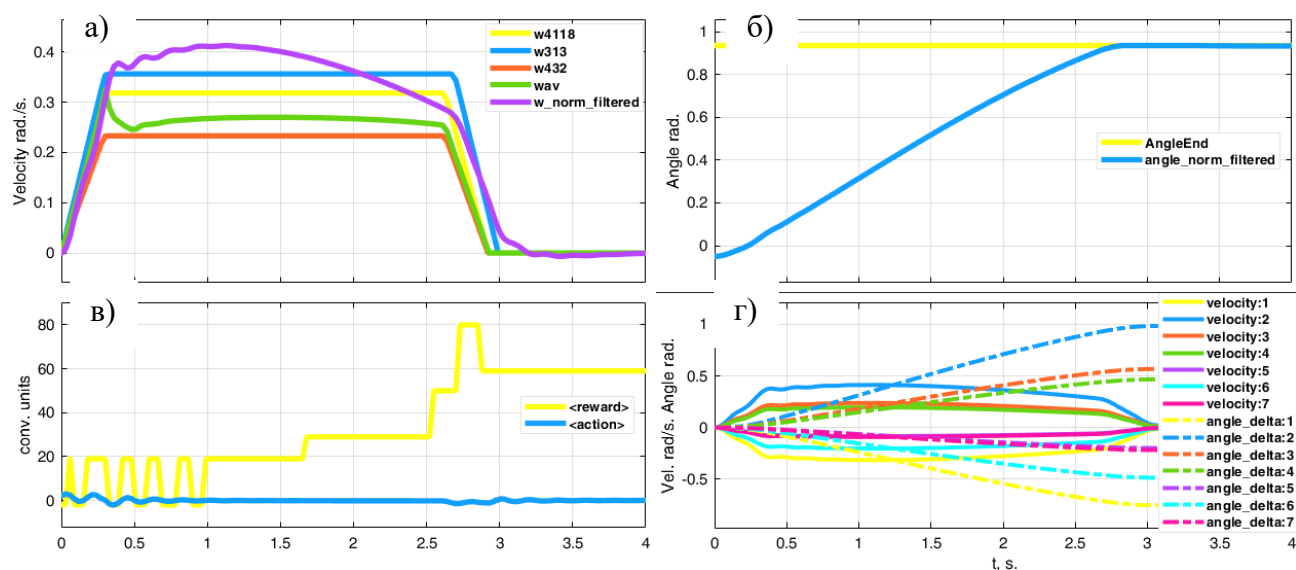


Рисунок 4.62 – Пример результатов планирования и оптимизации движения КР RL агентом: а – профили угловых скоростей для одного шарнира КР; б – динамика угла положения одного шарнира КР (по профилю скорости, полученным RL агентом); в – динамика функции реакции агента и функции вознаграждения; г – динамика углов положения и угловых скоростей шарниров КР

Таблица 4.17 – Обозначения к рис. 4.61

Обозначение переменной	Описание переменной
w4118, w313, w432	Угловые скорости шарнира КР, характерные для движения по опорным траекториям
wav	Угловая скорость по «средневзвешенной» опорной траектории
w_norm_filtered	Нормализованная и отфильтрованная угловая скорость, сгенерированная RL-агентом
reward	Значение функции вознаграждения
action	Значение функции действия агента
velocity:1 - velocity:7	Угловые скорости соответствующих шарниров КР
angle_delta:1 - angle_delta:7	Изменение углов положения соответствующих шарниров КР

Рассчитанное движение агентом имеет отклонение от траектории с самым минимальным потреблением энергии в данном случае не более 1,3 %. Предложенный подход применения агента RL DDPG для оптимизации траекторий по КМЭ может быть использован как аналог классическим методам оптимизации.

Выводы

Предложен подход и представлен алгоритм поиска субоптимальных движений КР (реализующих ВП и ВХ) по критерию минимизации энергопотребления на базе нейронной сети – RL DDPG агента. Отличительной особенностью его является достижение необходимого результата с незначительным снижением точности, но со значительной экономией вычислительных ресурсов.

Выводы по главе 4

Предложена математическая постановка однокритериальных и многокритериальных задач оптимизации для КРТП, формирующая теоретические основы при создании алгоритмического и программного обеспечения для технологических комплексов на базе ПР и КР, а также систем управления ими. Показана целесообразность выбора задач оптимизации и критериев эффективности, включая максимизацию производительности, минимизацию энергозатрат и максимизацию степени безопасности, а также их комбинации с учетом классифицируемых частей ТО, и обосновано наличие встроенных в ИСУ дополнительных оптимизационных механизмов, позволяющих обеспечить эффективное функционирование КР с человеком в недетерминированной среде с учетом текущей ситуации в рабочей зоне.

Показана значительное влияние методов и алгоритмов интерполяции траекторных перемещений на качество движения КР в соответствии с критериями, установленным в КРТП. Результаты проведенных экспериментальных исследований и результаты сравнительного анализа демонстрируют важность выбора актуального в условиях специфики конкретного КРТП алгоритма интерполяции траекторных перемещений КР. Актуальный выбор обеспечит минимизацию отклонения траекторных перемещений от заданных, а также позволит существенно сократить энергозатраты и повысить производительность. Сформированы элементы базы знаний по выбору методов интерполяции для последующей реализации управления в КРТП по выбранным критериям эффективности.

Разработаны теоретические основы и метод снижения размерности задач оптимизации АСУ оптимального управления КРТП за счет введения ограничений операционного и конфигурационного пространств КР, обеспечивающих эффективные для текущей ТО пространственные расположения ЦТИ КР. Реализован алгоритм оптимизации движения КР по критериям производительности ТО и энергоэффективности при оперативном планировании ВП и ВХ без необходимости разрешения коллизий. Отличительной особенностью алгоритма является использование БЗ редуцированных КП, содержащей уставки и дополнительные ограничения для решателей нелинейной задачи оптимизации. Использование предложенного алгоритма для оперативного планирования движений, реализующих ВП и ВХ, позволяет за счет снижения объема вычислений сократить общее время реакции системы управления на задание.

Предложен подход и представлен алгоритм поиска субоптимальных движений КР (реализующих ВП и ВХ) по критерию минимизации энергопотребления на базе нейронной сети – RL DDPG агента. Алгоритм позволяет существенно снизить нагрузку на вычислительные ресурсы в случае решения задач оптимизации в РКП.

Глава 5. Анализ и синтез методов оптимизации управления коллаборативным роботом в условиях недетерминированной среды рабочей зоны коллаборативного роботизированного технологического комплекса

Планирование движений КР в совместном рабочем пространстве с оператором является не тривиальной многокритериальной задачей оптимизации. Недетерминированная среда определяет высокую вероятность возникновения коллизий по ходу движения звеньев КР и инструмента. Основными критериями качества таких движений являются максимизация безопасности (гарантированный результат разрешения коллизий), времени исполнения движения, времени планирования, плавности движения (отсутствие высоких значений рывков и ускорений) и энергоэффективности.

Задачи организации ТП на базе роботизированных комплексов, функционирующих в совместной с человеком рабочей зоне, в значительной степени ответственнее и сложнее задач проектирования процессов с закрытым контуром безопасности [44] на базе общепромышленных роботов. Среди наиболее значимых отличий необходимо отметить:

- требования по обеспечению функционирования нескольких уровней безопасности (в том числе реализующих предотвращение столкновений с объектами коллизий) в зависимости от степени и формата вовлечения КР и человека в часть ТП [44];

- требования по обеспечению функционирования механизмов планирования и реализаций движений КР по задачам, формируемым в реальном времени оператором или модулями системы управления [358];

- требования по оптимизации движений КР, по критериям максимизации производительности энергоэффективности, плавности движения, эргономики и др. [62, 100, 126, 221, 326, 337].

Существующие алгоритмы планирования движений по разрешению коллизий при интеграции в ТП на базе КР не всегда гарантируют удовлетворительный результат в условиях ограниченного времени на расчет, а также нуждаются в дополнительной настройке.

В главе приведены результаты исследований по анализу, модернизации и разработке новых алгоритмов планирования и оптимизации движений при разрешении коллизий в недетерминированной среде КРТП. Представленные алгоритмы базируются на решениях, предложенных в предыдущих главах, и дополняют их.

5.1. Исследование алгоритмов разрешения коллизий при длинноходных перемещениях коллаборативного робота в полном и редуцированных пространствах

Недетерминированная среда для КРТП, в отличие от РТП на базе РТК с закрытым контуром безопасности, является нормальным явлением, изменчивость расположения объектов рабочей зоны приводит к возникновению коллизий. Механизмы разрешения коллизий для систем управления

КРТП являются их неотъемлемой частью. Необходимость планирования движений с учетом разрешения коллизий при исполнении частей ТО оказывает существенную нагрузку на вычислительные устройства, усложняя математическую составляющую задачи оптимизации в позиционном, контурном и траекторном режимах управления в реальном времени. Результаты проведенного анализа существующих алгоритмов разрешения коллизий позволили выделить как наиболее перспективные для задач целевого использования в ИСУ КРТП следующие 3 группы :

- методы градиентной оптимизации, например, CHOMP [216], TRAMP;
- алгоритмы поиска случайного пути, например, RRT [286];
- методы, основанные на глубоком обучении, например DeepLearning, RL [223, 296] и др.

При этом по аналогии с планированием движения без необходимости разрешения коллизий, рассмотренным в гл. 4, планирование движения по разрешению коллизий может выполняться как в полном пространстве, так и в РДП. Переход в РДП, как показали результаты исследования, может значительно снизить нагрузку на вычислительные устройства.

В случае необходимости разрешения коллизии в общем КП (Q), возникшей в результате планирования движения в режиме позиционного управления между двумя точками (точкой начала движения и точкой назначения):

$$P_1 P_2 \rightarrow Pos_mode(Q_1, F_{IK}(TF_2, Q_{IG})), \quad (5.1)$$

где Pos_mode – оператор режима позиционного управления; Q_1 – начальная конфигурация КР; F_{IK} – функция решения ОЗК; TF_2 – пространственное расположение КР в точке назначения; Q_{IG} – начальное предположение конфигурации в точке назначения; а равно в режиме контурного или траекторного управления стандартным способом разрешения коллизии является применение алгоритма из множества $M_{Collis} = \{RRT, CHOMP, TRAMP \dots\}$;

Применение универсальных оптимизационных алгоритмов либо алгоритмов поиска случайного пути при разрешении коллизий с учетом специфики рассматриваемого класса КРТП предлагается осуществлять в рамках режима траекторного управления в постановке задачи оптимизации 4 или 5 (гл. 4). Схематично варианты траектории движения КР отображены на рис. 5.1: представлена траектория, сформированная в результате работы универсального алгоритма разрешения коллизий в общем КП Q (рис. 5.1, а), и траектория, сформированная модернизированным универсальным алгоритмом, имеющим в качестве БЗ массив опорных конфигураций РКП (рис. 5.1, б). Первоначальное движение, траектория которого схематично представлена в виде пунктирной линии, несвободно от коллизий ввиду наличия на пути следования КР препятствия, модель которого в пространстве рабочей зоне КР представлено в виде аппроксимирующего тела (сферы). Тогда математическая постановка задачи планирования движения при разрешении коллизии для универсальных алгоритмов (рис. 5.1 а) сводится к нахождению такого закона управления:

$$u(t) = f(M_{Collis}, P_1, P_2, P_{OB}\{\dots\} \rightarrow S_{OB}, Traj_mode(\dots)), \quad (5.2)$$

при ограничениях:

$$\left\{ \begin{array}{l} u(t) \rightarrow q(t); \\ q(t_f) = Q_2 \pm \delta_q; \\ F_{FK}(Q_2) = TF_2 \pm \delta_{TF}; \\ q(t_0) = Q_1; \\ q(t_i) \rightarrow S_{R_i} \cap S_{OB_i} = 0, \\ |\dot{q}(t_i)| \leq \dot{q}^{lim}, \quad |\ddot{q}(t_i)| \leq \ddot{q}^{lim}, \quad |\ddot{q}(t_i)| \leq \ddot{q}^{lim}, \text{ для } \forall i \in \overline{1, n}, \end{array} \right. \quad (5.3)$$

где δ_q – ошибка рассогласования в КП; δ_{TF} – ошибка рассогласования в ОП, S_{R_i} – геометрическое множество точек поверхности звеньев и оснастки КР в момент времени t_i ; S_{OB_i} – геометрическое множество точек поверхности объектов коллизий в момент времени t_i .

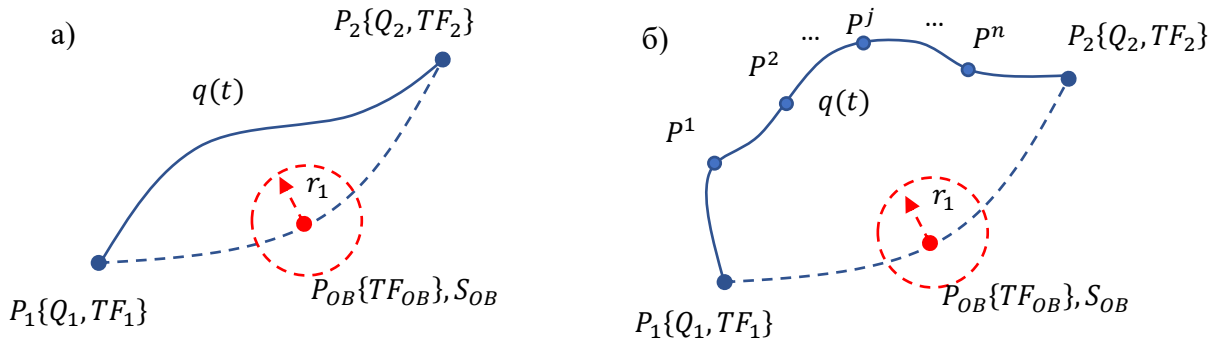


Рисунок 5.1 – Траектории движения КР при разрешении коллизии; а – для универсального алгоритма по двум точкам; б – для алгоритмов с использованием БЗ РКП

При наличии возможности разрешения коллизии в РДП (с использованием РКП) предлагается оригинальная математическая постановка задачи планирования движения для оптимизационных алгоритмов (рис. 5.1 б), которая сводится к нахождению с учетом ограничений (5.2) закона управления:

$$u(t) = F_{sm}(u^*(t)), \quad (5.4)$$

$$u^*(t) = \begin{cases} f_1(M_{Collis}, P_1, P^1, P_{OB}\{\dots\} \rightarrow S_{OB}, Traj_mode(\dots)); \\ f_2(M_{Collis}, P^1, P^2, P_{OB}\{\dots\} \rightarrow S_{OB}, Traj_mode(\dots)); \\ \dots \\ f_n(M_{Collis}, P^n, P_2, P_{OB}\{\dots\} \rightarrow S_{OB}, Traj_mode(\dots)), \end{cases} \quad (5.5)$$

где $F_{sm}(\)$ – операция интерполяции; $P^1, P^2 \dots P^n$ – промежуточные точки, образующие вместе с точкой начала и точкой назначения путь движения КР и полученные в результате направленного выбора из БЗ РДП, т.е. каждая $P^j\{Q_j^{red}, TF_j\}$ определена в РКП соответствующей части ТО, пространственные расположения образуют эффективные технологические позы, а звенья и инструмент КР не вызывают коллизии с объектами рабочей зоны, т.е. $\sum_1^n (S_{R_j}(Q_j^{red}) \cap S_{OB}) = 0$.

Преимуществом постановки задачи в варианте (5.4) (при входном аргументе $M_{Collis} = \{RRT, CHOMP, TRAMP \dots\}$) по отношению к (5.2) является сокращение расстояния от точки начала движения до точки назначения в КП, что гарантирует повышение вероятности сходимости. Тем не менее в обоих вариантах для универсальных алгоритмов оптимизации итерация поиска каждой новой приемлемой конфигурации КР сопровождается проверкой на столкновения звеньев КР и инструмента со всеми детерминированными объектами коллизий рабочей зоны, что требует значительного количества вычислительных ресурсов. Принимая во внимание рассмотренный недостаток, в работе предложен оригинальный алгоритм разрешения коллизий *basePoints* (рис. 5.2), расширяющий множество M_{Collis} , планирующий движение КР на основе получения кратчайшего пути алгоритмом Дейкстры [231] по ненаправленному графу G , ассоциированному с текущей частью ТО и идентифицированным РДП:

$$G = (V, E, w), \quad (5.6)$$

где $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – непустое множество вершин; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\} \subset V \times V$, причем каждое ребро $e_i = \{v_j, v_k\}$ представляет ненаправленную связь между соответствующими вершинами; каждая вершина v_j графа G соответствует определенной конфигурации Q_j^{red} из РКП; $G.V.Inf$ – ячейка со структурой данных, содержащая исчерпывающую информацию об опорной точке массива *conf0* (табл. 5.1), ассоциированного с вершиной графа; $w(e_i)$ – вес ребра e_i .

Вершины графа ассоциируются только с теми опорными точками, конфигурация КР в которых не вызывает коллизий с объектами окружения, заданными массивом объектов *env* (табл. 5.1), этот факт определяется на основе анализа массива маски коллизий *conf0mask* (табл. 5.1). Факт наличия или отсутствия ребра графа между двумя вершинами предлагается параметризовать степенью удаленности соответствующих точек РДП (в формате конфигураций, пространственных положений или пространственных расположений).

В работе в качестве меры степени удаленности была применена норма для векторного пространства, в частности в экспериментах текущего раздела – L_2 -норма (Евклидова норма) для пространственных положений:

$$dist = norm((G.V.Inf\{i, 1\}.TF_0\{1,1\}(1:3,4) - G.V.Inf\{j, 1\}.TF_0\{1,1\}(1:3,4)), \quad (5.7)$$

где TF_0 – матрица трансформации для соответствующей опорной точки РДП.

Если $dist_{j,k} > dist_{min}$, то $e_i = \{v_j, v_k\} \in E$ и $w(e_i) = dist_{j,k}$, иначе ребро отсутствует. Параметр $dist_{min}$ предлагается устанавливать эмпирически в зависимости от критериев эффективности, предъявляемых к быстрдействию алгоритма поиска кратчайшего пути. В текущем разделе в ходе проведения экспериментов параметр был принят $dist_{min} = 0,18$.

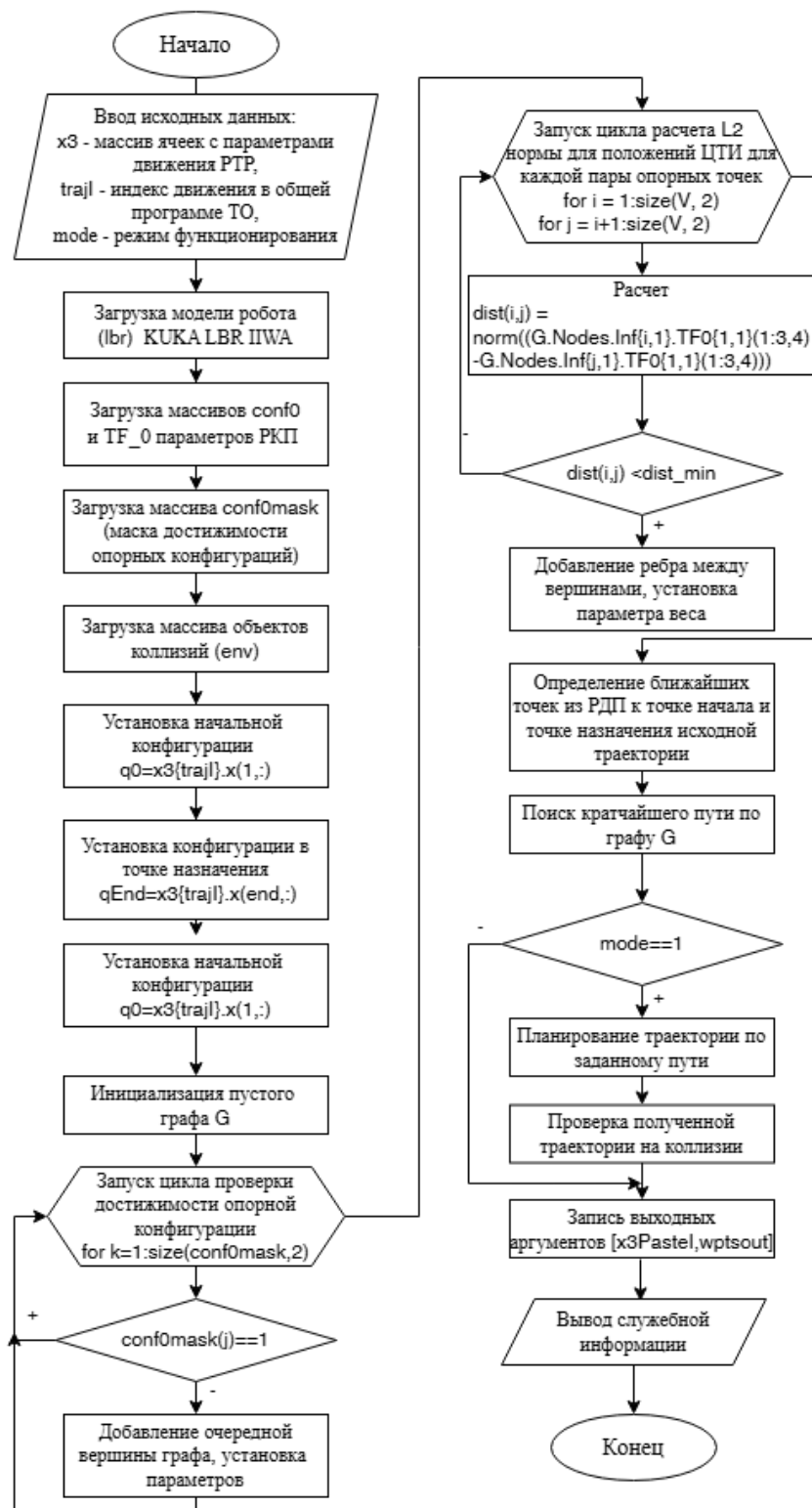


Рисунок 5.2 – Алгоритм разрешения коллизий basePoints

Полученный по построенному графу G кратчайший путь $path$ между текущей точкой и точкой назначения в обход коллизии далее предлагается использовать как аргумент функции в постановки задачи (5.4). Итоговое сглаженное движение по пути $path$ окончательным образом проверяется на наличие коллизий и в случае отрицательного прогноза коллизий передается на исполнение в ЛСУ КР.

Таблица 5.1 – Описание программных переменных алгоритма basePoints1

Программная переменная	Описание
x3PasteI	Ячейка размерностью 1×1 , содержащая перепланированную траекторию движения в КП
wptsout/path	Массив точек пути в КП размерностью $7 \times n$, где n – количество точек пути
x3	Ячейка размерностью 1×1 , содержащая исходную траекторию движения в КП
lbr	Программный объект (математическая модель робота)
conf0mask	Маска (массив) достижимости опорных конфигураций РКП, $conf0mask_j \in [0, 1]$ для РДП Q^{red}
conf0	Массив опорных конфигураций РКП для РДП Q^{red}
TF_0	Массив матриц трансформации для ЦТИ, соответствующий опорным конфигурациям РКП для РДП Q^{red}
env	Массив объектов коллизий с набором параметров
trajI	Индекс траектории в комплексе
mode	Режим работы функции <i>basePoints1(...)</i> , реализующей алгоритм (см. рис. 5.2)

Оригинальный алгоритм поддерживает два режима, в первом случае функцией возвращается спланированная траектория движения, во втором – возвращается только путь через опорные конфигурации, передаваемый в качестве входного аргумента в функции, реализующие универсальные алгоритмы. Объявление одноименной функции *basePoints1 (...)*, реализующей алгоритм, представлено в листинге 5.1:

Листинг 5.1

```
function [x3PasteI,wptsout]=basePoints1(x3,trajI,mode)
% Функция планирования траектории перемещения КР через опорные
% точки текущего ТП (массивы Q1, conf0 и conf_all)
% input data:
% x3 - ячейка, содержащая запланированную траекторию движения,
%      но в данный момент несвободную от коллизий
% trajI - индекс (порядковый номер) текущей траектории в общей
%         программе технологической операции;
% mode - режим, 1) "Single" - функция строит траекторию
%         самостоятельно
%         2) "Double" - функция предоставляет опорный
%         путь для алгоритмов CHOMP и RRT
% output data:
% x3PasteI - ячейка, содержащая обновленную траекторию;
% wptsout - массив промежуточных опорных точек (path), свободных
% от коллизий
...
end
```

Поиск коллизий КР и объектов рабочей зоны (т.е. проверка условия $S_{R_i} \cap S_{OB_i} = 0$ для планируемых движений) исследуемых модернизированных алгоритмов разрешения коллизий проводилась с помощью разработанной функции *colCheck(...)*, базирующейся на встроенной функции поиска коллизий *checkCollision(...)* пакета RST Matlab. В случае, если итоговая про-

верка на наличие коллизий по траектории, полученной алгоритмом basePoints, показала положительный прогноз, найденный путь через опорные точки РДП предлагается передать в качестве аргумента в функции реализации универсальных алгоритмов CHOMP или RRT. Повысить быстродействие расчетов универсальных алгоритмов CHOMP или RRT также предлагается за счет использования БД РКП. Предложенный модернизированный алгоритм разрешения коллизий manRRT на базе RRT с опорными точками представлен на рис. 5.3 (для него была разработана пользовательская функция *manRRT (...)*). Предложенный модернизированный алгоритм разрешения коллизий manCHOMP на базе CHOMP с опорными точками представлен на рис. 5.4 (для него была разработана пользовательская функция *manCHOMP (...)*).

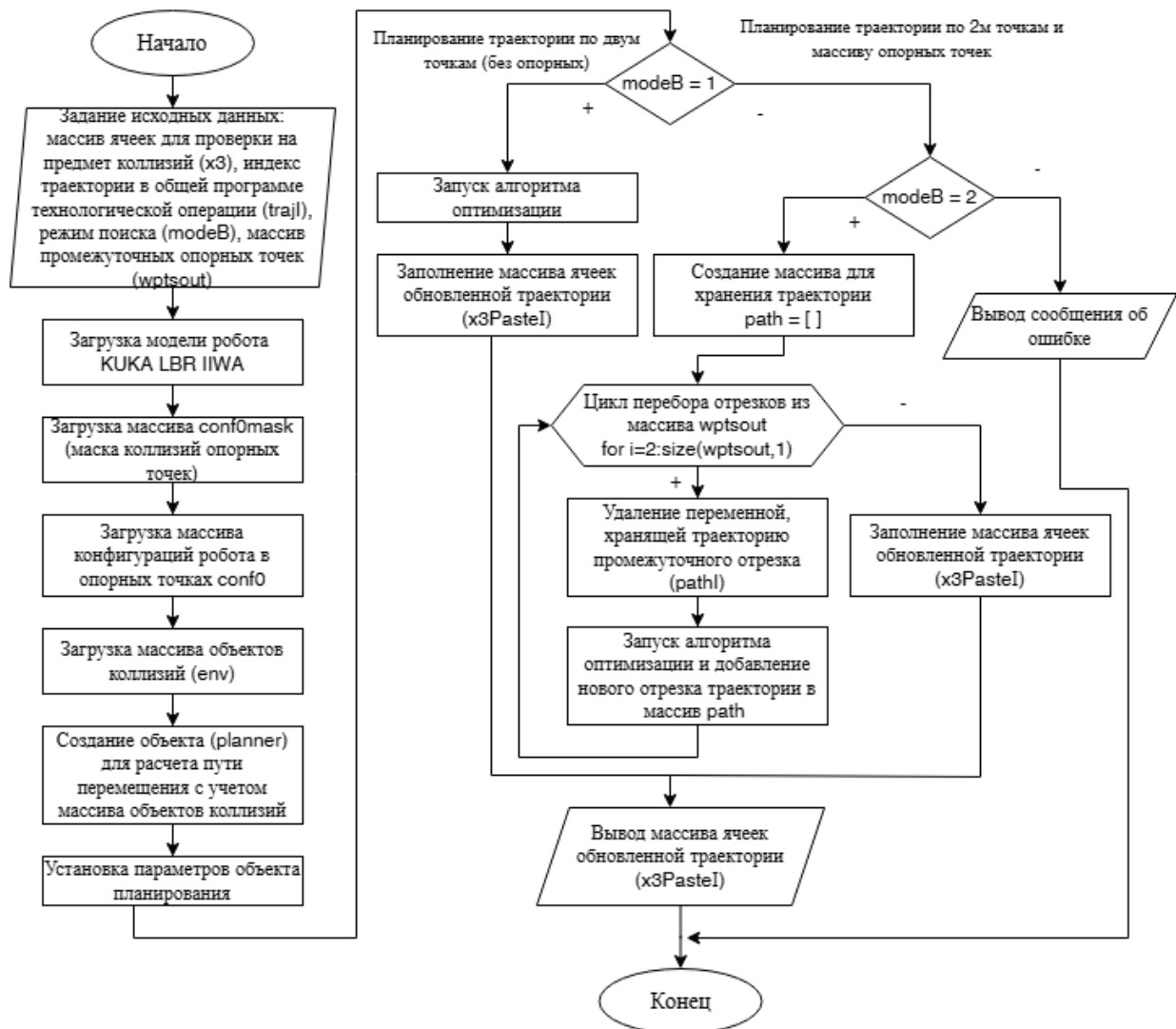


Рисунок 5.3 – Алгоритм разрешения коллизий manRRT

Отличительной чертой представленных алгоритмов являются возможности нахождения новой траектории для разрешения коллизий по заранее подготовленному пути из опорных конфигураций РДП. Для подтверждения эффективности функционирования оригинального алгоритма basePoints и модернизированных manRRT и manCHOMP был проведен численный эксперимент на комплексе имитационных моделей.

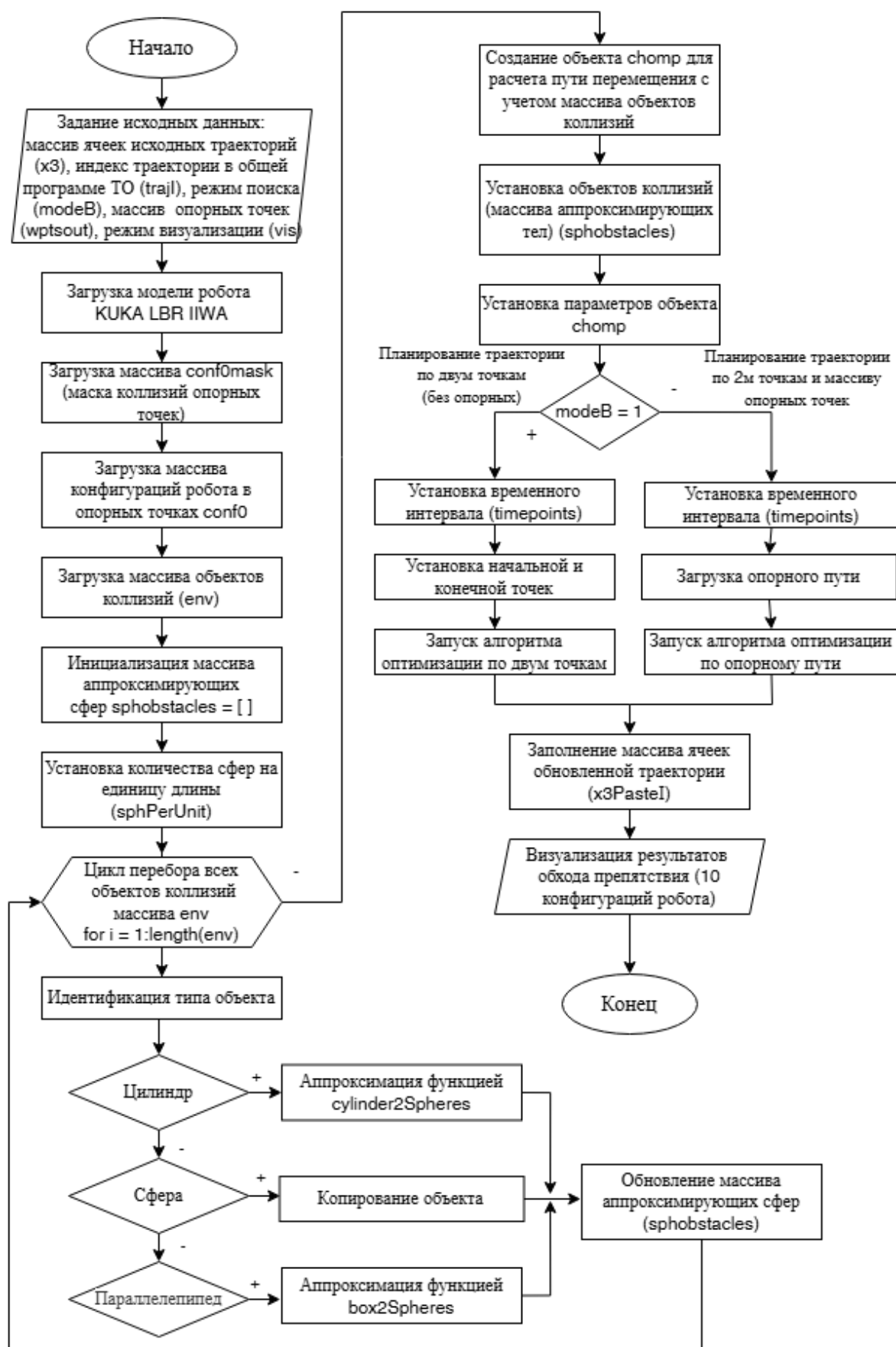


Рисунок 5.4 – Алгоритм разрешения коллизий manCHOMP

Эксперимент

В качестве цели рассматривалась оценка эффективности группы алгоритмов разрешения коллизий RRT, CHOMP, basePoints, manRRT и manCHOMP при планировании движений КР в недетерминированной среде.

Исследование проводилось на пример задач исполнения ТО по обработке изделий, преимущественно расположенных в горизонтальной плоскости. В качестве критериев эффективности были приняты:

- максимизация вероятности разрешения коллизии (Pr^+);
- минимизация времени, необходимого на расчет нового движения ($\bar{t}_{calc}^+$);
- минимизация времени исполнения нового движения ($\bar{t}_{move}^+$);
- минимизация общего времени разрешения коллизии ($\bar{t}_{calc}^+ + \bar{t}_{move}^+$);
- минимизация потребляемой энергии, сопряженной с перепланированным движением (E_{total});
- минимизация максимального углового рывка нового движения ($\ddot{q}_{max}$);
- минимизация длины траектории в обобщенных координатах (l_q^s);
- оптимизация комбинаций переменных.

Дополнительно в качестве оцениваемых переменных рассматривались относительные единицы, связывающие значения переменных нового движения и изначально запланированного (отношение средних длин траекторий, отношение средних максимальных рывков, отношение средней потребленной энергии и т.д.).

Первоначальная гипотеза заключается в предположении, что предложенный оригинальный алгоритм basePoints при использовании БЗ РДП будет характеризоваться меньшими требованиями к вычислительным ресурсам, по сравнению с универсальными алгоритмами разрешения коллизий, а в целом basePoints и модернизированные manRRT и manCHOMP обеспечат более высокие показатели вероятности разрешения коллизий по сравнению с RRT и CHOMP. В качестве дополнительного предположения целесообразно определить возможность выявления зависимостей и закономерностей, позволяющих выстроить приоритетность вариантов использования алгоритмов разрешения коллизий в зависимости от состояния окружающей среды и декларированных критериев эффективности ТП. В эксперименте параметры настроек для предложенных алгоритмов были выбраны согласно данным табл. 5.2.

В ходе эксперимента рассматривался ТП из общего класса процессов, рассмотренных ранее в гл. 2. Структурные единицы рабочей сцены ТП представлены массивом объектов коллизий (окружение КР), который при проведении исследований включал аппроксимирующие тела для рабочего стола, станции смены инструментов, обрабатываемых изделий, инструмента и нестационарных объектов коллизий (аппроксимирующее тело – сфера). Для алгоритмов RRT и

basePoints трехмерные модели основных объектов окружения [355] представлены на рис. 5.5, а (формат *.stl, *.dae и др.), для алгоритма CHOMP объекты аппроксимируются сферами (рис. 5.6) с заданным шагом детализации.

Таблица 5.2 – Исследуемые алгоритмы и значения параметров

Наименование алгоритма	Базовые параметры алгоритма
basePoints	<i>distancemax=0.18;</i> <i>algorithm='positive' % Dijkstra algorithm</i> <i>Q=conf0;</i>
RRT	<i>planner = manipulatorRRT(lbr,env);</i> <i>planner.EnableConnectHeuristic=0;</i> <i>planner.MaxConnectionDistance = 0.02;</i> <i>planner.ValidationDistance = 0.1;</i> <i>planner.SkippedSelfCollisions = 'parent';</i> <i>planner.MaxIterations=1000;</i> <i>numIter = 20;</i>
manRRT (RRT+BP)	Объединяют параметры алгоритмов basePoints и RRT
CHOMP	<i>chomp = manipulatorCHOMP(lbr);</i> <i>chomp.SphericalObstacles = sphobstacles;</i> <i>chomp.SmoothnessOptions = chompSmoothnessOptions(SmoothnessCostWeight=1e-2);</i> <i>chomp.CollisionOptions = chompCollisionOptions(CollisionCostWeight=10);</i> <i>chomp.SolverOptions = chompSolverOptions(Verbosity="none", LearningRate=7);</i> <i>timeEnd = 5;</i> <i>timestep = 0.1;</i> <i>trajtype = "interp1"</i>
manCHOMP; (CHOMP+BP)	Объединяют параметры алгоритмов basePoints и CHOMP

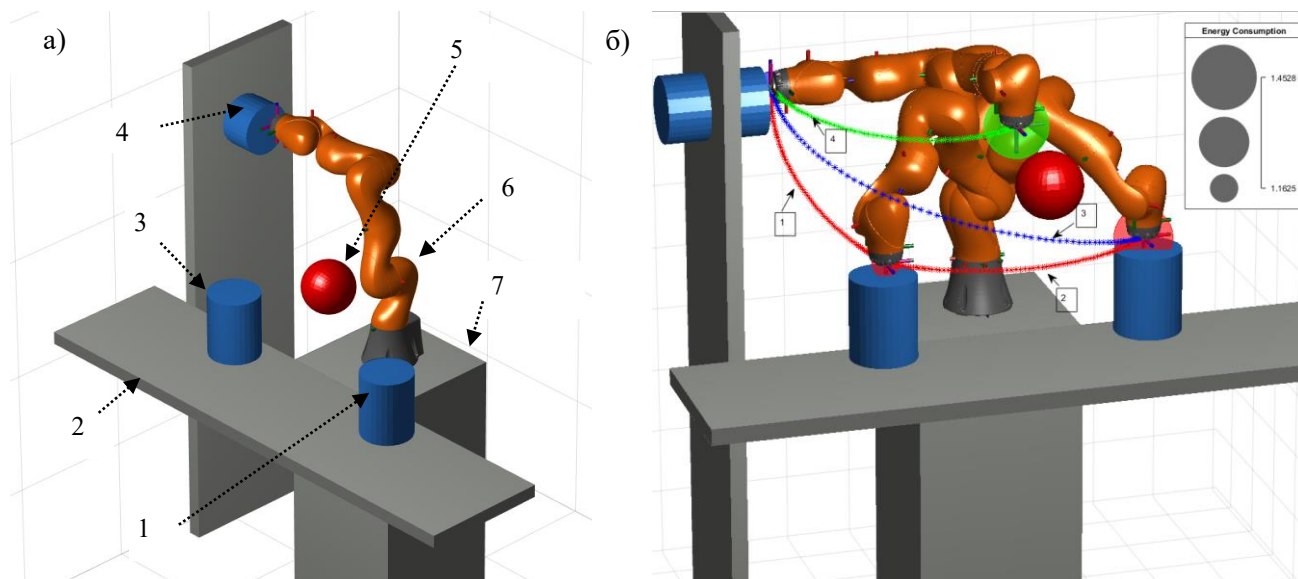


Рисунок 5.5 – Модель рабочей сцены КР: а) – КР в момент захвата инструмента (1 – изделие; 2 – стол; 3 – изделие; 4 – станция смены инструмента; 5 – объект коллизии; 6 – КР; 7 – тумба); б) – 4 пространственных расположения КР и 4 траектории перемещения ЦТИ при выполнении ТО

Подставлены четыре траектории (рис. 5.5, б траектории помечены цифрами), полученные в результате планирования движений, реализующих части ТО (а именно ВХ и ВП) без учета

нестационарного объекта коллизий, изображенного в виде сферы, имитирующего объем движений кисти оператора. В случае попытки реализации таких движений произойдет столкновение звеньев КР с объектом коллизии на траекториях 2 и 3. В эксперименте РХ не рассматривался в соответствии с ограничениями для задачи оптимизации, отраженными в гл. 2.

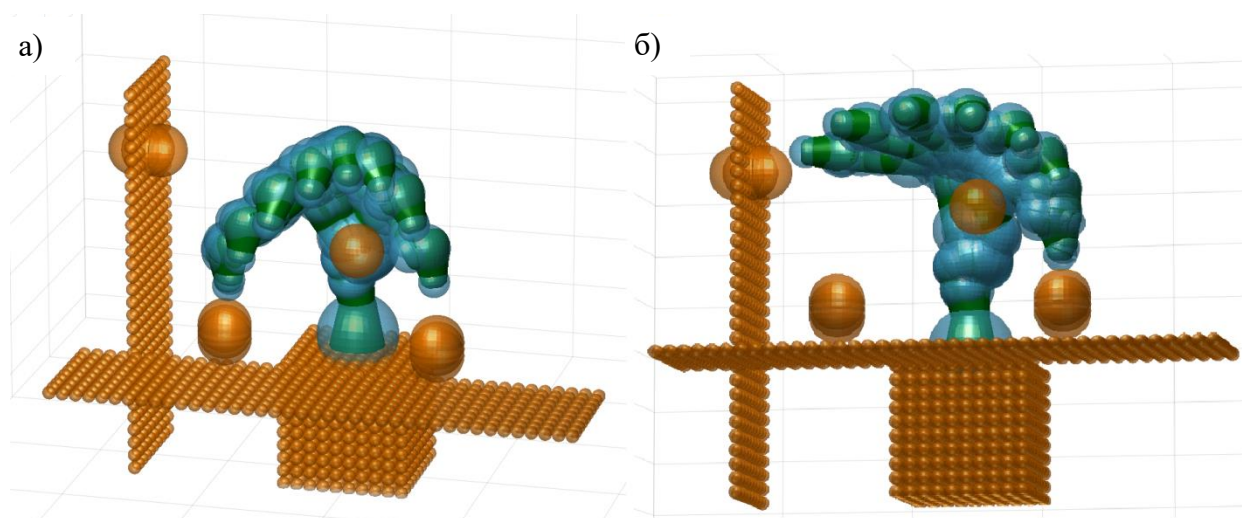


Рисунок 5.6 – Моделирование объектов рабочей зоны для алгоритма CHOMP: а – движение КР по траектории 2; б – движение КР по траектории 3 (см. рис. 5.5, б)

В эксперименте для поддержки алгоритмов, использующих опорные конфигурации, РКП (Q^{red}) было определено согласно подходу, отраженному в гл. 2. Рассматривалось 1720 движений по шаблону РТР в режиме максимальной производительности, реализующих ВП и ВХ. Начальные и конечные конфигурации КР преимущественно были сконцентрированы в 4-х зонах: возле станции смены инструмента, в позиции для режима ожидания над рабочим столом и в двух позициях над обрабатываемыми изделиями. Расположение нестационарного объекта коллизии на каждой итерации расчета выбиралось таким образом, чтобы объект не создавал коллизии с КР в точках начала и точках назначения, но при этом находился в зоне объема движений КР, тем самым, имитируя присутствия кисти (кистей) оператора в зоне обработки и ее окрестностей.

Из 1720 движений по шаблону РТР 590 движений вызвали коллизию с нестационарным объектом. Для каждого состояния была рассмотрена реализация алгоритмов разрешения коллизий (см табл. 5.2) с мониторингом переменных состояния на соответствующих имитационных моделях (гл. 3). Формирование сигнала задания в виде обобщенных координат для СУЭП КР по результатам отработки алгоритмов разрешения коллизий осуществлялось разработанной функцией сглаживания $TRAJSmooth(...)$, синтезированной на основе выводов, полученных в гл. 4. Для функции сглаживания был установлен режим производительности, т.е. планирование движения с минимально возможным временем исполнения. Результаты эксперимента получены при запуске имитационных моделей на вычислительном устройстве, имеющем следующие характеристики: процессор Intel i5, 2.4 ГГц, ОЗУ 16 Гб.

Оценка эффективности функционирования алгоритмов в эксперименте проводилась на основе предложенной системы показателей, включающей в себя набор как размерных, так и безразмерных параметров:

- 1) вероятность разрешения коллизии Pr^+ ;
- 2) коэффициент, равный среднему значению отношения длин траекторий движений, полученных одним из исследуемых алгоритмов, и длин траекторий для соответствующего движения позиционного управления РТР для всех n успешно спланированных движений алгоритмом num_m .

$$k_{ratio}^l = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{lq_{num_m}}{lq_{PTR}}}{n}, \quad (5.8)$$

где lq_{num_m} , lq_{PTR} – длины траекторий, полученные одним из 4-х исследуемых алгоритмов, и длины траекторий для движения позиционного управления РТР соответственно, n – количество успешно спланированных движений соответствующим алгоритмом num_m ;

- 3) коэффициент, равный среднему значению отношения максимальных рывков для движений, полученных одним из исследуемых алгоритмов, к отношению максимальных рывков для соответствующего движения позиционного управления РТР, для всех n успешно спланированных движений алгоритмом num_m :

$$k_{ratio}^{jerk} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{\left(\max_{m=1..7} \max_{i=0..nP_s} |\ddot{q}_{num_m}(t_i)| \right)}{\left(\max_{m=1..7} \max_{i=0..nP_s} |\ddot{q}_{PTR}(t_i)| \right)}, \quad (5.9)$$

где nPs – количество временных дискрет (равное для всех полученных движений);

- 4) коэффициент, равный среднему значению отношения общих затрат энергии для движений, полученных одним из исследуемых алгоритмов, и общих затрат энергии для соответствующих движений позиционного управления РТР, для всех n успешно спланированных движений алгоритмом num_m :

$$k_{ratio}^E = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{E_{num_m}^{total}}{E_{PTR}^{total}}}{n}; \quad (5.10)$$

- 5) среднее время, требуемое для выполнения операции планирования нового движения по обходу коллизий $\bar{t}_{calc}^+$, с (для успешно спланированных движений);

- 6) среднее время, требуемое для исполнения нового движения СУЭП КР по обходу коллизий $\bar{t}_{move}^+$, с (для успешно спланированных движений).

Анализ результатов

В результате эксперимента были получены данные (табл. 5.3) результаты анализа 590 движений по разрешению коллизий, полученных пятью представленными алгоритмами.

Таблица 5.3 – Усредненные данные результатов разрешения коллизии алгоритмами basePoints (BP), RRT, manRRT, CHOMP, manCHOMP

Показатель эффективности	Алгоритмы разрешения коллизий				
	BP (1)	RRT (2)	manRRT(3)	CHOMP(4)	manCHOMP(5)
k_{ratio}^l	1,44	1,17	1,81	1,06	1,13
k_{ratio}^{jerk}	1,38	1,32	3,65	0,75	0,66
k_{ratio}^E	1,59	3,21	3,89	2,41	2,57
$\bar{t}_{calc}^+$, сек	3,02	4,75	8,99	7,10	8,25
$\bar{t}_{move}$, сек	8,36	6,20	13,42	3,56	3,82
$\bar{t}_{calc} + \bar{t}_{move}$, сек	11,38	10,95	22,41	10,66	12,07
Pr^+	98,3	94,9	99,8	81,4	93,2
Pr^-	1,7	5,1	0,2	18,6	6,8

На рис. 5.7 представлена визуализация данных (см. табл. 5.3) в виде радарной диаграммы с логарифмической шкалой, на диаграмме отражены данные для 5 алгоритмов для показателей эффективности (строки 1 – 6 и 8). На рис. 5.8 представлена визуализация полученных в ходе разрешения коллизий траекторий на примере варианта движения 29 эксперимента.

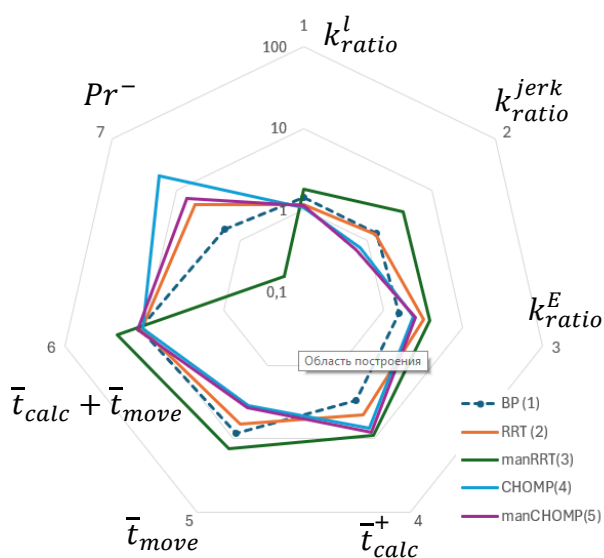


Рисунок 5.7 – Усредненные данные результатов разрешения коллизий алгоритмами basePoints (BP), RRT, manRRT, CHOMP, manCHOMP (логарифмическая шкала)

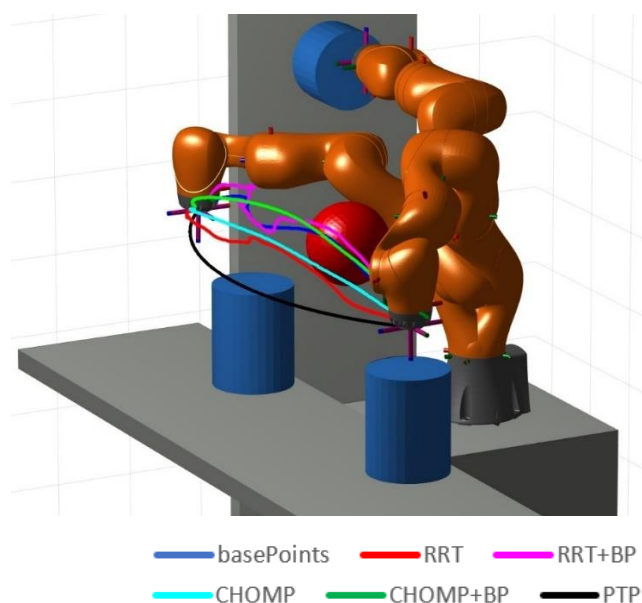


Рисунок 5.8 – Визуализация полученных в ходе разрешения коллизий траекторий для варианта движения № 29 эксперимента

Базовое движение по шаблону РТР не свободно от коллизий, также не свободно от коллизий движение, полученное алгоритмом CHOMP (присутствует касание объекта коллизии и звена КР). Соответствующие движениям фазовые траектории в КП представлены на рис. 5.9, динамика потребления энергии СУЭП КР представлена на рис. 5.10.

Таким образом, на репрезентативной выборке подтвердилась принятая гипотеза о том, что предложенный алгоритм basePoints из-за возможности оперирования данными о РДП менее требовательный к вычислительным ресурсам по сравнению с универсальными алгоритмами.

Так, при принятых установках рассматриваемых алгоритмов (см. табл. 5.2) расчет движений по разрешению коллизий алгоритмом basePoints оказался в 1,57 раза быстрее, чем алгоритмом RRT и в 2,35 раза быстрее, чем алгоритмом CHOMP.

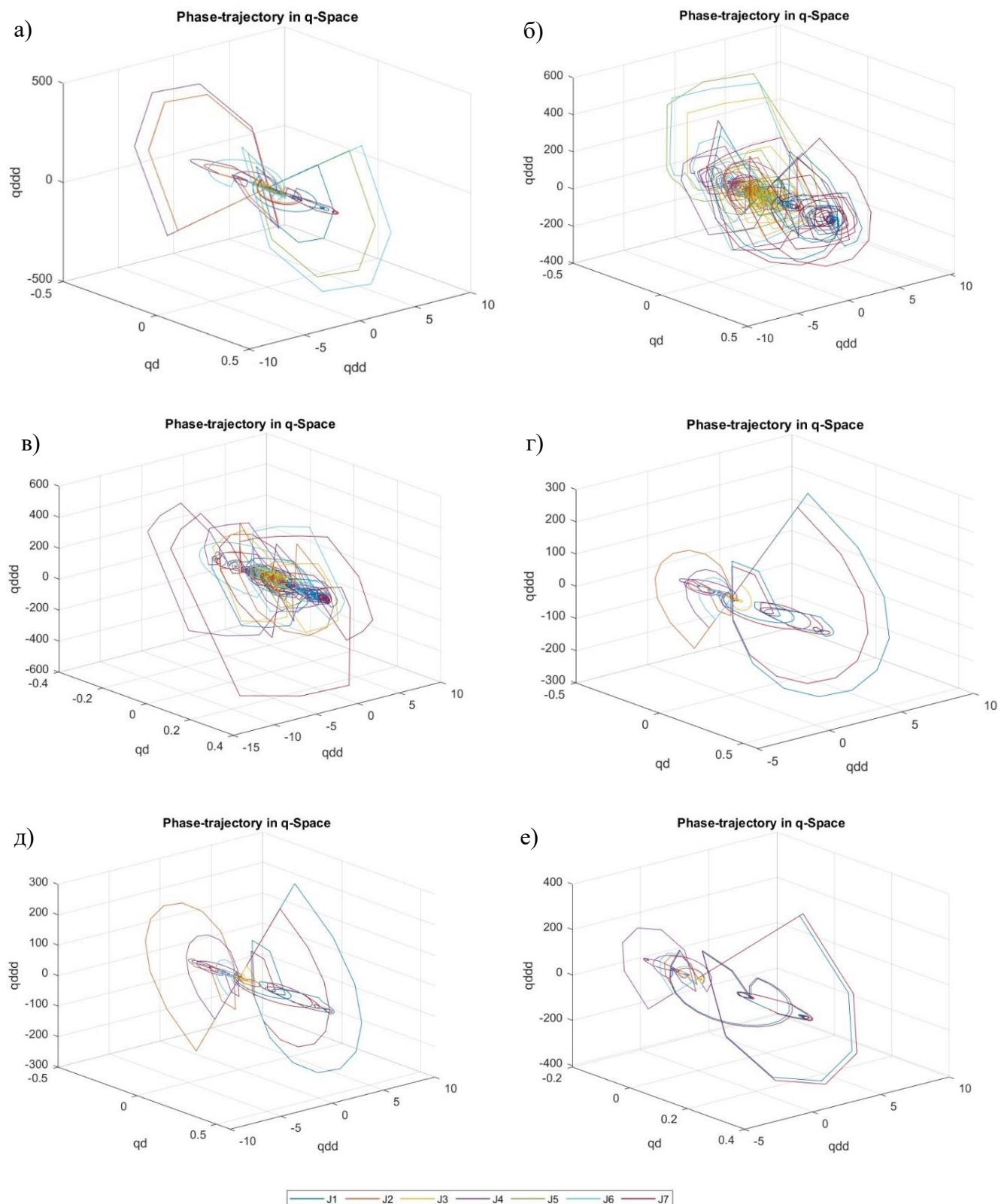


Рисунок 5.9 – Фазовые траектории в КП для 6 движений для ситуации 29: а – basePoints (BP); б – RRT; в – manRRT; г – CHOMP; д – manCHOMP; е – базовое РТР

По суммарному времени, включающему время реакции системы и время исполнения движения, алгоритмы basePoints, RRT и CHOMP продемонстрировали приблизительно равные результаты (отличия составили до 6,7 %), данный факт обусловлен более длительным временем исполнения движения по алгоритму basePoints. В свою очередь, длительное время исполнения движения определено более протяженной траекторией в КП: 44 % для алгоритма basePoints против 17 % алгоритма RRT и 6 % алгоритма CHOMP. Сокращение длины траектории, генерируемой алгоритмом basePoints, возможно за счет уменьшения шага дискретизации (Q^{red}).

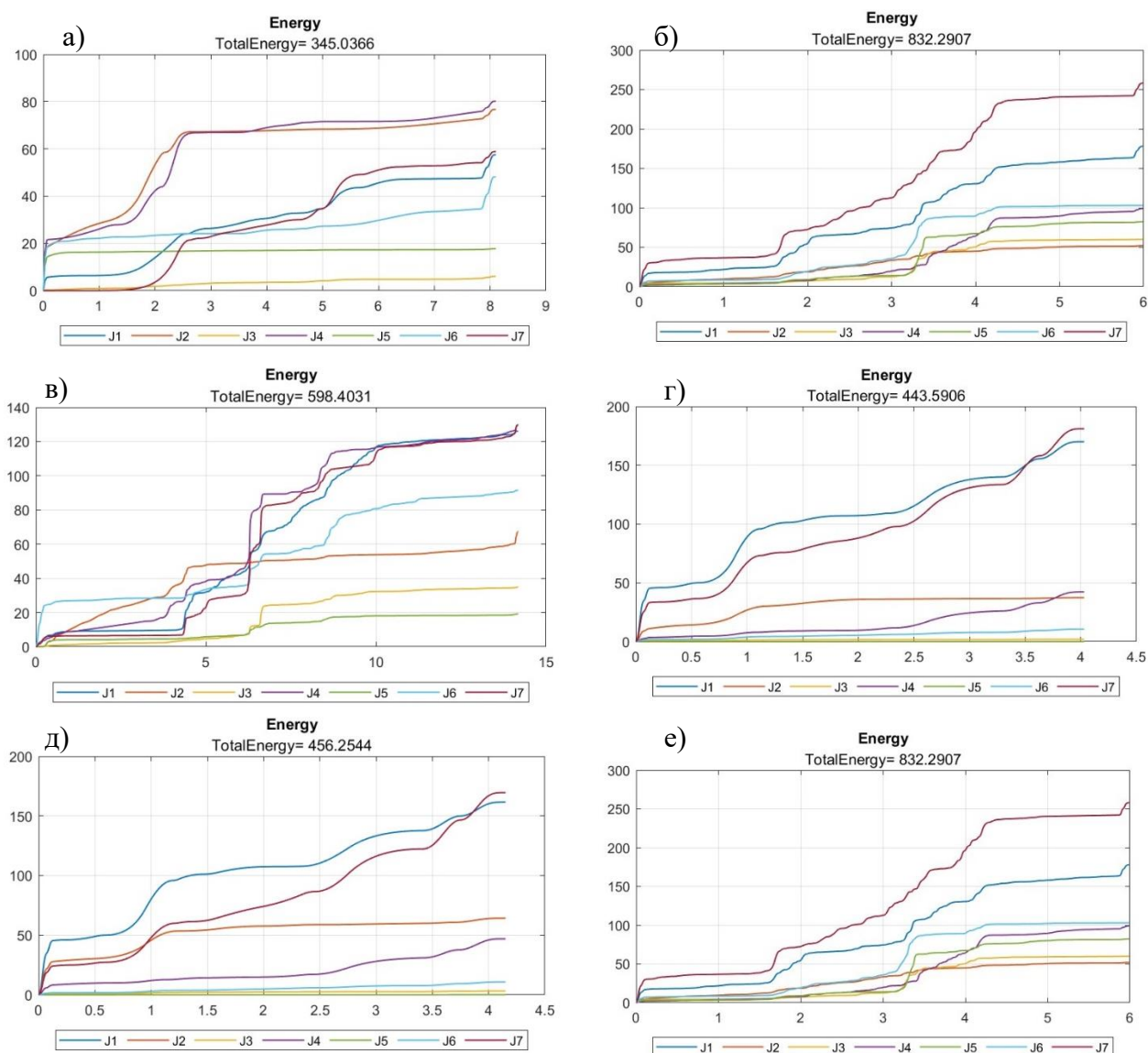


Рисунок 5.10 – Динамика потребления энергии СУЭП КР для 7 шарниров (ситуация 29): а – basePoints (BP); б – RRT; в – manRRT; г – CHOMP; д – manCHOMP; е – базовое РТР

Плавность движение также не характерна для движений алгоритма basePoints, что вполне предсказуемо, в силу заложенных в алгоритм принципов кусочной аппроксимации.

По показателю энергоэффективности движения, спланированные алгоритмом basePoints, в среднем менее энергозатратные. Так, повышение энергозатрат при разрешении коллизии алгоритмом basePoints по отношению к базовому движению РТР составило в среднем 59 % тогда, как для алгоритма RRT 221 %, а для CHOMP 141 %. Необходимо отметить, что такое преимущество вызвано не только формой управляющего сигнала, но и длительностью самого движения. Хотя последнее не является определяющим.

Необходимо подчеркнуть, что анализ результатов исследований позволил выявить факт высоких значений показателя вероятности успешного разрешения коллизий для разработанного алгоритма basePoints.

В условиях данного эксперимента вероятность успешного разрешения коллизий алгоритмом basePoints превысила аналогичный показатель для алгоритма RRT на 3,4 %, а для алгоритма CHOMP на 16,9 %. Подробный анализ перепланированных траекторий движений, в которых не удалось избежать столкновения (неудачный вариант), показал, что коллизии, сопряженные с движениями, спланированными алгоритмами basePoints и RRT, характеризуются касанием ЦТИ или звеньев КР с объектом коллизии (что может быть скомпенсировано программным добавлением «защитной» оболочки к объектам коллизии для формирования управляющего закона, исключающего столкновение). Для неудовлетворительных вариантов разрешения коллизий по алгоритму CHOMP помимо касаний присутствуют полные столкновения КР с объектами рабочей зоны, полученные в результате интерполяции движения по физически и технологически нереализуемому пути (рис. 5.11, а).

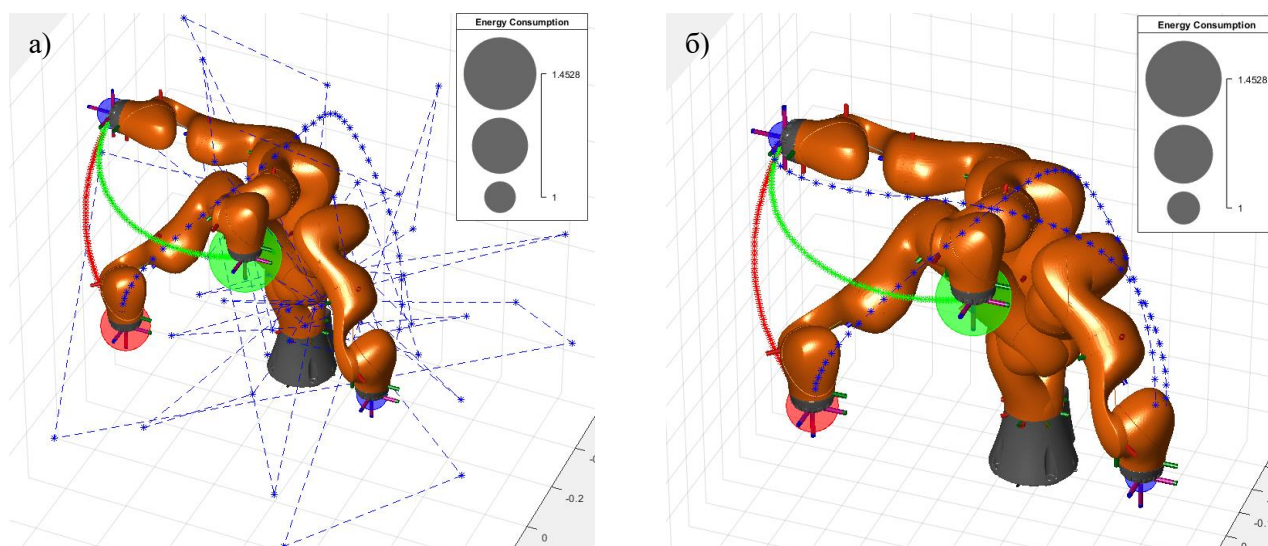


Рисунок 5.11 – Результаты разрешения коллизий по заданным ВП и ВХ: а – пример неудачного разрешения коллизии алгоритмом CHOMP; б – пример удачного варианта разрешения коллизии алгоритмом mapCHOMP на базе данных РДП

Движения ЦТИ в ОП для всех рассматриваемых алгоритмов укладываются в ограничения, установленные требованиями безопасности для КРТП. Пример графиков проекции линейной скорости ЦТИ в ОП для ситуации 29 представлен на рис. 5.12. Плавность движений, спланированных оригинальным алгоритмом basePoints, соизмерима с плавностью движений, полученных алгоритмом CHOMP, и значительно превосходит по этому параметру результаты для алгоритма RRT.

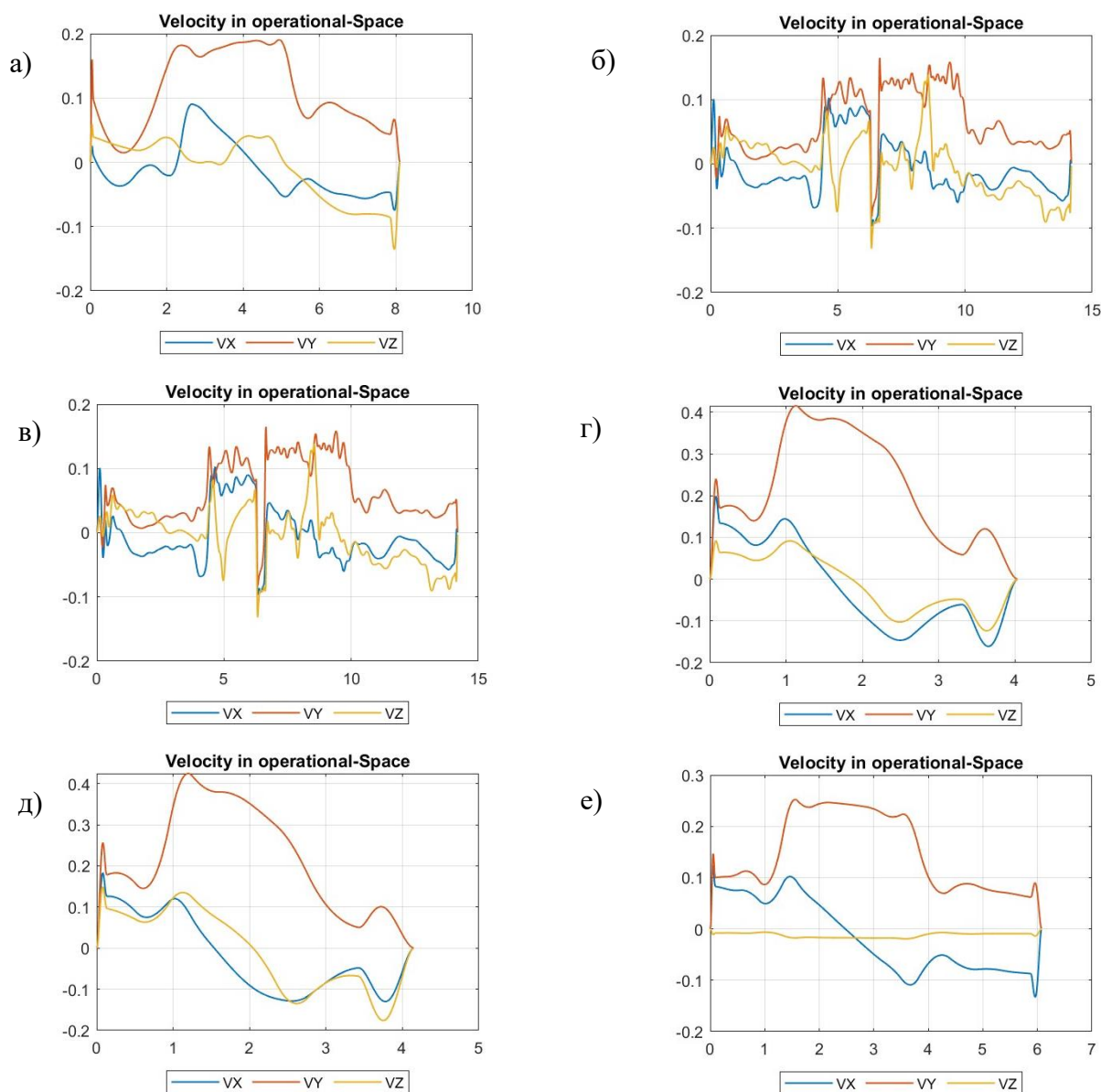


Рисунок 5.12 – Проекция линейной скорости ЦТИ в ОП для ситуации 29: а – basePoints (BP); б – RRT; в – manRRT; г – CHOMP; д – manCHOMP; е – базовое РТР

При комплексной оценке эффективности оригинального алгоритма по диаграмме (см рис. 5.7) возможно заключить, что алгоритм basePoints обладает рядом преимуществ, которые при его применении могут существенно положительным образом повлиять на интегральные показатели качества ТП. При этом присущие ему недостатки, во-первых, могут быть частично скомпенсированы дополнительными манипуляциями с детализацией описания РДП и

настройками функций интерполяции, во-вторых, при установке критериев задачи оптимизации таких, как минимизация времени реакции системы, минимизация энергопотребления не являются определяющими.

Требуют внимания результаты исследований по разрешению коллизий гибридными алгоритмами $\text{manRRT}(\text{RRT}+\text{BP})$ и $\text{manCHOMP}(\text{CHOMP}+\text{BP})$. Влияние наличия опорного пути, полученного алгоритмом basePoints , для основного алгоритма RRT и CHOMP прослеживается по приведенным данным (см. табл. 5.3 и рис. 5.7).

По сравнению с базовым алгоритмом RRT гибридный алгоритм manRRT обеспечил планирование движений, характеризующихся большей длиной траектории, меньшей плавностью, меньшей энергоэффективностью, большим временем расчета и исполнения движения, но при этом количество неудачно спланированных движений снизилось на 4,9 %, что сделало алгоритм manRRT самым эффективным с точки зрения вероятности разрешения коллизий.

По сравнению с базовым алгоритмом CHOMP гибридный алгоритм manCHOMP обеспечил планирование движений, характеризующихся приблизительно равной длиной траектории, большей плавностью движения до 13,6 %, приблизительно равным показателем энергоэффективности, большим временем расчета и исполнения движения, но при этом количество неудачно спланированных движений снизилось на 11,8 %. В итоге, вероятность разрешения коллизий для алгоритма manCHOMP составило 93,2 %.

Таким образом, можно заключить, что подстановка опорного пути в качестве исходного аргумента для алгоритма CHOMP в целом положительным образом сказывается на результатах планирования, особенно значимо увеличивается показатель вероятности разрешения коллизии. Для алгоритма RRT не все однозначно, подстановка опорного пути целесообразна только в том случае, когда требуется максимизация вероятности разрешения коллизии и не предъявляются жесткие требования в ТО по остальным критериям эффективности движения.

Экспериментальное подтверждение дифференциации результатов функционирования алгоритмов разрешения коллизий (связанной с изменением сценария окружения и параметров ТО) доказывает целесообразность наличия в ИСУ КР базы знаний, способной с учетом заданного критерия оптимизации при планировании движений (по разрешению коллизий) осуществлять целенаправленное включение наиболее подходящего алгоритма с целью формирования эффективного закона управления (в обобщенных координатах) для ЛСУ КР. Разработка такой БЗ рассматривается в настоящей главе в следующих разделах. Необходимо отметить, что показатели эффективности, связанные с временем, следует рассматривать в относительном сравнении в рамках группы алгоритмов, поскольку время расчета и формирования сигнала управления зависит от производительности вычислительного устройства, и может быть уменьшено за счет переноса ПО на более производительное аппаратное обеспечение или путем запараллеливания опе-

раций. Дополнительные исследования, связанные с оценкой функциональной возможности использования рассматриваемых алгоритмов разрешения коллизий в рабочей сцене с движущимися объектами, продемонстрировали наличие такой возможности только для ситуаций, характеризующихся низкими скоростями объектов. В таком случае вероятность успешного разрешения коллизии будет зависеть от ряда факторов: удаленности объекта от звеньев КР и ЦТИ, величины линейной скорости движения объекта, направления движения, предсказуемости траектории движения и др.

На рис. 5.13 представлен пример результата разрешения коллизии (алгоритмом CHOMP) КР и внешней среды, включающей помимо объектов рабочей зоны, два дополнительных объекта коллизии: стационарный объект (шар без шлейфа) и движущийся объект (шар со шлейфом). Алгоритм обеспечил планирование движения по исполнению ВП в обход коллизии и перемещение ЦТИ в точку назначения. Тем не менее, с учетом специфики рассматриваемого ТП (нестационарные объекты коллизий, в частности, имитируют руки или кисти человека, скорости движения которых значительные) реагирование КР на изменение рабочей зоны целесообразно организовать посредством формирования управляющих сигналов СУ на базе предустановленных траекторий, опорных пространственных расположений или опорных конфигураций (рассматривается в последующих разделах).

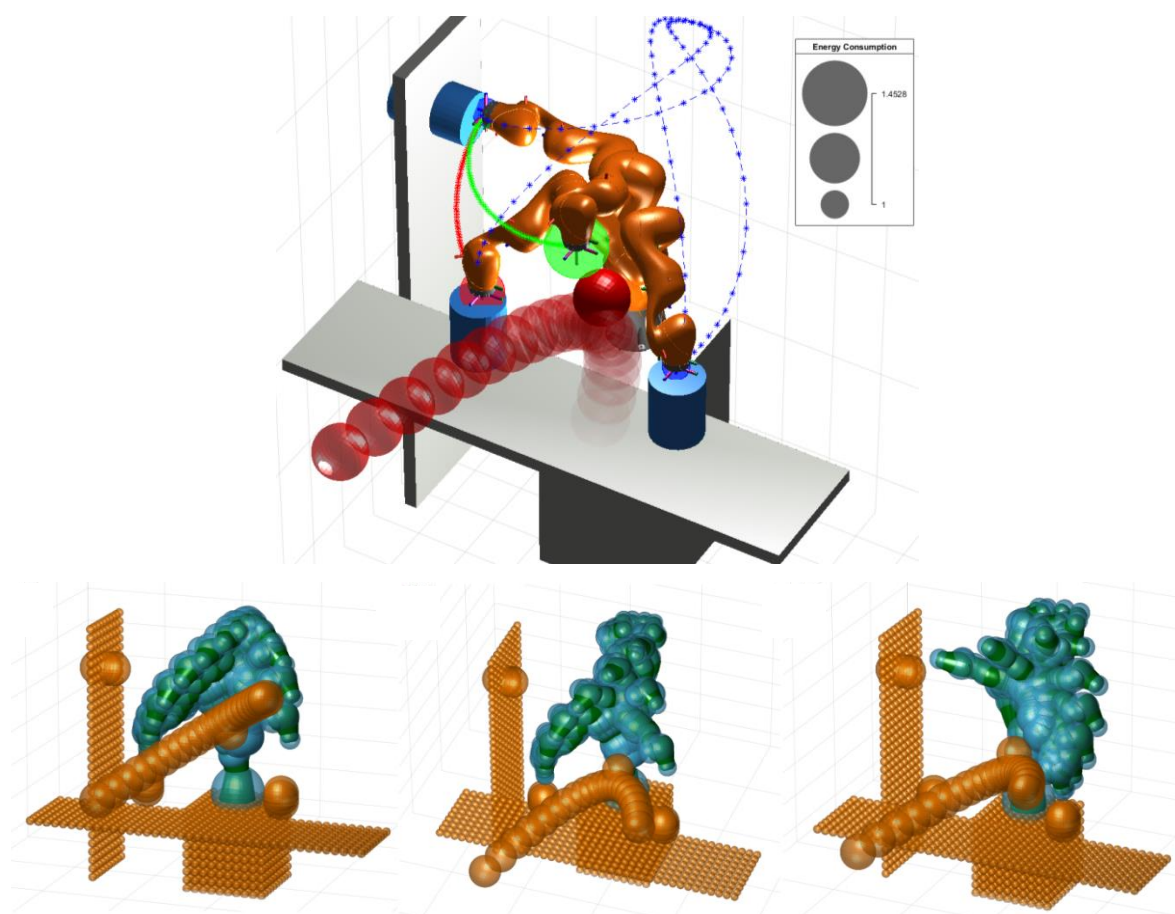


Рисунок 5.13 – Пример разрешения коллизий алгоритмом CHOMP при наличии движущихся объектов

Выводы

1) Предложен оригинальный алгоритм разрешения коллизий *basePoints*, расширяющий множество M_{Collis} (множество алгоритмов разрешения коллизий), планирующий движение КР на основе получения кратчайшего пути алгоритмом Дейкстры по ненаправленному графу, ассоциированному с текущей частью ТО и идентифицированным РДП. Алгоритм характеризуется меньшими требованиями к вычислительным ресурсам по сравнению с универсальными алгоритмами разрешения коллизий (в 1,57 раза быстрее, чем алгоритм RRT, и в 2,35 раза быстрее, чем алгоритм CHOMP).

2) Предложены модернизированные алгоритмы *mapRRT* и *mapCHOMP*, по ряду показателей эффективности, в частности, по показателю вероятности разрешения коллизий, превосходящие базовые RRT (на 4,9 %) и CHOMP (на 13,6 %).

3) Проведен сравнительный анализ эффективности группы оптимизационных алгоритмов разрешения коллизий с целью формирования зависимостей для базы знаний по приоритетному включению алгоритмов разрешения коллизий с учетом условий ТО и рабочей сцены в рамках ситуационного управления.

4) Получены алгоритмы, позволяющие планировать движения КР в ТП по разрешению коллизий при наличии движущихся объектов в рабочей зоне. Экспериментально подтверждена их эффективность. Возможность разрешения коллизий значительно ограничивается скоростью движения объекта, поэтому предложено в таких ситуациях совмещать функционал встроенной системы автоматики и безопасности с алгоритмом разрешения коллизий при наличии движущихся объектов.

5.2. Планирование и оптимизация движений коллаборативного робота при разрешении коллизий в ограниченном операционном пространстве

Предложен и исследован алгоритм планирования движений по разрешению коллизий в ограниченном пространстве на основе принципов траекторного и контурного управления, поддерживающий оптимизационные механизмы по критериям энергоэффективность и производительность. Проведено сравнение оригинального решения с универсальными алгоритмами, в частности *RRT* и *CHOMP*, продемонстрированы преимущества предложенного алгоритма при функционировании в ограниченном пространстве. Результаты исследования обобщены и предложены рекомендации по организации системы управления КР, поддерживающей классификацию частей ТО и идентифицирующей возможность применения оригинального алгоритма в ограниченном пространстве.

Требования к КРТП (гл. 2) должны быть реализованы системой управления в условиях ограничений, накладываемых технологией производства, отраженных в маршрутном, операционном или маршрутно-операционном описании. Декомпозиция ТП, ТО и далее на ТПд, включающие РХ,

ВХ, и ВП, позволяет определить возможность нахождения решения с учетом предъявляемых требований. Например, очевидно, что для ТПд вертикального сверления отверстия в горизонтальной плоскости изделия не представляется возможным решить задачу разрешения коллизий в области запястья КР без нарушения режима сверления (параметров движения ЦТИ – скорости, ускорения и т.п.) или обеспечения прямолинейного движения. При этом, движения, реализующие ВП и большинство ВХ, почти всегда могут быть скорректированы. Например, движение, осуществляющее ВП выхода ЦТИ из локальной зоны обработки изделия в точку ожидания не ограничено определенной траекторией для ЦТИ, для этого движения возможен запуск механизма разрешения коллизий (если существует положительный прогноз), и могут быть решены задачи оптимизации по производительности и энергоэффективности. Исходя из сказанного формируется целесообразность поиска алгоритмов оптимизации управления движением КР в условиях ограничений режимов и политики безопасности для частей ТО, характеризующихся как ВП и ВХ.

Существование значительного количества факторов, характеризующих те или иные обстоятельства ТО в совместной зоне КР и человека, затрудняют решение задачи оптимизации в общем виде. Требуется значительное количество вычислительных ресурсов для поиска оптимума. В таком случае декомпозиция математического описания ТО может позволить сформировать комплекс задач оптимизации с похожим функционалом, но разным набором ограничений. Тогда при правильной классификации набора обстоятельств ТО (сценария) может быть подобрана подходящая подзадача оптимизации и решена за приемлемый временной интервал.

Ограничения в постановке задачи оптимизации в части планирования движения будут определяться следующими факторами: наличием ограничений ОП и КП, наличием предустановленных форм желаемых траекторий (их математического описания), форматов задания и количеством точек исходного пути, наличием необходимости решения ОЗК, существованием или отсутствием базы эталонных конфигураций, наличием ограничений по режимам движения, ограничениями политики безопасности, данными объемов и локализацией объектов коллизий, способов поиска альтернативных маршрутов и др. И в каждом отдельном случае требуется проведение исследований для нахождения наиболее корректных постановок задач оптимизации и привлекательных вариантов их решения.

Принимая во внимание разнообразие возможных вариантов планирования, оптимизации и реализации движений в рамках ВП и ВХ, в работе представляются результаты разработки и исследования оригинального алгоритма *PTS (exploring with preset trajectory shape)* формирования оптимальных законов управления для движений, реализующих ВП и ВХ с учетом ограничений – высокой вероятности возникновения коллизий по ходу движения ЦТИ по заданному пути, содержащему только две точки (текущую точку и точку назначения), и с учетом предустановленной формой кривой траектории движения в ОП (например, дугой окружности).

Методология

Исследования по разработке алгоритма планирования оптимального движения КР проводились для КР с избыточным числом степеней свободы (с семью степенями свободы). Апробация полученных результатов выполнялась в ходе экспериментов на имитационной модели КР *KUKA LBR IIWA 7 R800* (гл. 3).

Планирование движений КР в целях реализации частей ТО априори осуществляется параллельно в двух пространствах. В КП движение КР описывается уравнениями 4.1 и 4.2.

В ОП для КР с избыточным числом степеней свободы движение описывается согласно формуле:

$$\Lambda(\vec{x}_E)\ddot{\vec{x}}_E + \mu(\vec{x}_E, \dot{\vec{x}}_E) + \rho(\vec{x}_E) = \vec{F}_E, \quad (5.11)$$

где Λ – матрица инерции в ОП; $\vec{x}_E, \dot{\vec{x}}_E, \ddot{\vec{x}}_E, \vec{F}_E$ – векторы размерностью $[6 \times 1]$ координат в декартовой системе скоростей, ускорений, а также сил и моментов ЦТИ (локальной базы рабочего инструмента) в ОП соответственно; μ и ρ – векторы компонентов (квадратичных по скоростям) и гравитационных сил, выраженные в ОП соответственно.

Взаимосвязь между переменными КП и ОП для КР с избыточным числом степеней свободы представляются в виде преобразования:

$$\dot{q} = J_b^+ \dot{\vec{x}}_E, \quad (5.12)$$

где $J_b^+ = W^{-1}(J_b^T(J_b W^{-1}J_b^T))^{-1}$ – псевдообратная матрица Якобиана, вычисляемая согласно методу Мура-Пенроуза [245, 312]; W – предпочтительная $[n \times n]$ диагональная положительно определенная весовая матрица.

Тогда, задав траекторию движения ЦТИ в ОП, становится возможным определить траекторию движения в КП и при наличии критерия оптимизации движения и ограничений режимов $(\dot{q}, \ddot{q}, \ddot{\ddot{q}})$, определить динамику движения и время исполнения траектории $t_{end} - t_{start}$. Далее решив обратную задачу динамики для уравнения (4.1), вычислить $\tau(t)$. В таком случае, имея математическое описание электроприводов осей КР (в том числе редуцированное [34, 152]), и оснащающего оборудования, можно рассчитать необходимую энергию на реализацию заданного перемещения. В работе для определения энергопотребления системы электроприводов были использованы линеаризованные модели (гл. 3).

При этом общая затрачиваемая энергия на реализацию перемещения с учетом отсутствия внешних сил (так как исследование проводилось для ВП и ВХ, контакт инструмента и изделия отсутствует) рассчитывается согласно (3.28), где затрачиваемая энергия электроприводами находится согласно (3.27). Тогда подзадача оптимизации для движений, реализующих ВП и ВХ с учетом ограничений – высокой вероятности возникновения коллизий по ходу движения ЦТИ,

и по заданному пути, содержащего только две точки, с предустановленной формой кривой траектории движения в ОП (дугой окружности) может быть формализована.

Подзадача оптимизации: если технологией задан путь для ЦТИ для реализации ВП или ВХ по двум точкам: начальной P_1 , для которой задана конфигурация КР (q_0), и точки назначения P_2 , для которой задана трансформация в формате TF_f , при этом, решение

$$q(t) = F_{ip}(q_0, q_f), \quad (5.13)$$

$$q_f = F_{IK}(q_0, TF_f) \quad (5.14)$$

при установленных ограничениях на обобщенные координаты несвободно от коллизий, т.е. $\exists i$, что $S_{R_i} \cap S_{Ob_i} \neq 0$ при $q(t_i)$, $t_i \in [t_0, t_f]$. Здесь F_{ip} – функция нахождения параметров движения для ЦТИ в КП по траектории минимальной длины; F_{IK} – функция решения ОЗК в общем либо редуцированном КП; S_{R_i} – геометрическое множество точек поверхности звеньев и оснастки КР; S_{Ob_i} – геометрическое множество объектов коллизий, расположенных по ходу движения ЦТИ в области обработки в объеме движения 6-го и 7-го звеньев КР. Тогда задача оптимизации в постановке задачи Майера [172] согласно обобщенному функционалу качества

$$J = g_0[q^*(t_0), q^*(t_f), t_0, t_f] \quad (5.15)$$

в частном случае с ограничениями будет иметь вид:

$$J = t_f - t_0, J \rightarrow \min; \quad (5.16)$$

$$q^*(t_0) = q_0, q^*(t_f) = q_f, \dot{q}^*(t_0) = \dot{q}^*(t_f) = 0 \quad (5.17)$$

и для $\forall i$ $S_{R_i} \cap S_{Ob_i} = 0$ при $q^*(t_i)$, $t_i \in [t_0, t_f]$, где $\begin{bmatrix} R_i & x_{E_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = F_{FK}(q^*(t_i))$, для $\forall t \in [t_0, t_f]$ такого, что x_{E_i} является решением системы (т.е. принадлежит заданной в ОП дуги некой окружности),

$$\begin{cases} (x_{E_i}(1) - x_0)^2 + (x_{E_i}(2) - y_0)^2 + (x_{E_i}(3) - z_0)^2 = r^2 \\ a(x_{E_i}(1) - x_0) + b(x_{E_i}(2) - y_0) + c(x_{E_i}(3) - z_0) = 0 \end{cases} \quad (5.18)$$

где R – матрица вращения; F_{FK} – функция решения ПЗК; $\{x_0, y_0, z_0\}$ – координаты точки центра окружности; r – радиус окружности; $\{a, b, c\}$ – координаты вектора нормали к плоскости расположения окружности.

Для анализа эффективности предложенного решения (алгоритма *PTS*) проводилось сравнение полученных результатов с результатами альтернативных вариантов разрешения коллизий, в частности методами итерационного решения ОЗК, *CHOMP*, *RRT*, генерирования пути через опорные точки РКП и др.

Представлена траектория движения ЦТИ, реализующего ВП (рис. 5.14, а). Движение синтезировано в режиме позиционного управления (*PTP*) в КП по заданной (текущей) конфигурации начальной точки (q_0) и найденной решением ОЗК (методом *BFGS* с поддержкой БЗ РКП) конфигурации точки назначения (q_f), промежуточные точки ($[q(t_1) \dots q(t_{i-1})]$) найдены с помо-

щью алгоритмов сплайн-интерполяции (полиномом пятой степени). Движение оптимизировано по критерию максимизации производительности, время исполнения составило 0,88 секунд с учетом пауз в начале и после окончания движения, но на пути следования 6-го и 7-го звеньев КР прогнозируется появление объект коллизии. Изменение во времени переменных состояния $(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{\ddot{q}})$, максимумы значений угловых ускорений некоторых координат находятся на границе допустимых значений (рис. 5.14, б). Фазовая траектория переменных $(\dot{q}, \ddot{q}, \ddot{\ddot{q}})$ представлена на рис. 5.15, г, а на рис. 5.15, а-в – характерные для синтезированного движения нормированные поверхности мощности, момента, развиваемого двигателем, и ускорения в КП в разрезе шарнир – временная дискрета размерности $[7 \times nPs]$, где nPs – количество временных точек.

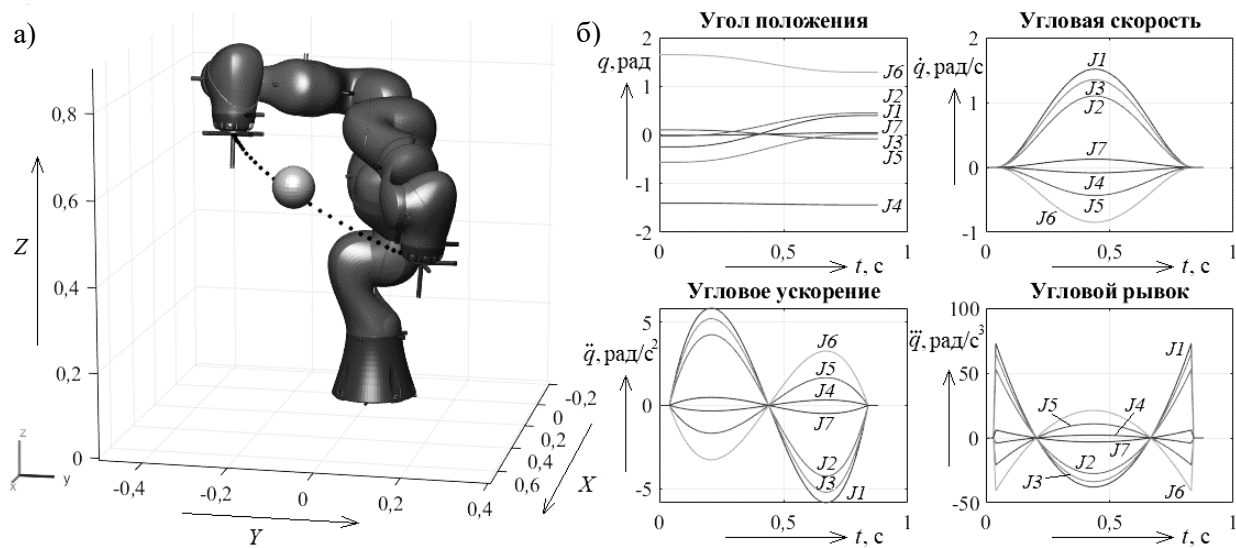


Рисунок 5.14 – Параметры движения КР, реализующего ВП: а – трехмерная визуализация траектории движения (шар – объект коллизии); б – изменение во времени $q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{\ddot{q}}$

Показатели качества движения (PTP) представлены в табл. 5.4, максимальный рывок и ускорение при реализации движения рассчитаны по формулам:

$$\ddot{q}_{max} \max_{j=1...7} \max_{i=0...nPs} |\ddot{q}(t_i)|_{max}; \quad (5.19)$$

$$\ddot{\ddot{q}}_{max} \max_{j=1...7} \max_{i=0...nPs} |\ddot{\ddot{q}}(t_i)|_{max}. \quad (5.20)$$

Вектор длин траекторий по каждому шарниру рассчитан по формуле:

$$l_q = \sum_{i=1}^{nPs} |q_{i+1} - q_i|. \quad (5.21)$$

Общая длина траекторий по всем шарнирам – по формуле:

$$l_q^s = \sum_{j=1}^7 l_q^j. \quad (5.22)$$

Необходимо обратить внимание, что спроектированное движение в режиме PTP (без учета коллизии) отличается высокими показателями качества (табл. 5.4), при этом начальная, конечная и промежуточные конфигурации обеспечивают формирование поз, приемлемых для ТП сверления при подходе к изделию сверху. Это достигается за счет редуцирования пространства состояний и формирования опорных конфигураций.

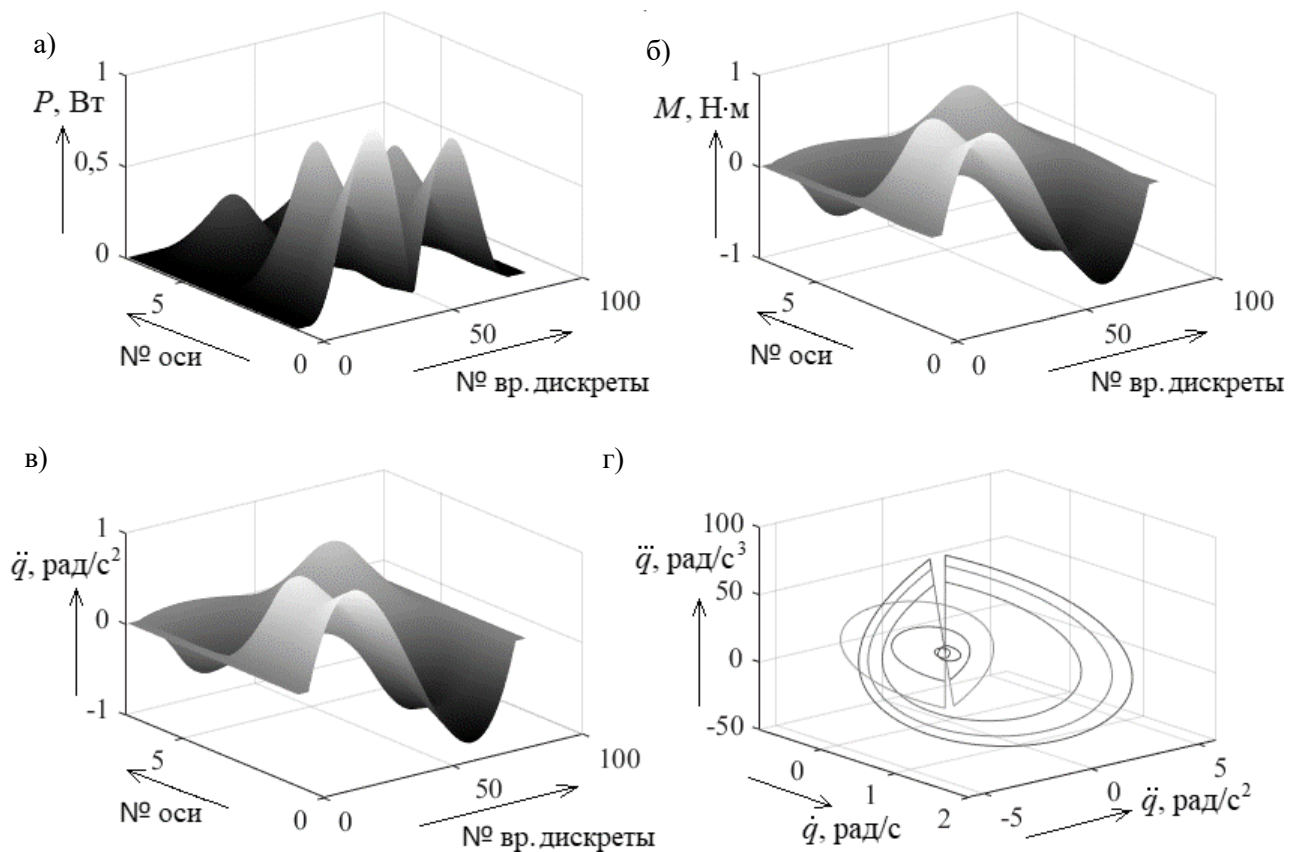


Рисунок 5.15 – Динамика движения КР в режиме *PTP*: а–в – нормированные поверхности мощности, момента, развиваемого электрическим двигателем, и ускорения в КР в разрезе шарнир – временная дискрета; г – фазовая траектория переменных $\dot{q}$, $\ddot{q}$, $\dot{q}$

Таблица 5.4 – Показатели качества движения, полученного алгоритмами *PTP*, *PTS*, *MRRT*, *CHOMP*

Наименование показателя качества	Алгоритм планирования движения			
	<i>PTP</i>	<i>PTS</i>	<i>MRRT</i>	<i>CHOMP</i>
Вектор длин траектории в разрезе обобщенных координат l_q , рад	$\begin{bmatrix} 0,6459 \\ 0,4696 \\ 0,5760 \\ 0,0365 \\ 0,1848 \\ 0,3613 \\ 0,0536 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,6961 \\ 0,4792 \\ 0,4218 \\ 0,7186 \\ 0,1905 \\ 0,4766 \\ 0,6071 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,8286 \\ 0,5639 \\ 0,7183 \\ 0,4891 \\ 0,4833 \\ 0,6708 \\ 0,2645 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,1247 \\ 0,2027 \\ 0,4673 \\ 0,3972 \\ 0,0727 \\ 0,3468 \\ 0,0021 \end{bmatrix}$
Сумма длин траекторий обобщенных координат l_q^s , рад	2,3278	3,5900	4,0187	2,6135
Максимальный рывок $\ddot{q}_{max}$, рад/с³	72,8740	3,0198e+03	316,5015	274,2562
Максимальное ускорение $\dot{q}_{max}$, рад/с²	5,8264	15,2955	10,0493	8,5952
Затрачиваемая энергия на движение E_{total} , Дж	1,7521e+03	3,0198e+03	936,0000	436,2264
Время исполнения движения, $t_f - t_0$, с	0,8800	1,0300	2,8800	2,3500

Разрешение коллизий было реализовано алгоритмом *PTS* решением задачи оптимизации для функции:

$$q^*(t) = \text{CirclePlan}(\text{Params}) \rightarrow \text{opt}, \quad (5.23)$$

согласно критерию 5.16

$$Params = \{q_0 | TF_f | \varphi | shiftN | t_f - t_0\} \quad (5.24)$$

с учетом ограничений обобщенные координаты и для $\forall i$, $S_{R_i} \cap S_{Ob_i} = 0$ при $q(t_i)$, $t_i \in [t_0, t_f]$, где φ – угол поворота плоскости окружности относительно вектора $TF_f(1:3,4) - TF_0(1:3,4)$, характеризующий направление изгиба траектории движения; $shiftN$ – коэффициент задания кривизны дуги. Среди оптимизируемых параметров согласно системе (5.18) φ и $shiftN$ совместно с заданными q_0 и TF_f определяют траекторию движения ЦТИ в ОП – дугу окружности, т.е. $\vec{x}_{E_i}$, где $i = \overline{1 \dots nPs}$.

Планирование движения ЦТИ по дуге окружности осуществляется согласно:

$$\vec{x}_E(1:3,1)(t) = \begin{bmatrix} \vec{x}_{E_x}(t) \\ \vec{x}_{E_y}(t) \\ \vec{x}_{E_z}(t) \end{bmatrix} = F_{ipT}(TF_0, TF_m, TF_f); \quad (5.25)$$

$$\vec{x}_E(4:6,1)(t) = \begin{bmatrix} \vec{x}_{E_\alpha}(t) \\ \vec{x}_{E_\beta}(t) \\ \vec{x}_{E_\gamma}(t) \end{bmatrix} = \begin{cases} F_{ipT}(TF_0, TF_m), t < \arg(\vec{x}_E(1:3,1)(t) = TF_m(1:3,4)); \\ F_{ipT}(TF_m, TF_f), t \geq \arg(\vec{x}_E(1:3,1)(t) = TF_m(1:3,4)), \end{cases} \quad (5.26)$$

где F_{ipT} – функция интерполяции согласно трапецеидальному профилю скорости. При этом необходимо отметить, что интерполяция угловых скоростей осуществляется двумя функциями (с остановкой вращения ЦТИ в промежуточной точке) для обеспечения формата задания дуги окружности по трем трансформациям TF_m – трансформация промежуточной точки окружности.

Для нахождения трансформации TF_m сначала с помощью линейной интерполяции находится средняя трансформация $TF_{tp} = transformtraj(TF_0, TF_f)$, которая содержит матрицу вращения $TF_{tp}(1:3,1:3) = R_m = TF_m(1:3,1:3)$. Далее для нахождения вектора смещения $TF_m(1:3,4)$ промежуточной точки дуги окружности определяется ее сдвиг относительно вектора, соединяющего точку назначения и точку начала траектории движения: $shift = shiftN \cdot (|TF_f(1:3,4) - TF_0(1:3,4)|)$. Чтобы определить направление смещения, создается локальная система координат с центром в точке $TF_{tp}(1:3,4)$, такая что, оси аппликат и ординат определяются как:

$$z_c = \frac{(TF_f(1:3,4) - TF_{tp}(1:3,4))'}{|TF_f(1:3,4) - TF_{tp}(1:3,4)|}, \quad (5.27)$$

$$y_c = \frac{z_c \times ([0 \ 0 \ 10] - TF_{tp}(1:3,4))'}{|z_c \times ([0 \ 0 \ 10] - TF_{tp}(1:3,4))|}, \quad (5.28)$$

где $[0 \ 0 \ 10]$ – координаты произвольной точки, достаточно удаленной от точек траектории движения, необходимой для задания плоскости расположения окружности. Тогда $x_c = \frac{z_c \times y_c}{|z_c \times y_c|}$, сме-

шение производится на величину $shift$ вдоль оси x_c' , полученной поворотом оси x_c на угол φ относительно оси z_c согласно выражению $TF_m(1:3,4) = TF_c'(1:3,4)$,

$$TF_c^r = \begin{bmatrix} x_c' & y_c' & z_c' & TF_{tp}(1:3,4) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot axang2TF([0 \ 0 \ 1 \ \varphi]) \cdot (E \cdot [shift \ 0 \ 0])'. \quad (5.29)$$

Здесь $axang2TF$ – функция, конвертирующая преобразование, заданное в формате «ось-угол» представление (*Axis-Angle rotations*) в матрицу однородного преобразования.

Таким образом, решая задачу (5.23) относительно параметров (5.24) с учетом ограничений, например, методом нелинейной оптимизации (*fmincon Interior Point Algorithm* [211]), можно получить движение $q^*(t)$ – разрешение коллизии (рис. 5.16, а; траектория оптимального движения выделена полужирной линией), характеризующееся минимальным временем исполнения. Параметры движения КР представлены на графиках (рис. 5.16, б).

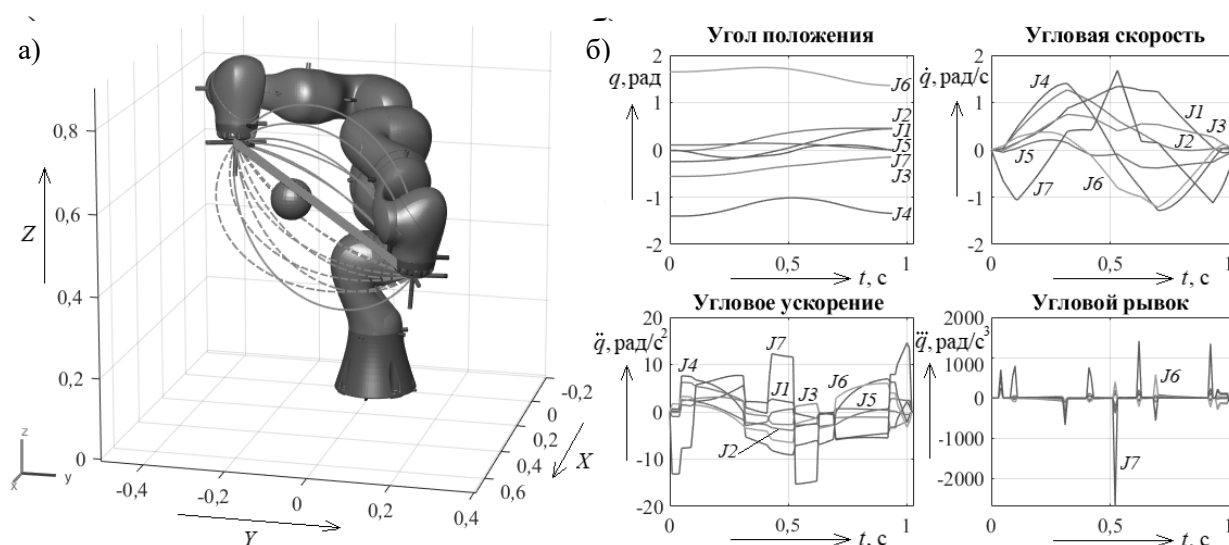


Рисунок 5.16 – Параметры движения КР, реализующего ВП с разрешением коллизии алгоритмом *PTS*: а – трехмерная визуализация траектории движения (шар – объект коллизии); б – графики изменения во времени переменных состояния ($q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{\ddot{q}}$)

Время исполнения движения составило 1,03 с, что на 0,15 с больше, чем время исполнения первоначального движения. На рис. 5.16, б представлено изменение во времени переменных состояния ($q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{\ddot{q}}$), максимумы значений угловых ускорений большей части координат находятся на границе допустимых значений. Фазовая траектория переменных ($\dot{q}, \ddot{q}, \ddot{\ddot{q}}$) представлена на рис. 5.17, г. На рис. 5.17 (а, б, в) представлены характерные для синтезированного движения нормированные поверхности мощности, момента, развиваемого электрическим двигателем, и ускорения в КП в разрезе шарнир – временная дискрета размерности $[7 \times nPs]$. Графики демонстрируют высокие значения ускорений и рывков, нормированные поверхности негладкие с большим количеством всплесков. Вместе с выбранной траекторией разрешения коллизии (см. рис 5.16, а) продемонстрировано семейство траекторий разрешения коллизий, полученных вариацией параметров $shiftN = 0.1:0.05:0.3$ и $\varphi = 0:\pi/6:2\pi$. При этом пунктирными линиями выделены траектории движения, несвободные от коллизий, тонкими линиями – достижимые траектории, полу-

жирной линией – оптимальная траектория. Для тех же вариаций параметров (табл. 5.5) приведены показатели эффективности движения в формате [факт коллизии (1 или 0)/требуемая энергия, в Дж/время исполнения, в с]. А также в табл. 5.4 представлено сравнение полученного движения с исходным.

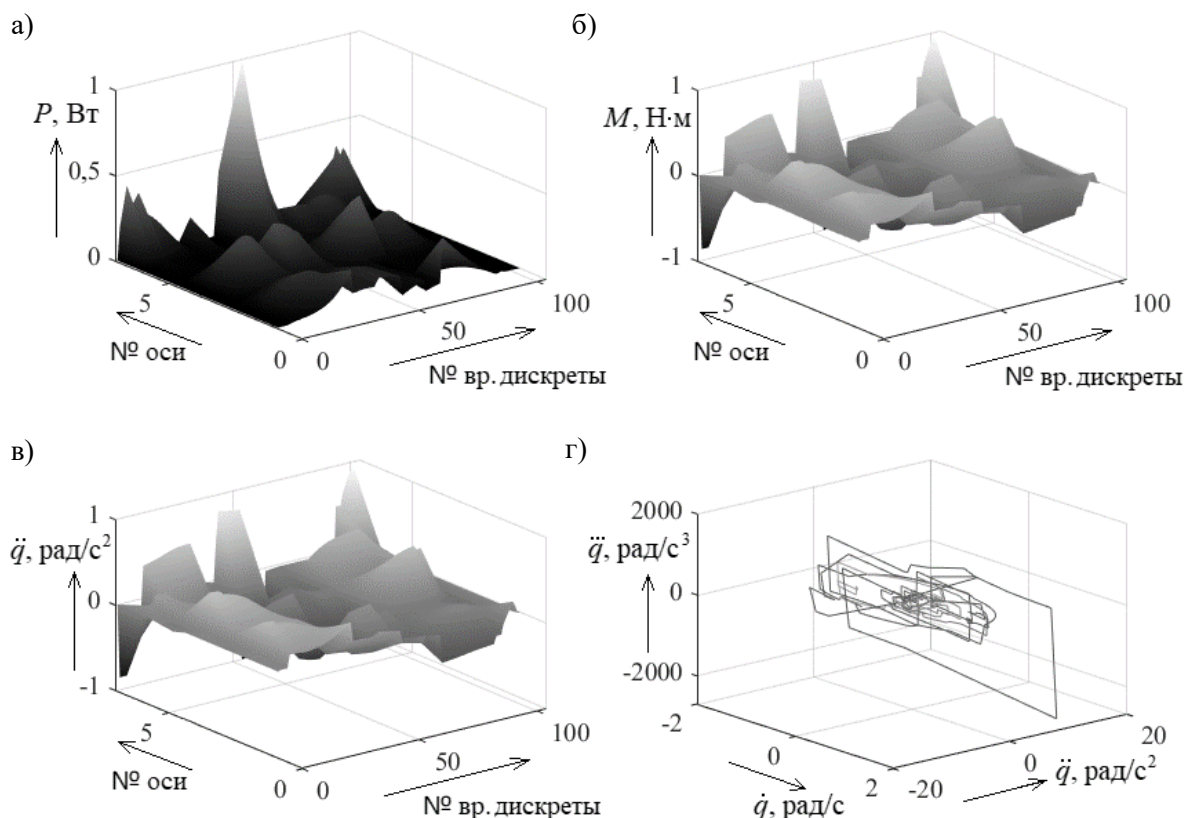


Рисунок 5.17 – Динамика движения КР (алгоритм *PTS*):

а, б, в – нормированные поверхности мощности, момента, развиваемого электрическим двигателем, и ускорения в КП в разрезе шарнир – временная дискрета;
г – фазовая траектория переменных ($\dot{q}$, $\ddot{q}$)

Из приведенных данных (см. табл. 5.4) видно, что наряду с незначительным увеличением времени исполнения движения (17 %) потребление энергии увеличивается на 72 % за счет повышения показателей динамики и более длинной траектории обхода. Но анализ данных табл. 5.5, а также других данных имитационного моделирования позволяет заключить, что среди семейства движений обхода существуют движения, не сильно уступающие по времени исполнения оптимальному, но требующие меньшего расхода энергии, например, (подчеркнуто в табл. 5.5) с временем исполнения 1,08 с (увеличение на 22,7 %) и расходом энергии 2364 Дж (увеличение на 34,9 %). Данный факт говорит о возможности использования в предложенном решении многокритериальных функционалов оптимальности, например, на базе переменных общего энергопотребления и времени исполнения движения.

Таблица 5.5 – Показатели эффективности движения в формате [факт коллизии (1 или 0)/требуемая энергия, в Дж/время исполнения, в секундах] для семейства траекторий алгоритма *PTS*

		shiftN (коэффициент задания кривизны дуги)				
		sN1=0,1	sN2=0,15	sN3=0,2	sN4=0,25	sN5=0,3
Угол поворота, в рад	0	[1/Inf/Inf]	[1/Inf/Inf]	[1/Inf/Inf]	[1/Inf/Inf]	[1/Inf/Inf]
	0,5236	[1/Inf/Inf]	[1/Inf/Inf]	[1/Inf/Inf]	[1/Inf/Inf]	[1/Inf/Inf]
	1,0472	[1/Inf/Inf]	[1/Inf/Inf]	[1/Inf/Inf]	[1/Inf/Inf]	[1/Inf/Inf]
	1,5708	[1/Inf/Inf]	[1/Inf/Inf]	[1/Inf/Inf]	[1/Inf/Inf]	[1/Inf/Inf]
	2,0944	[1/Inf/Inf]	[1/Inf/Inf]	[1/Inf/Inf]	[0/3019,7615/1,03]	[0/4009,587/1,03]
	2,618	[1/Inf/Inf]	[0/2364,2841/1,08]	[0/2470,9326/1,08]	[0/2706,6483/1,13]	[0/3510,2751/1,13]
	3,1416	[0/2835,7348/1,08]	[0/2705,7268/1,13]	[0/2882,1055/1,13]	[0/2834,4497/1,18]	[0/3091,9094/1,23]
	3,6652	[0/3179,1196/1,13]	[0/3434,9631/1,13]	[0/3350,0978/1,18]	[0/3516,7466/1,23]	[0/3929,0859/1,23]
	4,1888	[0/3753,0138/1,13]	[0/3858,1035/1,18]	[0/3809,2319/1,28]	[0/3818,4956/1,38]	[0/3446,0052/1,58]
	4,7124	[0/4160,6469/1,13]	[0/3830,0554/1,28]	[0/3872,8177/1,43]	[0/3833,6397/1,58]	[0/3682,0241/1,83]
	5,236	[0/4443,3678/1,08]	[0/4615,5276/1,18]	[0/4713,0313/1,33]	[0/4637,2027/1,48]	[0/4550,1278/1,68]
	5,7596	[1/Inf/Inf]	[0/5018,7203/1,08]	[0/6113,1786/1,08]	[0/6232,4162/1,18]	[0/6431,5102/1,28]
	6,2832	[1/Inf/Inf]	[1/Inf/Inf]	[1/Inf/Inf]	[1/Inf/Inf]	[1/Inf/Inf]

Высокая степень дифференциации интегральных параметров движений из семейства обхода, наглядно продемонстрированная на графиках (рис. 5.18, 5.19), дает широкие возможности для выбора весов критериев оптимальности, что может, в том числе, являться предметом дополнительных исследований. Графики (рис. 5.19) построены на базе данных (см. табл. 5.5), на графиках представлены также и интегральные характеристики (рис. 5.18) для траекторий не-свободных от коллизий (выделенных пунктирными линиями на (см. рис. 5.16, а).

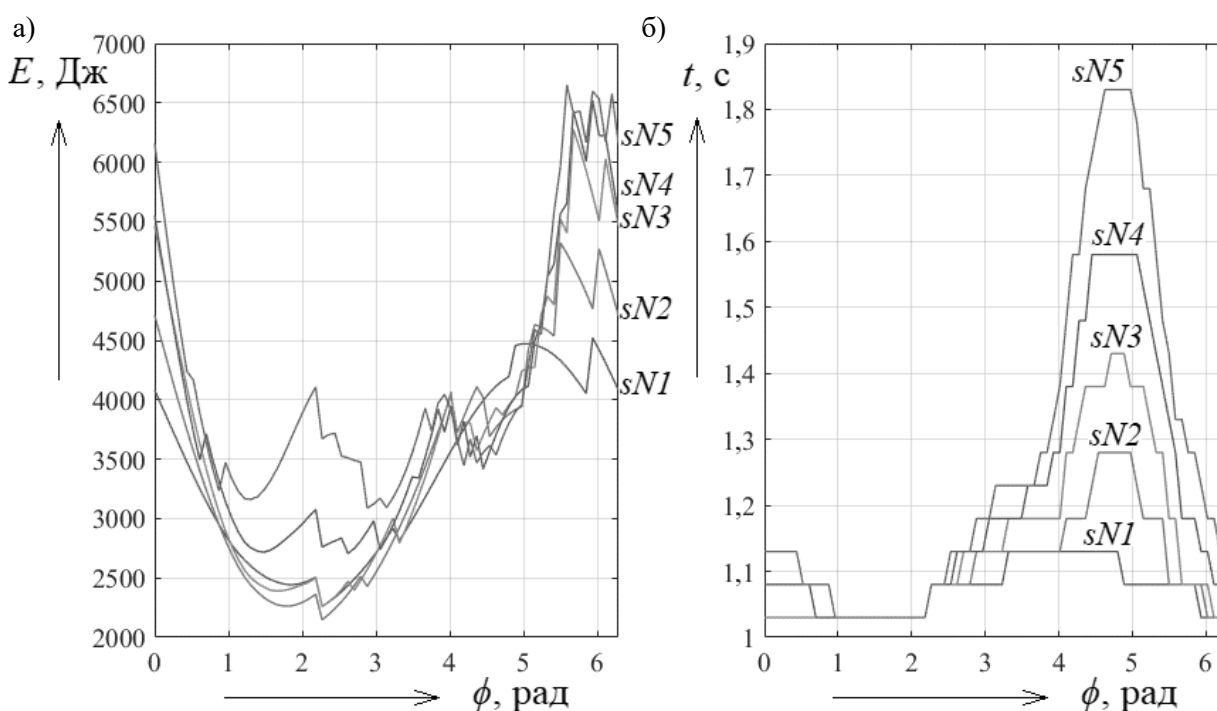


Рисунок 5.18 – Характеристики вариантов планирования движения алгоритмом *PTS* без учета коллизии: а – потребляемая энергия (E); б – время исполнения (t)

Такая визуализация параметров обхода может оказаться также удобна при проектировании СППР для операторов КРТП, при наличии у последнего возможности внесения коррекций в ре-

зультаты планирования движений, что может обеспечить «перенастройку» критериев оптимальности с учетом изменения обстоятельств рабочей сцены, и придаст свойства гибкости ИСУ.

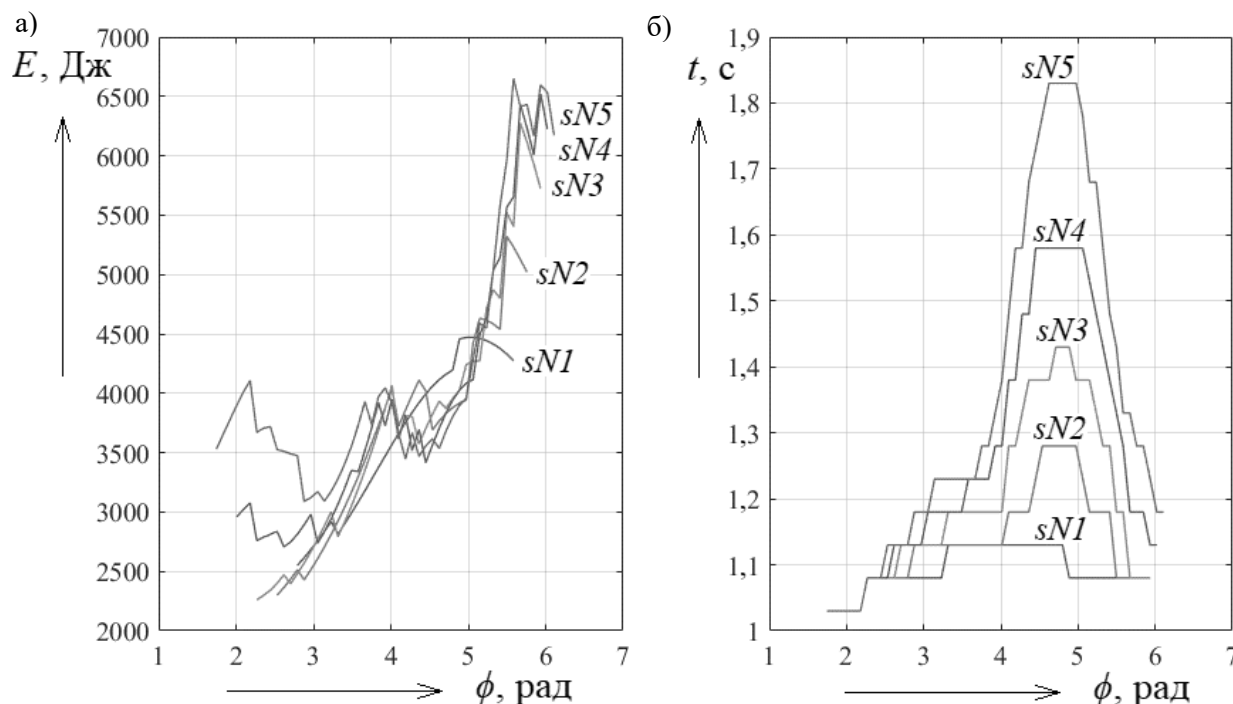


Рисунок 5.19 – Характеристики вариантов планирования движения алгоритмом *PTS* с разрешением коллизии: а – потребляемая энергия (E); б – время исполнения (t)

Сравнение результатов предложенного решения по разрешению коллизий проводилось с двумя альтернативными решениями на базе известных и хорошо зарекомендовавших себя алгоритмов *MRRT* и *CHOMP*, направленных на поиск последовательности состояний КР в КП, обеспечивающих разрешение коллизий и достижение точки назначения, заданной в ОП. На рис. 5.20, а представлена траектория движения ЦТИ реализующего ВП. Движение синтезировано алгоритмом *MRRT* в КП по заданной (текущей) конфигурации начальной точки (q_0) и найденной решением ОЗК (методом *BFGS* с поддержкой базы опорных конфигураций) конфигурации точки назначения q_f , промежуточные точки $[q(t_1)...q(t_{f-1})]$ найдены с помощью алгоритмов сплайн-интерполяции (полиномом пятой степени). Движение оптимизировано по критерию производительности (5.16), время исполнения составило 2,88 секунд с учетом пауз в начале и после окончания движения.

При изменении во времени переменных состояния КР (рис. 5.20, б) наблюдаются высокие показатели динамики в начале и в конце траектории движения. Фазовая траектория переменных ($\dot{q}, \ddot{q}, \ddot{\ddot{q}}$) представлена на рис. 5.21, г, на рис. 5.21 а, б, в представлены характерные для синтезированного движения нормированные поверхности мощности, момента, развиваемого двигателем, и ускорения в КП в разрезе шарнир - временная дискрета. При сравнении полученного движения с исходным и сформированным алгоритмом *PTS* видно, что время реализации ВП увеличилось на 227 %, но при этом требуемая энергия уменьшилась на 46 % (см. табл. 5.4), что прежде всего связано с протяженным участком равномерного движения (см. рис. 5.20).

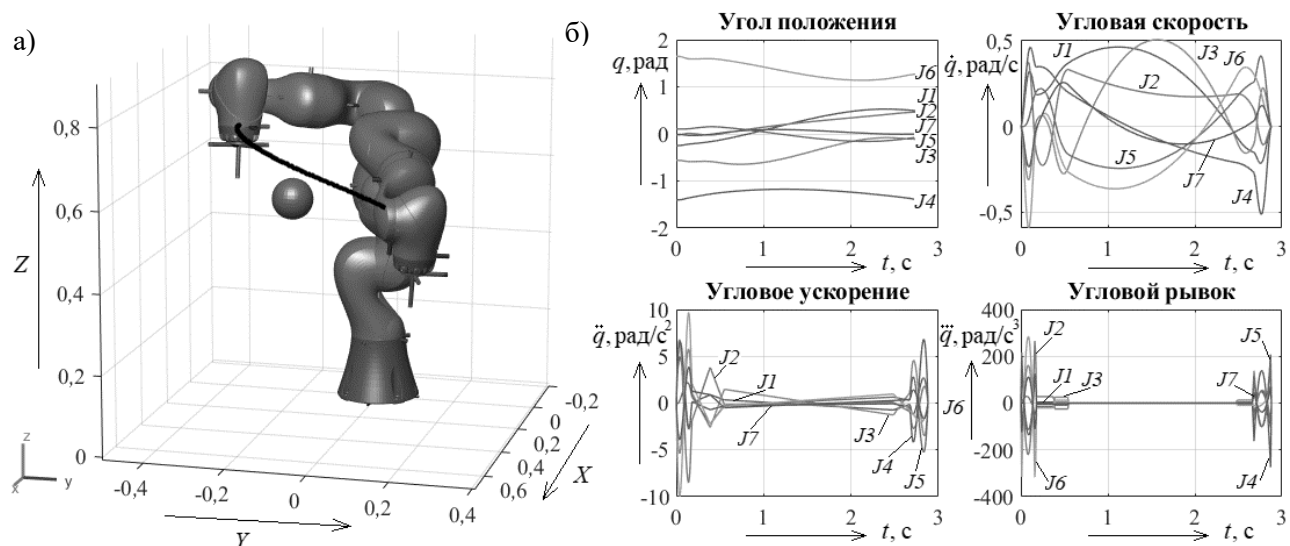


Рисунок 5.20 – Параметры движения КР, реализующего ВП с обходом коллизии алгоритмом *MRRT*: а – трехмерная визуализация траектории движения (шар – объект коллизии); б – графики изменения во времени переменных состояния $q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}$

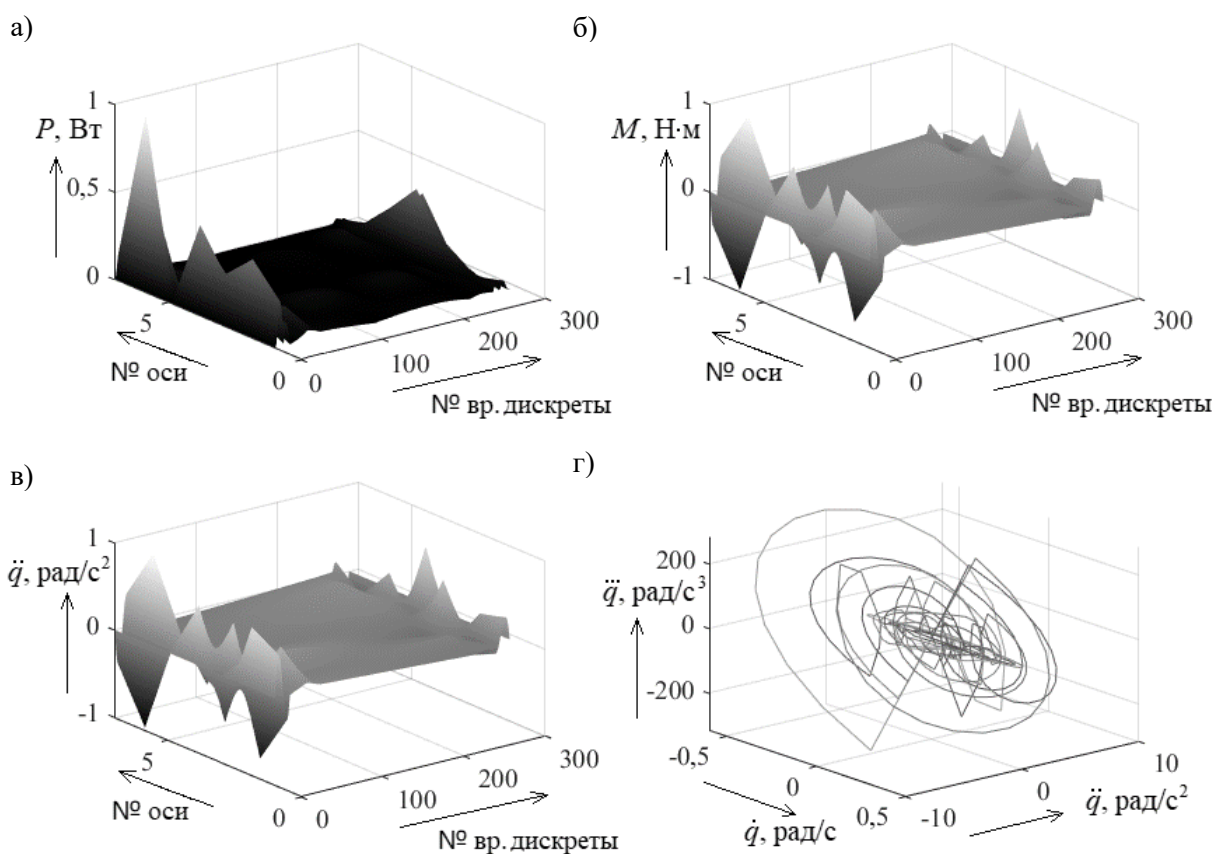


Рисунок 5.21 – Динамика движения КР (алгоритм *MRRT*): а – в – нормированные поверхности мощности, момента, развиваемого электрическим двигателем, и ускорения в КР в разрезе шарнир – временная дискрета; г – фазовая траектория переменных $\dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}$

На рис. 5.22, а представлена траектория движения ЦТИ, реализующего ВП. Движение синтезировано алгоритмом *CHOMP* в КР по заданной (текущей) конфигурации начальной точки (q_0) и найденной решением ОЗК (методом *BFGS* с поддержкой базы опорных конфигураций)

конфигурации точки назначения (q_f), промежуточные точки $[q(t_1) \dots q(t_{f-1})]$ найдены с помощью алгоритмов сплайн-интерполяции (полиномом пятой степени). Движение оптимизировано по критерию производительности (5.16), время исполнения составило 2,35 секунд с учетом пауз в начале и после окончания движения.

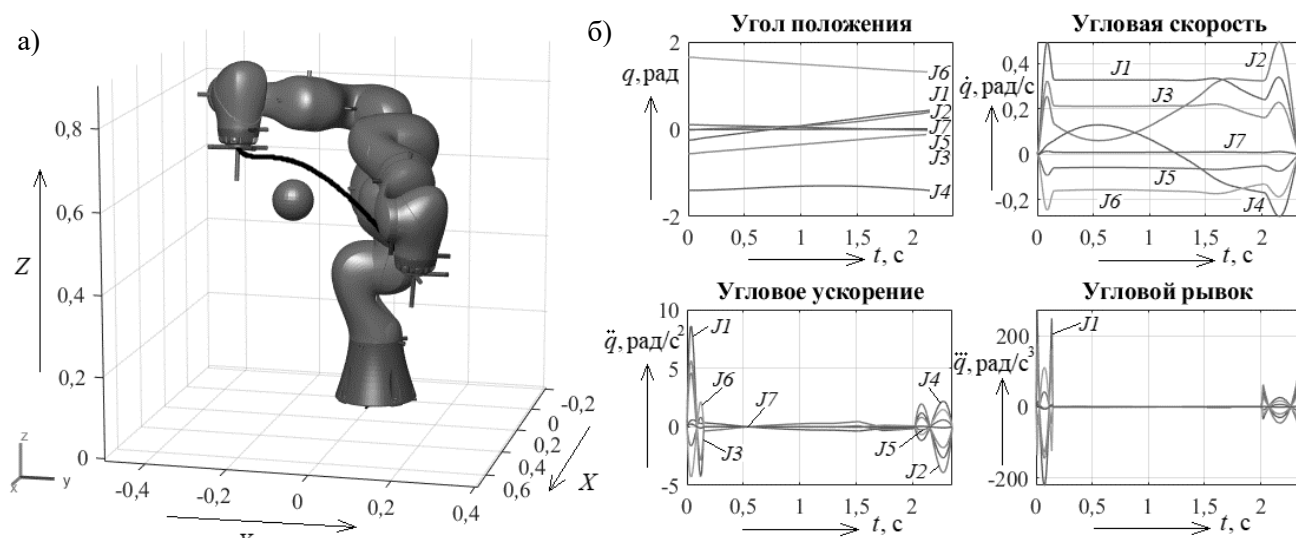


Рисунок 5.22 – Параметры движения КР, реализующего ВП с обходом коллизии алгоритмом *CHOMP*: а – трехмерная визуализация траектории движения (шар – объект коллизии);

б – графики изменения во времени переменных состояния $q, \dot{q}, \ddot{q}, \dddot{q}$

При изменении во времени переменных состояния ($q, \dot{q}, \ddot{q}, \dddot{q}$) наблюдаются высокие показатели динамики в начале траектории движения (см. рис. 5.22, б). Фазовая траектория переменных ($\dot{q}, \ddot{q}, \dddot{q}$) представлена на рис. 5.23 (г). На рис. 5.23 (а, б, в) представлены характерные для синтезированного движения нормированные поверхности мощности, момента, развиваемого двигателем, и ускорения в КП в разрезе шарнир – временная дискрета. В табл. 5.4 представлено сравнение полученного движения с исходным и сформированным алгоритмом *PTS*. Время реализации ВП увеличилось на 167 %, но при этом требуемая энергия уменьшилась на 75 %, что прежде всего связано с протяженным участком равномерного движения, а также сглаженностью траектории (см. рис. 5.22).

Необходимо отметить, что при решении задач оптимизации по минимизации потребляемой энергии для движений, реализующих ВП и ВХ, рассмотрение только показателя E_{total} в отрыве от времени некорректно, так как при уменьшении значения E_{total} растет значение $t_f - t_0$, что приводит к снижению производительности ТП, а также может вести к повышению энергопотребления оснащающего оборудования (например, шпинделя или лазерного комплекса). Для получения объективных сравнительных данных по предложенному решению и решениям, получаемым алгоритмами *MRRT* и *CHOMP*, был проведен эксперимент на имитационной модели. Для этого в редуцированном ОП, ограниченном в сферической системе координат согласно:

$$\begin{cases} 1,2217 \leq \theta \leq 0,6981; \\ -\frac{\pi}{4} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{4}; \\ 0,4 \leq R \leq 0,9; \end{cases} \quad (5.30)$$

было сформировано 100 пар точек, заданных в формате $\{q_0, TF_f\}_j, j = \overline{1 \dots 100}$. При этом, для всех алгоритмов вычислений первоначальная конфигурация q_0^j выбиралась из РДП (множества опорных конфигураций), характеризующихся эффективными для технологических операций сверления в горизонтальной плоскости позами. Для алгоритмов *MRRT* и *CHOMP* конфигурация точки назначения определялась путем решения ОЗК $q_f^j = F_{IK}(q_0^j, TF_f^j)$ с установкой в качестве начального предположения конфигурации в точке назначения наиболее близкой опорной конфигурации из РДП.

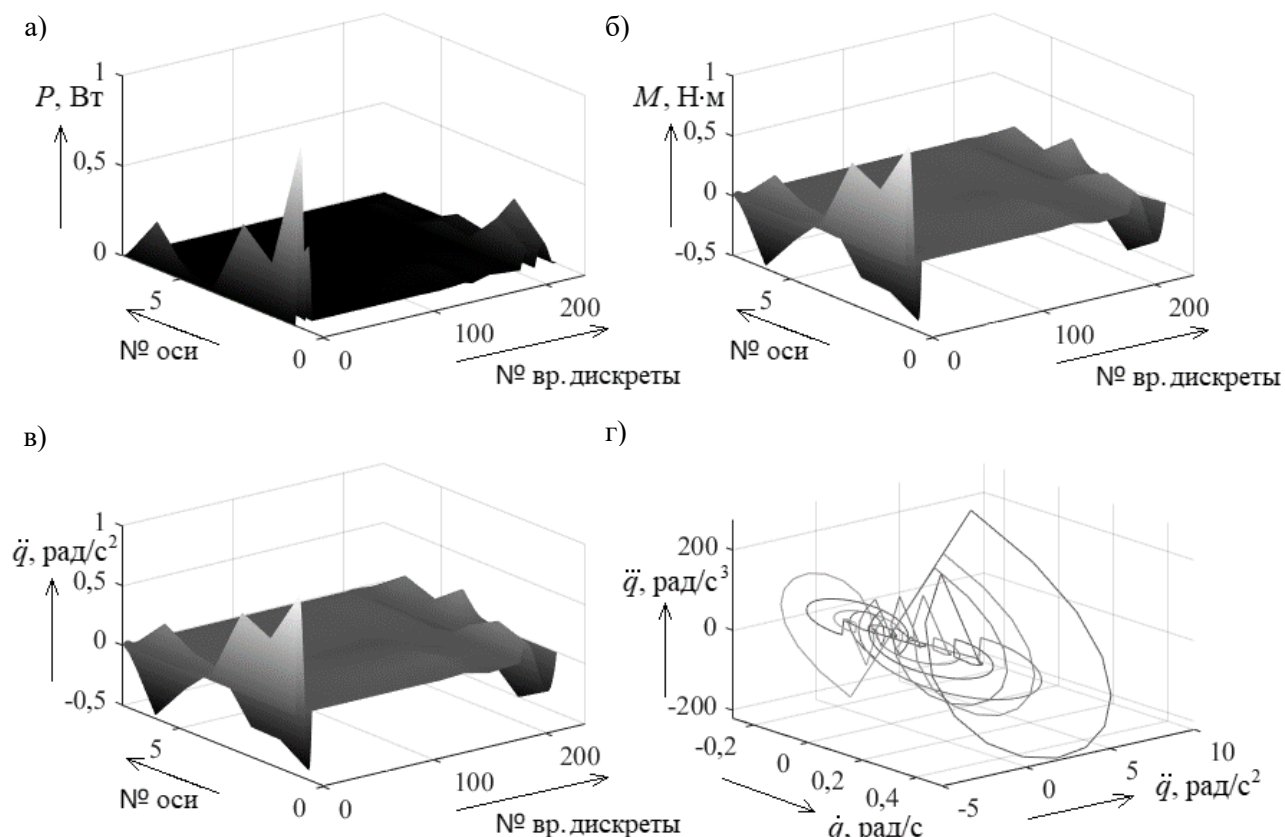


Рисунок 5.23 – Динамика движения КР (алгоритм *CHOMP*): а – в – нормированные поверхности мощности, момента, развиваемого электрическим двигателем, и ускорения в КР в разрезе шарнир – временная дискрета; г – фазовая траектория переменных $\dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}$

Для каждой пары точек был осуществлен расчет движения в режиме *PTP* с минимальным временем исполнения, далее на пути движения 6-го и 7-го звеньев помещался объект коллизии и осуществлялось разрешение коллизий алгоритмами *PTS*, *MRRT* и *CHOMP* с критерием минимизации временных затрат (табл. 5.6).

Таблица 5.6 – Усредненные данные по серии экспериментов

Алгоритм	$\overline{t_f - t_0}, \text{с}$	$\overline{E_{total}}, \text{Дж}$	$\overline{\ddot{q}_{max}}, \text{рад/с}^2$	$\overline{l_q^s}, \text{рад}$
<i>PTP</i>	1,0800	2,0901 е+03	5,6721	3,2118
<i>PTS</i>	1,0900	3,5701 е+03	14,0067	3,9026
<i>MRRT</i>	4,3380	1,2869 е+03	9,8116	5,7100
<i>CHOMP</i>	2,9700	0,5859 е+03	8,8114	3,1028

Эффективность предложенного решения подтвердилась, причем в среднем время исполнения траекторий увеличилось на 1,1 %, тогда как требуемая для перемещения энергия увеличилась на 70 %, средняя мощность увеличилась на 69 %. При реализации обходов коллизий с учетом ограничений поставленной задачи алгоритмы *MRRT* и *CHOMP* хуже справились с задачей, показав увеличение по времени на 301 % и 175 % соответственно, при этом энергия снизилась на 38 % и 72 % за счет снижения мощности на 84 % и 89 %.

В ходе постановочной части работы было отмечена важность проведения дополнительных исследований, направленных на разработку эффективных алгоритмов поиска оптимальных движений по разрешению коллизий при выполнении ВХ и ВП ТО. В качестве основного критерия оптимизации рассматривался критерий минимизации времени исполнения движения, поскольку именно время исполнения движения в большей степени влияет на общую производительность ТП, что в условиях промышленного производства является основополагающим фактором.

В рамках анализа существующих алгоритмов разрешения коллизий, в частности *MRRT* и *CHOMP*, был выявлен ряд свойственных им существенных недостатков, среди которых в качестве наиболее значимых можно выделить:

- 1) необходимость решения ОЗК для получения (q_f) (что требует дополнительных затрат вычислительных ресурсов);
- 2) нет гарантии получения результата (разрешения коллизии);
- 3) нет гарантии получения приемлемого результата (траектории движения могут быть непредсказуемыми в ОП);
- 4) высокая зависимость качества решения от параметра «начальное предположение конфигурации в точке назначения» функции F_{IK} ;
- 5) значительное увеличение времени реализации ВП или ВХ с разрешением коллизии.

В ходе исследований было разработано математическое описание алгоритма разрешения коллизии по предустановленным формам траектории движения, обозначены границы его применимости и при установленных ограничениях доказана его высокая эффективность. Удалось добиться показателей качества (по времени исполнения движения), в разы превосходящие показатели, получаемые с помощью алгоритмов общего назначения, в частности на базе алгоритмов *CHOMP* и *MRRT*.

Преимущества разработанного алгоритма:

- 1) по сравнению с алгоритмами *MRRT* и *CHOMP* дает лучший результат по времени исполнения;
- 2) имеет потенциал сокращения времени поиска решения за счет выбора первого свободного от коллизии движения из общего семейства (которое по своим характеристикам с большой долей вероятности будет не хуже вариантов, полученных алгоритмами *MRRT* или *CHOMP*);

- 3) не требуется решение ОЗК;
- 4) обеспечивает предсказуемость движения КР в ОП для оператора.

Недостатки алгоритма:

- 1) дает гарантированный результат только при планировании движений в РКП, отражающем множество эффективных поз в рамках выполнения текущей ТО;
- 2) дает гарантированный результат при разрешении коллизий только в ограниченном объеме ОП (в частности, исследования проводились при возникновении коллизий в объеме движения 6-го и 7-го звеньев КР);
- 3) высокая скорость исполнения ВХ или ВП сопряжена с высокими значениями ускорений и рывков (данная проблема может быть устранена снижением значений показателей динамики движения).

Указанные недостатки в целом не снижают высокую эффективность алгоритма PTS при соблюдении ограничений на задачу оптимизации. Использование этого алгоритма упрощает процедуру разрешения коллизий, особенно, если возможна кластеризация частей ТО в рамках ТП, при этом обеспечивается декомпозиция общей задачи оптимизации при разрешении коллизий на комплекс оптимизационных задач с ограничениями по примеру рассмотренной. То есть для значимого объема частей ТО КРТП может быть выстроено соответствие частей ТО с наборами ограничений, позволяющих применить локальные задачи оптимизации и упрощенные алгоритмы планирования разрешения коллизий. Такие кластеры могут идентифицироваться модулями ИСУ по параметрам технического задания, маршрутных или операционных карт и в соответствии с результатами работы систем распознавания рабочей сцены.

Выводы

- 1) Предложен авторский алгоритм PTS формирования оптимальных законов управления по быстродействию для движений, реализующих ВП и ВХ с учетом ограничений – высокой вероятности возникновения коллизий по ходу движения ЦТИ в области обработки в объеме движения 6-го и 7-го звеньев КР – наиболее распространенных при выполнении ТО оператором и КР в совместном пространстве.
- 2) Проведено исследование, направленное на анализ эффективности предложенного алгоритма и известных алгоритмов разрешения коллизий в недетерминированной среде КРТП с учетом ограничения ОП. Продемонстрированы высокие показатели эффективности алгоритма PTS по показателю быстродействия (производительности ТО) до 301 % по сравнению с универсальными алгоритмами CHOMP и MRRT.

5.3. Алгоритм планирования движения коллаборативного робота при разрешении коллизий на базе RL агента

С точки зрения планирования и оптимизации движения робота КРТП отличается от ТП с разделенными рабочими пространствами человека и робота необходимостью планирования движения в реальном времени в ответ на задание оператора, вышестоящей АСУ или в связи с выявленной атипичной ситуацией, например, возникновением коллизии по ходу движения. При этом одними из основных критериев эффективности результата планирования движения являются минимальные затраты времени на расчёт движения (обеспечивающие минимизацию снижения производительности, вызванного необходимостью перепланирования), а также обеспечение требуемого уровня безопасности. Необходимо отметить, что коллизию, прогнозируемую по ходу движения КР в рамках части ТО КРТП, не всегда возможно исключить за счет оперативного перепланирования движения. Так, если коллизия прогнозируется при исполнении РХ [40] или некоторых вариантов ВХ в рамках ТПд [40], перепланирование невозможно, поскольку оно приведет к изменению технологических параметров изготовления изделия.

На рис. 5.24, а представлены части ТО и схемы маршрутов движения КР при выполнении варианта технологического задания согласно данным табл. 5.7. Для маршрутов движения в рамках ВП и некоторых ВХ (см. табл. 5.7 – ВХ1), в частности, существует возможность разрешения коллизии за счет перепланирования движения, при этом движение может быть также оптимизировано в соответствии с установленным критерием.

Для КРТП широко распространены ТО совместной обработки изделий человеком и роботом, в которых пересечение рабочего пространства человека и робота наблюдается в области кисти, предплечья и запястья человека и центральной руки робота (в частности для робота KUKA IIWA – 5-го, 6-го и 7-го звеньев, а также рабочего органа), например, при осуществлении оператором вспомогательных действий по позиционированию детали или указанию точки сверления маркером и т.п. Это обстоятельство определяет возможность применения алгоритмов разрешения коллизий в РДП, превосходящих по скорости расчёта универсальные алгоритмы, что может сократить время на расчёт нового движения.

Таким образом, большинство ВХ и частей ВП схематично может быть представлено согласно (см. рис. 5.24, б), где часть ТО $\{P_{SDIS1}P_{SDIS2}\}$ является ВХ; $P_{SDIS1}, P_{SDIS2}, P_{BASE}$ – точки, характеризующие пространственные расположения КР – стартовой точки, точки назначения и базовой точки массива опорных конфигураций соответственно; CollisionObject – объект коллизии, представляемый геометрическим телом (модель тела определяется исходя из задач и требований к системе планирования движений, в том числе, для сокращения затрат на обработку графических объектов может быть представлена в виде аппроксимирующих тел) – объединением оболочек сферы и пара-

болоида; штриховыми линиями обозначены траектории движения КР по маршрутам, полученные в режиме позиционного управления (РТР).

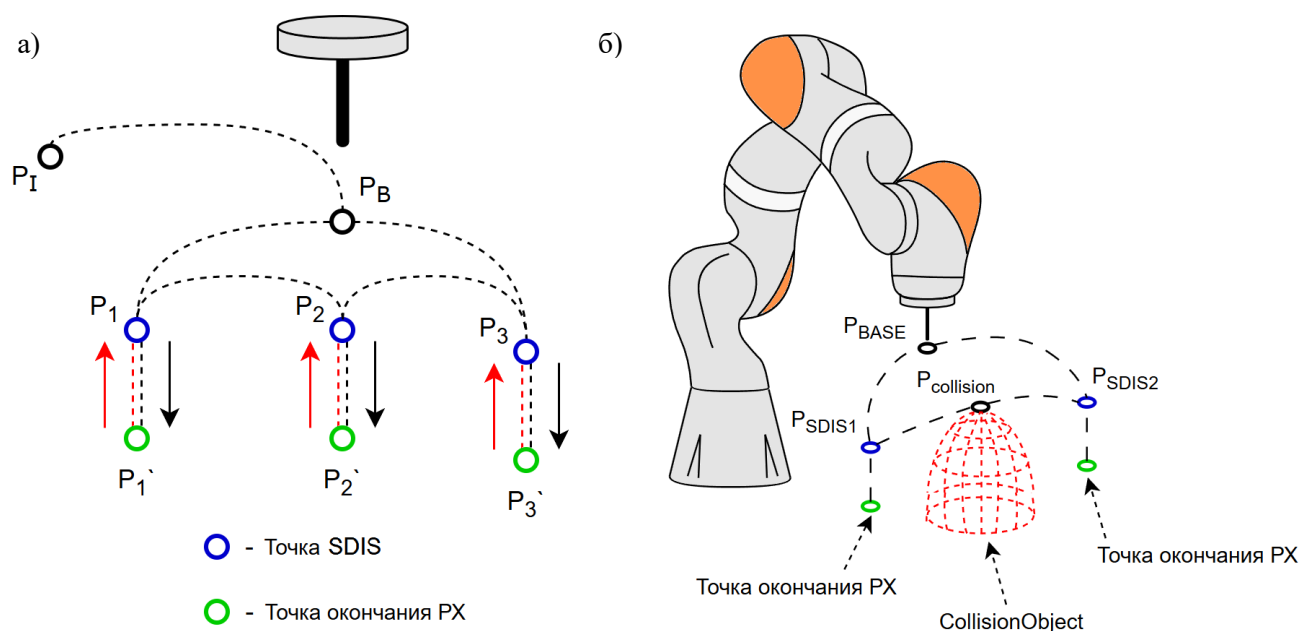


Рисунок 5.24 – Траектории движения КР в пространстве: а – части ТО и схема маршрутов КР; б – типовая схема реализации VX или частей ВП

Таблица 5.7 – Оценка возможности оперативного перепланирования движения в зависимости от типов частей ТО

Часть ТО	Путь части ТО	Оценка возможности оперативного перепланирования движения
ТПД	$P_B P_1 P_1' P_1 P_2 P_2' P_2 P_3 P_3' P_3 P_B$;	Возможно частично
ВП	$P_1 P_B$;	Возможно
PX	$\{P_B P_1'; P_2 P_2'; P_3 P_3'\}$;	Невозможно
VX ₁	$\{P_B P_1; P_1 P_2; P_2 P_3; P_3 P_B\}$;	Возможно
VX ₂	$\{P_1' P_1; P_2' P_2; P_3' P_3\}$;	Невозможно

Наличие объекта коллизии на пути реализации VX требует оперативного реагирования. Прежде всего происходит блокирование текущего движения РТР системой автоматики. Далее требуется инициировать средства перепланирования движения. Поскольку движение по типу синхронного РТР более невозможно, то необходимо наличие автоматических инструментов, способных выполнить перепланирование движения в оперативном режиме без участия человека (фактически за счет интеллектуализации решения). В общем случае перепланирование движения может осуществляться в соответствии со следующими стратегиями:

- 1) ожидание КР в текущем пространственном расположении пока объект коллизии не покинет рабочую зону;
- 2) разрешение коллизий в пространстве асинхронных движений шарниров в рамках запланированного движения РТР для каждого шарнира КР в отдельности;
- 3) планирование нового движения по пути, сформированному из предустановленных опорных конфигураций с проверкой на наличие коллизий;

4) планирование нового движения с применением универсальных алгоритмов разрешения коллизий типа RRT, CHOMP и др.;

5) планирование нового движения с применением гибридных алгоритмов разрешения коллизий, включающих в себя принципы и механизмы стратегий пунктов 3 и 4;

6) планирование нового движения с применением специализированных алгоритмов разрешения коллизий в редуцированном пространстве движений типа PTS или RLOS (exploring with RL agent in operating space), предлагаемым в настоящей работе, и др.

Необходимо отметить, что у каждой стратегии есть определенные недостатки, некоторые из которых особенно ярко проявляются в рамках КРТП:

- стратегия 1 эффективна только в том случае, если имеется твердая уверенность, что оператор отреагирует на информацию системы оповещения и устранил объект коллизии (например, уберет руку) и, если это в принципе возможно в рамках текущего действия (возможно, оператор в этот момент удерживает деталь и не может убрать руку из данной области рабочего пространства);

- стратегия 2 не гарантирует результат, а также требует наличия встроенных механизмов организации поиска траектории, свободной от коллизии, что также является отдельной задачей;

- стратегия 3 – поиск может занять значительное время, результат не гарантирован, полученное движение может не быть плавным, требует работы механизмов проверки коллизий для каждой части пути;

- стратегия 4 – результат не всегда гарантирован за приемлемый временной интервал;

- стратегия 5 – дает значительно лучший результат, чем стратегия 4, но требует наличия БД опорных конфигураций, время поиска решения может быть значительным;

- стратегия 6 (PTS) – планирование в ограниченное число итераций, не требует решения ОЗК, поддерживает механизмы дополнительной оптимизации движения (в частности, задач обеспечения быстродействия и энергоэффективности), требует задания типа опорных траекторий движения относительно ЦТИ в ОП (математически описываемых в ОП), эффективна только в РДП.

Учитывая специфику функционирования КРТП на промышленных предприятиях и приоритетность критериев эффективности результатов разрешения коллизий в виде достижения требуемого уровня безопасности и минимизации снижения производительности, предлагается разработать алгоритм разрешения коллизий в РДП, не предполагающий наличия предустановленных форм траекторий (как в стратегии 6 (PTS)), но при этом менее требовательный к вычислительным мощностям, чем алгоритмы стратегий 3 – 5 и обеспечивающий более плавные движения. Разработка алгоритмов, функционирующих в РДП, является перспективным решением, поскольку реальные КРТП промышленных производств характе-

ризуются высоким потенциалом возможности декомпозиции на классы ТО, определяющие технологические ограничения объема движений КР.

Полное множество ТО в рамках КРТП соотносится с системой классификации подмножеств ТО, классы ограничивают КП и ОП для каждого подмножества ТО на основании характерных для него эффективных и целесообразных движений КР. Таким классом, например, может быть «Сверление изделия, расположенного в горизонтальной плоскости с некоторым отклонением». В частности, схематично ТО данного класса представлена на рис. 5.25, где продемонстрировано положение ЦТИ в момент начала сверления изделия.

Наличие углов φ и θ поворота инструмента относительно горизонтальной плоскости глобальной системы координат КР объясняется сложностями установки изделия в идеально горизонтальном положении. Тогда, если создан инструментарий, позволяющий идентифицировать заданную ТО в рамках установленных классов, и с учетом понимания принципов проектирования движения КР, то каждому классу ТО может быть поставлено в соответствие некоторое РДП КР, ограничивающее свободу движений и одновременно повышающее их эффективность с точки зрения достижения целей текущей ТО.

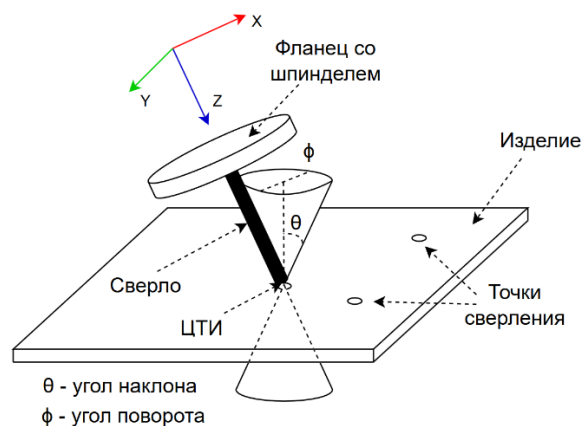


Рисунок 5.25 – Схема ТО сверления изделия, расположенного в горизонтальной плоскости с некоторым отклонением

Для реализации механизма разрешения коллизий, возникающих на пути следования 5-го, 6-го и 7-го звеньев КР, предлагается использовать RL-агент – нейронную сеть, обученную в соответствии с технологией Reinforcement Learning [47]. Преимущество данной технологии в задачах планирования движения КР в РДП заключается в возможности организации быстрого обучения под новый класс ТО без необходимости разметки данных или вывода аналитического решения.

С учетом проведенного предварительного исследования (в котором оценивалась эффективность функционирования агентов rlDDPGAgent, rlTD3Agent, rlPGAgent и др. [329]) была выбран SAC RL- (Soft actor-critic reinforcement learning) агент (rlSACAgent). Для обучения и тестирования агента была разработана оригинальная модель инфраструктуры окружающей среды (Environment), а также детерминированы характеристики агента:

1) тип агента и алгоритм обучения – SAC RL (2 интегрированных сети – актор и критик) [373];

2) вектор действий агента $[\Delta\varphi_{RL}\Delta\theta_{RL}]$ отражает изменение направления движения агента в сферической системе координат (глобальной системе координат), ограничения значений действий приняты в диапазоне $[-\frac{\pi}{16}; \frac{\pi}{16}]$;

3) нулевое направление $[\varphi_{RL}^0, \theta_{RL}^0]$ соответствует первым двум координатам вектора (углам поворота), соединяющего начальную точку и точку назначения в ОП в сферической системе координат;

4) динамическая среда задана пространством действий и наблюдений, а также функцией перезагрузки и итеративного обновления;

5) математическое описание функции вознаграждения:

- достижение цели

$$r_s = \begin{cases} 1000 & \text{if } IsDone \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (5.31)$$

где $IsDone = (|dPoseF| < 0.15)$ – функция с областью допустимых значений $[1; 0]$; $dPoseF = EE - PoseF$ – вектор, соединяющий две точки (точку назначения и текущую точку положения); $EE = NewPoseE$ – вектор, характеризующий текущее положение ЦТИ с учетом применения действий агента в глобальной системе координат; $dPoseAb = PoseAb - EE$ – вектор, соединяющий точку центра объекта коллизии и текущую точку положения;

- расстояние до цели

$$r_d = \begin{cases} -4.5 - \ln(|dPoseF|) - 10 \cdot |dPoseF|^2 & \text{if } |dPoseF| < 0.15; \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (5.32)$$

- коллизия с ядром объекта коллизии (сфера – кисть)

$$r_{c_core} = \begin{cases} \frac{-0.1}{|dPoseAb|} & \text{if } |dPoseAb| < 0.15 \wedge |dPoseAb| > 0.01 \\ -1000 & \text{if } |dPoseAb| < 0.05 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}; \quad (5.33)$$

- коллизия с «шлейфом» объекта коллизии (параболоид)

$$r_{c_tail} = \begin{cases} -1000 & \text{if } (EE_c(3) > EE_c(1)^2 + EE_c(1)^2 \Lambda(-\frac{0.1}{EE_c(1)^2 + EE_c(1)^2}) < -1000 \\ -\frac{0.1}{EE_c(1)^2 + EE_c(1)^2} & \text{if } (EE_c(3) > EE_c(1)^2 + EE_c(1)^2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (5.34)$$

где $EE_c = TF_c^{-1} \cdot EE$ – вектор положения ЦТИ в локальной системе координат объекта коллизии; $TF_c = \begin{bmatrix} vc_x & vc_y & vc_z & PoseAb \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ – матрица трансформации для локальной системы коор-

динат объекта коллизии; uc_x, uc_y, uc_z – базисные вектора локальной системы координат объекта коллизии;

- общая награда находится как сумма частных наград:

$$Reward = r_s + r_d + r_{c_core} + r_{c_tail}. \quad (5.35)$$

6) пространство состояний динамической среды агента размерности $[15 \times 1]$ представляется в виде

$$State = [PoseF; PoseE; PoseAb; \varphi_{RL}; \theta_{RL}; uc_z; uc_y; uc_x; flagColor] \quad (5.36)$$

7) пространство наблюдений в динамической среде агента представляется в виде

$$Observation = State(1:14).$$

Движение по разрешению коллизии с помощью RL-агента организуется в соответствии с предлагаемым алгоритмом RLOS. Краткая характеристика этапов алгоритма отражена в табл. 5.8, траектории движений для этапов отражены на схеме (рис. 5.26).

Таблица 5.8 – Этапы планирования движения по разрешению коллизии алгоритмом RLOS

Формальное описание этапа	Описание этапа
PTPData=getDATA(SDIS ₁ → SDIS ₂)	Получение значений параметров движения РТП с прогнозом коллизии
RLData=RLtraj(SDIS ₁ → SDIS ₂ ±δ)	Планирование пути разрешения коллизии в операционном пространстве
LINapprData= LINappr(RLData);	Аппроксимация пути RLData отрезками прямых
PTPfData=LINf(RLData _n → SDIS ₂)	Планирование заключительной части пути (с выходом в точку назначения с заданной точностью)
STData=SmoothTraj(LINapprData, PTPfData)	Формирование итогового сглаженного движения

На первом этапе процедуры разрешения коллизии задаются исходные данные для алгоритма:

- пара пространственных положений для ЦТИ P_{SDIS1} и P_{SDIS2} , которая определена в ОП кортежем $\{TF_1; TF_2\}$, и поскольку в качестве основания для перепланирования траектории был положен факт возникновения коллизии на траектории движения РТП ($P_{SDIS1} \rightarrow P_{SDIS2}$), заданной оператором или АСУ, следовательно, указанная пара также определена и в КП кортежем $\{q_1; q_2\}$;

- данные по объекту коллизии в ОП в виде кортежа $\{TF_c; F_c(x_c, y_c)\}$, где $R_c = TF_c(1:3, 1:3) = [uc_x \quad uc_y \quad uc_z]$ – матрица вращения, составленная из базисных векторов локальной системы координат объекта коллизий, при этом координаты его центра

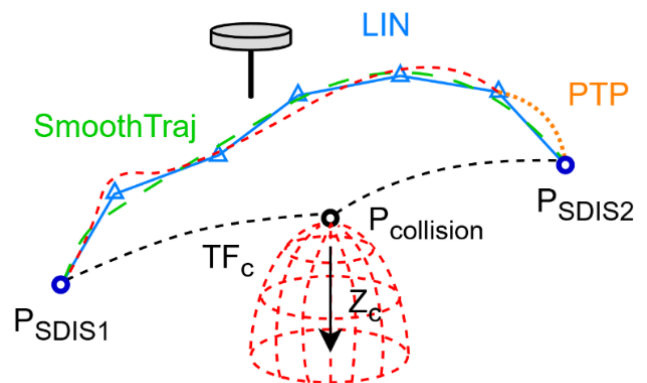


Рисунок 5.26 – Схематичное отображение траекторий 2 – 4 этапа (см. табл. 5.8) планирования движения по разрешению коллизии алгоритмом на базе RL-агента

$TF_c(1:3,4) = PoseAb$, а также базисный вектор оси аппликата $uc_z = z_c$ (указывающий обратное направление приближения объекта коллизии, в частности, моделирование руки человека, от кисти и вдоль предплечья), идентифицируется посредством интеллектуальной системы детектирования объектов, uc_x и uc_y – рассчитываются; необходимо отметить, что в процессе обучения RL-агента ориентация объекта коллизии задавалась согласно формулам:

$$uc_y = \frac{(PoseF - PoseAb)}{|\vec{PoseF - PoseAb}|}, uc_z = \frac{(uc_y \cdot vrand)}{|uc_y \cdot vrand|}, uc_x = \frac{(uc_y \cdot uc_z)}{|uc_y \cdot uc_z|}, \quad (5.37)$$

где $vrand$ – произвольный ненулевой неколлинеарный вектор (такой, что $uc_z(1) > 0$ с учетом взаимного расположения КР и оператора – КР и оператор стоят друг против друга); положение объекта коллизии определялась в окрестностях середины траектории $PTP(P_{SDIS1} \rightarrow P_{SDIS2})$; функция от двух переменных задает «шлейф» объекта коллизии, моделируя предплечье человека и защитное пространство (см. рис. 5.24, б) (в рассмотренном случае при обучении и тестировании агента использовалась функция $z_c = k \cdot (x_c^2 + y_c^2)$ для локальной системы координат объекта коллизии).

На втором этапе планируется траектория движения ЦТИ $RL_{traj}(P_{SDIS1} \rightarrow P_{SDIS2} \pm \delta)$ RL-агентом (см. рис. 5.26, представлена пунктирной линией, идущей вдоль треугольных маркеров), где δ – погрешность пространственного расположения.

Итогом работы алгоритма является массив промежуточных положений ЦТИ $PoseE$ траектории движения ($PoseE(:,end)$ – находится в окрестностях точки $PoseF$) либо ошибка агента, приведшая к столкновению.

На третьем этапе планируется движение $LIN_{appr}(q_1, RL_{traj}(...), step)$, где $step = size(RL_{traj}(...), 2)/n$ – шаг дискретизации для LIN_{appr} , n – количество аппроксимирующих отрезков прямолинейного движения (можно использовать любую другую предустановленную траекторию для участков аппроксимации). Результатом работы LIN_{appr} является массив структур Q размерностью n , где $Q_i, i = \overline{1, n}$ – i -е прямолинейное движение.

Четвертый этап. Поскольку RL-агент не гарантирует выход в точку назначения с точностью, приемлемой для ТО, комплекс движений $LIN_{appr}(...)$ дополняется заключительным движением LIN_f до пространственного расположения $TF_f = FK(q_2)$, тогда результатом будет являться дополненный массив структур Q , размерностью $n+1$.

На пятом, заключительном этапе в режиме траекторного управления происходит формирование сглаженного движения требуемой динамики по конфигурациям сформированного пути, т.е. по конечным конфигурациям соответствующих промежуточных движений – $Q(:, end)$ с помощью разработанной функции $smoothTraj(Q(:, end))$ со встроенными механизмами оптимизации движения.

Итоговый результат (Q_f) представляет собой полученное решение – движение до заданного пространственного расположения с разрешением коллизии. Конфигурации (Q_f) полученной траектории проверяются на коллизию, в случае отсутствия положительного прогноза коллизии структура, характеризующая движение, передается на исполнение ЛСУ, иначе перепланирование движения осуществляется альтернативными алгоритмами.

Результаты эксперимента на имитационной модели

Для подтверждения теоретических выкладок был проведен эксперимент на имитационной модели робота KUKA LBR IIWA 7 R800 (табл. 5.9), для 1000 движений.

Таблица 5.9 – Исходные данные для проведения эксперимента

Наименование параметра эксперимента	Значение или описание параметра
Технологическая операция	Сверление, Вспомогательный ход
Исходный режим управления	Позиционное управление РТР
Расчётное время исполнения базового движения	4,08 с
Ограничения операционного пространства	$x \in [0.2; 0.6]$; $y \in [-0.5; 0.5]$; $z \in [0.2; 0.6]$;
Расположение плоскости сверления; диапазон расчётного азимутального угла	Горизонтально, параллельно плоскости XOY глобальной системы координат, $\theta \in [0; \frac{\pi}{20}]$; $\varphi \in [0; 2\pi]$
Режим управления при разрешении коллизии	Контурное управление, траекторное управление
Модель объекта коллизий	Объединение сферы и поверхности вращения или объединение аппроксимирующих сфер
Профиль траектории движения для интерполяции	Полиномиальный (полином пятой степени, функция <i>quintipolytraj (...)</i>)
Критерий достижения результата при формировании нового движения	Достижение заданного пространственного расположения; отсутствие столкновений; время исполнения движения 4 с; соблюдение ограничений КР

Настройки алгоритмов RRT, CHOMP, PTS и RLOS выбирались таким образом, чтобы время расчёта занимало не более 50 % от времени исполнения движения. В табл. 5.10 представлены интегральные характеристики 1000 движений типа РТР в РДП для которых был сформирован положительный прогноз коллизий. Для каждого такого движения с помощью алгоритмов RRT, CHOMP, PTS и RLOS были выполнены операции планирования движения по разрешению коллизии. Данные табл. 5.10 рассчитывались, в том числе, согласно формулам (5.8 – 5.10). Дополнительно введена переменная – среднее время, требуемое для выполнения операции планирования нового движения по обходу коллизий $\bar{t}_{calc}$, с (для неуспешно спланированных движений – все равно вызывающих коллизию или несоответствующих требованиям динамики).

Таблица 5.10 – Усредненные данные результатов разрешения коллизии алгоритмами RRT, CHOMP, PTS и RLOS

Показатель эффективности	Механизмы планирования обхода коллизии				
	PTP	RLOS (1)	RRT (2)	CHOMP(3)	PTS(4)
k_{ratio}^l	1	2,0396	1,0757	1,4707	1,9799
k_{ratio}^{jerk}	1	37,10	227,56	307,37	158,98
k_{ratio}^E	1	2,0997	1,1211	2,8229	1,7898
$\bar{t}_{calc}^+$, сек	-	0,43	1,78	0,68	0,14
$\bar{t}_{calc}^-$, сек	-	0,32	2,28	0,65	0,13
Pr^+	-	0,713	*0,595	0,740	0,943

На рис. 5.27 представлена визуализация значений показателей (см. табл. 5.10) в логарифмической шкале в разрезе алгоритмов разрешения коллизий, демонстрирующая существенные отличия результатов планирования алгоритмами. На рис. 5.28 представлена визуализация результатов разрешения коллизий алгоритмами RRT, CHOMP, PTS и RLOS для одного из вариантов ВХ.

Результаты численных экспериментов на имитационной модели позволили выделить ряд преимуществ, присущих алгоритму RLOS, по сравнению с другими исследуемым алгоритмами, среди которых необходимо отметить:

- наилучший результат по плавности движения, максимальный рывок угловых координат меньше в диапазоне [4,27 ; 8,29] в зависимости от сравниваемого алгоритма;

- время, затрачиваемое на планирование движения, значительно ниже на [58 %; 313 %], чем у универсальных алгоритмов CHOMP и RRT, и превышает значение времени для алгоритма PTS на 67 %, что в абсолютном выражении составляет 0,29 с, результат для связки PTS и RLOS предсказуем, так как алгоритм PTS имеет в своем распоряжении шаблоны предустановленных траекторий;

- значение вероятности успешного разрешения коллизии для алгоритма RLOS соизмеримо с аналогами.

Среди недостатков необходимо отметить формирование алгоритмом RLOS наиболее длинной траектории движения КР в КП, что, в свою очередь, влечет дополнительные затраты энергии, но по показателю энергоэффективности RLOS не является наихудшим (см. табл. 5.10).

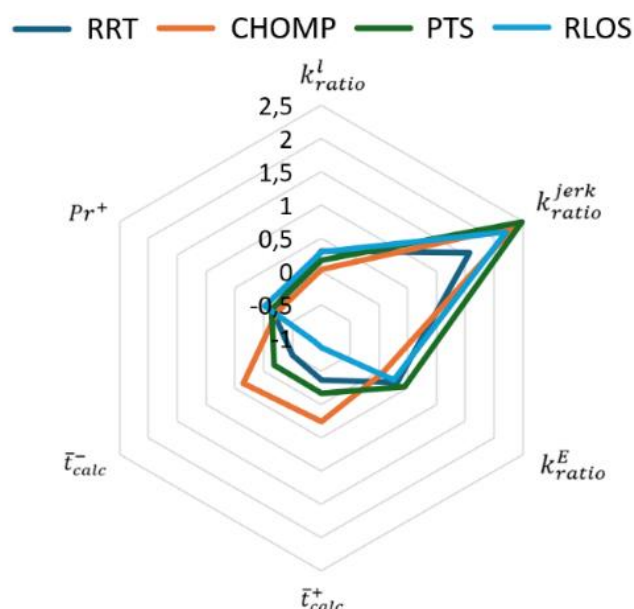


Рисунок 5.27 – Усредненные данные результатов разрешения коллизий алгоритмами RRT, CHOMP, PTS и RLOS (логарифмическая шкала)

Результаты численных экспериментов на имитационной модели позволили выделить ряд преимуществ, присущих алгоритму RLOS, по сравнению с другими исследуемым алгоритмами, среди которых необходимо отметить:

- наилучший результат по плавности движения, максимальный рывок угловых координат меньше в диапазоне [4,27 ; 8,29] в зависимости от сравниваемого алгоритма;

- время, затрачиваемое на планирование движения, значительно ниже на [58 %; 313 %], чем у универсальных алгоритмов CHOMP и RRT, и превышает значение времени для алгоритма PTS на 67 %, что в абсолютном выражении составляет 0,29 с, результат для связки PTS и RLOS предсказуем, так как алгоритм PTS имеет в своем распоряжении шаблоны предустановленных траекторий;

В результате проведенных исследований была выявлена возможность применения RL-агентов в ОП в качестве первичного механизма планирования движения при разрешении коллизий в РДП, что способствует значительному сокращению временных затрат на перепланирование. Предложенный оригинальный алгоритм RLOS, объединивший в себе достоинства математического аппарата нейронных сетей, инерциального управления и сплайн-интерполяции, продемонстрировал высокие результаты качества решений по установленным критериям, что проявилось в значительном уменьшении требуемого времени расчёта движения по сравнению с алгоритмами RRT, CHOMP и сопоставимым с PTS, более высокой степени плавности движения (снижении значений рывков) по отношению ко всем рассматриваемым алгоритмам.

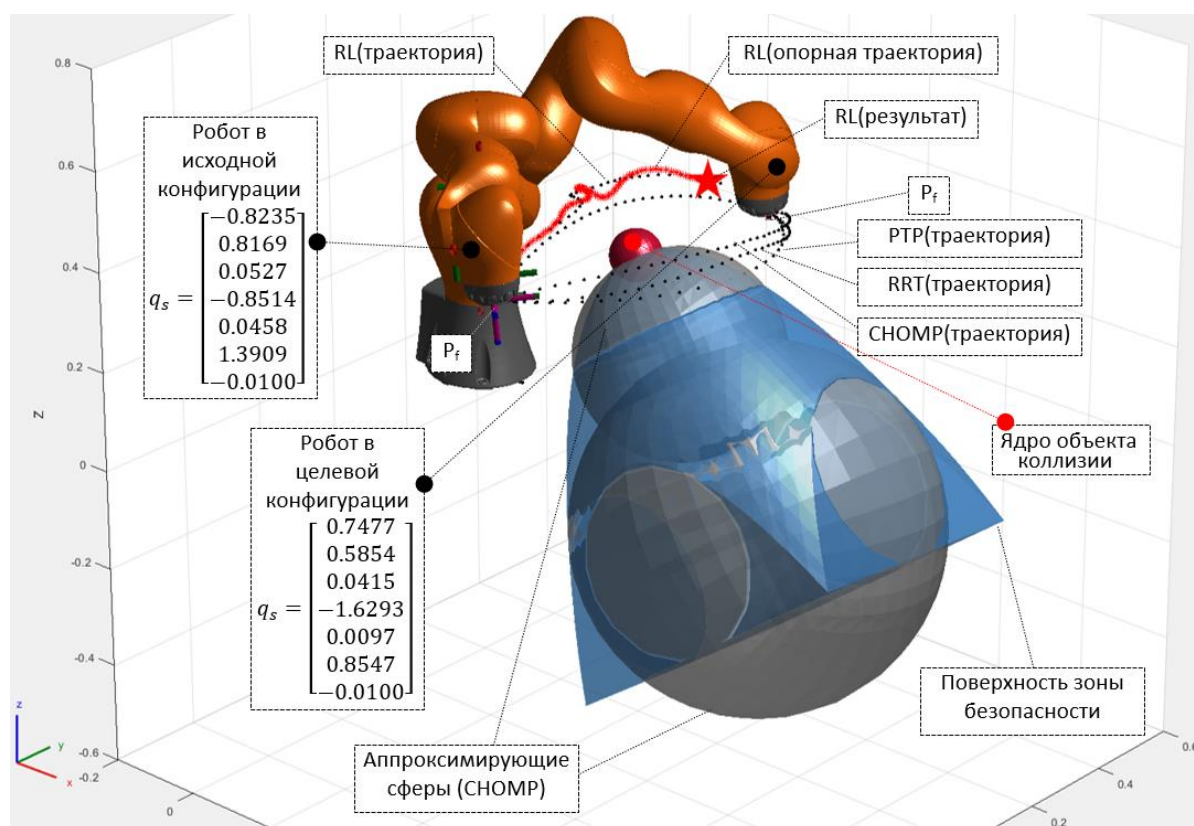


Рисунок 5.28 – Визуализация результатов разрешения коллизий алгоритмами RRT, CHOMP, PTS и RLOS для варианта BX

Выводы

1) Одними из основных требований, предъявляемых к КРТП, является оперативность управления при разрешении коллизий с объектами рабочей зоны и обеспечение заданного уровня безопасности работ при движении КР. Современные универсальные алгоритмы разрешения коллизий не всегда формируют решение за приемлемый временной интервал, что негативно сказывается на производительности ТП и повышает вероятность столкновений в режиме ожидания в случае динамической среды.

2) Разработан новый алгоритм разрешения коллизий в редуцированном ОП на базе нейронной сети – RL-агента, отличительной чертой которого является сокращенное время на

расчёт движения по разрешению коллизии, сниженные значения рывков угловых координат и возможность переобучения при изменении РДП. Полученные теоретические результаты были проверены в ходе эксперимента на 1000 движениях на имитационной модели КРТП сверления. Результаты анализа экспериментальных данных сравнения алгоритмов разрешения коллизий с RLOS демонстрируют целесообразность использования предложенного решения в условиях промышленного производства.

5.4. Технологический метод планирования движений КР на основе последовательного применения алгоритмов разрешения коллизий

Задачи планирования движений в КРТП осложнены наличием объектов коллизий. Объекты характеризуются нестационарностью положения в рабочей зоне робота в течение ТО. Параметры объектов (оператор, технологическая оснастка, например, варианты мягких захватов [100, 126], удерживающие устройства – позиционеры [343], дополнительные роботизированные устройства [327] и др.) в силу нетривиальности ТО КРТП должны учитываться в каждом шаге расчета нового движения по реализации частей ТО в оперативном формате планирования. В большинстве случаев режимы позиционного управления предустановленных или заданных инструкцией движений, при положительном прогнозе столкновений должны быть заменены на режимы контурного или траекторного управления в целях разрешения коллизий [187].

Синтез закона управления для режима траекторного управления с учетом необходимости разрешения коллизий целесообразно формировать следующим образом:

$$\begin{cases} q(t) = \{u(t) \mid \text{при } |q_{rs}(t) - q(t)| \leq \delta(t) \text{ и } S_R(t) \cap S_{Ob}(t) = 0\} \\ q_{rs}(t) = F_{IK}(TF(t)) \end{cases} \quad (5.38)$$

где $u(t)$ – закон управления; $q_{rs}(t)$ – задаваемая траектория движения в КП КР; $q(t)$ – фактическая траектория движения в КП КР; $\delta(t)$ – функция ошибки слежения; $S_R(t) = F_{surf}^R(q(t), Model_R)$ – поверхность модели КР (геометрическая оболочка); $S_{Ob}(t)$ – поверхности всех рассматриваемых объектов коллизии; F_{IK} – обобщенная функция решения ОЗК; $TF(t)$ – траектория движения центров локальных систем координат всех звеньев КР в ОП в формате массива матриц трансформаций; $Model_R$ – модель соответствующего КР в формате URDF.

В режиме траекторного управления формула (5.37) дополняется ограничениями динамики движения КР для КП (ограничениями скорости, ускорения и рывка в разрезе каждой обобщенной координаты):

$$|\dot{q}| \leq \dot{q}^{lim}, \quad |\ddot{q}| \leq \ddot{q}^{lim}, \quad |\dddot{q}| \leq \dddot{q}^{lim} \dots, \quad (5.39)$$

для ОП (ограничениями для производных линейных и угловых перемещений ЦТИ КР):

$$\dot{X} \leq \dot{X}_{max}, \ddot{X} \leq \ddot{X}_{max}, \ddot{\ddot{X}} \leq \ddot{\ddot{X}}_{max}, \quad (5.40)$$

где $X = [x \ y \ z]^T$ – позиция ЦТИ в декартовой системе координат, и

$$\dot{\Theta} \leq \dot{\Theta}_{max}, \ddot{\Theta} \leq \ddot{\Theta}_{max}, \ddot{\ddot{\Theta}} \leq \ddot{\ddot{\Theta}}_{max} \dots, \quad (5.41)$$

$\Theta = [\psi \ \theta \ \varphi]^T$ – ориентация ЦТИ, выраженная через углы Эйлера.

Существующие алгоритмы разрешения коллизий в режимах траекторного и контурного управления, в частности *CHOMP* [237] и *RRT* [291], гарантируют сходимость решения только в случае корректной настройки гиперпараметров (являющейся само по себе оптимизационной задачей), а также при наличии временных ресурсов, необходимых для расчета нового движения. Механизмы и алгоритмы разрешения коллизий на базе нейронных сетей, в частности *RL* [228], осуществляющие поиск пути из массива пространственных расположений ресурсозатратны на этапах обучения (в силу высокой размерности оптимизационной задачи), а также неадаптивны при изменении окружающей среды. Методы, основанные на инерциальном управлении по заданным траекториям в ОП, не универсальны и не гарантируют решение в полном объеме движений. Кроме того, к планировщикам движений в КРТК, помимо основного – оперативного планирования движения по разрешению коллизий, могут предъявляться требования по быстродействию [317, 321], энергоэффективности [256, 342] и другие, что еще больше усложняет проведение оптимизационных мероприятий.

Стратегии увеличения качества систем управления КРТК при планировании движений по разрешению коллизий могут свестись помимо организационных мероприятий в целом к двум направлениям: к совершенствованию и повышению эффективности отдельных алгоритмов и их использованию либо к созданию механизмов декомпозиции пространства объема движений робота на РКП, характерных для идентифицированного класса ТО и выбору наиболее подходящего или подходящих алгоритмов под текущую специфику частей ТО. Применение технологического метода [40] планирования движений КР на базе последовательности отдельных алгоритмов разрешения коллизий позволяет решать задачи планирования и оптимизации движений по разрешению коллизий, в том числе в постановке задачи Майера [71, 172].

Методология. Эксперимент

Обобщенная схема планирования движения КР в недетерминированной среде может быть представлена согласно рис. 5.29. Основной блок «Планировщик движений» посредством интерфейсов ROS2 [192, 353] определяет задание контроллеру исполнительного устройства КР в формате сообщения, содержащего все необходимые параметры движения, либо в режиме позиционного управления (при наличии предустановленного движения и отсутствии положительного прогноза коллизии), либо в режиме траекторного управления при разрешении коллизий, идентифицированных детектором объектов коллизий [48]. Установки для планировщика определяет генератор задач по ТО. Планировщик на основании имеющейся системы критериев и с

учетом результатов классификации ТО и выбора РКП подбирает наиболее подходящий под специфику текущей ТО механизм планирования, обеспечивая при этом максимизацию заявленного в блоке «Система критериев эффективности движения» функционала качества.

В целях разработки правил выбора алгоритмов в предлагаемом технологическом методе планирования движений и в результате проведения теоретических и практических исследований были выявлены причины неудачного разрешения коллизий по траекториям перепланированных движений в разрезе четырех алгоритмов *RRT*, *CHOMP*, *PTS* (exploring with preset trajectory shape) и *RLOS* (exploring with RL agent in operating space) при работе в РКП, а также варианты возможных коррекций.

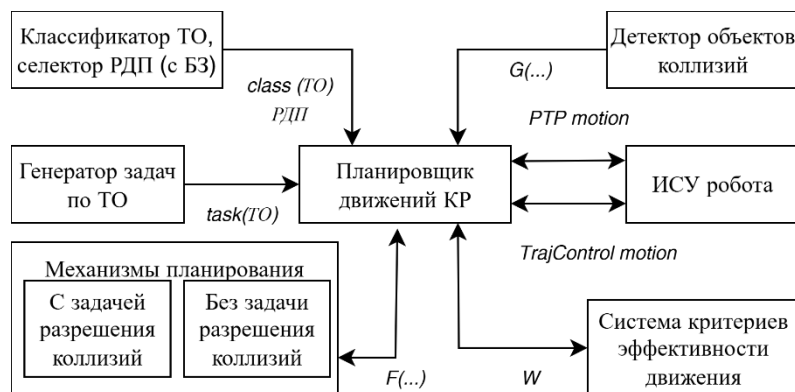


Рисунок 5.29 – Обобщенная схема планирования движения КР в недетерминированной среде, где G – вектор ключевых точек геометрических форм объектов коллизий, W – вектор весов соответствующих критериев, F – вектор функций планирования

Так, для алгоритма *RLOS* проблема получения неудовлетворительного результата на этапе планирования движения в ОП решается дообучением *RL*-агента, но это приводит к дополнительным затратам вычислительных ресурсов на этапах создания базы РКП. В то же время проблема наличия удовлетворительного решения для ОП, но приводящего к коллизии в КР, для такого типа алгоритмов решения не имеет, тогда как для алгоритма *PTS* данная проблема может быть решена за счет изменения типа предустановленной траектории движения в ОП, хотя и вызовет дополнительные затраты вычислительных ресурсов.

Универсальные алгоритмы (*RRT*, *CHOMP* и их модификации) также не лишены недостатков. Ошибки выбора траектории по большей части могут быть устранены за счет подходящей настройки гиперпараметров, среди которых существенное влияние на качество и достижимость решения оказывает величина шага расчета и параметры функций интерполяции на интервалах отрезков пути движения. Уменьшение шага и более жесткие ограничения функций интерполяции в разы увеличивают время расчета нового движения по разрешению коллизии, что, в свою очередь, может сделать алгоритмы непригодными для получения оперативного задания на движение в динамической среде. Немаловажную роль в получении неудовлетворительного решения по разрешению коллизий играет экстремальная близость объекта коллизии к звеньям КР, в таком случае все рассматриваемые алгоритмы должны дополняться функционалом первичного отхода КР от объекта коллизии с последующим планированием пути до необходимого пространственного расположения в точке назначения.

Полученные статистические данные демонстрируют неоднозначность в определении приоритетности выбора алгоритма в задачах планирования движения по разрешению коллизий в РКП в качестве основного. Таким образом, с научной точки зрения становится целесообразными разработка и исследование технологического метода, осуществляющего выбор наиболее подходящего алгоритма или последовательности алгоритмов в каждой конкретной ситуации с учетом специфики ТП для максимизации функционала качества.

В проведенном эксперименте на компьютерной модели целенаправленно были исследованы два универсальных алгоритма разрешения коллизии (*RRT* и *CHOMP* – группа 1), способные работать в полном (неограниченном) КП, и два специализированных алгоритма, эффективно функционирующих только в РКП (*PTS* и *RLOS* – группа 2).

Эффективность функционирования алгоритмов группы 2 только в РКП определяется спецификой встроенного механизма планирования движения по разрешению коллизии в ОП с последующим переходом в КП. Тогда как алгоритмы группы 1 осуществляют планирование движение непосредственно в КП. С другой стороны, эффективность алгоритмов группы 1 существенно зависит от предоставляемой в качестве аргумента конфигурации КР в точке назначения в функцию реализации. Так, если начальная конфигурация КР (q_s) и конфигурация в точке назначения (q_f) не находятся в одном и том же подмножестве РКП (Q_r), то достижение результата не будет гарантировано с приемлемыми в ТО точностью, временем планирования движения и степенью сглаженности траектории в КП.

В эксперименте обе функции реализации алгоритмов группы 1 были косвенно поддержаны базой опорных конфигураций РКП текущей ТО. Конфигурации q_f точек назначения, получаемые из структуры данных движения типа Point-to-point (РТР), рассчитываются функцией $F_{IK}(TF_f)$, которая гарантирует нахождение такого q_f , что $q_f \in Q_r$ и $q_s \in Q_r$. Без этой поддержки эффективность алгоритмов группы 1 была бы заметно снижена и в разрезе динамики движения, и по времени, затрачиваемому на расчет движения.

Необходимо отметить, что гиперпараметры соответствующих алгоритмов были настроены таким образом, чтобы в рамках одной и той же задачи они были сравнимы между собой. Наиболее важными параметрами выступали требования к времени расчета нового движения по разрешению коллизии не более 50 % от времени исполнения базового движения и вероятности получения удовлетворительного решения с первого раза не менее 60 %.

Технологический метод планирования движений КР

Для определения целесообразного порядка действий по последовательному применению рассматриваемых алгоритмов в технологическом методе предлагается оригинальная система нормированных коэффициентов качества движений. В ходе экспериментальных исследований рассчитаны значения нормированных коэффициентов в разрезе рассматриваемых алгоритмов

для дальнейшего их использования в интегральном функционале эффективности решения по разрешению коллизий. Статистическая выборка насчитывала 1000 движений КР KUKA LBR IIWA 7 R800 [367] в РКП. Описание программной модели КР представлено в [97], детализация и особенности модели раскрыты при автоматизации ТП в [108], особенности планирования движения в РКП для представленной модели робота в [35]. Расчетные формулы:

1) нормированный коэффициент качества движения по разрешению коллизии по критерию длины траектории в КП:

$$k_{ratio_{norm}}^{l_i} = \frac{(k_{ratio-LEdge^l}^{l_i})^{-1}}{\sum_1^4 (k_{ratio-LEdge^l}^{l_i})^{-1}}, \quad (5.42)$$

где $(k_{ratio}^{l_i})$ – среднее значение отношений длины траектории движения, полученного i – м алгоритмом, к длине траектории базового движения PTP в КП;

2) нормированный коэффициент качества движения по разрешению коллизии по критерию величины рывка (третьей производной угла положения):

$$k_{ratio_{norm}}^{jerk_i} = \frac{(k_{ratio-LEdge^{jerk}}^{jerk_i})^{-1}}{\sum_1^4 (k_{ratio-LEdge^{jerk}}^{jerk_i})^{-1}}, \quad (5.43)$$

где $(k_{ratio}^{jerk_i})$ – среднее значение отношения максимального рывка для движения полученного i – м алгоритмом к максимальному рывку базового движения PTP в КП;

3) нормированный коэффициент качества движения по разрешению коллизии по критерию энергоэффективности:

$$k_{ratio_{norm}}^{E_i} = \frac{(k_{ratio-LEdge^E}^{E_i})^{-1}}{\sum_1^4 (k_{ratio-LEdge^E}^{E_i})^{-1}}, \quad (5.44)$$

где $(k_{ratio}^{E_i})$ – среднее значение отношения общих затрат энергии для движения, полученного i – м алгоритмом, к общим затратам энергии при базовом движении PTP в КП;

4) нормированный коэффициент качества движения по разрешению коллизии по критерию временных затрат, необходимых для планирования движения (для успешно спланированных движений):

$$k_{norm}^{time+i} = \frac{(\bar{t}_{calc}^{+i}-LEdge^{time+})}{\sum_1^4 (\bar{t}_{calc}^{+i}-LEdge^{time+})}, \quad (5.45)$$

где $(\bar{t}_{calc}^{+i})$ – среднее время, требуемое для выполнения операции планирования нового движения для разрешения коллизий (для успешно спланированных движений);

5) нормированный коэффициент качества движения по разрешению коллизии по критерию временных затрат, необходимых для планирования движения (для неуспешно спланированных движений):

$$k_{norm}^{time-i} = \frac{-(\bar{t}_{calc}^i - LEdge^{time-})}{\Sigma_1^4(\bar{t}_{calc}^i - LEdge^{time-})}, \quad (5.46)$$

где $(\bar{t}_{calc}^i)$ – среднее время, требуемое для выполнения операции планирования нового движения для разрешения коллизий, (для неуспешно спланированных движений);

б) нормированный коэффициент качества движения по разрешению коллизии по критерию вероятности разрешения коллизии:

$$k_{norm}^{Pr^+i} = \frac{(Pr^+i - LEdge^{Pr^+i})}{\Sigma_1^4(Pr^+i - LEdge^{Pr^+i})}, \quad (5.47)$$

где (Pr^+i) – вероятность разрешения коллизии;

где $i = \overline{1,4}$ – порядковые номера соответствующих алгоритмов (табл. 5.11),

$[LEdge^l \ LEdge^{jerk} \ LEdge^E \ LEdge^{time+} \ LEdge^{time-} \ LEdge^{Pr^+i}] = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$ – нижние границы области допустимых значений соответствующих показателей.

Таблица 5.11 – Нормированные средние показатели эффективности движений, полученных алгоритмами *RRT*, *CHOMP*, *PTS* и *RLOS*

Нормированный коэффициент	Алгоритмы разрешения коллизий			
	<i>RLOS</i> (1)	<i>RRT</i> (2)	<i>CHOMP</i> (3)	<i>PTS</i> (4)
$k_{ratio_{norm}}^l$	0,0555	0,7628	0,1227	0,0589
$k_{ratio_{norm}}^{jerk_i}$	0,6642	0,1058	0,0783	0,1518
$k_{ratio_{norm}}^{E_i}$	0,0828	0,7519	0,0500	0,1153
k_{norm}^{time+i}	0,2022	0,0488	0,1279	0,6211
k_{norm}^{time-i}	-0,0947	-0,6746	-0,1923	-0,0385
$k_{norm}^{Pr^+i}$	0,2384	0,1989	0,2474	0,3153

Полученные значения в табл. 5.11, структура параметров кинематики и динамики движения (для одного движения) выделена на рис. 5.30.

Тогда оценку эффективности применения конкретного алгоритма разрешения коллизии в рамках технологического метода реализации частей ТО – ВП или ВХ, а следовательно, и получение наиболее эффективной последовательности применения отдельных алгоритмов, предлагается выполнять в соответствии с оригинальным интегральным показателем качества движения:

$$KPI_i = \frac{\Sigma_{j=1}^6 W_{i,j} \cdot K_{i,j}}{\Sigma_{j=1}^6 W_{i,j}}, \quad (5.48)$$

где $W_i = [\omega_1^i \ \omega_2^i \ \omega_3^i \ \omega_4^i \ \omega_5^i \ \omega_6^i]$ – матрица весовых коэффициентов приоритетности показателей, матрица столбец значений показателей (при этом в показателях, связанных с затратами времени на расчет, учтена вероятностью благоприятного и соответственно неблагоприятного исхода получения удовлетворительного и неудовлетворительного решения):

(5.49)



Принятые обозначения:

- 1 – ячейки, содержащие пары структур (кинематика, динамика) для каждого движения, соответствующего алгоритму разрешения коллизии; строки по порядку 1 и 2 – для алгоритма RLOS, 3 и 4 – для алгоритма RRT, 5 и 6 – для алгоритма CHOMP; 7 и 8 – для алгоритма PTS; 9 и 10 – базовое движение РТР;

- 1) приоритетность отсутствует (весовые коэффициенты одинаковые);
- 2) минимизация энергопотребления при исполнении движения $\min(E_{total})$;

3) максимизация быстродействия расчета и вероятности получения удовлетворительного решения $\min(\bar{t}_{calc}^+; (1 - Pr^+))$;

4) максимизация плавности движения $\min(\ddot{q})$;

5) минимизация потерь времени при неудовлетворительном решении $\min(\bar{t}_{calc}^-)$;

6) минимизация увеличения длины траектории $\min(lq)$ и вероятность разрешения коллизии в один проход $\max(Pr^+)$.

Таблица 5.12 – Результаты расчета KPI_i для алгоритмов разрешения коллизий *RRT*, *CHOMP*, *PTS* и *RLOS*

Матрица весовых коэффициентов (описание приоритетности критериев)	KPI_i алгоритма разрешения коллизий				Эффективная последовательность алгоритмов
	RLOS (1)	RRT (2)	CHOMP (3)	PTS (4)	
$W=[1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1]$ (приоритетность отсутствует)	0,1930	0,2626	0,0905	0,2041	2 – 4 – 1 – 3
$W=[1\ 1\ 10\ 1\ 1\ 1]$ (энергосбережение при исполнении движения)	0,1269	0,5562	0,0662	0,1508	2 – 4 – 1 – 3
$W=[1\ 1\ 1\ 10\ 1\ 10]$ (сокращение времени расчета и гарантия достижения результата)	0,1917	0,1511	0,1509	0,3889	4 – 1 – 2 – 3
$W=[1\ 10\ 1\ 1\ 1\ 1]$ (плавность движения)	0,4757	0,1685	0,0831	0,1727	1 – 4 – 2 – 3
$W=[1\ 1\ 1\ 1\ 10\ 1]$ (минимизация времени при получении неудовлетворительного решения)	0,0609	-0,0589	0,0062	0,0803	4 – 1 – 3 – 2
$W=[10\ 1\ 1\ 1\ 1\ 10]$ (минимизация увеличения длины траектории и вероятность разрешения коллизии в один проход)	0,1585	0,4263	0,1614	0,1914	2 – 4 – 3 – 1

Диаграмма (рис. 5.31) визуализирует преимущества алгоритмов в зависимости от установленных критериев качества. Результаты расчетов по экспериментальным данным позволяют предложить наиболее эффективные цепочки последовательностей применения алгоритмов для текущего РКП установленного класса ТО в зависимости от установленного интегрального критерия качества движения (см. табл. 5.12, последний столбец).

В расчете общих временных затрат не учитывается время, затрачиваемое на финальную проверку полученного движения на наличие коллизий с объектами среды, так как для всех алгоритмов оно одинаковое с точностью до 0,003 с и не влияет на параметры определения приоритетности алгоритмов.

Тестирование предложенного решения проводилось на выборке из 100 групп по 100 движений в рамках соответствующего РКП, в качестве ограничения, помимо ограничений динамических параметров, геометрии пространства и режимов ТО, выступало максимальное время, затрачиваемое на перепланирование движения, равное 50 % времени, необходимого на реализацию движения. Так, например, для движений, реализующих длинноходные ВП, время исполнения движения составляло 4 секунды, соответственно максимальное время на планирование

движения по разрешению коллизий – 2 секунды. Полученные экспериментальные данные для четырех последовательностей алгоритмов представлены в табл. 5.13, нумерация последовательности принята согласно табл. 5.12.

Экспериментальные данные подтверждают эффективность предложенных решений. Так, для последовательностей 2 – 4, 4 – 1, 4 – 2 характерна высокая степень вероятности разрешения коллизий. Необходимо отметить, что по последовательности 2 – 4 есть некоторое превышение ограничения на время расчета нового движения, в среднем на одно движения группы требуется 2,11 с, отклонение составляет 5,5 %. Отклонение не является критическим и может быть устранено за счет оптимизации настройки гиперпараметров алгоритма RRT или незначительным увеличением производительности аппаратной части вычислительного устройства. Для остальных цепочек среднее время расчета для одного движения составляет от 0,13 до 0,43 секунд. Невысокий показатель вероятности разрешения коллизий для последовательности 1 – 4 (72 %) связан с настройкой критерия на максимизацию плавности движения (см. табл. 5.13, столбец

[*jerk*; *RMSE*]). Действительно, последовательность характеризуется минимальным рывком, при этом коллизии чаще всего связаны с касанием объекта инструментом, повысить вероятность положительного исхода для цепочки 1 – 4 возможно за счет создания виртуальных защитных оболочек для объектов коллизий. Наименьшие требования ко времени расчета показали цепочки 4 – 1 и 4 – 2, за счет включения в последовательность алгоритма PTS, поддержанного БЗ предустановленных шаблонных движений для РКП. Наименее энергозатратные движения были спланированы последовательностями алгоритмов 1 – 4, 2 – 4 и 4 – 1, но из-за сниженного показателя вероятности разрешения коллизий последовательностью 1 – 4, для обеспечения энергоэффективности следует применять цепочки 2 – 4 и 4 – 1, так как почти для 30 движений из 100 для цепочки 1 – 4 потребуется подключение еще одного алгоритма, что приведет к повышению показателя энергопотребления.



Рисунок 5.31 – Приоритетность выбора алгоритма в зависимости от установленного критерия, 1 – акценты отсутствуют; 2 – энергосбережение при исполнении движения; 3 – минимизация времени расчета при максимизации вероятности достижения результата; 4 – максимизация плавности движения; 5 – минимизация времени при получении неудовлетворительного решения; 6 – минимизация увеличения длины траектории и вероятность разрешения коллизии в один проход

Таблица 5.13 – Экспериментальные данные для последовательностей применения алгоритмов разрешения коллизий

Идентификатор последовательности алгоритмов	$[Pr^+; RMSE], \%$	$[t_{gr}^+; RMSE]^*, c$	$[E; RMSE], \kappa ДЖ$	$[jerk; RMSE], м/с^3$
2 – 4	[91,50; 2,63]	[193,85; 8,66]	[76,09; 4,45]	[1827,37; 649,81]
4 – 1	[91,51; 2,71]	[12,68; 0,45]	[75,41; 4,34]	[274,97; 13,92]
1 – 4	[72,05; 4,47]	[31,46; 1,94]	[71,13; 5,71]	[181,68; 30,29]
4 – 2	[92,65; 2,55]	[15,33; 2,35]	[77,03; 4,48]	[455,77; 265,44]
* t_{gr}^+ – время, затраченное на расчет всех успешно спланированных движений группы				

Полученные расчетные данные демонстрируют возможность использовать последовательности из двух алгоритмов для перепланирования движения ВП с диапазоном вероятности получения удовлетворительного результата (в зависимости от последовательности) равным [0,72; 0,93]. В случае, если необходимо повышение вероятности положительного исхода можно использовать последовательности глубиной 3 или 4, при которых общая вероятность получения удовлетворительного решения будет повышена.

Полученные результаты расчета, анализа и моделирования движений при траекторном управлении в задачах разрешения коллизий для РКП позволяют сформировать основания для разработки системы выбора приоритетности алгоритма планирования движений в зависимости от идентифицированного класса ТО, определяющего соответствующее РКП, и установленной системы весов (критериев качества) в предлагаемом технологическом методе (рис. 5.32).

Первым этапом технологического метода является реализация процедур идентификации части ТО, для которой необходимо спланировать движение. Если часть ТО является технологическим ходом (ТПд или РХ), то планируется движение согласно алгоритмам планирования жестко ограниченных движений, если часть ТО является ВХ или ВП, то выполняется последовательность процедур (см. рис. 5.32).

Вторым этапом технологического метода является поиск возможности решения задачи планирования движения для ВХ или ВП в РКП. Если для текущей части ТО найдено подходящее РКП, то запускаются процедуры планирования движения в режиме позиционного управления, использующие решатели ОЗК с ограничениями и базу знаний РКП с опорными конфигурациями КР, если планирование движения завершается успешно и отсутствует прогноз коллизии, то заданная часть ТО реализуется за счет полученного движения.

Если прогноз коллизии с объектами рабочей зоны положителен, то выполняется третий этап технологического метода, содержащий алгоритмы планирования движений по разрешению коллизий. Задача оптимизации решается с учетом предложенной системы нормированных коэффициентов качества движений и установленного интегрального показателя – функционала оптимизации (см. табл. 5.12). Полученное в итоге движение по разрешению коллизии и реализующее ВХ или ВП передается на исполнения ЛСУ КР.

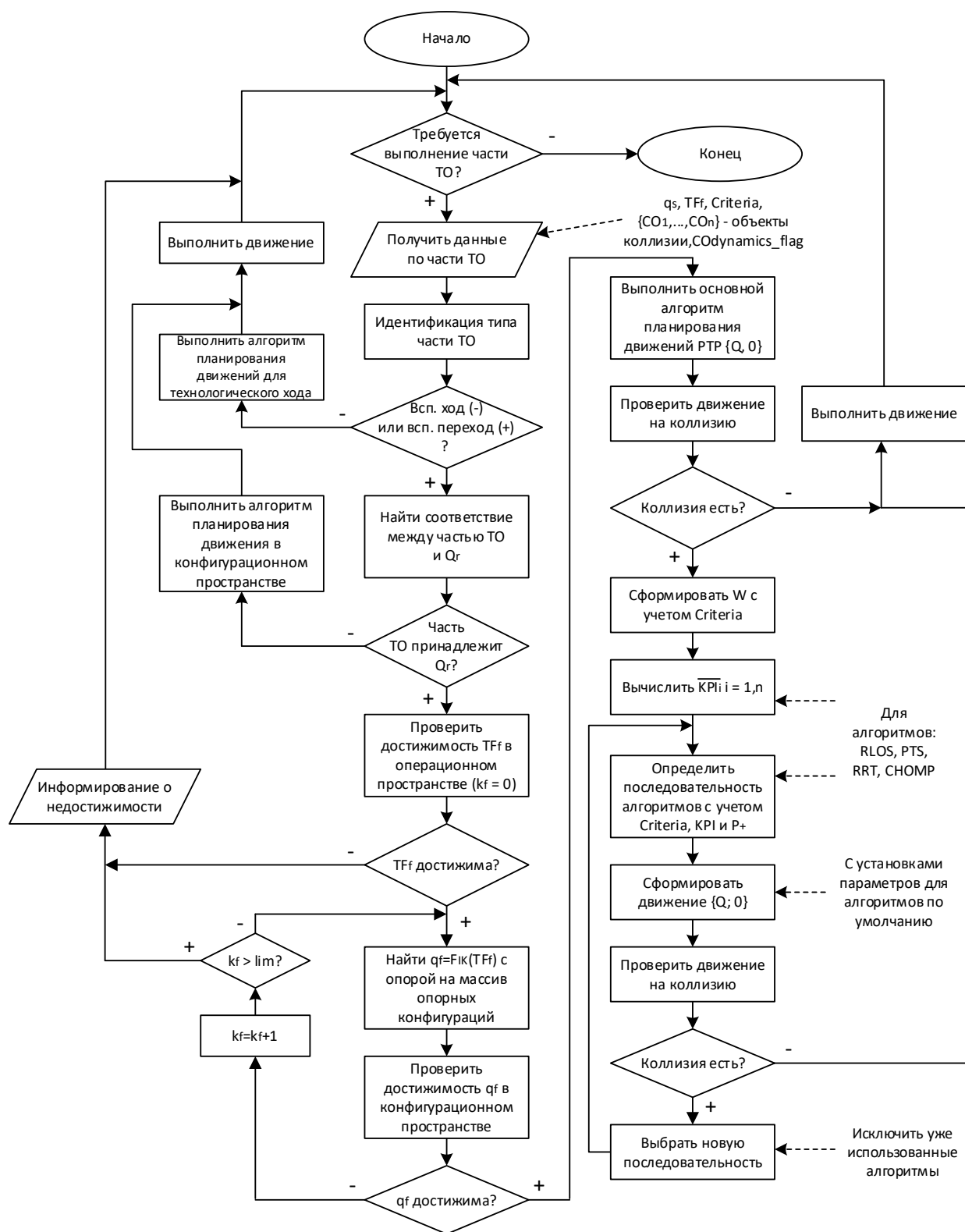


Рисунок 5.32 – Алгоритм технологического метода разрешения коллизий в РКП

Таким образом, если весь объем ТО робота в КРТП может быть декомпозирован на классы и каждому классу поставлено в соответствие РКП, в рамках которого определены в разрезе отдельных алгоритмов нормированные средние показатели эффективности движения (см. табл. 5.11), система критериев эффективности движения (матрица весовых коэффициентов) и KPI (5.48), определяющие БЗ технологического метода (см. рис. 5.32), то планирование движений по

разрешению коллизий может осуществляться в большей степени в РКП, что способствует увеличению производительности комплекса и повышению степени безопасности работ.

Результаты исследования и анализа процессов планирования движений в КРТП при наличии нестационарных объектов коллизии позволяют сделать вывод о высоком потенциале повышения эффективности, заложенном в механизмах классификации ТО с последующим приведением к соответствующему РКП и подбору актуального алгоритма разрешения коллизий, в целях повышения качества движения.

Детализированный анализ результатов, особенностей и взаимосвязей с гиперпараметрами планирования решения отдельных алгоритмов обеспечил возможность выработки интегрального функционала качества на базе настраиваемой системы критериев, позволяющей в рамках оригинального технологического метода осуществлять выбор наиболее актуальной последовательности алгоритмов, максимизируя функционал качества движения.

Экспериментальные исследования на имитационной модели (гл. 3) подтвердили преимущества предлагаемого решения по отношению к каждому алгоритму в отдельности, выражающиеся в сокращении среднего времени на расчет движения, повышении вероятности получения удовлетворительного результата при ограниченном времени, обеспечении плавности движения и др., в зависимости от настроек функционала качества.

Выводы

1) Недетерминированная среда КРТК значительно усложняет процессы планирования движений по реализации частей ТО в рамках производства. Существующие алгоритмы разрешения коллизий не всегда гарантируют получение удовлетворительного результата за ограниченный временной интервал, определенный необходимостью оперативной реакции на изменения в рабочей зоне. В связи с этим разработка мультиалгоритмических решений видится перспективным.

2) На базе разработанной имитационной модели движения робота KUKA LBR IIWA получена оригинальная экспериментальная выборка, содержащая параметры 1000 движений КР в РКП. Анализ качества движений реализован с помощью расчета и сравнения значений предложенной системы нормированных коэффициентов. Результаты статистической обработки позволили определить приоритетность выбора алгоритма разрешения коллизий в зависимости от установленного функционала качества движения.

3) Предложен оригинальный технологический метод планирования движений КР, осуществляющий на основе предложенной настраиваемой системы критериев выбор и реализацию наиболее актуальной последовательности отдельных алгоритмов разрешения коллизий, максимизируя функционал качества движения и обеспечивая повышение степени безопасности и производительности КРТП. В результате численных экспериментов выявлены преимущества

предлагаемого решения по отношению к каждому алгоритму для достижения критериев, а именно: минимизация: увеличения длины траектории и вероятности разрешения коллизии за один проход; затрат энергии на исполнение движения; времени при формировании неудовлетворительного решения; времени расчета при гарантированном результате в зависимости от выбранных настроек функционала качества.

5.5. Разработка высокоуровневого алгоритма формирования итоговой траектории движения коллаборативного робота с учетом приоритетности критериев эффективности технологического процесса

Результаты исследований (в гл.4 и 5) позволяют формировать комплекс методов и алгоритмов планирования и оптимизации движений КР в недетерминированной рабочей среде КРТП. Алгоритмическое обеспечение базируется на имитационных моделях (гл. 3) и включает расширенный набор вариантов реагирования в зависимости от заданной стратегии управления, включающей постановку задачи оптимизации, функционал качества, состояние КР и других элементов ПАК, а также состояния рабочего окружения. С целью разработки программного обеспечения ИСУ КРТП, реализующей предложенные варианты реагирования, был разработан новый обобщающий алгоритм, представленный в виде укрупненной блок-схемы на (рис. 5.33 и 5.34).

На первом этапе функционирования алгоритма осуществляется загрузка или генерация программы реализующей ТО в контексте частей ТО (ВП, ВХ, РХ, ТПд). Генерация такой программы выполняется в том случае, если источником знаний о ТО является оператор, который в реальном времени посредством принятой системы идентификации команд [48] проектирует части ТО. Вместе с программой ТО (представляющей собой полное или фрагментарное маршрутное, операционное или маршрутно-операционное описание) загружается комплекс моделей и осуществляется инициализация их параметров.

Далее по заранее определенным паттернам при помощи дискретного классификатора [31, 135], например, выполненного на базе нечеткой системы или нейронной сети, части ТО соотносятся с заранее рассчитанными и предустановленными в статическом модуле БЗ технологическими сценариями, например: а) сверление детали в горизонтальной плоскости; б) сверление в вертикальной плоскости; в) послойный съем металла фрезой; г) шлифование боковой поверхности трубы; д) торцевание изделия из листового металла и т.п. Соответствие необходимо для обеспечения работы ключевых методов и алгоритмов планирования и оптимизации движений и формирования закона управления для ЛСУ в части:

- режимов управления;
- ограничений, характерных для разных типов частей ТО;
- функционалов качества;

- баз знаний редуцированных пространств;
- шаблонов движений;
- процедур интерполяции и сглаживания;
- режимов разрешения коллизий;
- механизмов перехода между ОП и КП и т.д.

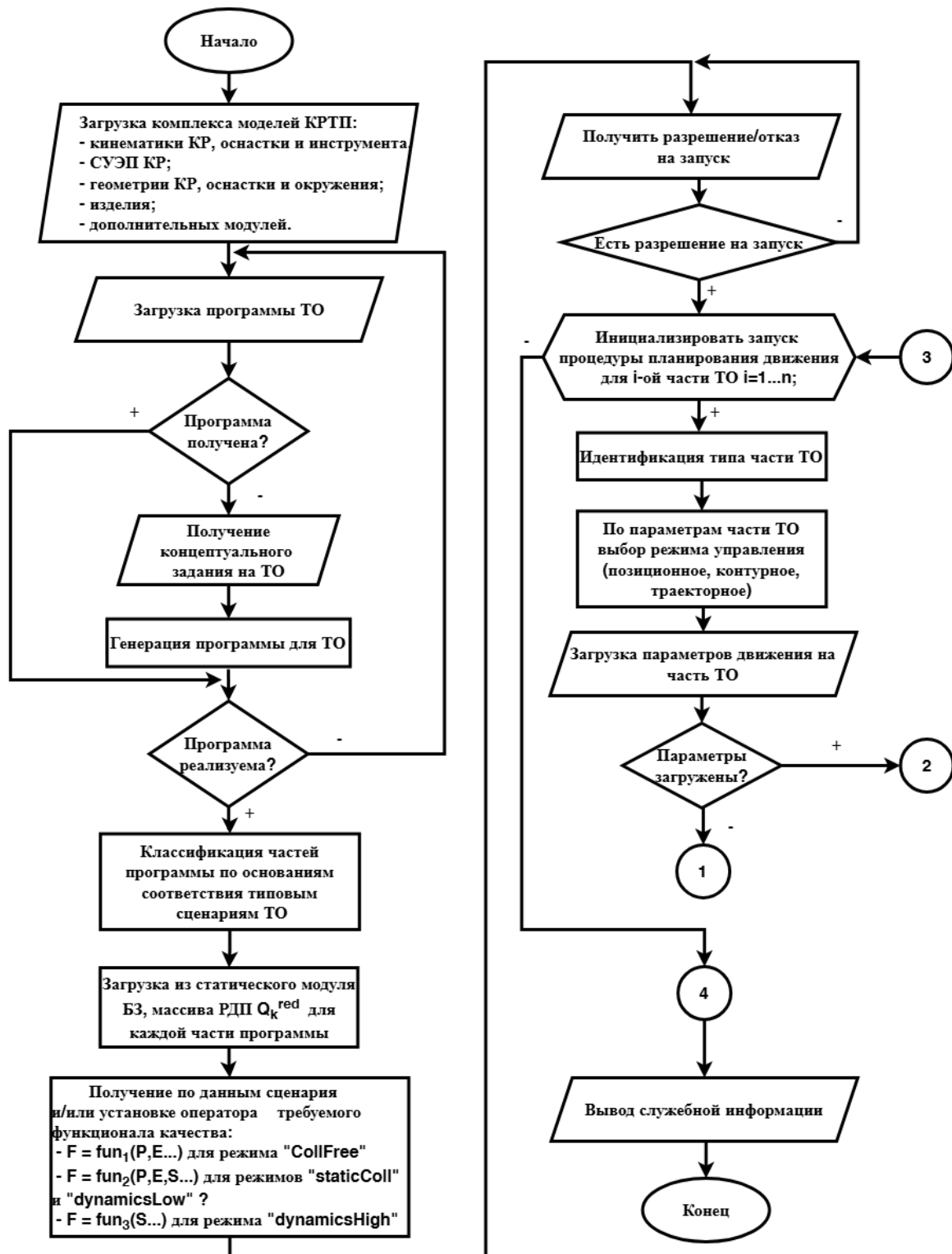


Рисунок 5.33 – Комплексный алгоритм формирования итоговой траектории с учетом приоритетности критериев (1-й фрагмент)

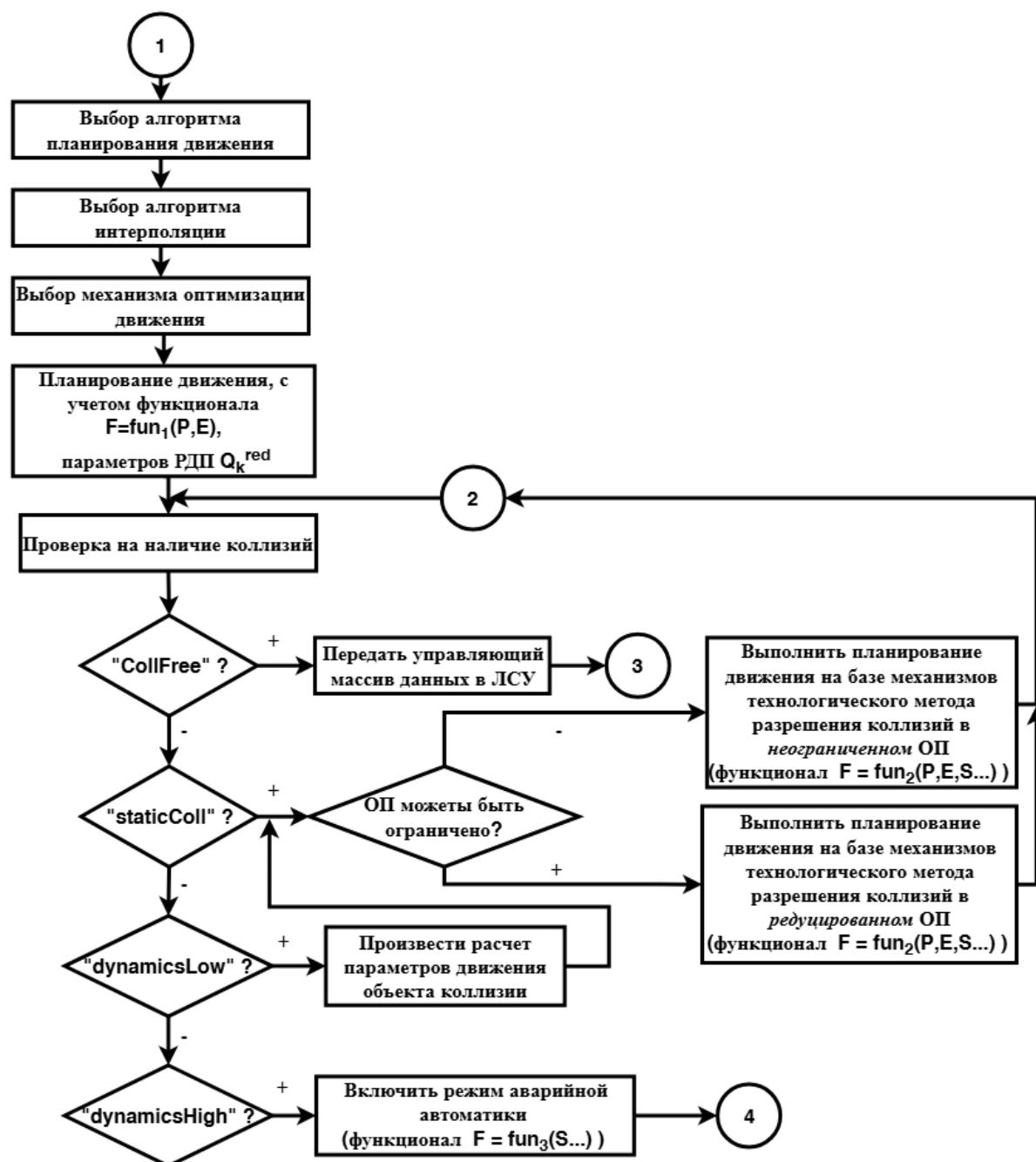


Рисунок 5.34 – Комплексный алгоритм формирования итоговой траектории с учетом приоритетности критериев (2-й фрагмент)

На втором этапе при наличии разрешения на организацию движений КР запускается цикл. В цикле при наличии в программе ТО детализированного описания параметров движения осуществляется попытка реализовать движение либо при отсутствии детализации осуществляется попытка такое движение спланировать. В случае успешного планирования и оптимизации движения, передается управляющий сигнал ЛСУ.

По полученному соответствию между частью ТО и предустановленным сценарием осуществляется выбор и настройка параметров локальных алгоритмов планирования, оптимизации, разрешения коллизии и других. Параметры локальных алгоритмов, как и системы приоритетности критериев эффективности, могут меняться динамично в зависимости от развивающей-

ся ситуации, связанной с прогнозом возможности реализации движения без столкновений. Система мониторинга рабочей сцены [262] позволяет фиксировать 4 состояния внутри КРТП относительно спланированного движения КР:

- 1) если спланированное и оптимизированное движение по прогнозу не вызывает коллизии, то соответствующий сигнал будет передан для исполнения ЛСУ;
- 2) если прогноз по коллизии положительный, и объекты коллизии статичны, то запускаются механизмы планирования и оптимизации движения на базе технологического метода разрешения коллизий в неограниченном ОП (если ограничить ОП не представляется возможным) либо в ограниченном ОП (если есть возможность редуцировать ОП);
- 3) если есть объекты коллизий, характеризующиеся низкой скоростью (интерпретация в количественном выражении качественного термина «низкая» и «высокая» для скорости относительна и оценивается исходя из динамических характеристик КР и времени реакции ИСУ) движения и предсказуемой траекторией, и производится расчет параметров движения объекта, то запускаются алгоритмы второго варианта с дополнительными данными о движущихся объектах коллизии;
- 4) при наличии объектов коллизий, характеризующихся высокими скоростями и/или непредсказуемой траекторией движения, запускается аварийный режим функционирования ИСУ КР, подающий ЛСУ сигнал об экстренной остановке, перемещении в предустановленную конфигурацию или иные команды, не требующие значительного времени реакции управляющих программ.

Все движения, сформированные алгоритмами разрешения коллизий, проходят повторную проверку на наличие коллизий. В случае отрицательного прогноза соответствующие управляющие сигналы для реализации движений передаются ЛСУ КР. Таким образом, полученные движения, реализующие ТО КРТП, являются оптимизированными в соответствии с установленными критериями стратегии управления в ТП. Тестирование работоспособности алгоритма и доказательства эффективности предложенных решений представлено в (гл. 3 и 6).

Выводы

- 1) Предложен оригинальный комплексный алгоритм, интегрирующий разработанное ранее алгоритмическое обеспечение в целях планирования и оптимизации движения КР по реализации части ТО в недетерминированной среде КРТП. Алгоритм определяет ключевые концептуальные взаимосвязи для программного обеспечения ПАК КРТП, предназначенного для управления КР в КРТП, в задачах максимизации производительности комплекса при исполнении ТО, обеспечения требуемого уровня безопасности для оператора и максимизации энергоэффективности СУЭП КР и оснащающего оборудования.

Выводы по главе 5

Показано, что недетерминированная среда КРТП значительно усложняет процессы планирования движений по реализации частей ТО в рамках производства. Существующие алгоритмы разрешения коллизий не всегда гарантируют получение удовлетворительного результата за ограниченный временной интервал, определенный необходимостью оперативной реакции на изменение в рабочей зоне.

Проведен анализ группы современных алгоритмов разрешения коллизий с учетом специфики рассматриваемого класса КРТП и декомпозированных ТО, среди выявленных основных интегральных недостатков алгоритмов отмечены высокие временные затраты на планирование движений по разрешению коллизий при требуемом уровне точности и безопасности перемещения ЦТИ и звеньев КР в рабочем пространстве.

Разработана группа оптимизационных алгоритмов по разрешению коллизий, в основе которых заложены принципы сокращения размерности оптимизационных задач за счет обращений к базе знаний РКП, соответствующей классу исполняемой части ТО. Повышение производительности алгоритмов достигнуто за счет планирования пути в КП через опорные конфигурации, соответствующие эффективным технологическим пространственным расположениям КР.

Разработана группа оптимизационных алгоритмов по разрешению коллизий в редуцированном операционном пространстве рабочей зоны КР, характерном для синтеза законов управления короткоходными перемещениями ЦТИ. В основе вычислительных механизмов заложены принципы математического аппарата преобразования пространств по предустановленным эталонным траекториям и универсальных аппроксиматоров, в исполнении нейронных сетей, обученных по технологии Reinforcement Learning. Алгоритмы данной группы за счет БЗ РДП позволяет кратно сократить время на вычислительные процедуры и становятся неотъемлемой частью математического обеспечения системы управления и оптимизации планирования движений КР в КРТП.

Для реализации принципов ситуационного управления в специфике конкретной рассматриваемой части ТО предложен оригинальный технологический метод планирования движений КР, осуществляющий на основе предложенной настраиваемой системы критериев выбор и реализацию наиболее актуальной последовательности отдельных алгоритмов разрешения коллизий, максимизируя функционал качества движения и обеспечивая повышение степени безопасности и производительности КРТП.

Предложен оригинальный комплексный алгоритм, интегрирующий разработанное ранее алгоритмическое обеспечение в целях планирования и оптимизации движения КР по реализации части ТО в недетерминированной среде КРТП. Алгоритм определяет ключевые концептуальные взаимосвязи для программного обеспечения ПАК КРТП, предназначенного для управления КР в КРТП, в задачах максимизации производительности комплекса при исполнении ТО, обеспечения требуемого уровня безопасности для оператора и максимизации энергоэффективности СУЭП КР и оснащающего оборудования.

Глава 6. Разработка алгоритмического и программного обеспечения ИСУ коллаборативным роботизированным технологическим процессом

Анализ современных отечественных авиастроительных производств выявил существенную особенность, выраженную в высокой степени сложности развертывания систем управления нетривиальными ТП на базе готовых программных решений. Уникальная продукция, штучное производство и повышенные требования информационной безопасности на авиационных предприятиях создают предпосылки для значительного увеличения стоимости внедрения и отладки имеющихся коммерческих программных решений внешними предприятиями-интеграторами и не всегда с гарантией удовлетворительного результата. Поэтому зачастую задачи по синтезу АСУ ТП возлагаются на специалистов профильных подразделений предприятия, которые из отдельных локальных решений синтезируют уникальное решение, адаптированное под конкретный ТП производства. Отсюда формируется востребованность в разработке научных и практических решений по формализации механизмов, методик и структур синтеза ПАК интеллектуальных систем управления КРТП. Целевой задачей такого ПАК следует считать обеспечение надежного и эффективного функционирования ИСУ КРТП, а также создание инфраструктуры для синтеза законов управления основным и вспомогательным КР для исполнения частей ТО, работы систем сенсорики и оповещения, механизмов оптимизации, инструментов диагностики и моделей состояний. Глобально в ИСУ КРТП на базе рассматриваемого ПАК должен осуществляться выбор стратегии планирования движения и ее реализации. Концептуально варианты выбора в рамках стратегии планирования (рис. 6.1) следующие:

- синтез функционала качества движений КР (максимизация производительности, энергоэффективности, степени безопасности и их комбинации);
- идентификация части ТО (ТПд, ВП, РХ, ВХ);
- выбор актуального КП для части ТО (по БЗ РДП);
- выбор режима управления;
- выбор шаблона траектории движения;
- выбор шаблона динамики движения по профилю угловой скорости;
- выбор алгоритма сглаживания (интерполяции) движения при контурном и траекторном управлении;
- выбор способа нахождения движения в КП по заданным пространственным расположениям в ОП (инерциальный способ, ОЗК с ограничениями, ОЗК без ограничений);
- выбор метода решения ОЗК (BFGS, LM и т.п.) и параметризация начальных условий, определяющих характеристики движения;

- выбор стратегии реагирования на изменения поведения оператора в рабочей зоне (блокировка движения, снижение показателей динамики движения, сокращение рабочей области КР, формирование оповещений);
- идентификация режима совместной работы (закрытый контур, сосуществование, кооперация, коллаборация);
- выбор механизмов разрешения коллизий в редуцированном КП (отдельные алгоритмы, мультиалгоритмический механизм);
- выбор механизмов разрешения коллизий в полном КП и др.

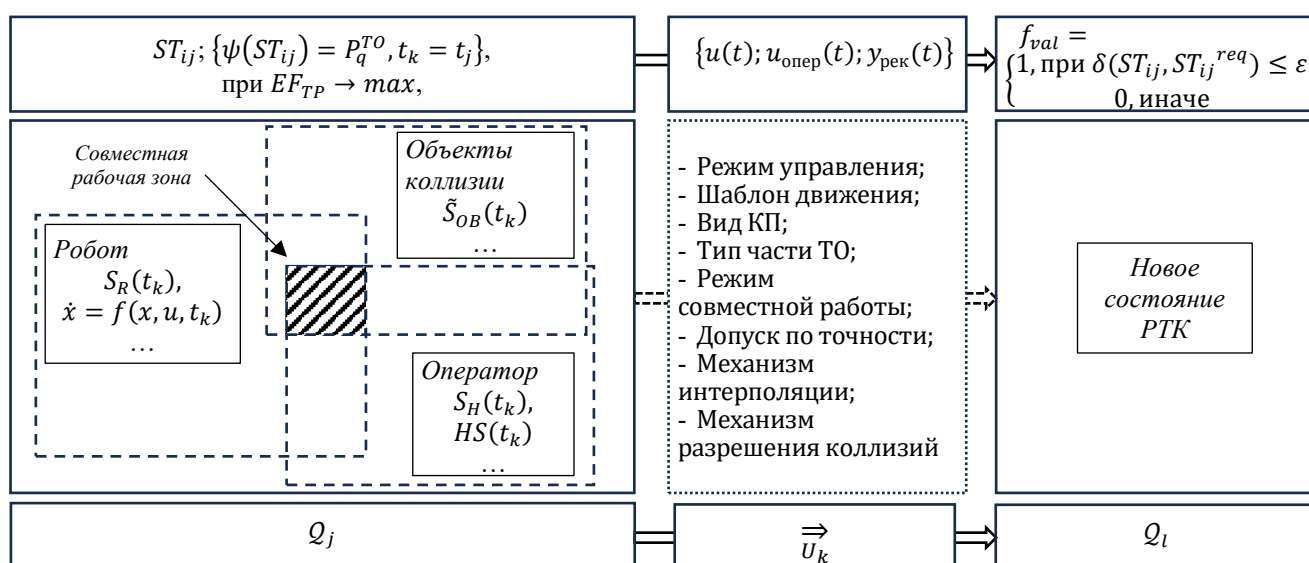


Рисунок 6.1 – Укрупненная схема групп параметров, определяющих стратегию движения КР

В текущей главе представлены нетрадиционные решения по формализации элементов ПАК, специфицирующие требуемую эффективную структуру и поведение ИСУ КРТП в концепциях объектно-ориентированного проектирования. Кроме того, предложены (помимо решений в гл. 4 и 5 базовые элементы программной части алгоритмов синтеза закона управления в позиционном и траекторном режимах.

6.1. Проектирование аппаратной части программно-аппаратного комплекса ИСУ коллаборативного роботизированного технологического процесса

Для апробации результатов научных исследований был разработан ПАК КРТП. Комплекс реализован на базе основного технологического оборудования – промышленного робота KUKA LBR IIWA7 R800 [287], внешний вид КР и элементов его базовой комплектации представлен на рис 6.2.

Параметры рабочей области КР представлены на рис. 6.3. Структурная схема ПАК представлена на рис. 6.4. В качестве позиционирующих устройств в рамках научных исследований в зависимости от рассматриваемого ТП были использованы одноосевой позиционер KUKA md250, мобильный робот KUKA youBot (рис. 6.5) [288], шести осевой робот малой грузоподъемности (WHEELTEC moveit с устройством управления на базе Raspberry Pi и STM32F103VET6), имитаторы роботов, стационарная оснастка, а также KUKA LBR IIWA7 R800 в роли удерживающего устройства.



Рисунок 6.2 – Внешний вид оборудования робота KUKA LBR IIWA7 R800: 1 – соединительный кабель к пульта оператора; 2 – пульт оператора (панель управления KUKA SmartPad); 3 – манипулятор; 4 – соединительный кабель к контроллеру КР; 5) контроллер КР (KUKA Sunrise Cabinet)

Аппаратная часть ПАК, помимо основного КР и представленных позиционирующих устройств, включала:

- захват Festo EHPS-25-Aco 8070830 K598;

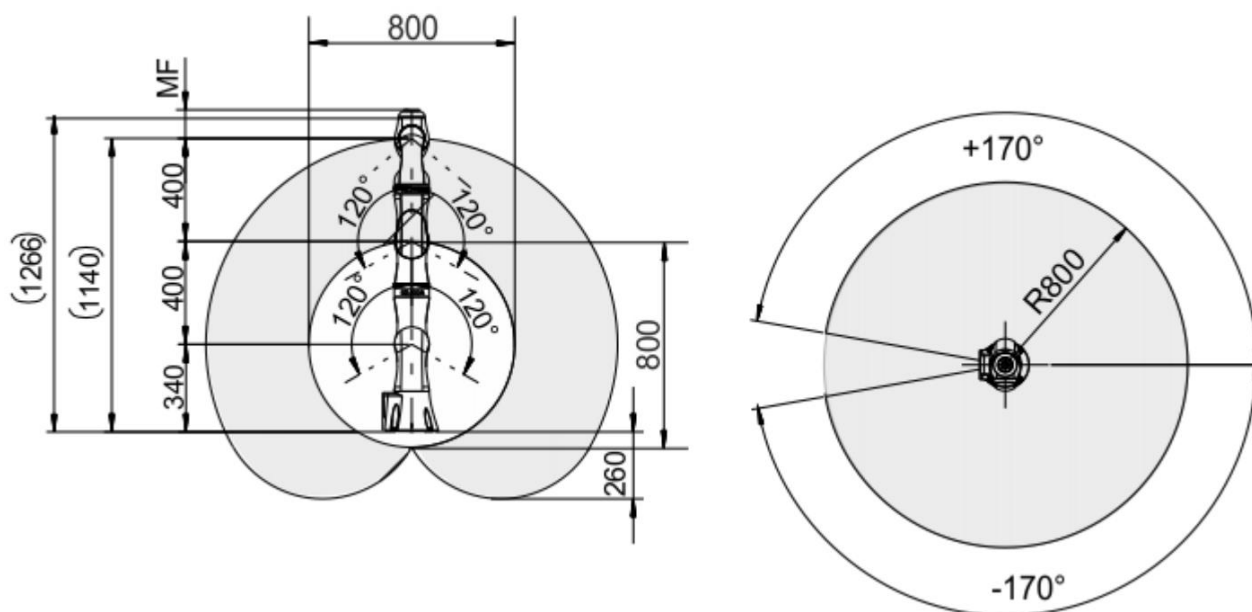


Рисунок 6.3 – Параметры рабочей области КР KUKA LBR IIWA7 R800 (единицы измерения мм)

- набор сменных инструментов;
- оборудование интеллектуальной системы детектирования объектов рабочей зоны и мультимодального управления [47, 48, 373], в составе:

- камер Intel Realsense Depth Camera D455;
- лидара Intel Realsense Lidar Camera L515;

- микрофонов Koradji Quatro microphone;

- микрокомпьютеров Nvidia Jetson Xavier NX;

- микрокомпьютеров Nvidia JetsonNano;

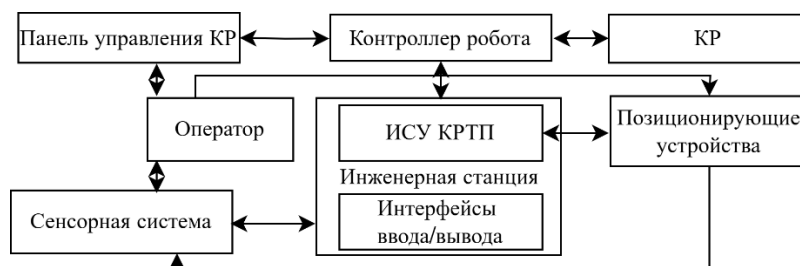


Рисунок 6.4 – Структурная схема ПАК

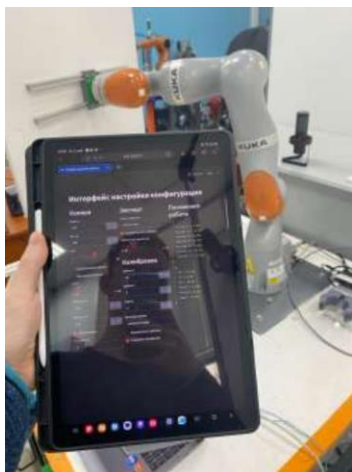
- серверный компьютер;
- источник бесперебойного питания IPPON Innova G2 2000 1800 Вт;
- системы идентификации, измерений (рис. 6.6, б) и мониторинга, в составе:
 - ультразвуковых датчиков расстояния HC-SR04 (рисунок 6.6, в);
 - гироскопов MPU-6050;
 - акселерометра BNO055;
 - интегральной схемы JL-32F4XX и Arduino Uno;
- устройство измерения энергопотребления [69];
- оборудование реализации интерфейсов ввода/вывода в составе:
 - планшетного компьютера Samsung Galaxy Tab S9 FE+ (рис 6.6, а);
 - очков виртуальной реальности Pico 4 Ultra;
 - 3D-сканера Creality CR-Scan Raptor;
 - панели переключения режимов и ввода экстренных команд (рис. 6.6, г);
- промышленный коммутатор Planet IGS-1600T.



Рисунок 6.5 – Позиционирующее оборудование; а – позиционер KUKA md250;
б – мобильный робот KUKA youBot

Общий вид КРТК и рабочая зона в момент реализации КРТП, имитирующего ТП окрашивания и сверления изделий сложной конфигурации, представлены в гл. 7 в соответствующих разделах.

а)



б)



в)



г)



Рисунок 6.6 – Оборудование средств измерения и интерфейсов ввода/вывода; а – планшетный компьютер Samsung Galaxy Tab S9 FE+, реализующий интерфейс ввода/вывода; б – устройство измерения положения точки в ОП; в – пульт оператора и система ультразвуковых датчиков расстояния; г – пульт выбора режима и ввода экстренных команд для КР

Выводы

1) Предложена унифицированная структура аппаратной части КРТК, позволяющая обеспечить исполнение алгоритмических, информационных и программных задач по управлению и оптимизации режимов функционирования КРТП.

6.2. Структура и реализация компонентов программно-аппаратного комплекса ИСУ коллаборативного роботизированного технологического процесса

Диаграмма компонентов

В этом разделе рассматриваются новые решения по реализации системы управления КРТП с недетерминированной рабочей зоной. В прил. М представлено оригинальное структурное описание программной части ПАК системы управления КРТП. Реализация отдельных компонентов, представлена в прил. Н. Выбор набора компонентов и их интерфейсы определены согласно введенному в гл. 2 комплексу требований, предъявляемых к ИСУ КРТП. Общим предназначением ИСУ КРТП является обеспечение эффективности процедур исполнения частей ТО за счет формирования закона управления, ведущего к реализации КР оптимизированных движений.

В компоненте «Конструктор экземпляра модели КРТК» прил. М происходит интеграция комплекса всех необходимых для расчета и прогнозирования моделей посредством предоставляемых интерфейсов 10, 24, 18 компонентами «Модель АСУТП», «Группа моделей элементов КРТК» и «Детектор коллизий» соответственно, детализация процессов синтеза экземпляра модели КРТК представлена на диаграмме (рис. 6.7).

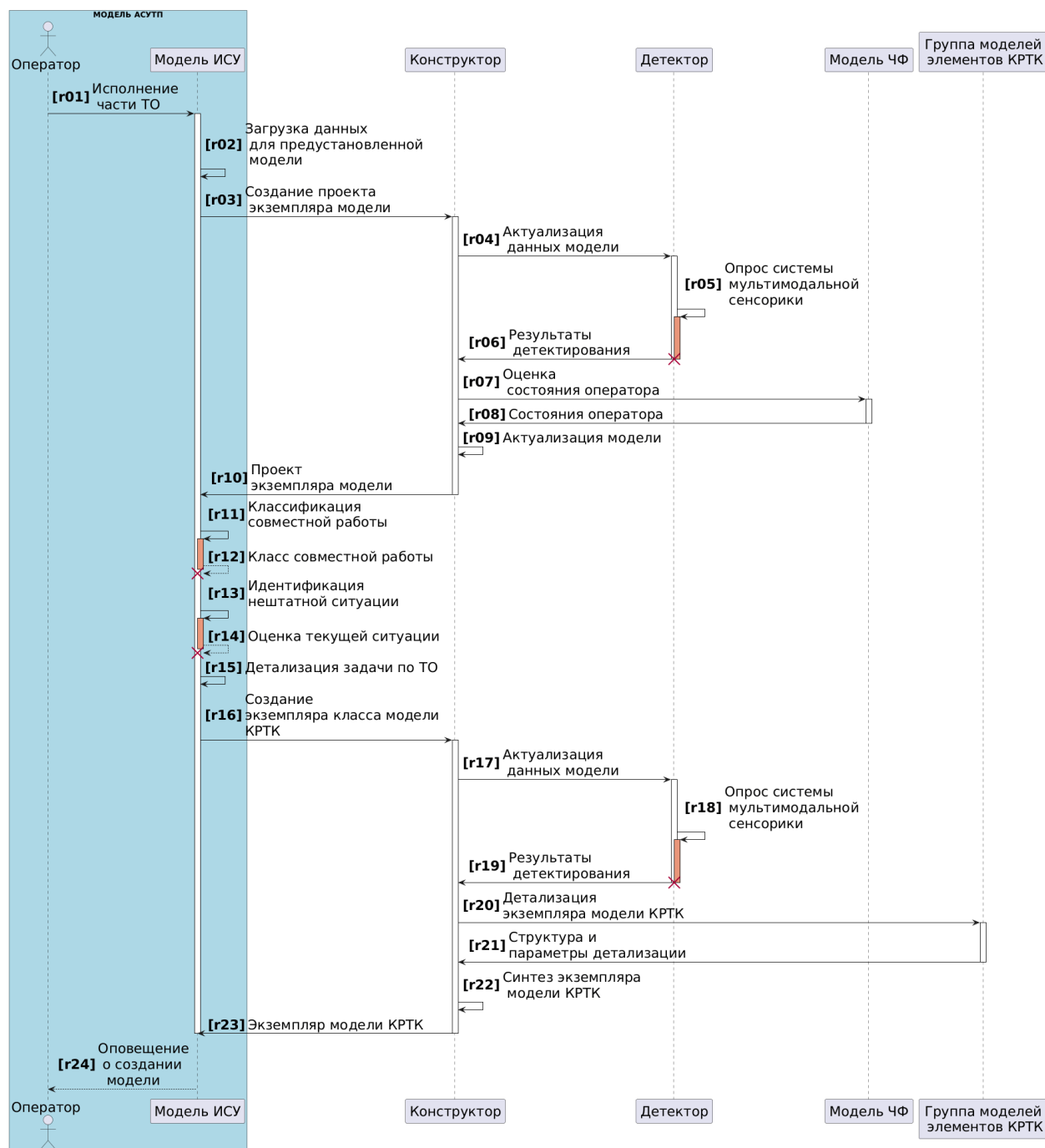


Рисунок 6.7 – Диаграмма последовательности процессов создания экземпляра класса модели КРТК

Полученный экземпляр модели КРТК в программном представлении может быть определен в виде объекта класса и актуален (согласно теории Пospelова Д.А. [118]) в течение одной части ТО либо группы частей ТО, в зависимости от стабильности условий текущего сценария среды.

Так, в зависимости от целевой функции оптимизации движения, определяемой во вложенном компоненте «Конструктор целевой функции», экземпляр модели КРТК может быть собран:

- на максимально детализированной нелинейной модели СУЭП (компонент «Нелинейная модель СУЭП КР» (гл. 3)), например, для проведения отладочных работ или дополнении БЗ;
- на упрощенной модели СУЭП (компонент «Частично линеаризованная модель СУЭП КР» (гл. 3)) для формирования закона управления движением в реальном времени и сокращения времени реакции системы;
- на редуцированных моделях энергопотребления (компонент «Модели энергопотребления» [108]) для синтеза оптимизированных движений по критерию «энергоэффективность».

По такой же логике экземпляр модели КРТК агрегирует модели вспомогательного оборудования (включая модели энергопотребления), МЧФ, модели 3D-геометрии. Согласно диаграмме (прил. М) математическое описание экземпляра модели КРТК на время постоянства сценария предоставляется посредством интерфейса 6 компоненту «Модель АСУТП» в основном для обработки во вложенном компоненте «Модель ИСУ». Актуальный экземпляр модели КРТК (по интерфейсу 8), текущее состояния моделей компонента «Модель АСУТП» (по интерфейсу 11) и данные предоставляемые по интерфейсам 14 и 15 компонентами «Классификатор нештатной ситуации» и «Классификатор совместной работы», являются основой для выработки управляющего сигнала для компонента «Планировщик движения», инициирующего итерационный процесс планирования и оптимизации движения – синтез закона управления для ЛСУ КР.

Для планировщика движений предоставлен интерфейс 28 компонента «Библиотека алгоритмов планирования движений», компонент обеспечивает поддержку процесса планирования и оптимизации движения широким набором алгоритмов, включающим универсальные алгоритмы, алгоритмы с опорными знаниями РДП, алгоритмы разрешения коллизий, а также алгоритмы с математическим аппаратом искусственного интеллекта.

Идентификация и детектирование объектов окружения для планировщика осуществляет компонент «Детектор коллизий», предоставляя по интерфейсу 19 данные о текущем расположении объектов коллизий (первичные данные по интерфейсу 16 о расположении ключевых точек оператора, по интерфейсу 17 о идентифицируемых остальных объектах рабочей зоны поступают от внешних средств детектирования и распознавания [47]), эти же данные в формате, совместимом для моделирования по интерфейсу 18 передаются для конструирования экземпляра модели КРТК, в том числе для МЧФ. Детектор коллизий также осуществляет проверку получаемых планировщиком траекторий движений (интерфейс 3) на предмет коллизий.

Планирование и оптимизация движений КР в ОП и КП (рис. 6.8) осуществляется посредством итерационного взаимодействия компонентов «Планировщик движения» и «Оптимизатор

движения» по интерфейсам 20 и 4, а также при взаимодействии с другими компонентами по интерфейсам 1, 8, 28 и 11.

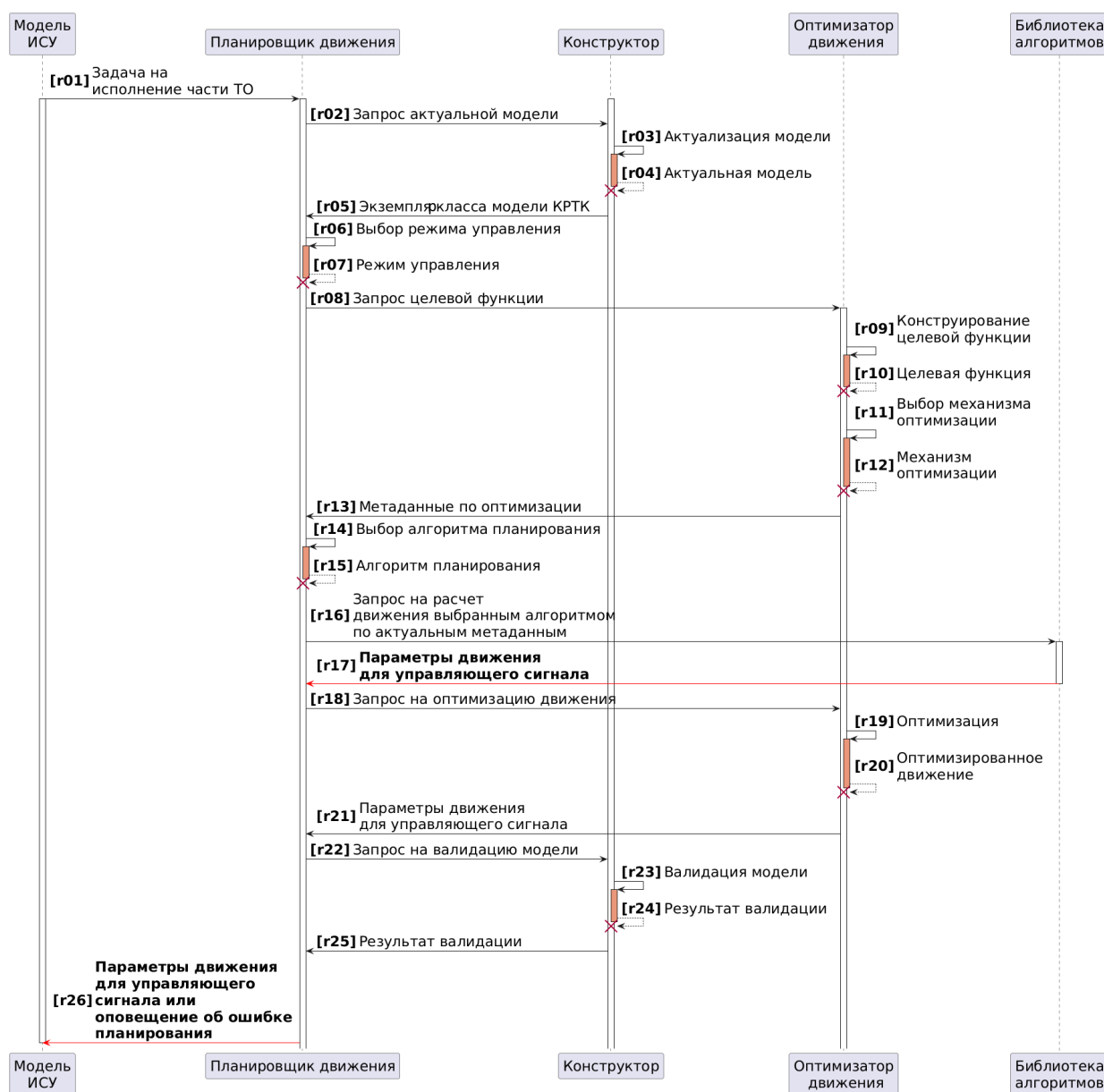


Рисунок 6.8 – Диаграмма последовательности процессов планирования движения для реализации части ТО

Вложенный компонент «Конструктор целевой функции» осуществляет синтез целевой функции (для задач оптимизации движения КР под текущую часть ТО) по метаданным, предоставляемым по интерфейсу 12 и агрегированной информации интерфейса 4. При этом для алгоритмов, поддерживающих планирование в РДП, оптимизатор запрашивает предоставляемый интерфейс 21 компонента «Селектор РДП».

Гибкость программной части ИСУ КРТП поддерживается компонентами «Архитектор моделей» (осуществляющим в автоматизированном режиме синтез новых или модернизацию существующих моделей (гл. 3), [108]) и «Конструктор РДП» (актуализирующий БЗ РДП при уточнении эффектов использования РДП или освоении новых ТО в рамках ТП).

Визуализация результатов моделирования осуществляется компонентом «Конструктор 3D графики и анимации», на базе рассмотренных в гл. 3 моделей в средах MATLAB и Webots [366] (рис. 6.9).

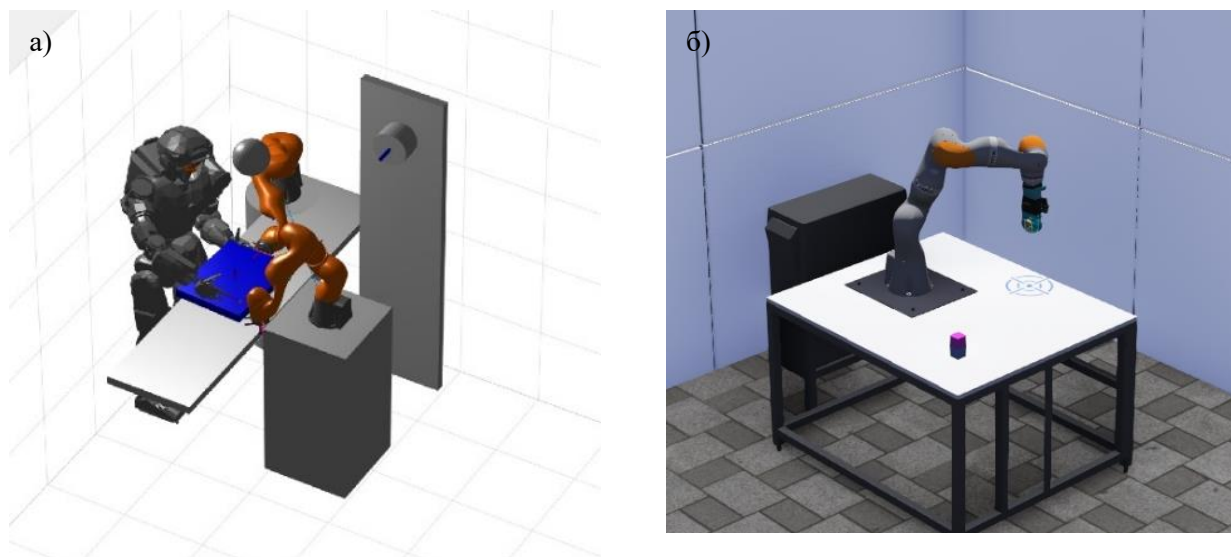


Рисунок 6.9 – Визуализация КРТП на примере: а – сверления изделия, имитация в среде MATLAB; б – перемещения грузов, имитация в среде Webots

Выводы

1) Предложен новый подход по организации структуры зависимостей компонентов программной части ИСУ КРТП. Набор компонентов обеспечивает синтез закона управления для планирования, оптимизации и реализации движений КР в рамках установленных задач ТО с учетом текущего сценария течения ТП. Продемонстрированы новые решения по интеграции дискретных моделей и моделей реального времени в единую систему, позволяющие непосредственно оптимизировать закон управления, а также обеспечивать возможность управления временем реакции системы в зависимости от требований по безопасности, свойственных текущему режиму. Модульность структуры и унификации ключевых интерфейсов позволяют ИСУ варьировать не только параметрами и режимами для максимизации целевой функции оптимизации, но и осуществлять выбор наиболее подходящих текущему сценарию моделей.

2) Предложена обобщенная логика взаимодействия основных компонентов, демонстрирующая динамическое представление и принципы функционирования модулей программной части ИСУ КРТП.

6.3. Программное обеспечение АСУ технологическими операциями

Общая координация функционирования управляющих алгоритмов и механизмов осуществляется в компоненте «Модель АСУТП», в котором базовым управляющим модулем является компонент «Модель АСУ ТО». Предложенная модель подробно рассмотрена в гл. 3, диаграмма классов программной части модели представлена на рис. 6.10 в концепции объектно-

ориентированного проектирования [87]. Особенностью модели АСУ ТО в соответствующем компоненте является реализация принципа минимизации структурной диверсификации объектов рабочей зоны КРТП. Такой подход обеспечивает снижение вычислительных затрат при синтезе экземпляра модели КРПК. Так, например, класс «оператор» («OperatorClass») наследует поля и методы класса «робот» («RobotClass»), объект класса «оператор» содержит данные об актуальной кинематической модели, свойственной модели тела человека, что позволяет моделировать его движения либо посредством получаемых с компонента «Детектор» данных, либо путем планирования движений алгоритмами, определенными планировщиком при операциях прогнозирования.

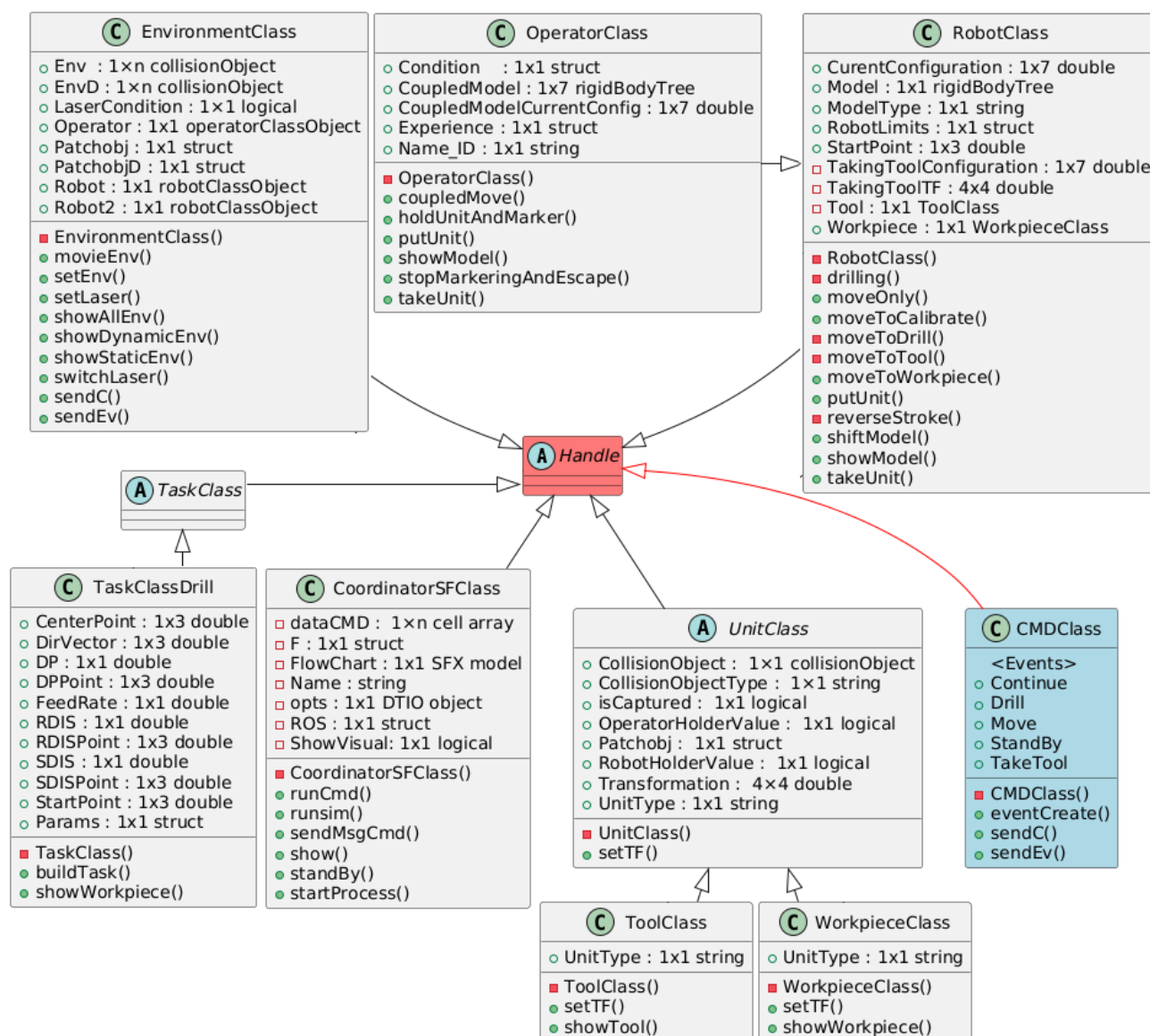


Рисунок 6.10 – Диаграмма основных классов модели АСУ ТО

Программная реализация моделей дополнительного оборудования рабочей зоны, меняющего во времени и пространстве свое расположение, например позиционирующее оборудование (в качестве позиционирующего оборудования использован КР), также наследует поля и ме-

тоды класса «робот», что позволяет определить унифицированную процедуру применения алгоритмов планирования и оптимизации.

В классе «робот» предусмотрены методы математической постановки и решения задач для формирования дискретного закона управления АСУ ТО, определяющего процессы синтеза закона управления СУЭП в компонентах «Планировщик движения» и «Оптимизатор движения»:

- свободного перемещения в ОП (характерного для ВП и ВХ);
- перемещения, ограниченного заданием, пространственным расположением ЦТИ и режимами перемещения (характерными для РХ или обратного хода для РХ);
- действия по захвату, откреплению инструмента;
- действия по захвату изделия либо иного объекта.

Дискретный закон управления детализирует задание, формируемое оператором или АСУТП в компоненте ИСУ КРТП. Основные аспекты детализации заключаются в определении режимов динамики и безопасности, конвертации ТО из пространства логики задач в пространство задания пути движения, для которого определены конфигурации КР в точках окончания частей пути и в промежуточных точках.

На рис. 6.11 представлен алгоритм разработанного метода *moveOnly()* класса «RobotClass» (см. рис. 6.10). Метод используется при синтезе управляющего сигнала в дискретной модели ИСУ КРТП (прил. М) для формирования движения по реализации ВП в определенную точку рабочей области, не связанного с высокими показателями точности (для длинноходных движений [108]). Помимо передачи сигнала в компоненты планирования движения, метод обеспечивает трансляцию необходимой информации для актуализации экземпляра модели КРТК в соответствующем компоненте. Метод поддерживает формирования дискретного сигнала управления по базовой модели КР без присоединенного инструмента или захваченного изделия и по расширенной модели с присоединенным инструментом или захваченной деталью.

На рис. 6.12 представлен алгоритм разработанного метода *moveToDrill()* (на примере ТО сверления) класса «RobotClass». Метод используется для синтеза управляющего сигнала в дискретной модели ИСУ КРТП для формирования движения по реализации ВХ в точку начала РХ, связанного с высокими показателями точности по положению и ориентации ЦТИ (для короткоходных движений).

В отличие от метода *moveOnly(...)* в методе *moveToDrill()* для получения конфигурации КР в точке назначения подключается математический аппарат решения ОЗК с ограничениями [324] из соответствующего компонента «Модуль решения ОЗК» (с ограничениями). В зависимости от специфики ТО ограничения задачи оптимизации могут различаться.

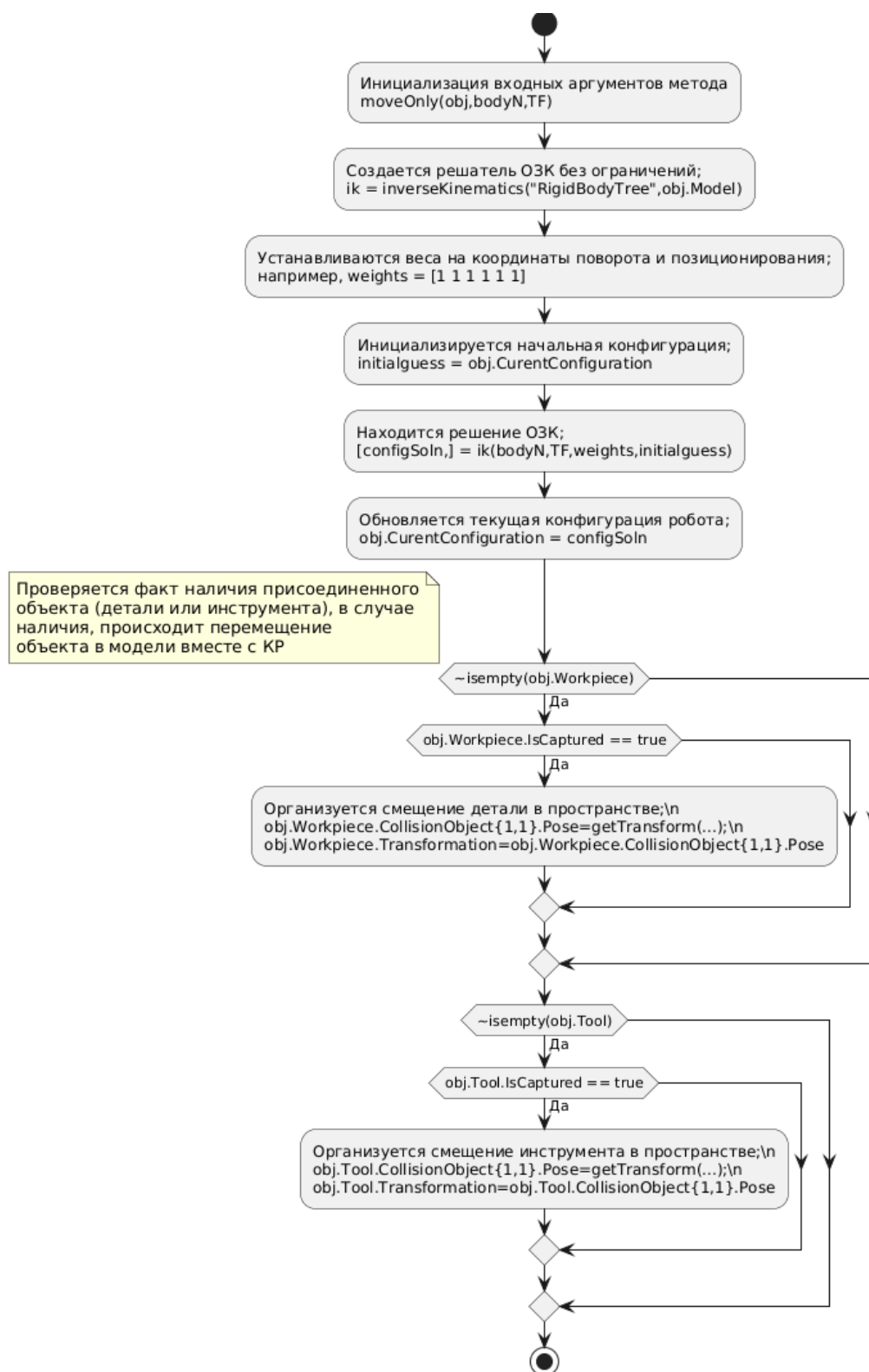


Рисунок 6.11 – ВП или ВХ в свободное место в операционном пространстве – метод *moveOnly()*

В данном примере, поскольку рассматривается ТО сверления изделия (гл. 2), то принципиальны ограничения по эффективному пространственному расположению КР (ограничения на изменение углов поворота шарниров) и направлению движения ЦТИ непосредственно при подходе к изделию (вдоль нормали к плоскости сверления). Необходимо отметить, что метод обеспечивает формирование дискретного сигнала управления для расширенной модели КР с присоединенным инструментом.

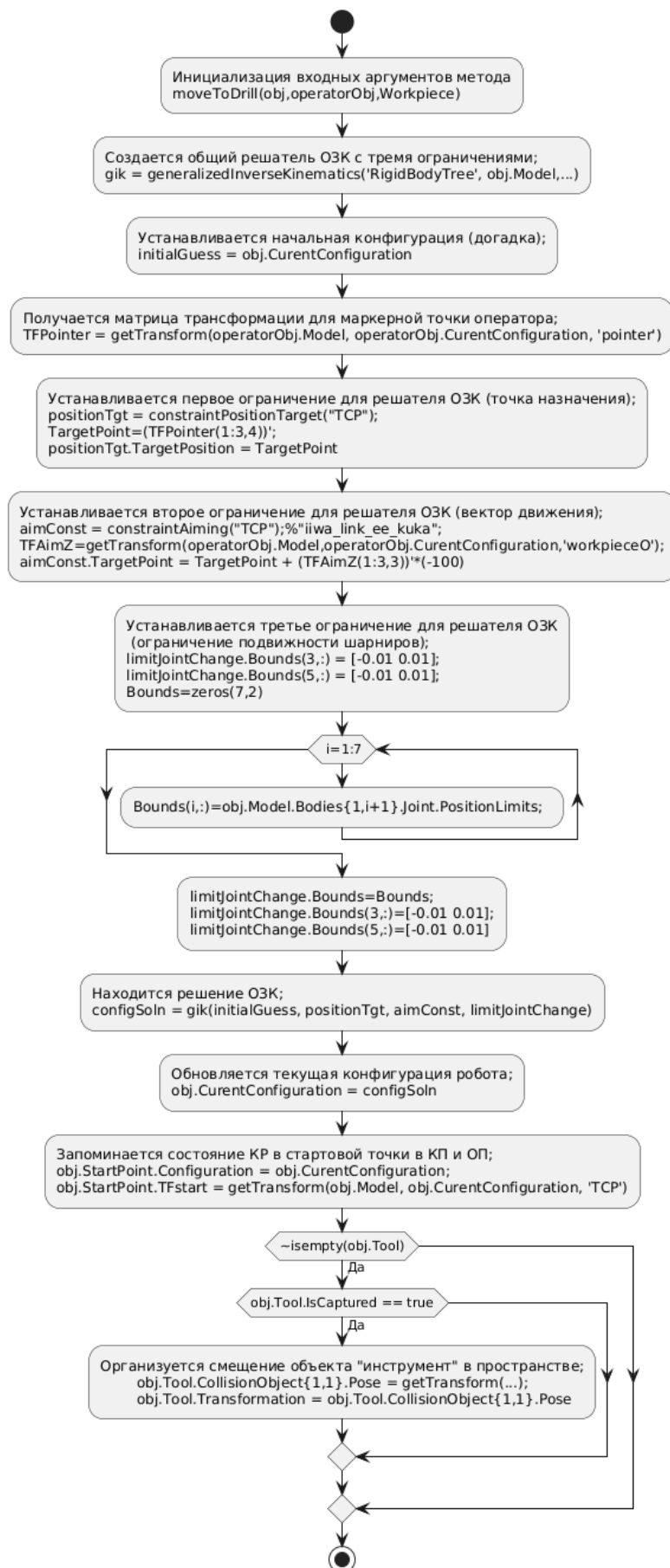


Рисунок 6.12 – ВХ в точку начала рабочего хода – метод *moveToDrill*()

Для формирования движения основного КР по реализации ВП в точку захвата инструмента, связанного с высокими показателями точности по положению и ориентации ЦТИ (для короткоходных движений), был разработан метод *moveToTool()* класса «RobotClass». Метод используется для синтеза управляющего сигнала в дискретной модели ИСУ КРТП. В методе *moveToTool()* также, как и в методе *moveToDrill()*, для получения конфигурации КР в точке назначения подключается математический аппарат решения ОЗК с ограничениями, условие задачи отличаются тем, что в данном методе всегда используется базовая кинематическая модель КР (без присоединенного инструмента), что несколько упрощает и ускоряет процесс синтеза управляющего сигнала.

Для формирования движения позиционирующего КР (либо кинематической модели человека при автономном моделировании исключительно в виртуальном пространстве) по реализации ВП в точку захвата изделия или детали был разработан метод *moveToWorkpiece()* класса «RobotClass». Требования к движению связаны с повышенными показателями точности по положению и ориентации ЦТИ (для короткоходных движений [108]).

Для метода *moveToWorkpiece()* в отличии от метода *moveToTool()*, условия решения ОЗК устанавливаются более жесткими, поскольку, как правило, для схвата (вакуумного, гибкого и т.п. [100]) требуется более ограниченный набор пространственных расположений КР, чем в наборе ограничений для КР, оснащенного симметричным инструментом, расположенным на одной оси с фланцем КР (например, шпинделем со сверлом или фрезой, симметричным автоматическим краскораспылителем и т.п.)

Синтез управляющего сигнала в дискретной модели ИСУ КРТП для формирования движения по реализации РХ (для текущего примера – части ТО по сверлению отверстия в изделии), связанного с максимально жесткими показателями точности по положению и ориентации ЦТИ (для короткоходных движений) обеспечивается разработанным методом *drilling()*. Рабочий ход как часть ТО согласно гл. 2, относится к классу HRP, а движение, реализующее такую часть ТО, должно быть спланировано в режиме траекторного управления. Для рассматриваемого примера (сверления), очевиден формат линейного перемещения ЦТИ в ОП. В данном случае возможны два основных варианта процедуры планирования движений. В первом варианте планирование движений происходит через итерационное решение ОЗК и сглаживание (применимо только при низких требованиях по точности – при высоком номере качества изделия). Достоинством варианта является большая вероятность получения управляющего закона для СУЭП. Принцип поиска точки назначения в целом аналогичен описанию *moveToDrill()*, с разницей в более мягких ограничениях на изменение углов положения шарниров. Это связано с необходимостью обеспечить минимизацию отклонения от заданной шаблонной траекторией ЦТИ в ОП, плавность движения и соблюдение скоростных режимов.

Второй вариант заключается в поиске закона управления через планирование движения инерциальным способом (применим для высоких номеров заданного качества). Недостатком

является большая вероятность при текущих начальных условиях (текущей конфигурации КР) не достичь точки назначения, выйдя за ограничения углов положения шарниров. Для обоих случаев задача оптимизация сопряженного движения КР в КП затруднена существенными ограничениями движения в КП.

Для формирования сигнала по реализации движения обратного хода используется разработанный метод *reversestroke*(), осуществляющий инверсию параметров управления, полученных для РХ методом *drilling* ().

На рис. 6.13 укрупненно представлен алгоритм метода *takeUnit* () класса «RobotClass». Метод направлен на генерацию управляющего сигнала в дискретной модели ИСУ КРТП для оснащающего оборудования КР для сведения схвата КР. Аналогичным образом только в реверсивном порядке, организован метод *putUnit* () генерации управляющего сигнала для разведения схвата КР. Таким образом, совокупность представленных и других разработанных вспомогательных методов программной части программно-аппаратного комплекса КРТП обеспечивает координацию функционирования управляющих алгоритмов и механизмов планирования оптимизированных движений КР для реализации частей ТО.

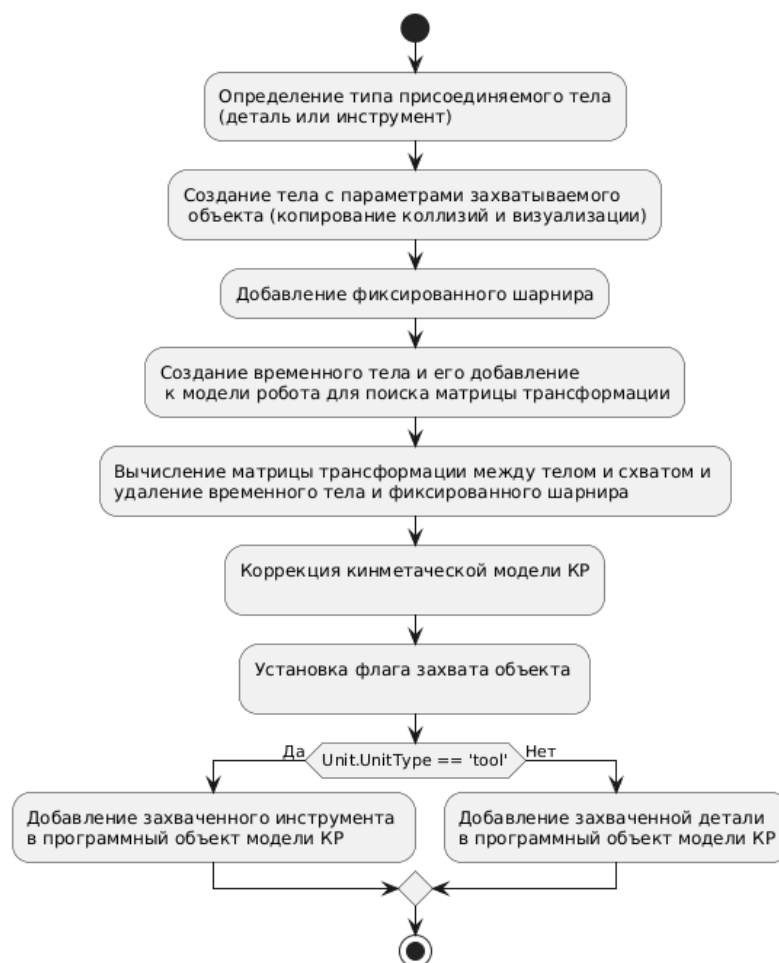


Рисунок 6.13 – Часть ВП – захват инструмента или изделия (не сопровождается движением основных осей КР) – метод *takeUnit*()

Выводы

1) Для координации управляющих действий всех элементов участвующих в КРТП предложена оригинальная структура программной части АСУ ТО. Представленная детализация классов программных объектов АСУ ТО и их зависимости формирует теоретические основы и прототипы практической реализации для архитекторов, системных интеграторов и программистов при создании коммерческих образцов промышленных систем управления КРТП.

2) Разработанное и представленное в текущем разделе математическое и алгоритмическое обеспечение, определяющее внутренние принципы и механизмы АСУ ТО при синтезе дискретных управляющих сигналов, позволяет обеспечить системы планирования и оптимизации движения в КРТП исходными задающими параметрами в соответствии с технологическим описанием выполняемых ТО.

6.4. Алгоритмическое и программное обеспечение управления движением коллаборативного робота в режиме позиционного управления

Для обеспечения процессов организации движения КР в задачах исполнения частей ТО, в том числе решения задач оптимизации, необходимо рассмотреть особенности процедур математического вывода закона управления $\varphi_3(t)$, а также их алгоритмическую и программную составляющие.

Первым типом движения, который следует рассмотреть, является РТР – движение КР от начального пространственного расположения до пространственного расположения в точке назначения – режим позиционного управления. При этом планирование движения осуществляется в КП и, как правило, в синхронном режиме движения шарниров (шарниры начинают и заканчивают движение одновременно, интервалы ускоренных и равномерных движений совпадают). Основными преимуществами режима позиционного управления при планировании движения являются: высокая скорость расчета, связанная с отсутствием необходимости осуществления вычислений в ОП; плавность движения, обеспечиваемая низкими значениями производных 1, 2 и 3 порядка угла положения ($\dot{q}$, $\ddot{q}$ и $\dddot{q}$). С другой стороны, не обеспечивается предсказуемость промежуточных пространственных расположений, что может нарушить достижение целей перехода (части ТО) или вызвать столкновение (коллизию) с объектами окружающей среды.

Предлагаемая итоговая структура данных Q , характеризующая движение РТР (а равно и движения других типов) содержит φ_3 в формате массива значений обобщенных координат q с привязкой к временному массиву $tSamples$ с частотой дискретизации, определяемой установками контроллера КР. Данная структура формируется в результате процесса решения ПЗК и ОЗК, ОЗД, проверки полученных пространственных расположений на предмет наличия коллизий с объектами окружения, а также решения задач оптимизации 1 – 5 (гл. 4). Соответствующее ПО представлено

в работе [149], сигнатура разработанной функции расчета Q для движения типа РТР представлена в виде:

Листинг 6.1

```
function [Q]=PTP(lbr,StartConfig,FinalPoint,bodyN,Params,vis)
... end
```

где $[Q]$ – переменная типа *struct*, характеристика полей структуры Q , представлена в табл. 6.1. Алгоритм функции *PTP* () представлен на рис. 6.14.

Таблица 6.1 – Поля структуры Q

Поле	Размерность	Описание	Математическое описание
$Q.pos$	$3 \times n$	Координаты положения ЦТИ в ОП	$\begin{bmatrix} x(t_0) \dots x(t_{end}) \\ y(t_0) \dots y(t_{end}) \\ z(t_0) \dots z(t_{end}) \end{bmatrix}$
$Q.vel$	$3 \times n$	Линейная скорость ЦТИ в проекциях на оси Ox, Oy и Oz в ОП	$\begin{bmatrix} v_x(t_0) \dots v_x(t_{end}) \\ v_y(t_0) \dots v_y(t_{end}) \\ v_z(t_0) \dots v_z(t_{end}) \end{bmatrix}$
$Q.accel$	$3 \times n$	Линейное ускорение ЦТИ в проекциях на оси Ox, Oy и Oz в ОП	$\begin{bmatrix} a_x(t_0) \dots a_x(t_{end}) \\ a_y(t_0) \dots a_y(t_{end}) \\ a_z(t_0) \dots a_z(t_{end}) \end{bmatrix}$
$Q.omega$	$3 \times n$	Угловая скорость вращения ЦТИ вокруг осей Ox, Oy и Oz в ОП	$\begin{bmatrix} \omega_x(t_0) \dots \omega_x(t_{end}) \\ \omega_y(t_0) \dots \omega_y(t_{end}) \\ \omega_z(t_0) \dots \omega_z(t_{end}) \end{bmatrix}$
$Q.q$	$7 \times n$	Угол положения шарниров КР в КП	$\begin{bmatrix} q_1(t_0) \dots q_1(t_{end}) \\ \vdots \dots \vdots \\ q_7(t_0) \dots q_7(t_{end}) \end{bmatrix}$
$Q.qd$	$7 \times n$	Угловая скорость шарниров КР в КП	$\begin{bmatrix} \dot{q}_1(t_0) \dots \dot{q}_1(t_{end}) \\ \vdots \dots \vdots \\ \dot{q}_7(t_0) \dots \dot{q}_7(t_{end}) \end{bmatrix}$
$Q.qdd$	$7 \times n$	Угловое ускорение шарниров КР в КП	$\begin{bmatrix} \ddot{q}_1(t_0) \dots \ddot{q}_1(t_{end}) \\ \vdots \dots \vdots \\ \ddot{q}_7(t_0) \dots \ddot{q}_7(t_{end}) \end{bmatrix}$
$Q.qddd$	$7 \times n$	Угловой рывок шарниров КР в КП	$\begin{bmatrix} \dddot{q}_1(t_0) \dots \dddot{q}_1(t_{end}) \\ \vdots \dots \vdots \\ \dddot{q}_7(t_0) \dots \dddot{q}_7(t_{end}) \end{bmatrix}$
$Q.tSample$	$1 \times n$	Массив интервалов времени при заданном шаге (<i>step</i>) дискретизации	$[t_0 \dots t_{end}]$

Функция *PTP* () поддерживает возможность вызова внешней функции варьирования методом интерполяции промежуточных конфигураций (и его параметров) для получения оптимизированного движения в КП (гл. 4). Формат вывода функции совместим с предложенной в гл. 3 функцией *DE* () расчета ОЗД по заданной модели СУЭП и механизма КР в КРТП, а также с предложенными функциями оптимизации движения (гл. 4) в рамках решения задач оптимизации 1 – 5. Поля $Q.q$ и $Q.tSamples$ являются форматом задающего сигнала $\varphi_3(t)$ для внешнего управления контроллера КР, все остальные поля являются индикаторами ограничений режимов и пространства.

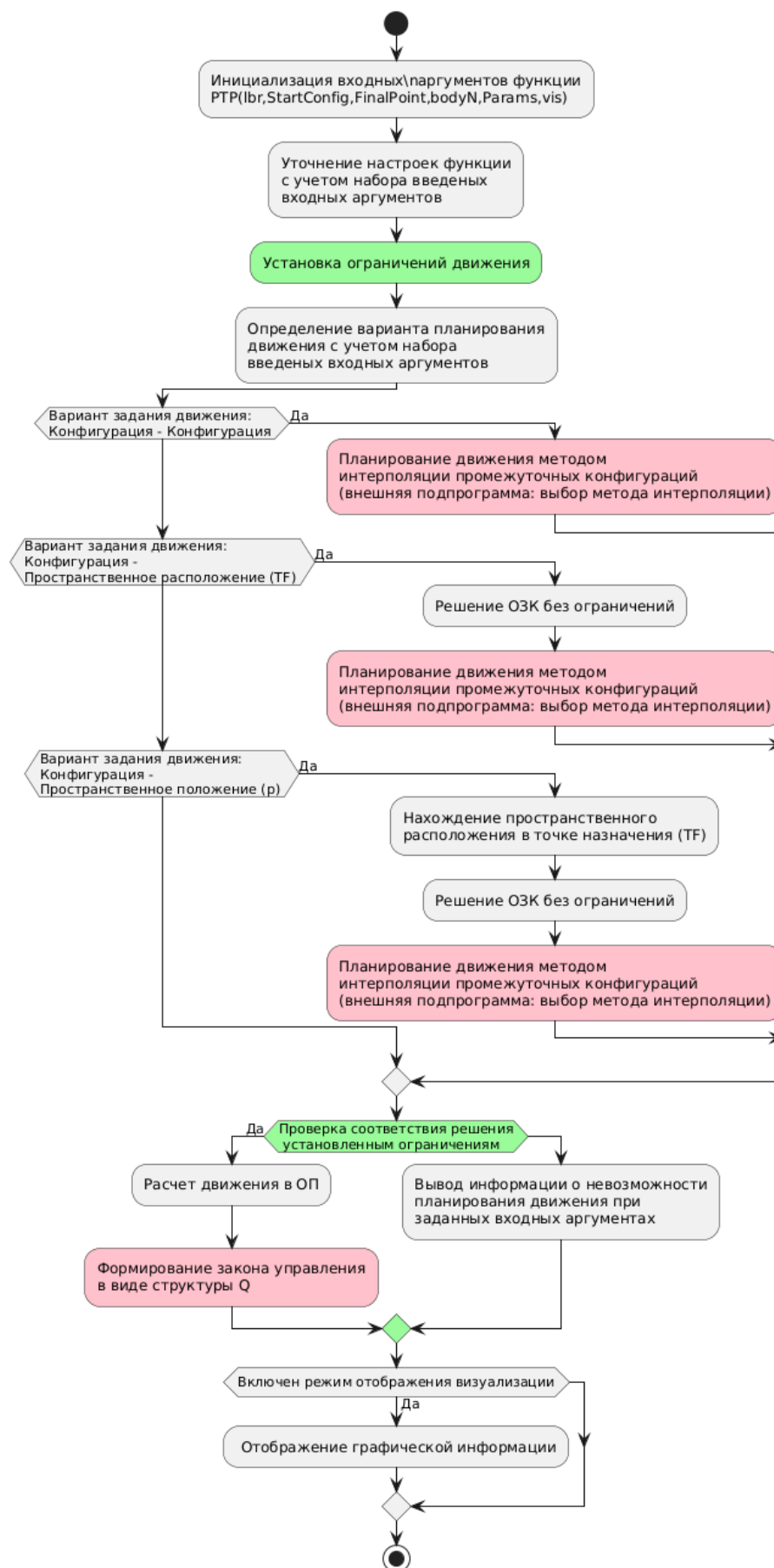


Рисунок 6.14 – Алгоритм функции *PTP* ()

В качестве входных аргументов функция $PTP(\dots)$ принимает:

- 1) модель КР lbr – объект класса $rigidBodyTree$ в формате $*.urdf$ [97];
- 2) текущее пространственное расположение КР в обобщенных координатах (в КП) $StartConfig$ – вектор размерности 1×7 ;
- 3) точку назначения $FinalPoint$ с учетом особенностей рассматриваемого КРТП, предусмотрены 3 формата задания переменной:
 - а) пространственное расположение в обобщенных координатах (в КП) – вектор размерности 1×7 , если движение КР производится в точку назначения с известной конфигурацией (рис. 6.15, а);
 - б) матрицу трансформации TF размерности 4×4 , если, например, расположение ЦТИ указывается оператором в оперативном режиме и идентифицируется системой детектирования [373, 47] или трансформация заранее известна, например, в случае вывода ЦТИ КР в начальную позицию типовой ТО (рис. 6.15, б);
 - в) вектор положения ЦТИ размерностью 1×3 , если оператору, например, требуется переместить ЦТИ без изменения ориентации для выхода на следующий аналогичный по режимам и ориентации ТПД (рис. 6.15, в, 6.15, г);
- 4) имя ЦТИ – $bodyN$ – имя звена КР или оснастки в модели lbr , локальная база которого полагается как локальная система координат ЦТИ;
- 5) массив параметров $Params$ размерностью 1×2 , являющийся ключевым при решении задачи оптимизации, $Params(1)=EndTime$; переменная, хранящая значение; t_{end} – общее время, затрачиваемое на движение; $Params(2)=step$ – шаг дискретизации времени, соответствующий установкам контроллера КР;
- 6) вспомогательный параметр vis , принимающий значения $[0,1]$ и отвечающий за визуализацию переменных полей Q .

Необходимо отметить, что при применении позиционного режима управления для реализации частей ТО следует учитывать формат задания точки назначения, поскольку выбранный формат существенно влияет на итоговый закон движения для СУЭП. Так, при равных пространственных расположениях для ЦТИ итоговые конфигурации существенно отличаются: $(q_f = [-0.6 \ 0.3 \ 0.0 \ -0.9 \ 0.0 \ 1.1 \ 1.0])$ – для варианта (см. рис. 6.15, а), $q_f = [-0.23 \ 0.34 \ -0.60 \ -0.90 \ 0.31 \ 1.12 \ 0.87]$ – для варианта (см. рис. 6.15, б). Механизмы управления процессом оптимизации итоговой конфигурации в частности и движением в целом представлен в гл. 2. В случае третьего формата задания точки назначения в виде вектора положения и ограничения в виде сохранения итоговой ориентации (рис. 6.15, в, 6.15, г) вообще могут бы получены принципиально разные траектории движения. Непредсказуемость движения может усложнить ис-

полнение ВП и ВХ в КРТП. Исключить нежелательные объемы пространства движения в ОП можно за счет предложенной технологии применения БЗ РДП.

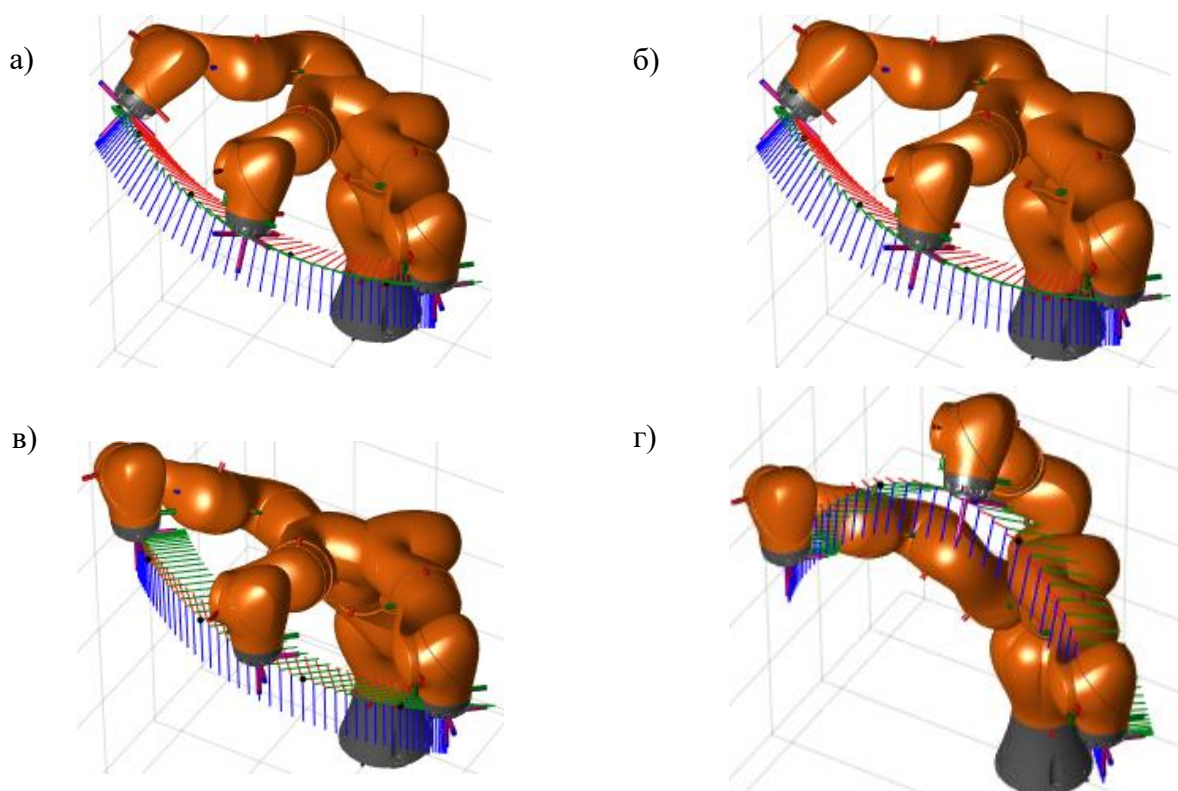


Рисунок 6.15 – Визуализация результатов планирования движения функцией $PTP(\quad)$ при различных форматах задания точки назначения; а – в формате конфигурации (1x7); б – в формате матрицы трансформации (4x4); в – в формате вектора положения [1x3], результат 1; г – в формате вектора положения [1x3], результат 2

Независимо от задания формата точки назначения планирование траектории движения осуществляется в КП, при этом, для первого варианта (вектора конфигурации) q определяется с помощью функции $quinticpolytraj(\dots)$, генерирующей кусочно-полиномиальную функцию пятого порядка по заданному t_{end} и $step$ (также могут быть и другие варианты интерполяции (гл. 4). Для второго (матрицы трансформации) и третьего (вектора положения) варианта задания точки назначения также используется функция $quinticpolytraj(\dots)$, но только после получения конфигурации в точке назначения путем решения ОЗК. То есть для второго варианта $\varphi_f = F_{IK}(\varphi_{guess}, TF_f)$, где $TF_f = FinalPoint$ (матрица трансформации), а φ_{guess} – начальное предположение конфигурации в точке назначения. Для третьего варианта $\varphi_f = F_{IK}(\varphi_{guess}, TF_s)$, где $TF_s = \begin{bmatrix} R & FinalPoint \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $R = F_{rotation}(F_{FK}(StartConfig))$; $F_{FK}(\dots)$ – функция решения ПЗК и возвращающая матрицу трансформации; $F_{rotation}(\dots)$ – функция, возвращающая ориентацию локальной системы координат.

Оптимизация производительности и энергоэффективности осуществляется посредством совместной работы функций расчета кинематики движения ($PTP(\quad)$, $LIN(\quad)$, $CIRC(\quad)$),

$TrajSmooth()$ и др.) и динамики движения $DE()$, в результате работы функций определяется значение переменной t_{end} . После определения полей $\dot{q}, \ddot{q}$ и $\ddot{q}$ структуры Q КП с помощью $F_{FK}(q(t))$ находятся поля $([x \ y \ z]), v, a, \omega$, при этом для каждого $t \in \overrightarrow{0, t_{end}}$ определяется $TF(t)$.

Правильность выполнения режимов части ТО, для которой планируется движение, проверяется с помощью дополнительной опции функции, проверяющей факт выхода из ограничений для всех полей Q : в КП в соответствии с ограничениями, указанными в паспортной документации КР [287] или полученными от системы оценки сценариев рабочего пространства (например, близости оснастки к оператору); в ОП в соответствии с ограничениями режима части ТО или полученными от системы оценки сценариев рабочего пространства (например, переход оператора в совместную зону работы). Аналогичная проверка, но по значениям моментов и сил, производится функцией $DE(...)$.

Для соблюдения ограничений рабочего пространства (исключения коллизий) части ТО в функции предусмотрена проверка траектории $q(t)$ на предмет коллизий с другими объектами рабочей зоны. Проверка осуществляется функцией $CheckCollision(...)$. Таким образом, представленный вариант планирования движения целесообразно применять в типах SRP (Soft Restricted Part) частей ТО (гл. 2).

Выводы

1) Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для реализации режима позиционного управления КР в ТП для движений классов SRP в КП, поддерживающее несколько форматов параметризации задания на движение. Режим позиционного управления по предложенному алгоритму предлагается рассматривать как базовый при организации движения для класса SRP при отсутствии каких-либо других условий либо рекомендаций.

2) В результате исследования было выявлено, что при реализации частей ТО в режиме позиционного управления формат задания исходных параметров пути существенным образом влияет на качество движения, в том числе на объем ОП, необходимый для реализации движения. Таким образом, модуль конструктора пути в системе планирования движения (прил. М) должен быть снабжен системой правил (в БЗ РДП) выбора формата параметризации движений в ОП, а оператор (в случае реализации мультимодального управления) ознакомлен с рекомендациями по приоритетности задания форматов.

6.5. Алгоритмическое и программное обеспечение управления движением коллаборативного робота в режиме контурного и траекторного управления

Для планирования движений класса HRP как правило требуется организация перемещения ЦТИ строго по определенной траектории, заданной в ОП, при этом и к части движений класса SRP также могут предъявляться такие требования, например, для обеспечения предсказуемости

движения ЦТИ при наличии какого-либо рода ограничений пространства или режимов. Естественно, такие траектории могут быть весьма разнообразными, их форма определяется решаемой конкретной частью ТО задачей (например, вертикального сверления, обрезки по контуру, шлифования изделия сферической формы и т.д.), но при этом математическая формализация таких траекторий в ОП сводится к поиску функции, обеспечивающей требуемое движение ЦТИ в ОП. Планирование выполняется инструментами аппроксимации и интерполяции по опорным точкам пути. Для элементарных движений только между двумя пространственными расположениями в задачах планирования движений КР используется функция планирования движения по прямой в ОП и функция, описывающая движение по окружности, рассматриваемая в текущем разделе. Такой тип функций удобен для планирования движений по частям ТО, которые связаны с обработкой изделий сферической или околосферической формы (например, покраской элементов фюзеляжа воздушных судов различного типа), а также предсказуемых ВП, например, для выхода КР в начальное пространственное расположения КР в ТО. Еще одним существенным преимуществом части ТО на базе CIRC является необходимость определения всего двух точек в ОП или КП (точки назначения и промежуточной) для получения функции, описывающей траекторию движения в ОП.

Среди недостатков планирования движения на базе предустановленных форм траекторий, в том числе CIRC, следует выделить следующие:

- отсутствует гарантия возможности реализации движения, связанная с ненулевой вероятностью недостижимости некоторых пространственных расположений в КП;
- при высоких значениях линейной скорости ЦТИ и тангенциального ускорения (или даже средних) не будет обеспечиваться плавность движения в КП ввиду высоких значений ускорений, рывков и ударов на некоторых участках движения, это, как правило, объясняется необходимостью обеспечивать установленную ориентацию ЦТИ при перемещении по заданной траектории.

Для проведения исследований по повышению эффективности частей ТО за счет оптимизации движений КР по типу CIRC была разработана пользовательская функция CIRC (рис. 6.16), возвращающая структуру $[Q]$ задания, содержащая $[\varphi_3, tSamples]$ как закон управления для контроллера КР. Подход к получению оптимального движения в формате $[Q]$ аналогичен описанному в разделе ранее.

Соответствующее ПО представлено в работе [148], сигнатура функции расчета Q для движения типа CIRC определяется как:

Листинг 6.2

```
function [Q]=CIRC(lbr,StartConfig,tf,bodyN,Params,vis)
...end
```

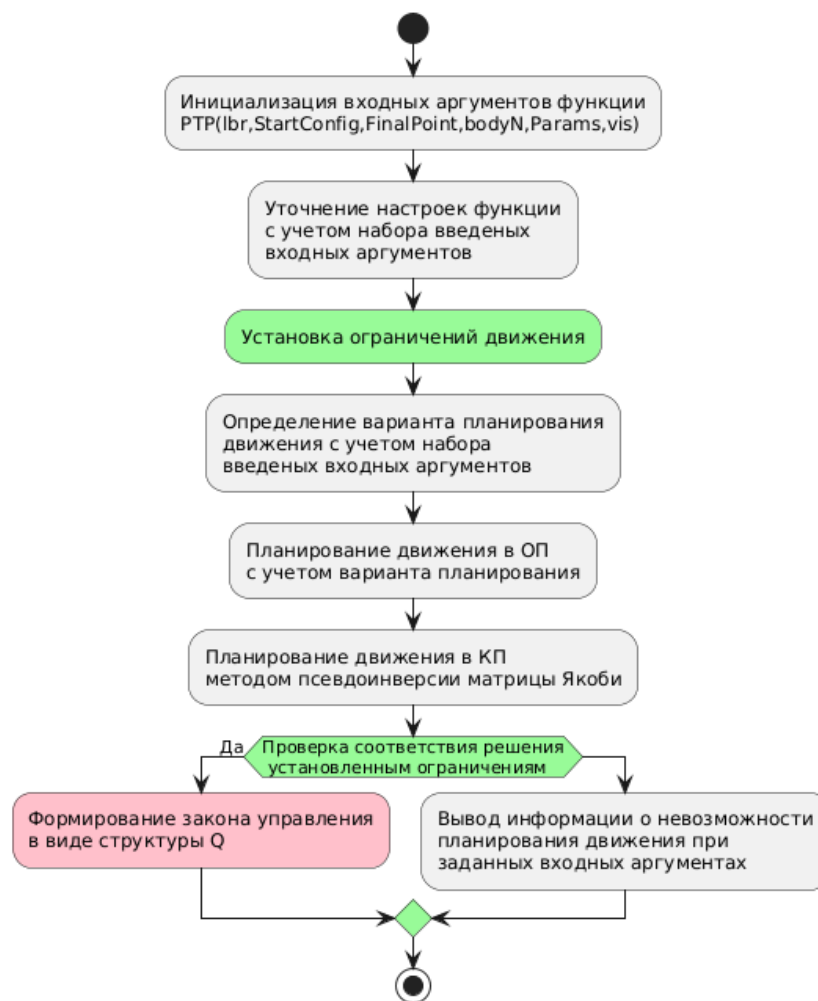


Рисунок 6.16 – Концептуальный алгоритм функции *CIRC* ()

Структура $[Q]$ для *CIRC* аналогична описанию, представленному в табл. 6.1, с отличием, отраженным в табл. 6.2.

Таблица 6.2 – Поле 3 структуры Q для *CIRC*

Поле	Размерность	Описание	Математическое описание
$Q.accel$	$3 \times n$	линейное тангенциальное ускорение в проекциях на оси Ox, Oy и Oz в ОП	$\begin{bmatrix} a_{tx}(t_0) \dots a_{tx}(t_{end}) \\ a_{ty}(t_0) \dots a_{ty}(t_{end}) \\ a_{tz}(t_0) \dots a_{tz}(t_{end}) \end{bmatrix}$

Входные аргументы функции *CIRC* – *lbr*, *bodyN* и *vis* имеют такое же определение и формат, как представлено в описании функции *PTP(...)*, при этом *StartConfig* может быть задан в двух форматах: а) вектора конфигурации пространственного расположения размерности 1×7 ; б) вектора положения ЦТИ в начальной точке окружности размерности 1×3 .

Аргумент *tf* также может быть задан в двух форматах: а) в формате структуры с полями *tf.B* и *tf.C*, содержащих соответственно матрицы трансформации для промежуточной точки окружности *B* и точки назначения *C* (либо в формате структуры с полями *tf.B* (*NaN*) и *tf.C* (4×4), тогда матрица трансформации для промежуточной точки *B* рассчитывается внутри функции); б) в формате матрицы размерности 2×3 , содержащей в первой строке XYZ_B положение ЦТИ в точке *B*,

во второй строке XYZ_C положение ЦТИ в точке С. В таком формате ориентация ЦТИ в точках В и С не определена и устанавливается по соглашению (например, остается неизменной и равной R_A , где А – точка старта, или выбирается R_n так, что ось $OZ_{\text{ЦТИ}}$ базы ЦТИ является нормалью к плоскости ABC (плоскость окружности) и др. в зависимости от специфики части ТО).

$Params$ – массив, содержащий настройки: $Params(1)=EndTime$ или t_{end} – общее время, затрачиваемое на движение; $Params(2)=st_{a_s}$ – доля времени на равноускоренное движение от t_{end} ; $Params(3)=step$ – шаг дискретизации времени; $Params(4)=saveOrientation$ – параметр, отвечающий за ориентацию $XYZ_{\text{ЦТИ}}$ при прохождении ЦТИ по окружности; $Params(5)=delta$ определяет направление изгиба дуги траектории движения; $Params(6)=shiftNorm$ – коэффициент кривизны дуги (кривизна дуги задается как произведение длины хорды AC и коэффициента $shiftNorm$).

Для всех форматов задания входных и выходных переменных планирование движения по заданной в ОП траектории осуществляется в два этапа (в отличие от позиционного режима управления – движений типа РТР), в начале в ОП, после – в КП. В обоих пространствах осуществляется проверка на выход из ограничений режимов и пространства.

Для проведения исследования организации движения КР в рамках ТО в работе были предусмотрены для функции CIRC пять вариантов идентификации движения в зависимости от форматов входных аргументов. Отличие вариантов состоят в различии алгоритмов нахождения решения, а также в различие конечных результатов функции изменения ориентации ЦТИ ($R_{\text{ЦТИ}}$). Тогда задача сводится к тому, что по заданным в одном из форматов точкам P_1, P_2 и P_3 , где (рис. 6.17) P_1 – начальная точка, P_2 – промежуточная точка, P_3 – точка назначения (финишная точка), необходимо найти такое $\varphi_3(t)$, что для каждого $t_i \in [0, \dots, t_{end}]$ – $F_{FK}(\varphi_3(t_i)) \cong TF(P_i)$, где $TF(P_i)$ – трансформация для ЦТИ в точке P_i с точностью δ . Точки P_1, P_2 и P_3 однозначным образом определяют единственную окружность и соответствующую плоскость (см. рис. 6.17). Промежуточные точки пути $P_1 - P_2 - P_3$ (или $O_{\text{ЦТИ}1} \dots O_{\text{ЦТИ}i} \dots O_{\text{ЦТИ}end}$) могут быть найдены в ОП, исходя из знания уравнения окружности в локальной системе координат XYZ_C , а затем путем преобразования систем координат $TF(XYZ_C \rightarrow XYZ)$ представлены в глобальной системе координат ОП. Тогда для каждой $O_{\text{ЦТИ}i}$ и $R_{\text{ЦТИ}i}$ может быть определено состояние в КП $\varphi_{3i} = F_{IK}(\varphi_{3i-1}, TF_i)$ или с помощью Якобиана согласно формуле:

$$V_{EE} = J \cdot \dot{q}, \quad (6.1)$$

где $V_{EE} = V_{\text{ЦТИ}} = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z \ v_x \ v_y \ v_z]^T$ – вектор проекций угловой и линейной скоростей в ОП; J – геометрический Якобиан; $\dot{q} = [\dot{q}_1 \dots \dot{q}_7]$ – вектор угловых скоростей ЦТИ в КП. По аналогии с описанием (см. рис. 6.14) путем совместного использования функций $CIRC(\dots)$ и $DE(\dots)$ мо-

жет быть найден оптимальный закон управления $\varphi_3(t)$ при заданном критерии оптимизации для функции $DE(\dots)$.

Планирование движения в ОП предлагается выполнять согласно схеме (рис. 6.17), на котором представлена траектория прохождения ЦТИ КР по окружности.

Независимо от варианта организации движения планирование его в ОП начинается с решения задачи определения изменения положения центра локальной базы $XYZ_{\text{ЦТИ}}$ (см. рис. 6.17) в пространстве и времени (расчет ориентации в предлагаемом варианте выполняется после), то есть в неподвижной глобальной системе координат XYZ и неподвижной локальной системе координат XYZ_c (системе «окружность»). Система XYZ_c определяется окружностью, проходящей через точки P_1, P_2 и P_3 следующим образом: O_c – центр окружности (начало координат); z_c – вектор нормали к плоскости $P_1P_2P_3$; x_c – ортонормированный вектор, направление которого совпадает с направлением вектора O_cP_1 , тогда уравнение плоскости окружности имеет вид:

$$z_{c_x}(x - x_{c_0}) + z_{c_y}(y - y_{c_0}) + z_{c_z}(z - z_{c_0}) = 0. \quad (6.2)$$

При этом радиус окружности равен $r = |\overline{O_cP_1}|$. Для нахождения z_c используется свойство векторного умножения векторов и операций нормирования:

$$z_c = \frac{\overline{P_1P_2} \times \overline{P_1P_3}}{|\overline{P_1P_2} \times \overline{P_1P_3}|}. \quad (6.3)$$

Для определения точки O_c составляется система линейно независимых уравнений с учетом того, что: радиус окружности, проведенный перпендикулярно к хорде, делит ее пополам, тогда, если точка M_1 – середина хорды P_1P_2 , то $\overline{O_cM_1} \perp \overline{P_1P_2}$, если точка M_2 – середина хорды P_2P_3 , то $\overline{O_cM_2} \perp \overline{P_2P_3}$, следовательно, с учетом равенства $\emptyset$ скалярного произведения ортогональных векторов получается два уравнения:

$$\begin{aligned} \overline{P_1P_2} \cdot \overline{O_cM_1} &= 0; \\ \overline{P_2P_3} \cdot \overline{O_cM_2} &= 0 \end{aligned}$$

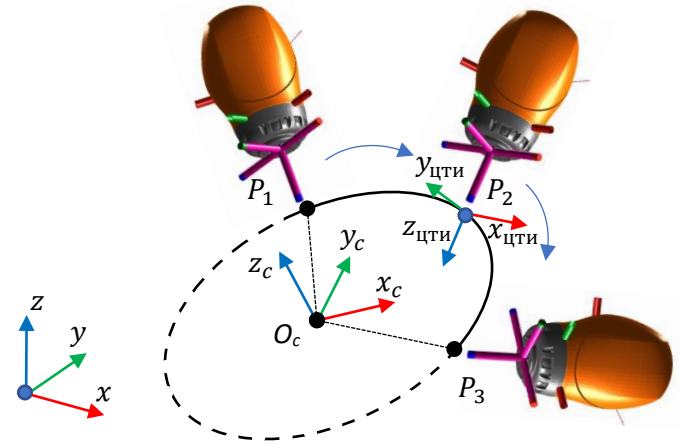


Рисунок 6.17 – Движения КР в ОП в привязке к глобальной системе координат, локальной системе координат ЦТИ и локальной системе координат плоскости, содержащей шаблонную траекторию движения ЦТИ КР

или в формате координат при условии, что $P_1(x_1 y_1 z_1)$, $P_2(x_2 y_2 z_2)$ и $P_3(x_3 y_3 z_3)$;
 $M_1(\frac{x_1+x_2}{2} \frac{y_1+y_2}{2} \frac{z_1+z_2}{2})$, $M_2(\frac{x_2+x_3}{2} \frac{y_2+y_3}{2} \frac{z_2+z_3}{2})$,

можно записать:

$$\left(\frac{x_1+x_2}{2} - x_{C_0}\right)(x_2 - x_1) + \left(\frac{y_1+y_2}{2} - y_{C_0}\right)(y_2 - y_1) + \left(\frac{z_1+z_2}{2} - z_{C_0}\right)(z_2 - z_1) = 0; \quad (6.4)$$

$$\left(\frac{x_2+x_3}{2} - x_{C_0}\right)(x_3 - x_2) + \left(\frac{y_2+y_3}{2} - y_{C_0}\right)(y_3 - y_2) + \left(\frac{z_2+z_3}{2} - z_{C_0}\right)(z_3 - z_2) = 0. \quad (6.5)$$

Третье уравнение системы получается исходя из задания уравнения плоскости $P_1P_2P_3$, в которой лежит окружность и из того, что точка $O_C \in P_1P_2P_3$, тогда :

$$z_{C_x}(x_{C_0} - x_1) + z_{C_y}(y_{C_0} - y_1) + z_{C_z}(z_{C_0} - z_1) = 0, \quad (6.6)$$

где $z_C = (z_{C_x} z_{C_y} z_{C_z})$; $P_1 \in P_1P_2P_3$. Выполнив преобразования, получим:

$$z_{C_x}x_{C_0} + z_{C_y}y_{C_0} + z_{C_z}z_{C_0} = z_{C_x}x_1 + z_{C_y}y_1 + z_{C_z}z_1, \quad (6.7)$$

После необходимых преобразований и записи системы уравнений (6.4), (6.5) и (6.7) в матричной форме вычисляются координаты точки $O_C(x_{C_0} y_{C_0} z_{C_0})$:

$$X = A^{-1}B, \quad (6.8)$$

где

$$X = TF_C(1:3,4) = [x_{C_0} y_{C_0} z_{C_0}]^T;$$

$$A = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_2 & y_3 - y_2 & z_3 - z_2 \\ z_{C_x} & z_{C_y} & z_{C_z} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2 + z_2^2 - z_1^2) \\ \frac{1}{2}(x_3^2 - x_2^2 + y_3^2 - y_2^2 + z_3^2 - z_2^2) \\ z_{C_x}x_1 + z_{C_y}y_1 + z_{C_z}z_1 \end{bmatrix}.$$

С учетом порядка выбора системы координат XYZ_C составляется матрица вращения:

$$TF_C(1:3,1:3) = R = [x_C^T y_C^T z_C^T], \quad (6.9)$$

где

$$x_C = \overline{O_C P_{1norm}} = \begin{pmatrix} \left(\frac{x_1 - x_{C_0}}{\sqrt{(x_1 - x_{C_0})^2 + (y_1 - y_{C_0})^2 + (z_1 - z_{C_0})^2}} \right) \\ \left(\frac{y_1 - y_{C_0}}{\sqrt{(x_1 - x_{C_0})^2 + (y_1 - y_{C_0})^2 + (z_1 - z_{C_0})^2}} \right) \\ \left(\frac{z_1 - z_{C_0}}{\sqrt{(x_1 - x_{C_0})^2 + (y_1 - y_{C_0})^2 + (z_1 - z_{C_0})^2}} \right) \end{pmatrix}^T; \quad (6.10)$$

$$y_C = z_C \times x_C. \quad (6.11)$$

Для нахождения центра (точки $O_{цти}$) вращающейся вокруг O_C системы координат $XYZ_{цти}$ воспользуемся цилиндрической системой координат с началом в точке O_C и осью $O_C z$, совпадающей с z_C , тогда с учетом того, что точка P_1 — начало движения, имеем

$$\begin{cases} \tilde{x}_{цти} = r \cdot \cos(\varphi); \\ \tilde{y}_{цти} = r \cdot \sin(\varphi); \\ \tilde{z}_{цти} = 0, \end{cases} \quad (6.12)$$

где $\tilde{O}_{цти}(\tilde{x}_{цти} \tilde{y}_{цти} \tilde{z}_{цти})$ – координаты центра локальной системы $\widetilde{XYZ}_{цти}$ относительно системы $XYZ_{цти}$; $\varphi = (x_c; \widehat{O_c O_{цти}}) = (\widehat{O_c P_1}; \widehat{O_c P_2})$, тогда координаты $O_{цти} = TF_c \cdot [\tilde{x}_{цти} \tilde{y}_{цти} \tilde{z}_{цти} | 1]^T$; $r = |\widehat{O_c P_1}|$ – радиус окружности.

Поскольку P_1 – начальная точка движения, то $\varphi_0 = 0$, тогда $\varphi_f = \angle P_1 O_c P_3$ – конечный угол, при этом:

$$\varphi_f = \angle P_1 O_c P_2 + \angle P_2 O_c P_3 = \arctg\left(\frac{|\widehat{O_c P_1} \times \widehat{O_c P_2}|}{\widehat{O_c P_1} \cdot \widehat{O_c P_2}}\right) + \arctg\left(\frac{|\widehat{O_c P_2} \times \widehat{O_c P_3}|}{\widehat{O_c P_2} \cdot \widehat{O_c P_3}}\right), \quad (6.13)$$

где φ_f представлен суммой углов, чтобы учесть в расчете $\varphi_f - \varphi_0 > \frac{\pi}{2}$.

Формула (6.13) получена согласно геометрическому смыслу векторного произведения – площадь параллелограмма $S_{parall} = |\vec{a} \times \vec{b}|$ (где $\vec{a}$ и $\vec{b}$ его образующие вектора, α – угол между ними), с другой стороны

$$\begin{aligned} S_{parall} &= \text{пр}_b \vec{a} \cdot \text{tg}(\alpha) \cdot |\vec{b}| = \text{tg}(\alpha) \cdot \text{пр}_b \vec{a} \cdot |\vec{b}| = \text{tg}(\alpha) \cdot (\vec{a} \cdot \vec{b}) \rightarrow \\ &\rightarrow |\vec{a} \times \vec{b}| = \text{tg}(\alpha) \cdot (\vec{a} \cdot \vec{b}), \rightarrow \alpha = \arctg\left(\frac{|\vec{a} \times \vec{b}|}{\vec{a} \cdot \vec{b}}\right). \end{aligned}$$

Тогда для $\forall \varphi_i \in [\varphi_0, \varphi_f]$ в соответствии с уравнением окружности можно найти вектор (или точку) $O_{цти_i} = TF_c \cdot [\tilde{x}_{цти_i} \tilde{y}_{цти_i} \tilde{z}_{цти_i} | 1]^T$, где $\tilde{z}_{цти_i} = 0$ для $\forall i$ в системе XYZ .

После получения массива точек в ОП для положения центра системы $XYZ_{цти}$ в глобальной системе координат, задав динамику положения и динамику ориентации, используя $q_i = F_{IK}(TF_i)$ или $\dot{q} = J_b^+(\dot{x}_E)$ возможно определить состояние КР в КП (для реализации CIRC).

Во всех форматах задания исходных данных движение сначала планируется в ОП исходя из требований движения центра локальной системы $XYZ_{цти}$ по заданной окружности в соответствии с трапецеидальным (симметричным) профилем линейной скорости, при этом динамика движения может задаваться через параметры $v_{max}, a_{\tau max}, t_{end}, st_{a_s}$ двумя способами (рис. 6.18):

1) $v_{цти}(t_{end}, st_{a_s})$, где t_{end} – общее время исполнения движения, в секундах; st_{a_s} – доля времени равноускоренного движения от общего времени t_{end} , тогда:

$$v_{max} = \frac{l_{arc}}{t_{end} \cdot (1 - st_{a_s})}; \quad (6.14)$$

$$a_{\tau max} = \frac{v_{max}}{st_{a_s} \cdot t_{end}}, \quad (6.15)$$

где l_{arc} – длина дуги окружности (траектория движения). Тогда уравнение движения центра системы $XYZ_{цти}$ в системе XYZ_c представляется как:

$$\begin{cases} \dot{v}_{\text{ЦТИ}} = a_{\tau\max}, \text{ если } 0 \leq t < st_{a_s} \cdot t_{\text{end}}; \\ \dot{v}_{\text{ЦТИ}} = 0, \text{ если } st_{a_s} \cdot t_{\text{end}} \leq t \leq (1 - st_{a_s}) \cdot t_{\text{end}}; \\ \dot{v}_{\text{ЦТИ}} = -a_{\tau\max}, \text{ если } (1 - st_{a_s}) \cdot t_{\text{end}} < t \leq t_{\text{end}}; \end{cases} \quad (6.16)$$

2) $v_{\text{ЦТИ}}(v_{\max}, a_{\tau\max})$, тогда $st_{a_s} \in (0; 0.5)$, а

$$t_{\text{end}} = \sqrt{\frac{l_{\text{arc}}}{\frac{v_{\max}}{(st_{a_s} - st_{a_s}^2)}}}. \quad (6.17)$$

Выражение (6.17) верно лишь при условии, что P_1, P_2 и P_3 такие, что точка $O_{\text{ЦТИ}}$ сможет достичь скорости $v_{\max}$, иначе профиль скорости приобретает треугольный вид – равномерное движение отсутствует.

При оптимизации движения CIRC по быстродействию удобно использовать первый способ совместно с спланированным вращением (движением) ЦТИ, тогда, снижая значение показателя t_{end} и контролируя ограничения переменных состояния движения в ОП и КП ($v_{\text{ЦТИ}}, a_{\tau\text{ЦТИ}}, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}, \tau$ и др.) можно получить движение ЦТИ КР по заданной окружности P_1, P_2 и P_3 за минимальное время, при этом обеспечивая максимальную производительность ВП или ВХ.

Профиль скорости $\omega_{\text{ЦТИ}}(\omega_{\text{ЦТИ}_x}, \omega_{\text{ЦТИ}_y}, \omega_{\text{ЦТИ}_z})$ подстраи-

вается под полученный профиль $v_{\text{ЦТИ}}$ (рис. 6.19), т.е. $\omega_{\text{ЦТИ}}(t)$ планируется таким образом, что $R_{\text{ЦТИ}}(t_2) = R_{P_2}$, а $R_{\text{ЦТИ}}(t_{\text{end}}) = R_{P_2}$, где $R_{\text{ЦТИ}}(t)$ – матрица вращения базы ЦТИ в заданный момент времени. Движение вращения не сглаживается, так как с учетом задания формата входных аргументов для функции CIRC, может быть технологически принципиально в точке P_2 (промежуточной) иметь строго заданную ориентацию.

Переход в КП осуществляется по формуле (6.1). Формат вывода функции совместим с предложенной в гл. 3 функцией $DE(\quad)$ расчета ОЗД по заданной модели СУЭП и механизма робота в КРТП, а также с предложенными функциями оптимизации движения (гл. 4) в рамках решения задач оптимизации 1 – 5. Проверка выхода из ограничений, а также прогноз коллизий осуществляется аналогично описанию, представленному при описании режима позиционного управления (см. рис. 6.14).

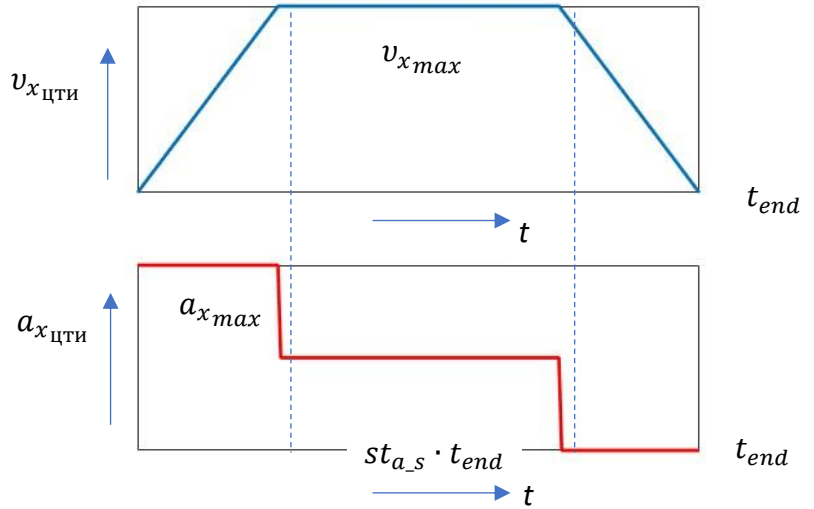


Рисунок 6.18 – Параметры для задания функции $v_{\text{ЦТИ}}(\dots)$ (пример для одной проекции линейной скорости и ускорения ЦТИ – проекции на ось Ox)

В ходе проведения исследования было выявлено, что при реализации частей ТО, а именно ВП или ВХ в режиме траекторного управления, формат задания исходных параметров пути существенно образом влияет на качество движения, полученного по факту исполнения синтезированного закона управления для СУЭП. Возможность варьирования параметрами, которые не являются ограниченными, как при планировании движений для ТПд и РХ, предоставляют значительный потенциал для оптимизации управляющего воздействия как в производительности ТО, так и в энергоэффективности. В

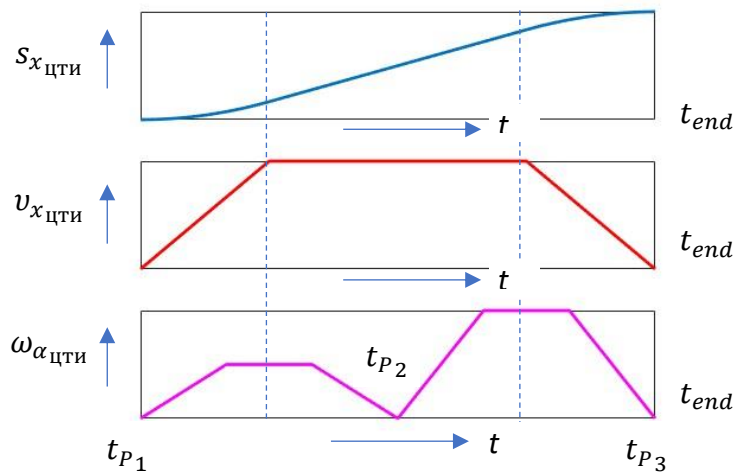


Рисунок 6.19 – Задание $\omega_{цти}(\dots)$ в операционном пространстве

качестве примера существенных отличий итогового закона управления при задании параметров в пяти форматах далее продемонстрированы реакции объекта управления (посредством отображения отдельных переменных его состояния):

- вариант 1 (рис. 6.20) точка начала задана в формате конфигурации, промежуточная точка и точка назначения – в формате пространственного расположения. Энергопотребление КР составляет 115,367 Дж;

- вариант 2 (рис. 6.21) точка начала задана в формате конфигурации, промежуточная точка и точка назначения в формате пространственного положения. Ориентация ЦТИ сохраняется равной ее ориентации в начальной точке. Энергопотребление КР составляет 71,797 Дж. Сохранение ориентации инструмента позволило сократить потребление КР на 38 %;

- вариант 3 (рис. 6.22) точка начала задана в формате конфигурации, промежуточная точка и точка назначения – в формате пространственного положения. Ориентация ЦТИ сохраняется неизменной относительно локальной базы изделия. Вариант может быть использован для планирования движений для ТПд, РХ или для ВП и ВХ с ограничениями;

- вариант 4 (рис. 6.23) точка начала задана в формате конфигурации, промежуточная точка и точка назначения – в формате пространственного расположения. Ориентация ЦТИ в начале движения совпадает с базой изделия далее – согласно заданным матрицам вращения для промежуточной точки и точки назначения. В данном случае из-за существенного отличия матриц вращения для всех трех точек, определяющих движение, потребовались значительные затраты энергии. Такой вариант нецелесообразно использовать при формировании закона управления для реализации неограниченных ВХ и ВП;

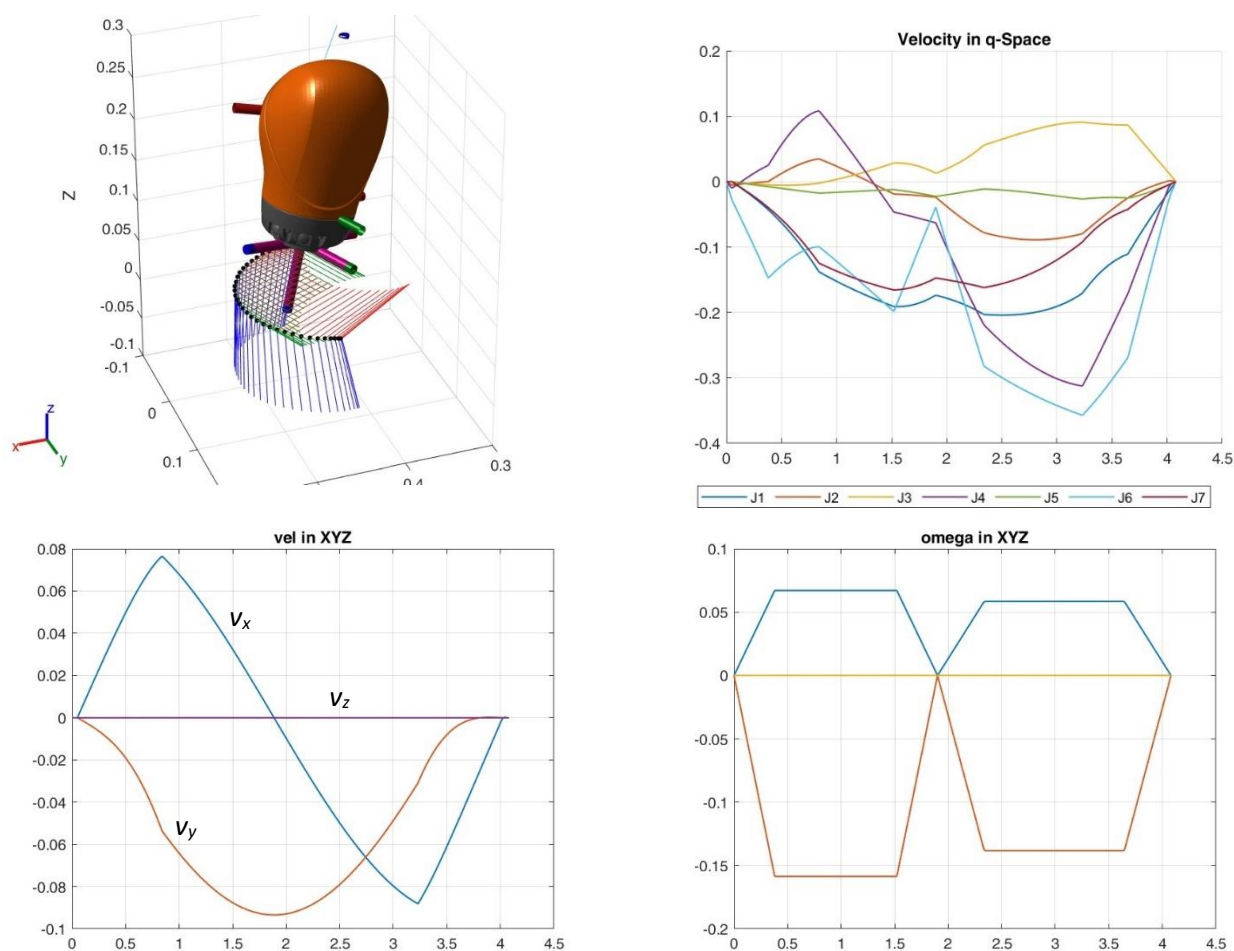


Рисунок 6.20 – Динамика переменных состояния объекта управления в режиме траекторного управления в формате данных варианта 1 (энергопотребление составляет 115,367 Дж)

• вариант 5 (рис. 6.24) точка начала задана в формате конфигурации, промежуточная точка и точка назначения – в формате пространственного положения. Ориентация ЦТИ равна ориентации базы изделия. Ось Oz ЦТИ сонаправлена нормали обрабатываемой плоскости изделия.

Вариант может быть использован для планирования движений как для ТПД, РХ или для ВП и ВХ с ограничениями, так и для неограниченных ВП и ВХ, например при организации следом реверсивного движения. Рассмотренный тип движения по окружности и его производные типы (движения, составленные из сглаженных частей траекторий типа CIRC) целесообразно применять в SRP и HRP частях ТО (гл. 2), в том числе в задачах разрешения коллизий предложенным в оригинальном алгоритмом PTS.

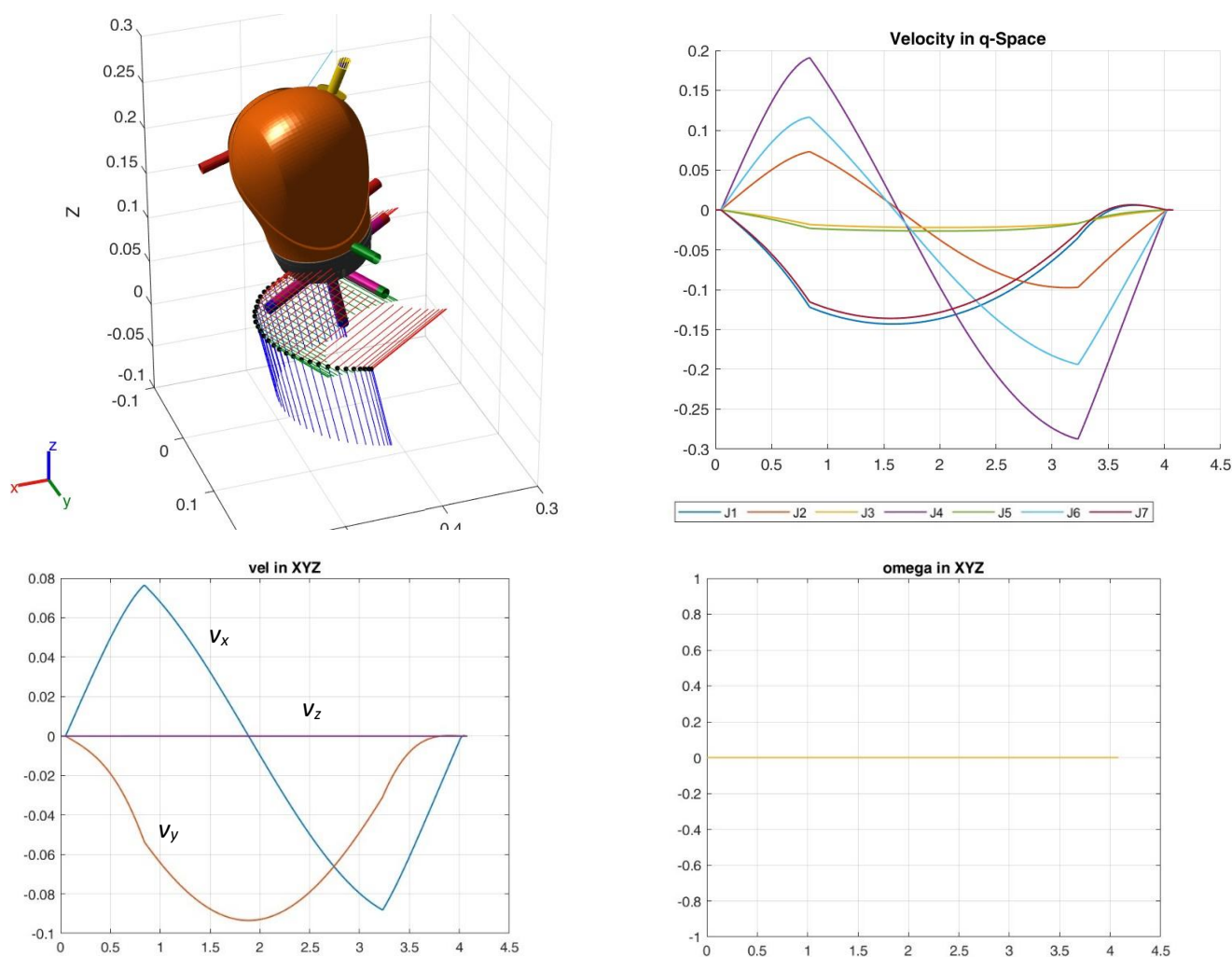


Рисунок 6.21 – Динамика переменных состояния объекта управления в режиме траекторного управления в формате данных варианта 2 (энергопотребление составляет 71,797 Дж)

Представленные варианты синтеза закона управления для реализации КР частей ТО в режиме траекторного управления на примере движения по окружности в аналогичной степени характерны и для любого другого варианта шаблона траектории (при наличии его математического описания в ОП) при инерциальном способе движения, например, по прямой, по ветви параболы или гиперболы, по синусоиде и т.д.

Примеры демонстрируют значительное влияние формата параметризации движения для реализации ВП или ВХ на качество движения. Таким образом, предлагается при создании РДП по ТО после получения базы опорных конфигураций проводить экспериментальное [108] или имитационное моделирование для определения (характерного для текущего РДП):

- эффективного режима управления (позиционного или траекторного);
- эффективного шаблона траектории для ВП или ВХ в КРТП (для случая траекторного управления);
- эффективных параметров задания для каждого из шаблонов траекторий.

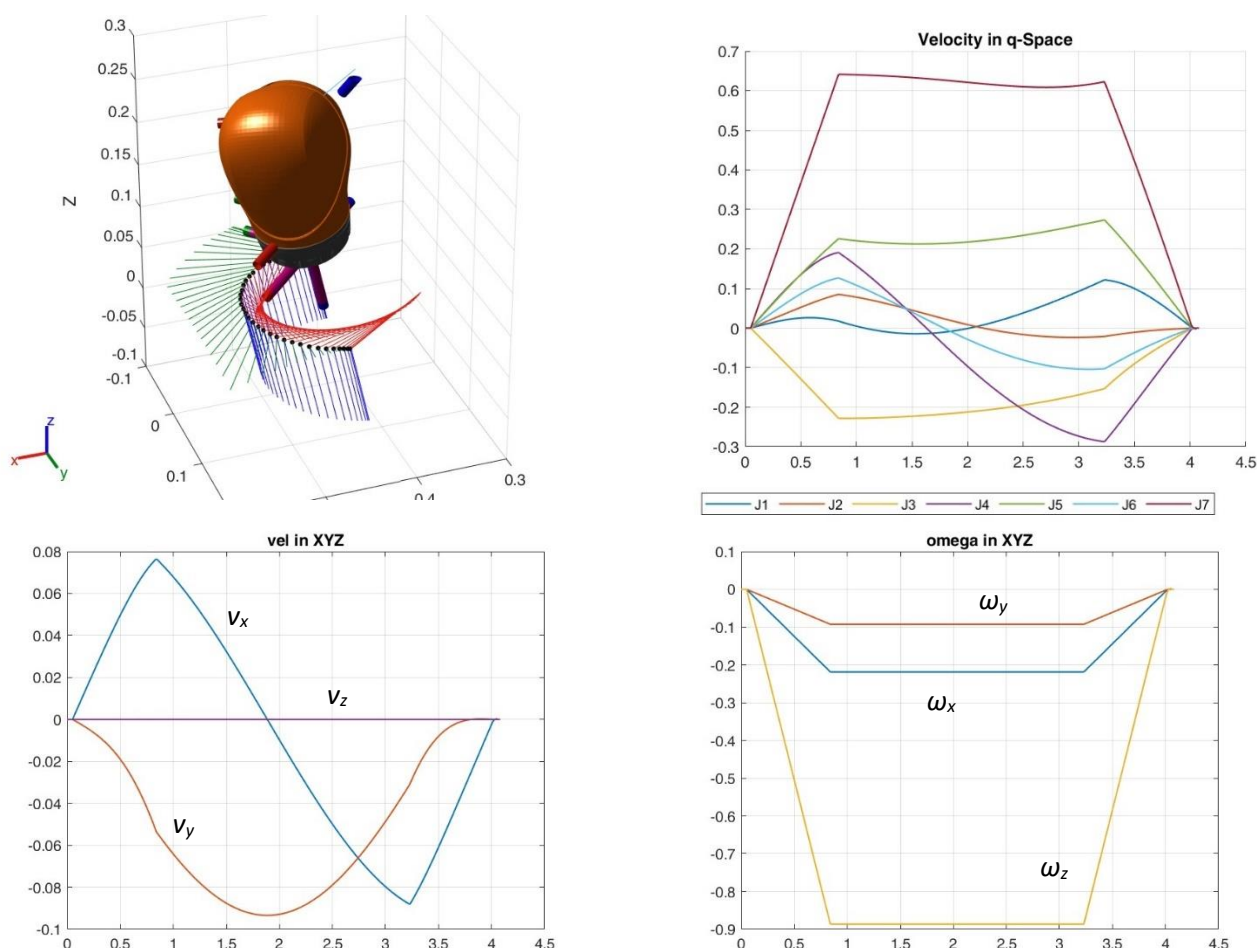


Рисунок 6.22 – Динамика переменных состояния объекта управления в режиме траекторного управления в формате данных варианта 3 (энергопотребление составляет 224.870 Дж)

Критерий эффективности следует выбирать согласно рассмотренным в (гл. 4) задачам оптимизации. Знания о полученных шаблонах движения и их параметры должны быть сохранены в БЗ РДП, предоставляя инструменты вариативности для планировщика движений (прил. М).

Выводы

1) Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для реализации режима траекторного управления КР в ТП для движений классов HRP и SRP по шаблонным траекториям (на примере движения по окружности), поддерживающее несколько форматов параметризации задания на движение.

2) В результате исследования было выявлено, что при реализации частей ТО, а именно ВП или ВХ в режиме траекторного управления, формат задания исходных параметров пути существенно образом влияет на качество движения, полученного по факту исполнения синтезированного закона управления для СУЭП. Возможность варьирования параметрами, которые не являются ограниченными, предоставляет значительный потенциал для оптимизации управляющего воздействия, как в производительности ТО, так и в энергоэффективности.

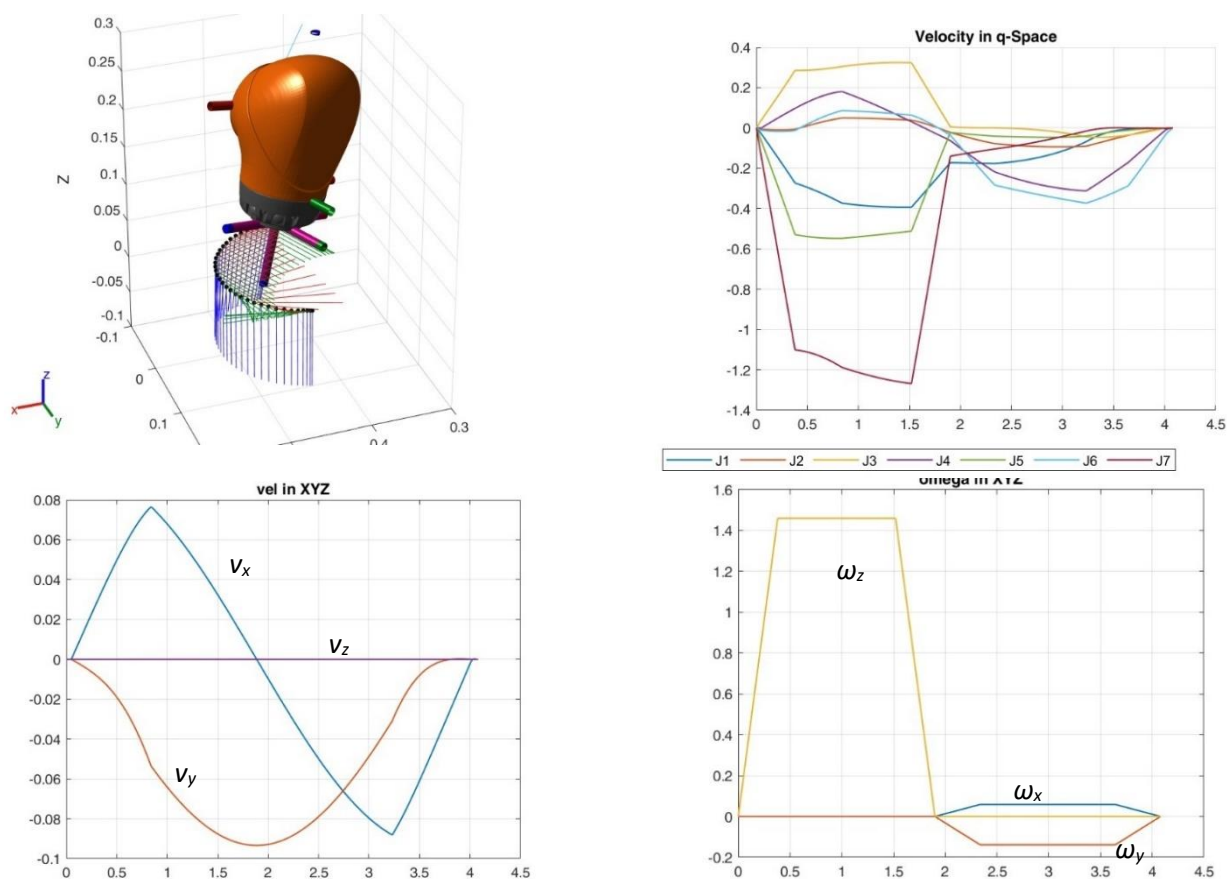


Рисунок 6.23 – Динамика переменных состояния объекта управления в режиме траекторного управления в формате данных варианта 4 (энергопотребление составляет 724,224 Дж)

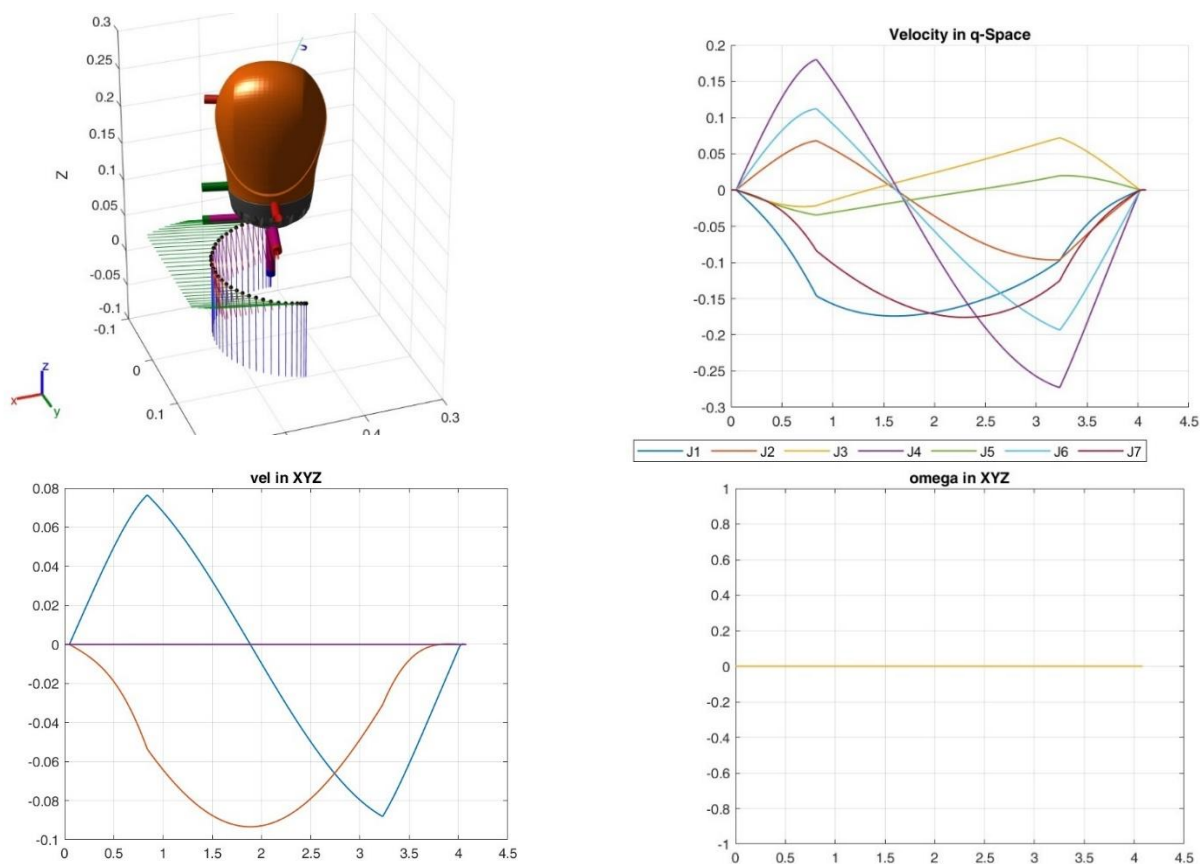


Рисунок 6.24 – Динамика переменных состояния объекта управления в режиме траекторного управления в формате данных варианта 5 (энергопотребление составляет 74,642 Дж)

3) Предложено дополнить БЗ РДП знаниями о наиболее эффективных шаблонах траекторий при реализации ВП или ВХ между опорными точками РДП (в КП или ОП). Наличие инструмента подбора наиболее подходящего шаблона движения позволяет снизить время реакции системы планирования движений в режиме оптимизации, что обеспечивает повышение производительности КРТП.

Выводы по главе 6

Предложена унифицированная структура аппаратной части КРТК, позволяющая обеспечить исполнение алгоритмических, информационных и программных задач по управлению и оптимизации режимов функционирования КРТП.

Предложена оригинальная структура организации зависимостей компонентов программной части ИСУ КРТП. Набор компонентов обеспечивает синтез закона управления для планирования, оптимизации и реализации движений КР в рамках установленных задач ТО с учетом текущего сценария течения ТП. Продемонстрированы новые решения по интеграции дискретных моделей и моделей реального времени в единую систему, позволяющие непосредственно оптимизировать закон управления, а также обеспечивать возможность управления временем реакции системы в зависимости от требований безопасности, свойственных текущему режиму. Модульность структуры и унификация ключевых интерфейсов позволяют ИСУ варьировать не только параметрами и режимами для максимизации целевой функции оптимизации, но и осуществлять выбор наиболее подходящих текущему сценарию моделей.

Представлена обобщенная логика взаимодействия основных компонентов, демонстрирующая динамическое представление и принципы функционирования модулей предложенной программной части ИСУ КРТП, включающей алгоритмическое и программное обеспечение для реализации режима позиционного управления КР в ТП для движений классов SRP в КП и алгоритмическое и программное обеспечение для реализации режима траекторного управления КР в ТП для движений классов HRP и SRP по шаблонным траекториям.

Разработанное и представленное в текущем разделе математическое и алгоритмическое обеспечение, определяющее внутренние принципы и механизмы АСУ ТО при синтезе дискретных управляющих сигналов, позволяет обеспечить системы планирования и оптимизации движения в КРТП исходными задающими параметрами в соответствии с технологическим описанием выполняемых операций.

Глава 7. Экспериментальные исследования модулей ИСУ коллаборативным роботизированным технологическим процессом в производственных условиях

В главе представлена серия экспериментов на промышленном оборудовании научно-образовательного центра «Промышленная робототехника и передовые промышленные технологии» ФГБОУ ВО «КнАГУ», направленная на подтверждение научных и технических решений, рассмотренных в предшествующих главах, а также на моделирование технико-экономических показателей при внедрении ИСУ КРТП в производство.

Отдельные параметры рассматриваемых ТП были основаны на анализе задач и целей модернизации АСУ ТП камеры роботизированной покраски на базе манипуляторов серии ABB IRB 5500-22 в гальваническом цехе 96 Филиала ПАО «ОАК» – КнААЗ им. Ю.А. Гагарина, соответствующий акт внедрения представлен в прил. В.

7.1. Экспериментальные исследования реализации технологических переходов и рабочих ходов коллаборативного робота в технологическом процессе окрашивания изделий

В целях подтверждения эффективности предложенных решений при выборе алгоритмов интерполяции для синтеза закона управления КР в задачах выполнения ТПД в ТП окрашивания изделий приводятся результаты эксперимента на промышленном оборудовании в лабораторных условиях, подробности представлены в работе [261].

Цель. Оценка отклонений траекторных перемещений от заданных для 9 вариантов алгоритмов интерполяции, сравнение итоговых движений по параметрам: минимально возможного времени исполнения движения и сопряженных с движениями энергозатрат.

Исходные данные: параметры КРТК и глобальные настройки системы управления представлены в табл. 7.1, параметры эксперимента для КРТП окрашивания представлены в табл. 7.2, внешний вид КРТК в ТП окрашивания представлен на рис. 7.1, комплекс внешнего управления КР представлен на рис. 7.2.

Таблица 7.1 – Основное оборудование КРТК и глобальные настройки системы управления в экспериментах по ТП окрашивания, механообработки, нанесения ГМ

Наименование параметров КРТК и глобальных настроек АСУ	Описание параметров КРТК и глобальных настроек АСУ
1) КР	KUKA LBR iiwa 7 R800
2) Оборудование системы распознавания и идентификация пространственного расположения объектов коллизий	Мультикамерная система на базе камер Intel Realsense Depth Camera D455, лидара Intel Realsense Lidar Camera L515, вычислительных микрокомпьютеров Nvidia Jetson Xavier NX и JetsonNano, оптические датчики, ультразвуковые датчики расстояния HC-SR04
3) Управляющее ПО	MATLAB/ROS2/ KUKA Sunrise.OS 1.16

Продолжение таблицы 7.1

Наименование параметров КРТК и глобальных настроек АСУ	Описание параметров КРТК и глобальных настроек АСУ
4) Управляющее оборудование	Контроллер KUKA Sunrise Cabinet, сервер на базе AMD Ryzen™ 9 5900X, инженерная станция на базе AMD Ryzen™ 5 7640HS, пульт оператора Kuka SmartPad
5) Интерфейс управления	Пользовательский интерфейс реального времени KUKA Sunrise.FRI 1.16
6) Измерительные устройства фактических углов положения и угловых скоростей	Встроенная система сенсорики КР
7) Метод управления системой управления	Программное управление
8) Шаг дискретизации сигнала	10 мс

Таблица 7.2 – Параметры эксперимента для КРТП окрашивания изделия сложной конфигурации

Наименование параметра	Значение или описание параметра
1) Изделие	Имитатор изделия – полусфера радиусом 0,27 м, координаты центра сферы в глобальной системе координат [0,7 0 0,4]
2) Краскораспылитель, факел	Имитатор – лазерный указатель, расстояние от фланца КР до поверхности изделия (имитация длины факела) 0,265 м, диаметр пятна окрасочного факела – 150 мм
3) Допуски	Линейный допуск – 9 мм, угловой допуск - 1°
4) Ограничения углов, угловых скоростей шарниров КР	Штатные, согласно документации
5) Ограничения угловых ускорений шарниров КР	0,75 от штатных, согласно документации
6) Уровень жесткости шарниров	Низкий (устанавливается программно для обеспечения безопасности человека в случае непредвиденного столкновения)
7) Режим управления	Траекторный
8) Оборудование и параметры съемки	Цифровая зеркальная камера Canon EOS 6D, процессор DIGIC 5, CMOS-датчик на 20,2 мегапикселя, тип фокусировки – ручной, выдержка – 30 с, светочувствительность (ISO) – 500, диафрагменное число - f/22
9) Алгоритмы интерполяции	'trap' 'cubic' 'quintic' 'cubicSmooth/spline' 'cubicSmooth/makima' 'cubicSmooth/pchip1' 'quinticSmooth/spline' 'quinticSmooth/makima' 'quinticSmooth/pchip1'
10) Критерий оптимизации движения	Минимальное возможное время исполнения движения, минимальное время планирования движения, безопасность ТП для человека

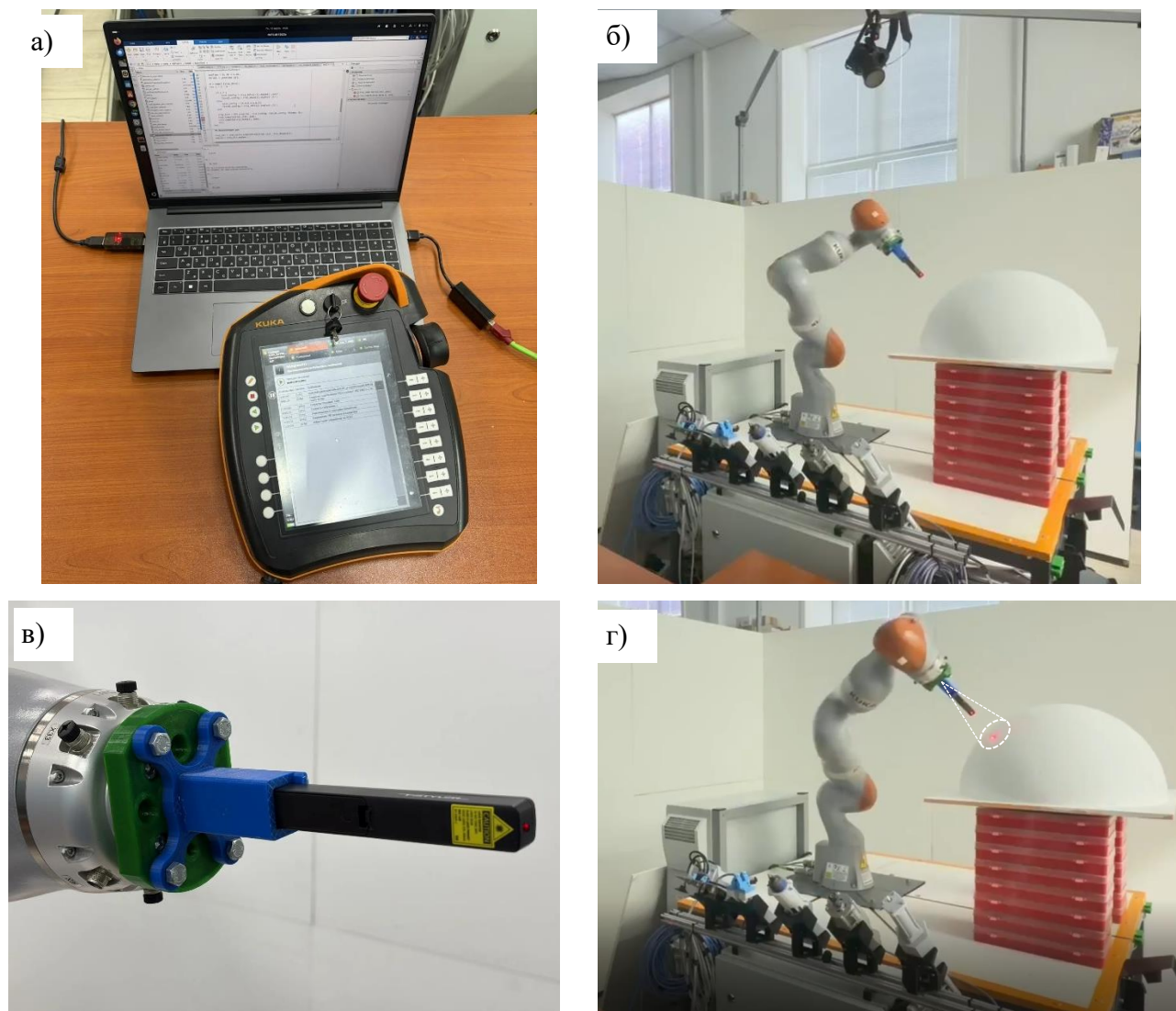


Рисунок 7.1 – Элементы КРТК экспериментального исследования

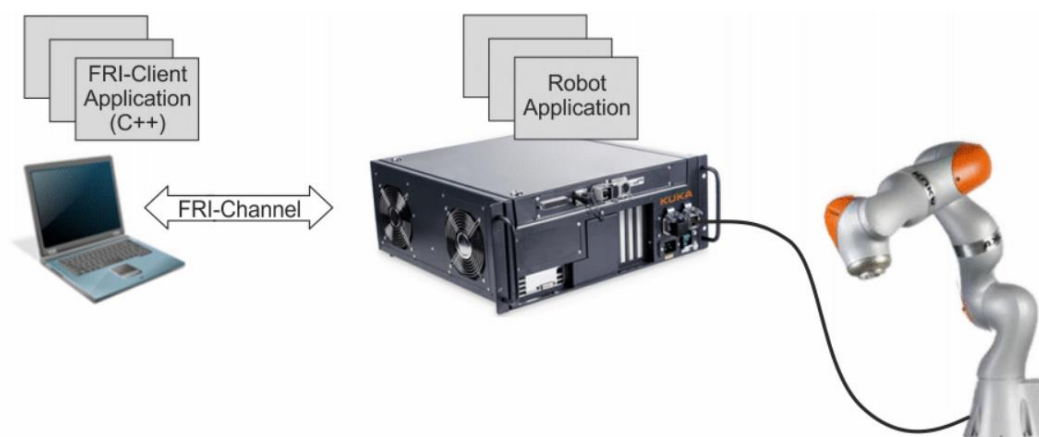


Рисунок 7.2 – Комплекс внешнего управления КР

Оцениваемые показатели: время исполнения движения, сопряженные энергозатраты, визуальная экспертная оценка степени отклонения траектории от заданной (PE) (по шкале от 1 до 5, где 1 – наименьшее среднее отклонение, 5 – наибольшее среднее отклонение).

Результаты эксперимента: значения показателей t_{end} , E_{total} и PE в разрезе вариантов алгоритма интерполяции представлены в табл. 7.3, траектории центра пятна окрасочного факела на поверхности изделия представлены на рис. 7.3, графики изменения углов положения и угловых скоростей шарниров КР в рамках движения 1 и 5 представлены в прил. П, фрагменты графика изменения угла положения и угловой скорости для движения 6-го шарнира КР представлены на рис. 7.4.

Таблица 7.3 – Экспериментальные значения показателей в разрезе вариантов интерполяции

Показатель	Наименования алгоритмов интерполяции								
	trap/ spline	cubic/ makima	quintic/ pchip1	cubicSmooth/ spline	cubicSmooth/ makima	cubicSmooth/ pchip1	quinticSmooth/ spline	quinticSmooth/ makima	quinticSmooth/ pchip1
t_{end} , с	31.69	36.49	35.89	28.09	30.39	29.49	27.19	30.49	29.89
E_{total} *, кДж	23,17	17,24	27,27	8,78	7,76	8,86	9,46	8,77	10,32
PE	1,75	2	1,75	4	4,75	4	4	4,5	3
$\frac{E_{total}}{t_{end}}$, кДж/с	0,73	0,47	0,76	0,31	0,26	0,30	0,35	0,29	0,35

* - значение затраченной энергии получено на имитационной модели

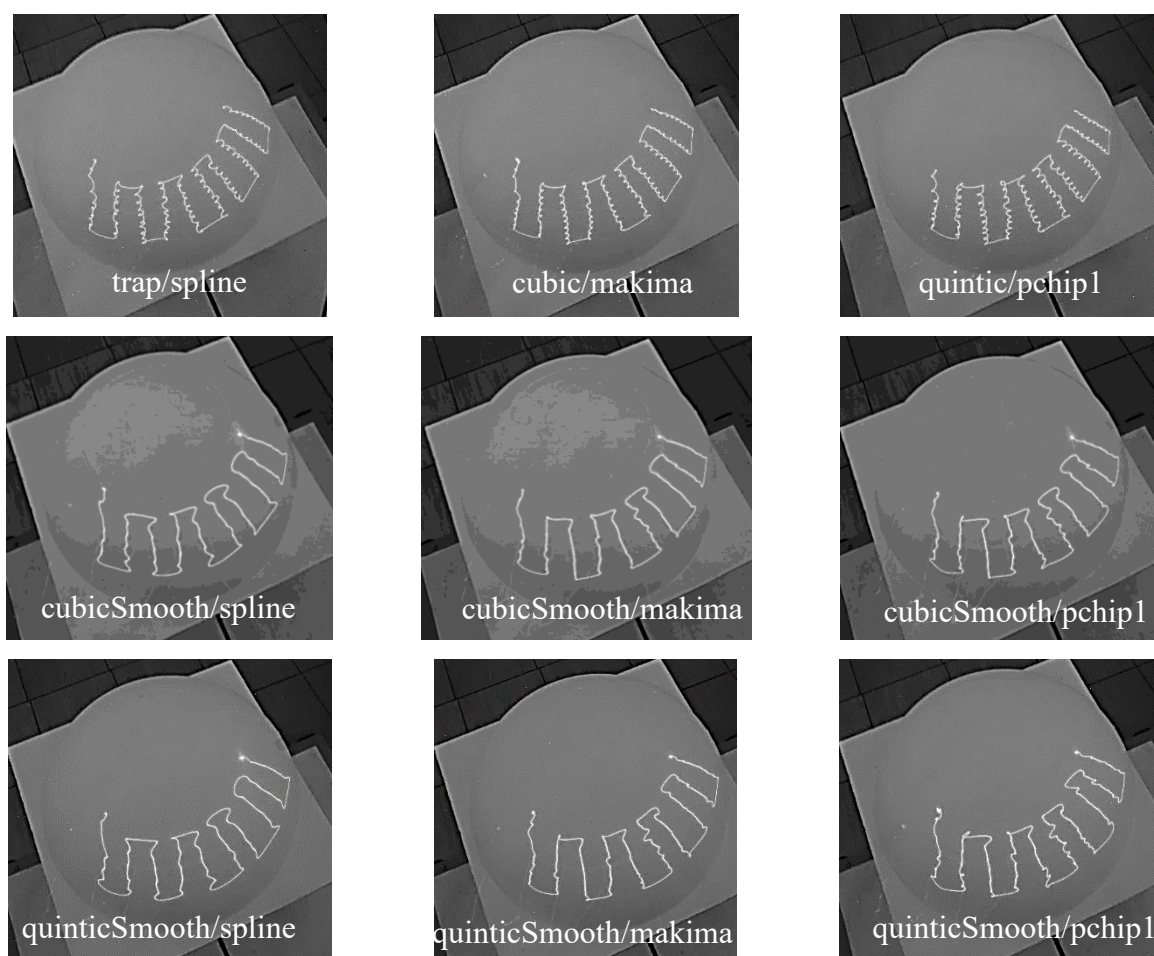


Рисунок 7.3 – Траектория перемещения пятна лазера (имитация центра пятна окрасочного факела) при замедленной съемке (для девяти вариантов движения)

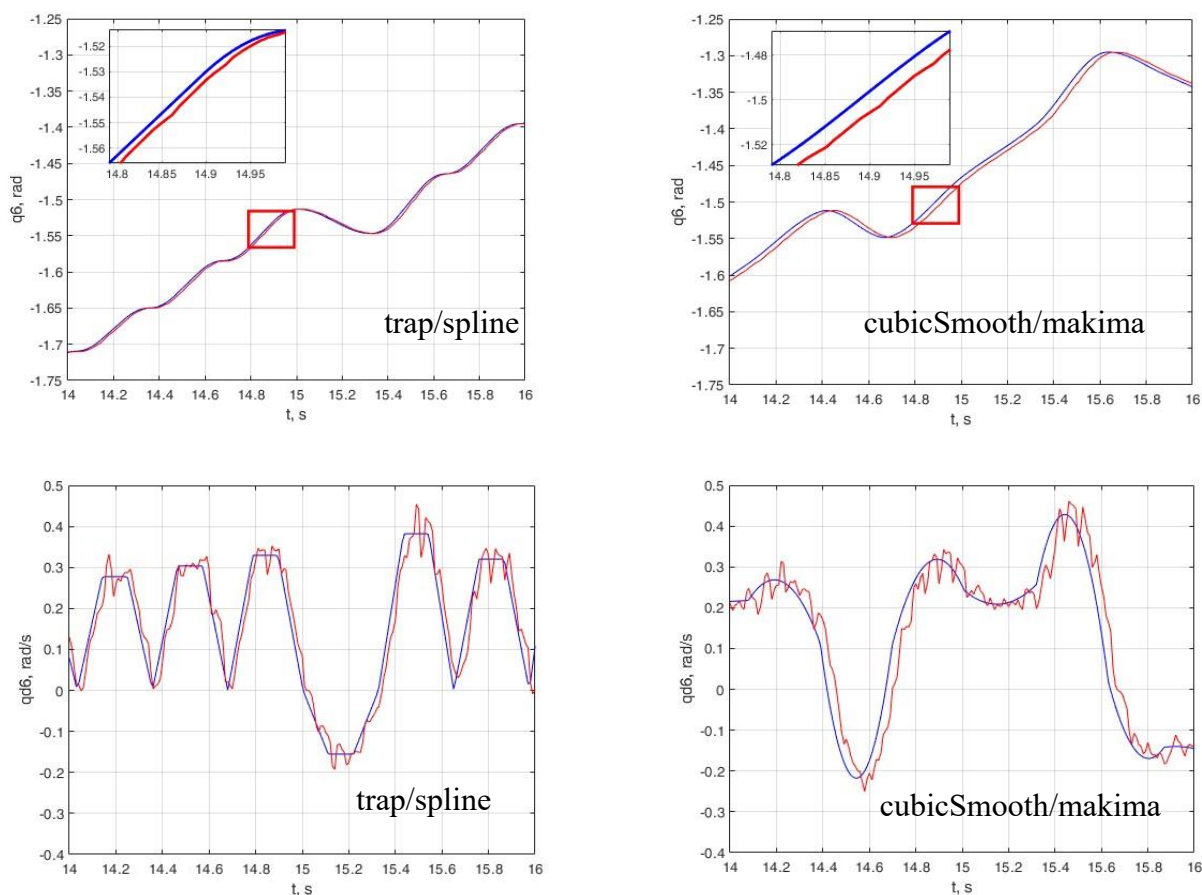


Рисунок 7.4 – Изменение углов положения и угловых скоростей для движения 6-го шарнира КР

Анализ результатов. Анализ 9 траекторий перемещения центра пятна окрасочного факела (пятно лазера имитатора), полученных в результате планирования движения с применением девяти вариантов алгоритма интерполяции, позволяет заключить, что все траектории получены в пределах установленного допуска. Тем не менее с учетом рис. 7.3 и табл. 7.3 представляется возможным выполнить дифференциацию движений по установленным в постановочной части эксперимента критериям. Так, максимальная производительность для КРТП может быть получена при использовании алгоритма *quinticSmooth/spline* (27,19 с на ТПд), минимальная производительность связана с алгоритмом без сглаживания *cubic/makima* (36,49 с на ТПд); минимальное удельное энергопотребление сопряжено с алгоритмом *cubicSmooth/makima* (0,26 кДж/с), максимальное – с *quintic/pchip1* (0,26 кДж/с); по плавности и точности следования заданной траектории в приоритете траектория движения 5 *cubicSmooth/makima* ($PE = 4,75$), на последнем месте траектории движений 1 (*trap/spline*, $PE = 1,75$) и № 3 (*quintic/pchip1*, $PE = 1,75$).

Выводы

1) Продемонстрировано функционирование КРТП, в частности, реализация ТПд по окрашиванию криволинейной поверхности.

2) Реализован механизм автоматического планирования и реализации движений по исполнению ТПД методом программного управления в реальном времени, качество полученных траекторий соответствует установленным угловым и линейным допускам.

3) Исследован экстремальный режим движения при предельных допустимых значениях угловых скоростей и повышенных угловых ускорениях шарниров, а также программно установленном низком уровне жесткости шарниров, обеспечивающем максимальную безопасность для человека.

4) Продemonстрировано существенное влияние варианта алгоритма интерполяции на значимые параметры движения (на производительность процесса и удельное энергопотребление КР), подтверждена целесообразность постановки для каждого РДП в БЗ в соответствие конкретными алгоритмами интерполяции, обеспечивающими повышение эффективности движения.

7.2. Экспериментальные исследования реализации вспомогательных переходов и вспомогательных ходов коллаборативного робота в технологическом процессе механообработки

В целях подтверждения эффективности предложенных решений в гл. 5 (алгоритмов управление движением КР с разрешением коллизий в ограниченном ОП) приводятся результаты эксперимента на промышленном и лабораторном оборудовании в лабораторных условиях для ВП и ВХ технологических операций на примерах КРТП механообработки (в том числе без участия оператора в режиме РТП) и нанесения герметизирующих материалов (ГМ). Подробности результатов эксперимента представлены в работе [180].

Цель. Оценить эффективность функционирования группы алгоритмов RLOS, RRT+, СНОМР+, PTS планирования и оптимизации движений КР при разрешении коллизий.

Исходные данные: параметры КРТК (рис. 7.5) и глобальные настройки системы управления представлены (см. табл. 7.1) в табл. 7.4, параметры эксперимента для КРТП механообработки и нанесения ГМ представлены в табл. 7.5, рабочая зона КРТП механообработки без участия оператора представлена на рис. 7.6, с участием оператора на рис. 7.7, рабочая зона КРТП нанесения ГМ представлена на рис. 7.8, комплекс внешнего управления КР (см. рис. 7.2).

Таблица 7.4 – Вспомогательное оборудование КРТК в эксперименте по ТП механообработки и нанесения ГМ

Наименование вспомогательного оборудования	Описание вспомогательного оборудования
1) Параметры вспомогательного робота	5-DOF робот WHEELTEC – moveit (сервопривода HWZ020, микроконтроллер STM32F103VET6), механический двухпальцевый захват
2) Мобильный робот	KUKA YouBot
3) Вакуумный захват	Универсальный вакуумный захват для панелей

Таблица 7.5 – Параметры КРТП механообработки и нанесения ГМ

№	Наименование параметра	Значение или описание параметра
1)	Изделие	Верхняя панель корпуса БЭК
2)	Автоматический дозатор ГМ	Имитатор дозатора
3)	Шпиндель со сверлом	Имитатор шпинделя (патрон), сверло
4)	Допуски по траектории ВП и ВХ	Допуски для ВП и ВХ не устанавливаются
5)	Допуск по точности позиционирования в точке начала РХ	Линейный допуск – 0,8 мм, угловой допуск – 0,5°
6)	Ограничения углов, угловых скоростей, угловых ускорений, моментов шарниров КР	Штатные, согласно документации
7)	Уровень жесткости шарниров	Низкий (устанавливается программно для обеспечения безопасности человека в случае непредвиденного столкновения)
8)	Режим управления	Траекторный, позиционный
9)	Алгоритмы разрешения коллизий	RLOS, RRT+, CHOMP+, PTS
10)	Критерий оценки эффективности движения	Факт отсутствия коллизии, минимальное время планирования движения при установленном времени на исполнение движения
11)	Установленная длительность движения	В диапазоне от 3,98 до 4,00 с.

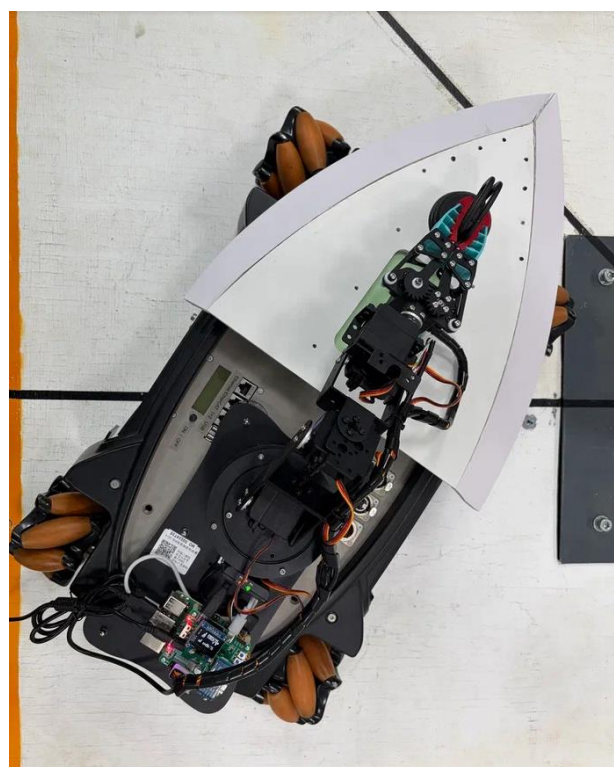
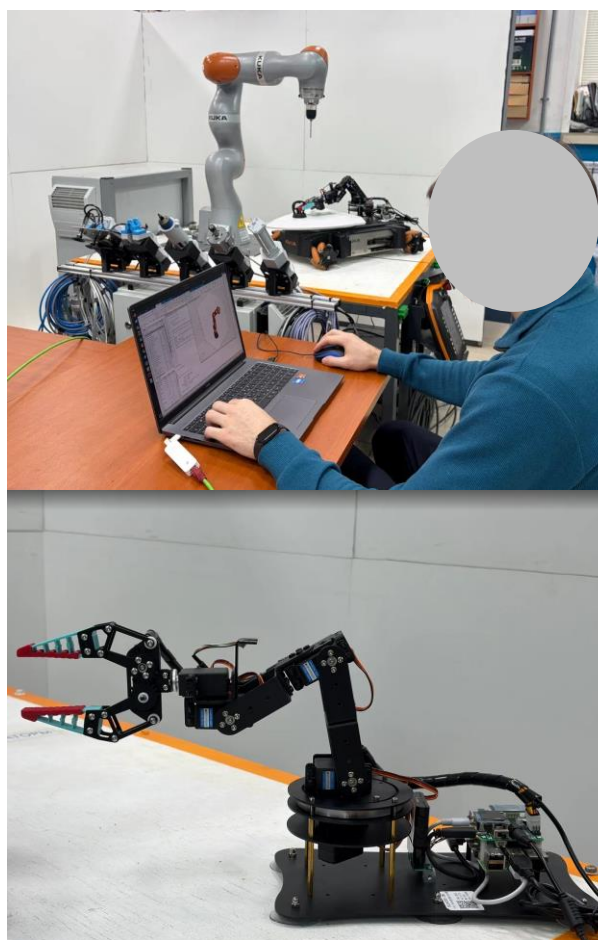


Рисунок 7.5 – Оборудование КРТК сборки элементов фюзеляжа БЭК

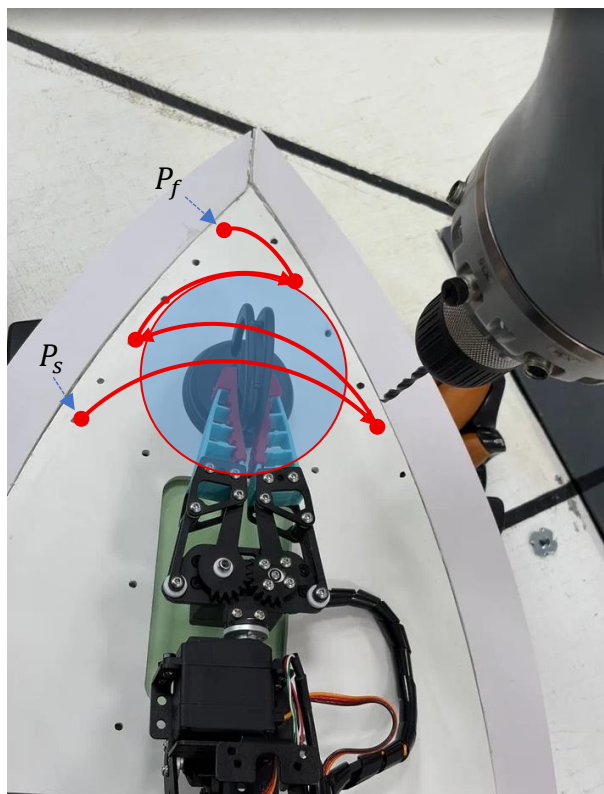
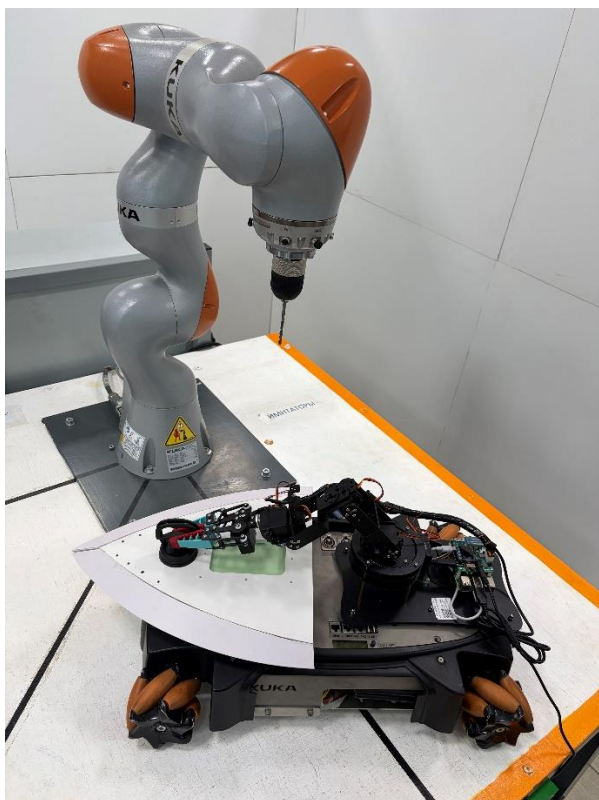


Рисунок 7.6 – Рабочая зона роботизированного технологического процесса механообработки

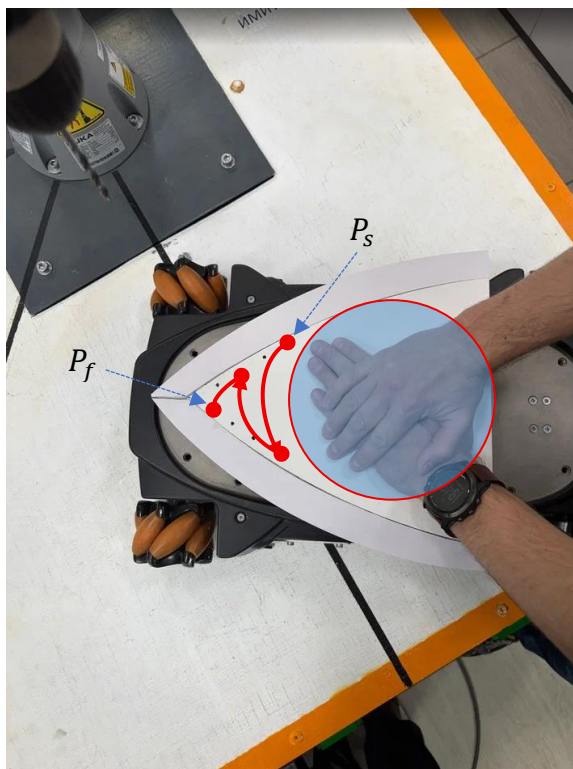


Рисунок 7.7 – Рабочая зона коллаборативного роботизированного технологического процесса механообработки (с участием оператора)

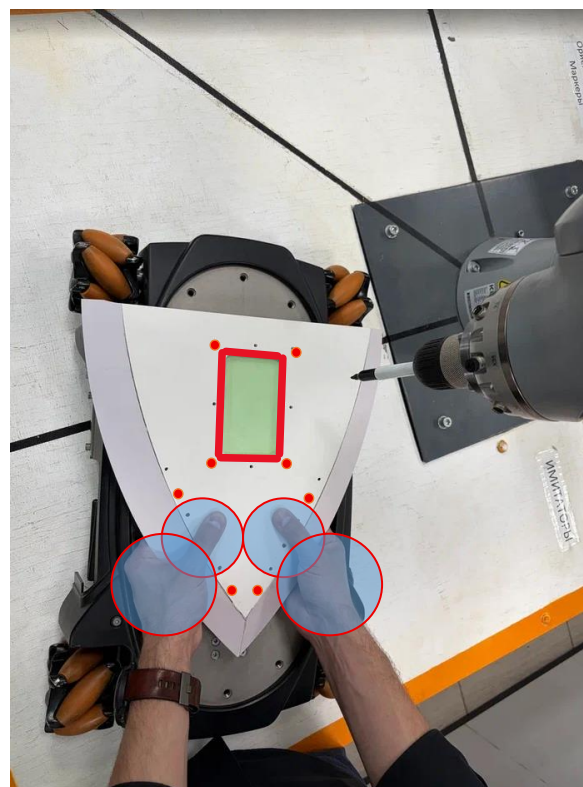


Рисунок 7.8 – Рабочая зона КРТП (с участием оператора) нанесения полимерных композиционных материалов по периметру люка (установлен имитатор автоматического дозатора герметизирующих материалов)

Оцениваемые показатели: среднее время перепланирования движения ($\bar{t}_{calc}^+$), связанное с необходимостью разрешения прогнозируемой коллизии, при движении КР по шаблону РТР; вероятность разрешения коллизии P_r^+ с первого раза одним алгоритмом.

Результаты эксперимента: детализация эксперимента для КРТП по механообработке представлена в гл. 5 и в работе [180], уточненные результаты по показателю времени перепланирования движения (t_{calc}^+) представлены в табл. 7.6, по вероятности разрешения коллизии, коэффициенту k_{ratio}^E и среднему времени расчета движения ($\bar{t}_{calc}^+$) – в табл. 7.7. Примеры графиков изменения угловой скорости 6-го шарнира для движения по шаблону РТР и полученного алгоритмом RLOS представлено на рис. 7.9.

Таблица 7.6 – Статистические показатели параметра t_{calc}^+ , с

Наименование алгоритма	min	max	Медиана	Q1*	Q3**	IQR***
RLOS	0,308	1,148	0,351	0,329	0,715	0,387
RRT	1,196	2,335	1,539	1,386	1,714	0,328
CHOMP	0,807	1,383	0,910	0,895	0,937	0,042
PTS	0,476	0,645	0,520	0,508	0,526	0,017

* – первый квартиль; ** – третий квартиль; *** – межквартильный размах.

Таблица 7.7 – Усредненные экспериментальные и модельные данные результатов разрешения коллизии алгоритмами RRT, CHOMP, PTS и RLOS

	RLOS	RRT	CHOMP	PTS
P_r^+ , % (эксперимент)	75,3	88,5	91,33	95,1
P_r^+ , % (модель)	76,8	89,8	93,6	94,3
$\bar{t}_{calc}^+$, с (эксперимент)	0,351	1,539	0,730	0,135
k_{ratio}^E (эксперимент)	3,15	1,04	1,16	1,98
k_{ratio}^E (модель)	2,63	1,08	1,26	1,54

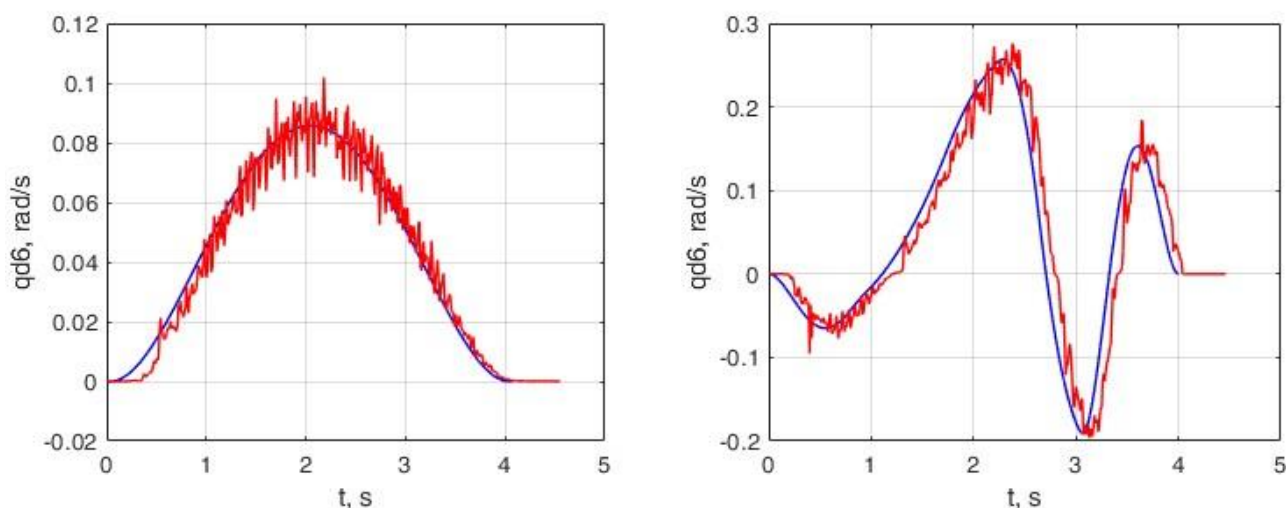


Рисунок 7.9 – Переходные процессы по угловой скорости для 6-го шарнира: а – для движения по шаблону РТР; б – для движения, полученного алгоритмом RLOS

На рис. 7.10 – 7.13 представлены примеры фазовых траекторий переменных состояния шарниров КР на примере движения 29 в варианте RLOS и PTP.

Анализ результатов. Данные эксперимента, уточняющие результаты, полученные в ходе имитационного моделирования в гл. 5, демонстрируют превосходство алгоритмов CHOMP и PTS по показателю P_r^+ – 91,33 % и 95,1 % соответственно. Тем не менее по показателю $\bar{t}_{calc}^+$ алгоритм CHOMP существенно уступает 0,73 с против 0,135 с для PTS и 0,351 с для RLOS. Повышение вероятности разрешения коллизий в эксперименте, по сравнению с результатами исследования гл. 5 связано с введением защитных оболочек (виртуального увеличения объема объектов коллизий). Так же следует отметить, что алгоритм PTS предназначен для функционирования только в ограниченном РДП и в случае невозможности постановки соответствия РДП для текущей ситуации в рабочей зоне по алгоритму PTS решение найдено не будет. Решение по алгоритму RRT требует существенных временных затрат, что также не всегда может оказаться эффективным в рамках рассматриваемого КРТП.

По показателям энергоэффективности (k_{ratio}^E) очевидное преимущество принадлежит алгоритмам RRT и CHOMP, формирующим более плавные движения. При этом анализ экспериментальных и модельных данных, а именно сохранение уровня дифференциации энергозатрат для 4-х типов движений (рис. 7.14), доказывает возможность использования приближенных

(быстродействующих) моделей [108] для принятия решений о выборе алгоритмов разрешения коллизий по критерию энергоэффективности.

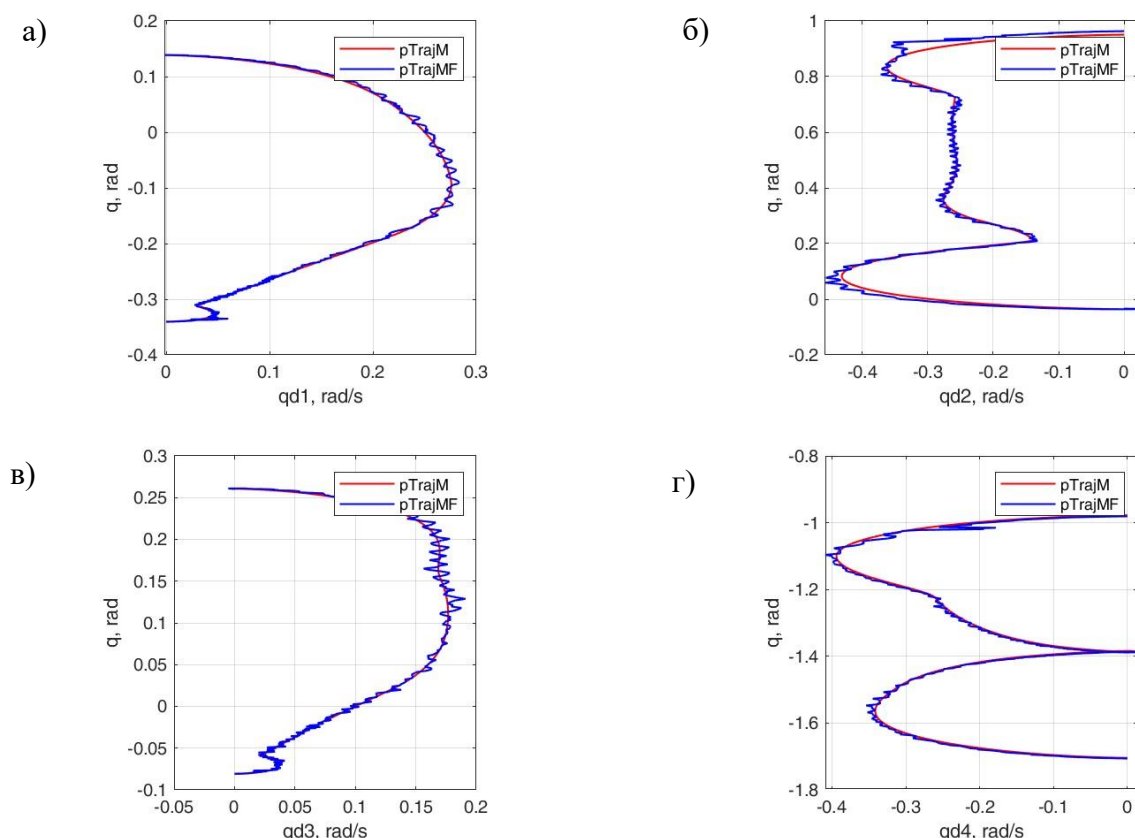


Рисунок 7.10 – Фазовые траектории для шарниров КР с 1-го по 4-ый при движении 29 для алгоритма RLOS

В целом данные эксперимента на лабораторном оборудовании подтверждают обозначенные зависимости, составленные на основе анализа данных эксперимента на имитационной модели, и определяют целесообразность варьирования алгоритмами для исполнения каждой конкретной части ТО. Анализ графиков (рис. 7.9 – 7.13) изменения переменных состояния шарниров КР позволяет сделать заключение об отсутствии отклонения от установленных линейных и угловых допусков, при реализации метода программного управления в режиме траекторного управления по исполнению ВП и ВХ.

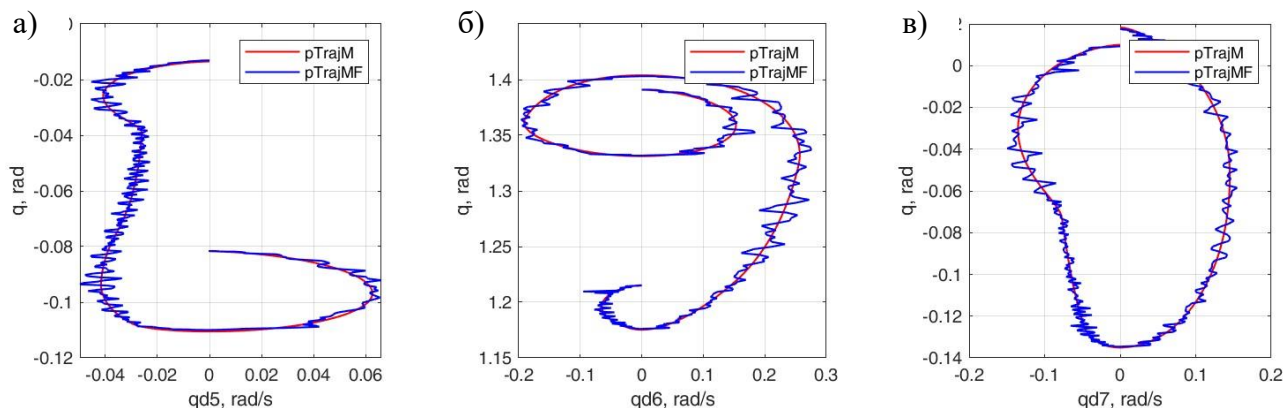


Рисунок 7.11 – Фазовая траектория для шарниров КР с 5 по 7 (а, б, в соответственно) при движении 29 для алгоритма RLOS

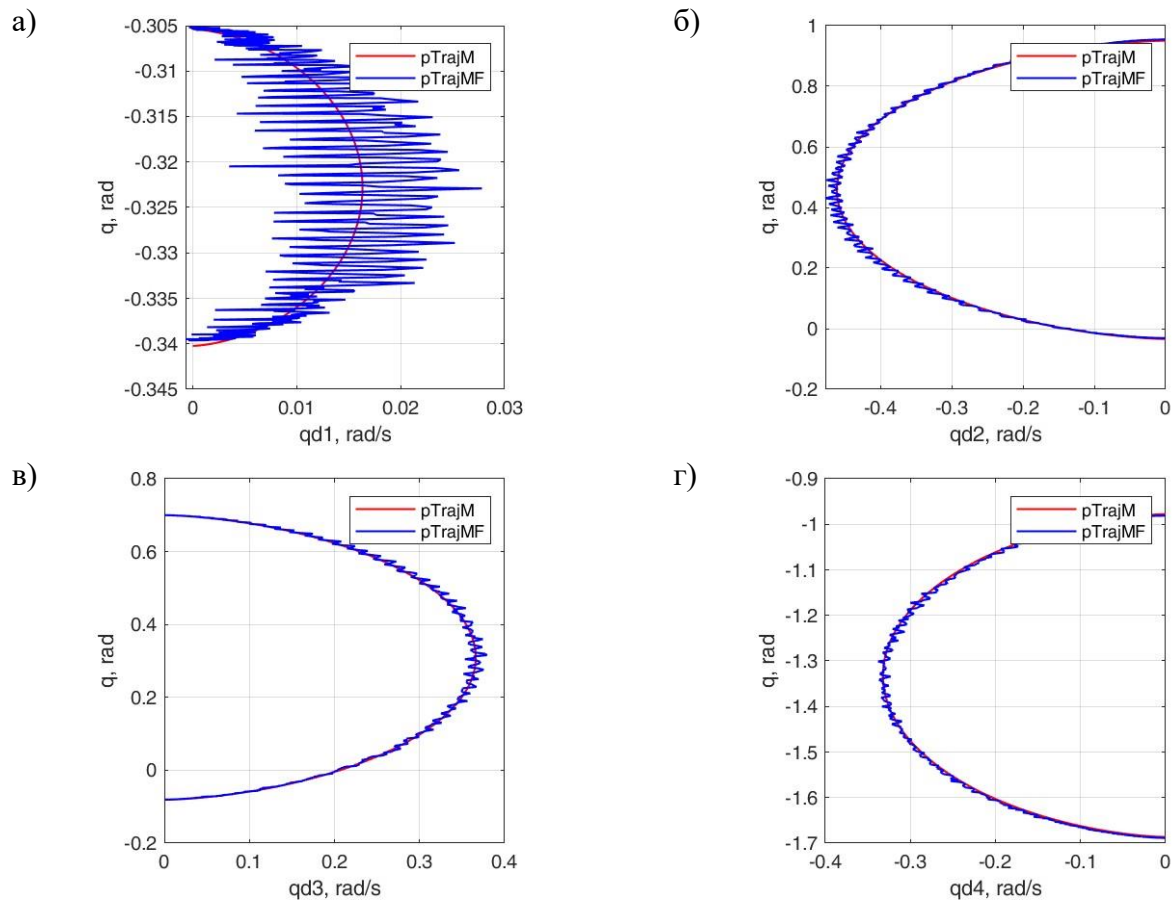


Рисунок 7.12 – Фазовые траектории для шарниров КР с 1-го по 4-й при движении 29 для базового движения РТР

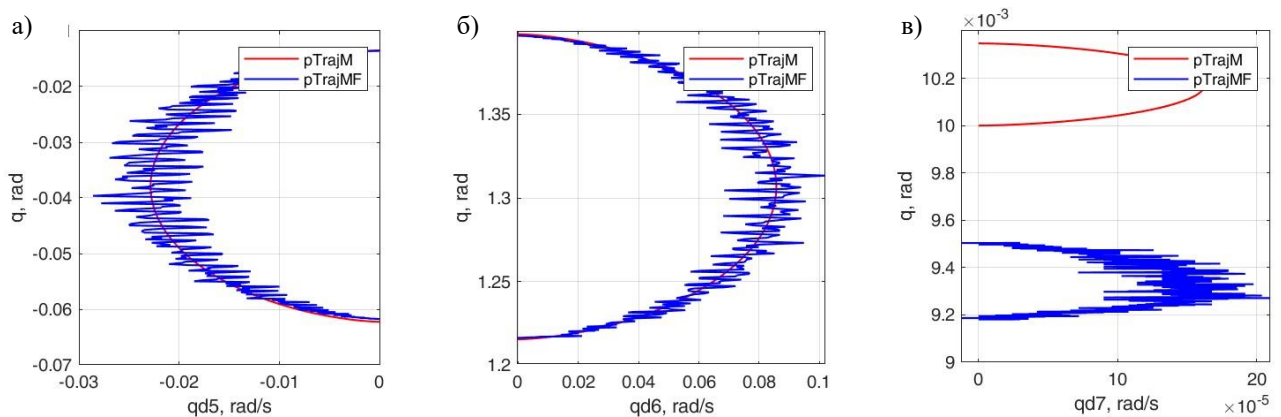


Рисунок 7.13 – Фазовые траектории для шарниров КР с 5 по 7 (а, б, в соответственно) при движении 29 для базового движения РТР

Выводы

- 1) Продемонстрировано функционирование КРТП на примере реализации ВП и ВХ, необходимых для реализации ТПд по механообработке и нанесению ГМ.
- 2) Реализован механизм автоматического планирования и реализации движений по исполнению ВП и ВХ методом программного управления в реальном времени, точность позиционирования ЦТИ в точке начала РХ соответствует установленным угловым и линейным допускам.

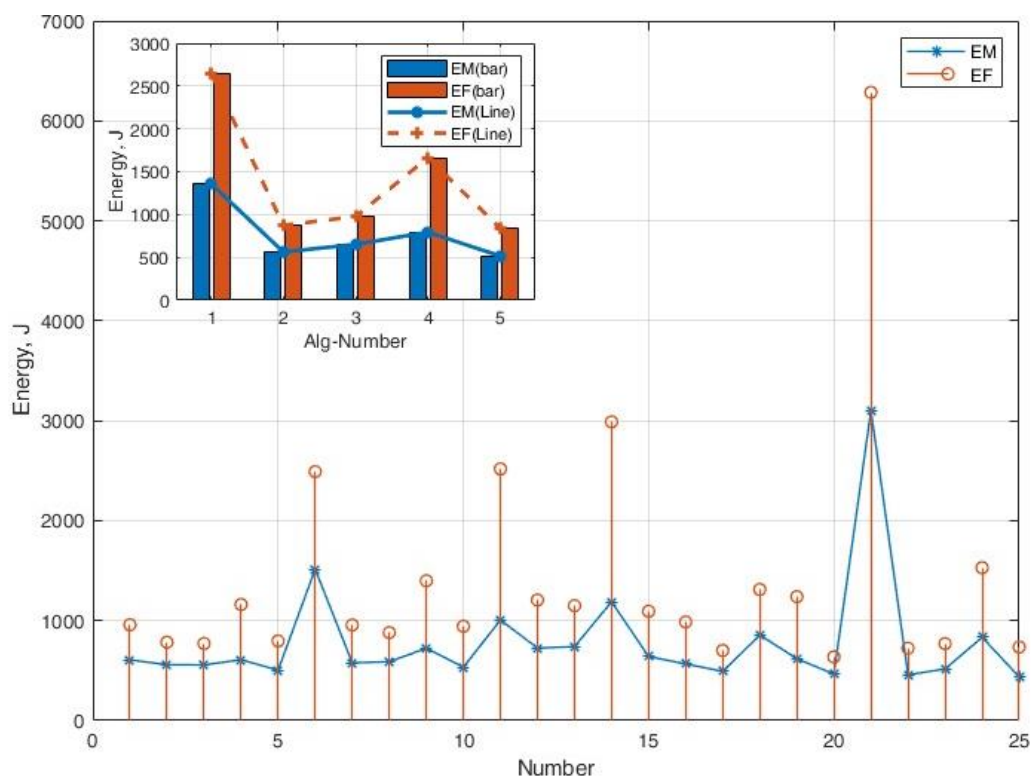


Рисунок 7.14 – График энергозатрат в разрезе 25 движений: EF, EM – энергозатраты движения КР, полученные по экспериментальным и модельным данным соответственно; EF(bar), EM(bar) – средние энергозатраты в разрезе алгоритмов разрешения (1, 2, 3, 4, 5 – RLOS, RRT, CHOMP, PTS, РТР соответственно) для экспериментальных и модельных данных соответственно

3) Исследован режим движения при ограничениях времени расчета движения по разрешению коллизий, а также с программно установленным низким уровнем жесткости шарниров, обеспечивающим максимальную безопасность для человека.

4) Продемонстрировано существенное влияние вариантов алгоритма разрешения коллизий на значимые параметры КРТП (вероятность разрешения коллизии с первого раза и время расчета нового движения), доказана эффективность алгоритмов, подтверждена целесообразность наличия в БЗ РДП механизма постановки для каждой конкретной ситуации соответствия конкретного алгоритма разрешения коллизии, обеспечивающего повышение эффективности КРТП.

7.3. Экспериментальные исследования по оценке эффективности предложенного комплекса решений на имитационной модели коллаборативного роботизированного технологического процесса

В целях обоснования целесообразности для КРТП решений, предложенных в ходе проведенных исследований в разделе приводятся результаты серии экспериментов на имитационной модели (гл. 3). В эксперименте степень недетерминированности моделировалась показателем вероятности возникновения коллизии по ходу движения КР при выполнении части ТО.

Первый этап

Цель. Оценка степени влияния степени недетерминированности рабочей сцены на интегральные показатели ТП.

Исходные данные: настройки модели выполнены в соответствии с данными, представленными в табл. 7.8, при этом разрешение коллизий не осуществляется, столкновения фиксируются штатной системой автоматики КР, движение перепланируется с учетом опыта оператора

Таблица 7.8 – настройки элементов ДСМ

Наименование параметра или переменной	Значение или описание параметра/переменной
Вероятность возникновения коллизий Pr^+ для 9 случаев	[0 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4]
Тип движения для реализации части ТО	РТР
Продолжительность смены	7200 с (2 ч)
Трудозатраты, LC (Labor Cost)	2 чел/ч
Количество частей в одной технологической операции	Задано равномерным распределением в интервале [3, 10]
Ограничения редуцированного пространства	Присутствуют
Продолжительность смены	7200 с
$\bar{T}_{pf1}^{TO}$ сервера Task_Decomposition	40 с
$\bar{T}_{pf2}^{TO}$ сервера Task Priority Increasing	10 с
Длительность движения $\bar{T}_{main}^{TO}$ сервера MovementR_Realization	4 с
Длительность планирования движения типа РТР $\bar{T}_{add_MC1}^{TO}$ сервера Default_MovementR_Planning	0,1 с
Длительность проверки движения на наличие коллизий $\bar{T}_{add_MC2}^{TO}$ сервера Collision_checking	0,3 с
Длительность процедур разрешения коллизий $\bar{T}_{add_MC3}^{TO}$ сервера Collision_resolution	0 с (по условию – механизмы разрешения коллизий отсутствуют)
Длительность планирования части ТО для КР по операционному описанию $\bar{T}_{add_STR}^{TO}$ (сервер SubTaskR_Planning)	20 с
Временные задержки звеньев запаздывания Transport Delay	0,01~0,1 с
Средняя мощность КР в режиме ожидания $\bar{P}_{standby}$	0,3 кВт
Средняя мощность КР в режиме движения с минимальной нагрузкой на фланце $\bar{P}_{mov}$	1,3 кВт

Оцениваемые интегральные показатели: перечень оцениваемых показателей, а также подробное описание показателей и формулы для их расчета представлены (см. гл. 3). Значения интегральных показателей в разрезе вариантов моделирования представлены в прил. Р, визуализация динамики некоторых показателей для отдельных условий моделирования приведены на рис. 7.15 – 7.21.

Описание моделируемой АСУ ТП: на первом этапе эксперимента рассматривалась система управления ТП, в которой отсутствуют механизмы прогнозирования и разрешения коллизий. Столкновения фиксируются штатной системой автоматики, реакция на столкновение – аварийная остановка с передачей управления оператору, при этом все оставшиеся части ТО перепланируются. Вопрос оценки качества безопасности ТП не ставился ввиду очевидной небезопасности процесса для оператора и оборудования.

Анализ результатов. На рис. 7.15 – 7.16 представлена визуализация некоторых показателей КРТП при $Pr = 0$.

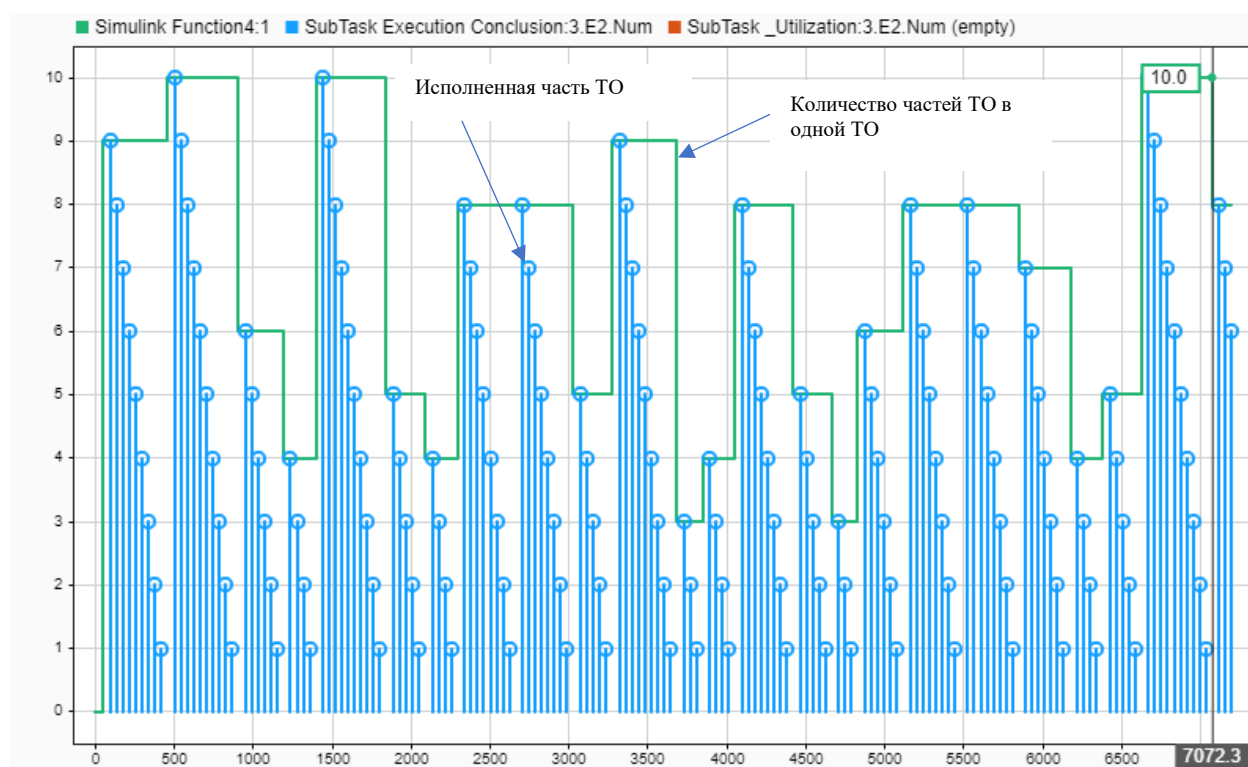


Рисунок 7.15 – Динамика выполнения ТО и частей ТО для этапа 1 эксперимента, при $Pr = 0$

Периодичность выполнения частей ТО и количество частей в рамках каждой ТО представлены на рис. 7.15, в виду отсутствия коллизий все части ТО выполняются без перепланирования (рис. 7.16, г).

Значения показателя $\varepsilon t^{ws} = 0,093$ (рис. 7.16, а) демонстрирует высокую степень вовлеченность оператора в КРТП, характерную для условий моделирования ТП. Доля времени непосредственного участия КР и системы планирования движений в общем времени ТП составляет 9,3 %, при этом, согласно значению показателя $\varepsilon^{ws} = 0,293$ (рис. 7.16, в), за это же время тратится до 29,3 % энергии КР. Объем потребленной энергии за смену в периоды времени, связанным с планированием движения 0,006 кВт*час и с непосредственным выполнением движения 0,22 кВт*час, а также в целом в течении времени течения всего ТП 0,75 кВт*час представлен на (рис. 7.16, б).

За смену происходит исполнение 149 частей ТО за счет реализации 149 движений (рис. 7.16, д), среднее время исполнения движения и время, затрачиваемое на его планирование – статично по условию исходных данных для эксперимента первого этапа.

Результаты эксперимента демонстрируют наличие потенциала повышения эффективности даже в ТП с высокой степенью вовлеченности оператора за счет снижения временных затрат и энергопотребления КР в операционное время (гл. 4), т.е. путем непосредственного решения задач оптимизации 1 и 2.

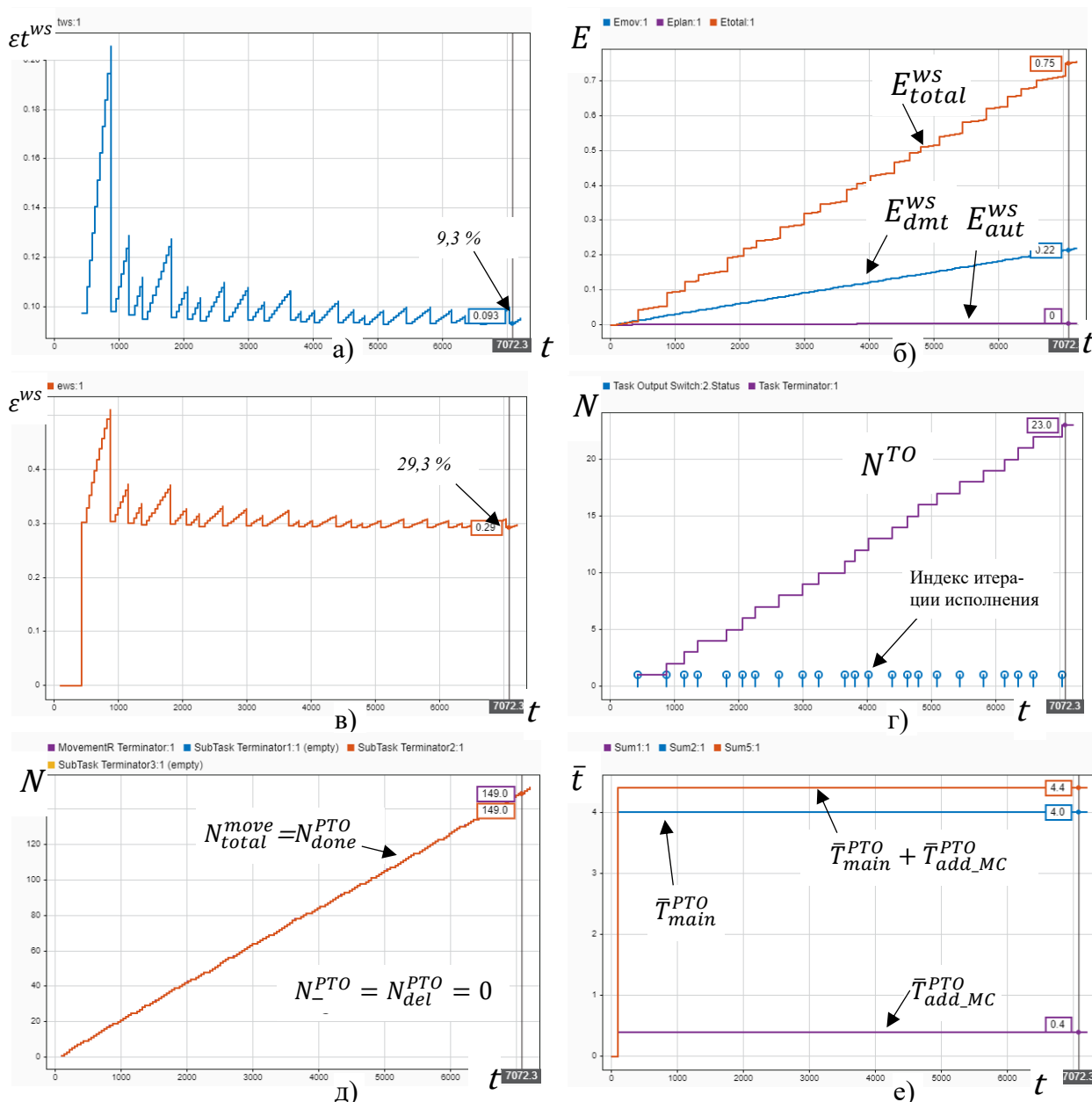


Рисунок 7.16 – Динамика некоторых переменных состояния КРТП для этапа 1 эксперимента при $Pr = 0$

Задачи сокращения временных затрат в контурах SubTask Control и Task Control В (см. гл. 3, рис. 3.2, табл. 3.1), а также сопряженных с этим временем затрат энергии за счет повышения эффективности труда оператора и других организационных мероприятий не рассматриваются как выходящие за рамки настоящего исследования и относящиеся к задачам производственного менеджмента. Тем не менее для контура Movement Control актуальны и эффективны авторские предложения (гл. 4, 5), в частности, за счет выбора наиболее подходящего профиля угловых скоростей, ограничения РДП и соответствующих опорных конфигураций, метода интерполяции, сглаживания или типов движений.

На рис. 7.17 – 7.18 представлена визуализация показателей КРТП при $Pr = 0,2$. На рис. 7.17, наряду с выполненными частями ТО наблюдаются сорванные части ТО, которые были отменены в связи с обработкой системы автоматики по столкновению. В результате столкнове-

ние, само по себе являющееся серьезным фактором риска причинения вреда оператору или оборудованию, выступает причиной отмены текущей и всех последующих частей ТО, повторного перепланирования всех невыполненных частей, а также зачастую планирования дополнительных движений для возвращения КР в исходную технологическую позицию.

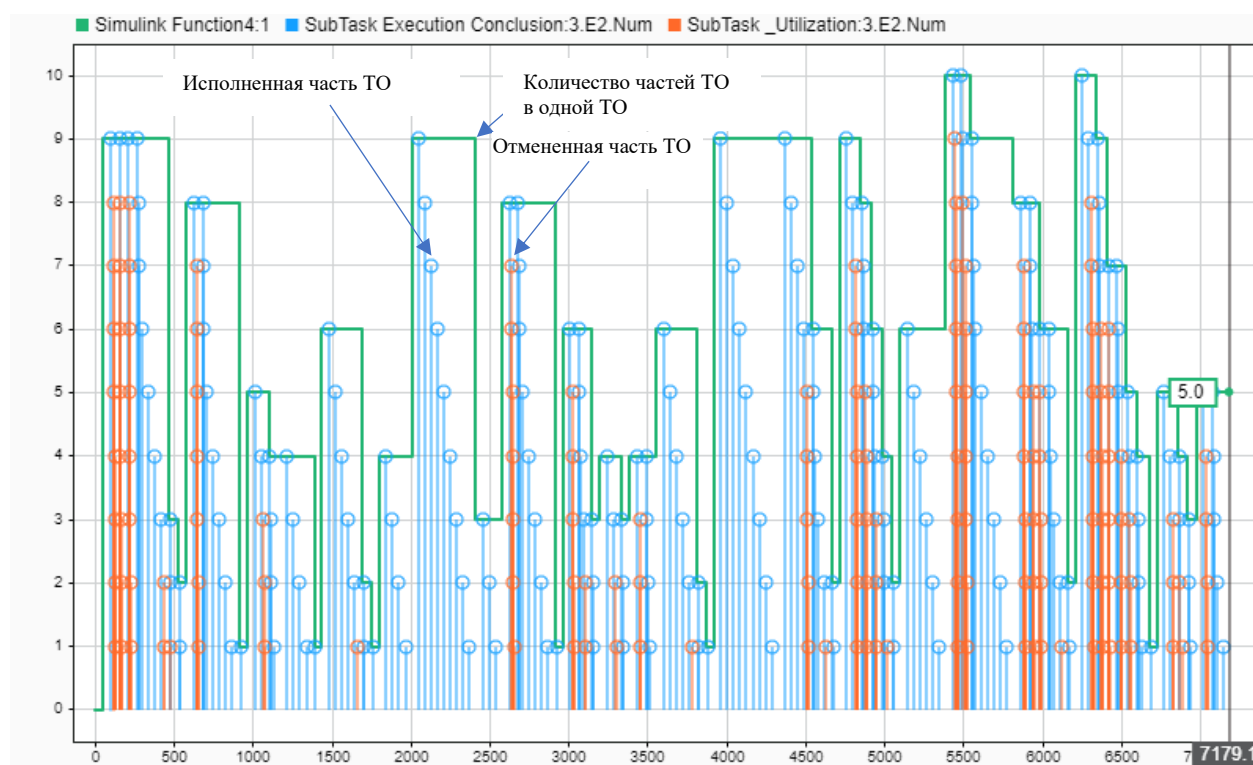


Рисунок 7.17 – Динамика выполнения ТО и частей ТО для этапа 1 эксперимента, при $Pr = 0,2$

Дополнительная работа приводит (см. прил. Р и рис. 7.15 – 7.18):

- к увеличению среднего вспомогательного времени ($\bar{T}_c^{TO}$) на 8,25 % по сравнению с ТП со значением переменной $Pr = 0$,

- к снижению коэффициента β_{done}^N на 77,3 % и коэффициента α_{done}^N на 56,5 %, что отчетливо видно при сравнении зависимостей (см. рис. 7.16, г, д и 7.18 г, д);

- к увеличению значений показателей εt^{ws} и ε^{ws} на 24,1 % и 15 % соответственно, что ведет к росту удельных трудозатрат ($\frac{LC}{N^{TO}}$) и удельного энергопотребления на реализацию ТО ($\frac{E_{total}^{ws}}{N^{TO}}$) на 4,6 % и 9 % соответственно;

- к сокращению ритма исполнению ТО с 23 единиц до 22 единиц в смену.

Помимо сокращения ритма выпуска, оператор вынужден значительную часть времени выполнять вспомогательные операции по перепланированию частей ТО, что увеличивает интенсивность и напряженность его работы, что ведет к накоплению усталости и может привести к снижению концентрации внимания.

На рис. 7.19 – 7.20 представлена визуализация показателей КРТП при $Pr = 0,3$. Зависимости и значения показателей, представленные в прил. С для данного случая демонстрируют

крайне негативный результат течения ТП. Ключевой показатель ритма выполнения ТП снизился на 17 %, что явилось последствием 57 столкновений или аварийных остановок за смену.

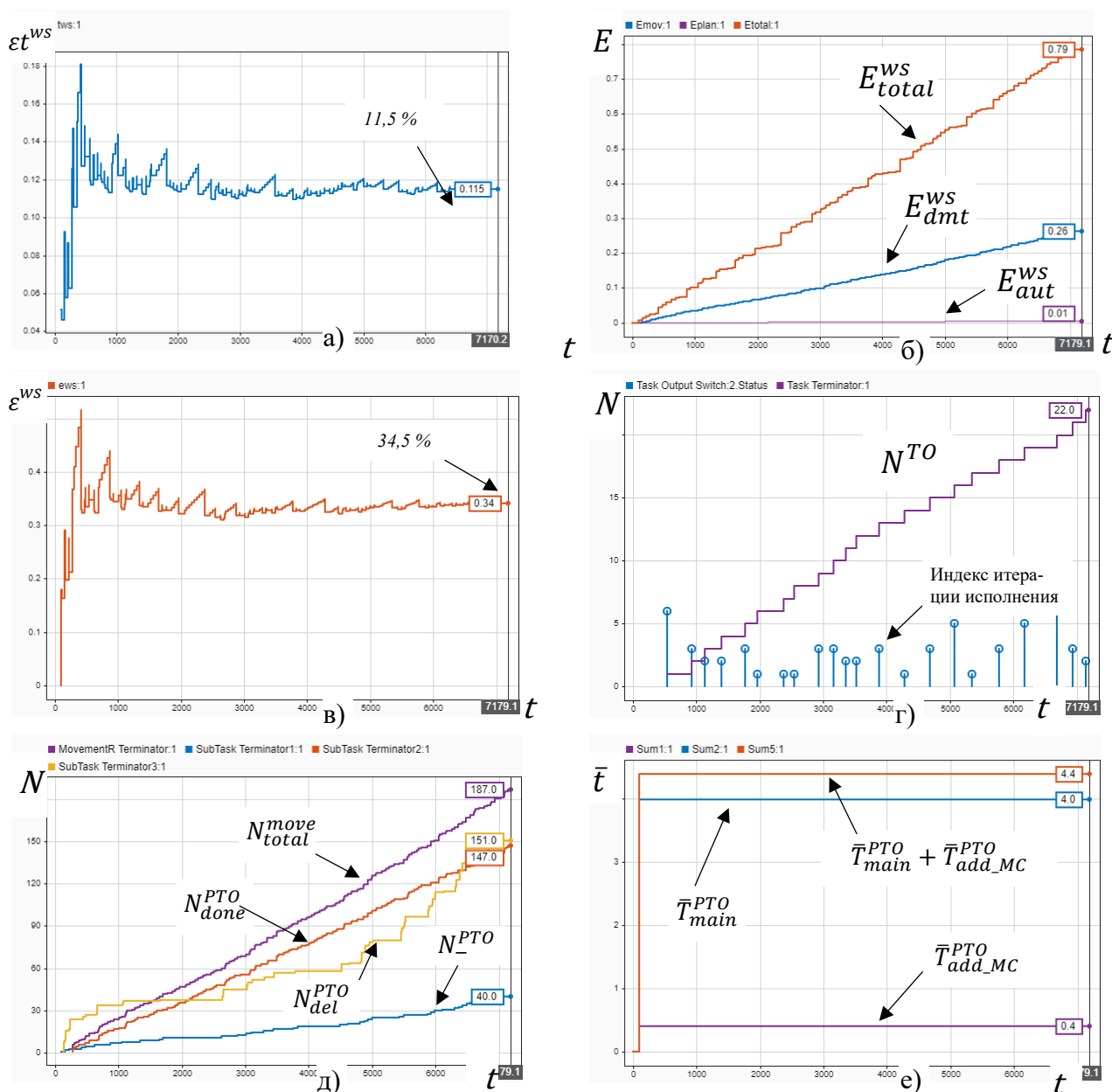


Рисунок 7.18 – Динамика некоторых переменных состояния КРТП для этапа 1 эксперимента при $Pr = 0,2$

Среднее вспомогательное время ($\bar{t}_c^{TO}$) увеличилось на 27,8 % по сравнению с ТП со значением переменной $Pr=0$. Коэффициент β_{done}^N снизился на 89,5 %. Коэффициент α_{done}^N снизился на 65 %. Рост удельных трудозатрат ($\frac{LC}{N_{TO}^+}$) и удельного энергопотребления на реализацию ТО ($\frac{E_{total}^{ws}}{N_{TO}^+}$) составил 20,7 % и 27,3 % соответственно. Количество отмененных частей ТО значительно (на 46 %) превысило количество выполненных. При этом значения показателей εt^{ws} и ε^{ws} (см. рис. 7.18 а, в и 7.20 а, в) остались на уровне значений для эксперимента при $Pr = 0,2$, что обусловлено увеличением времени нахождения КР в режиме ожидания из-за общего снижения ритма выполнения ТО.

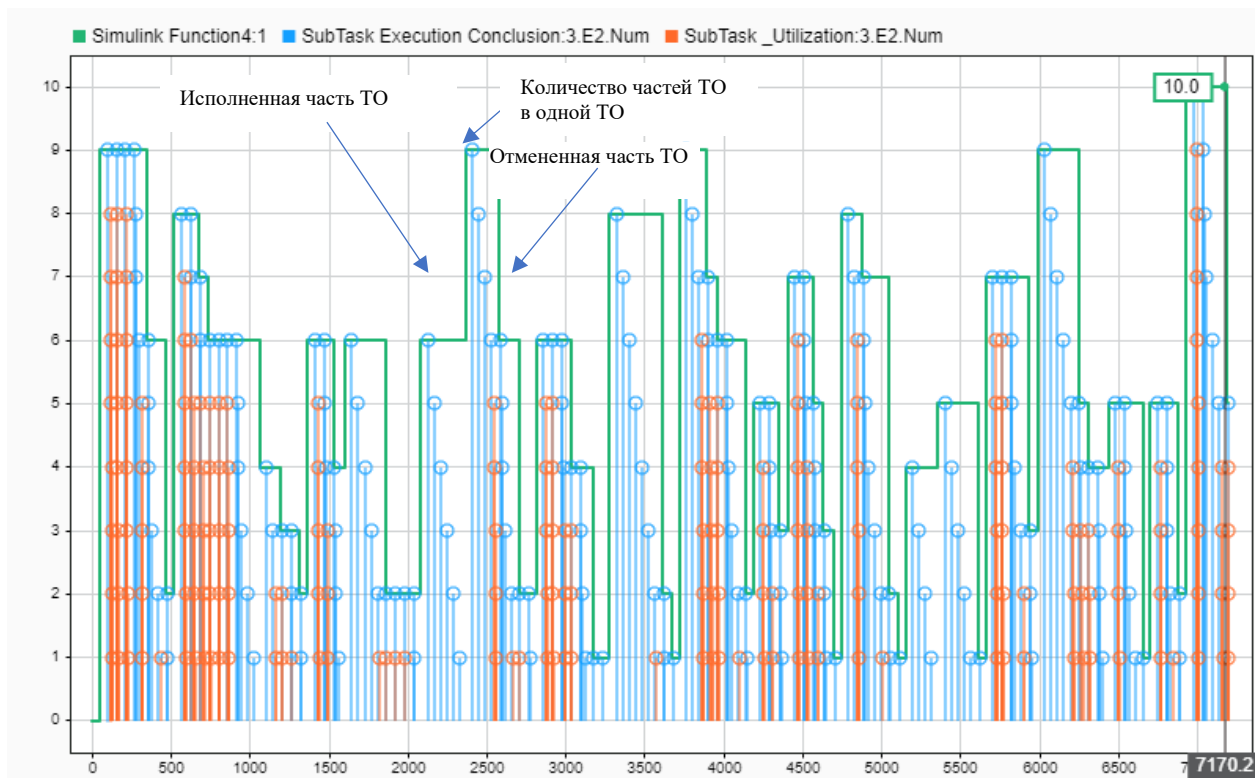


Рисунок 7.19 – Динамика выполнения ТО и частей ТО для этапа 1 эксперимента при $Pr = 0,3$

Некоторые ТО (см. рис. 7.20) переделываются более 5 раз, такое количество перепланирований в конечном итоге может привести к ошибке и дефектовке изделия.

Результаты первого этапа эксперимента на ДСМ демонстрируют наличие нелинейной зависимости интегральных показателей ТП от вероятности возникновения коллизии по ходу движения КР. На рис. 7.21 представлена визуализация показателей: коэффициента β_{done}^N , коэффициента α_{done}^N , удельных трудозатрат ($\frac{LC}{N_{TO}}$) и удельного энергопотребления на реализацию ТО $\frac{E_{total}^{ws}}{N_{TO}}$. На основе эмпирической оценки можно заключить, что при вероятности коллизии $Pr \in [0, 0.0, 8]$ и наличии в КРТК качественной и надежной аварийной системы автоматики реагирования на столкновения ТП без системы разрешения коллизий еще может быть целесообразен, в остальных случаях система разрешения коллизий становится безальтернативной, даже несмотря на увеличение вспомогательного времени в контуре Movement Control.

Выводы по первому этапу:

- определен потенциал оптимизации КРТП (с высокой степенью вовлеченности человека) по энергосбережению (в пределах доли 29,3 % от общего энергопотребления) и увеличению ритма исполнения ТО (в пределах доли времени 9,3 % от общего времени исполнения ТО);
- сформирована рекомендация, что в условиях моделируемого процесса система управления КРТП должна в обязательном порядке включать механизмы прогнозирования и разрешения коллизий при $Pr > 0,08$;

- получены зависимости интегральных показателей КРТП от вероятности возникновения коллизии, которые могут сформировать часть БЗ, участвующей в выборе системы критериев при оптимизации КРТП для задач оптимизации 1 - 5 (гл. 4).

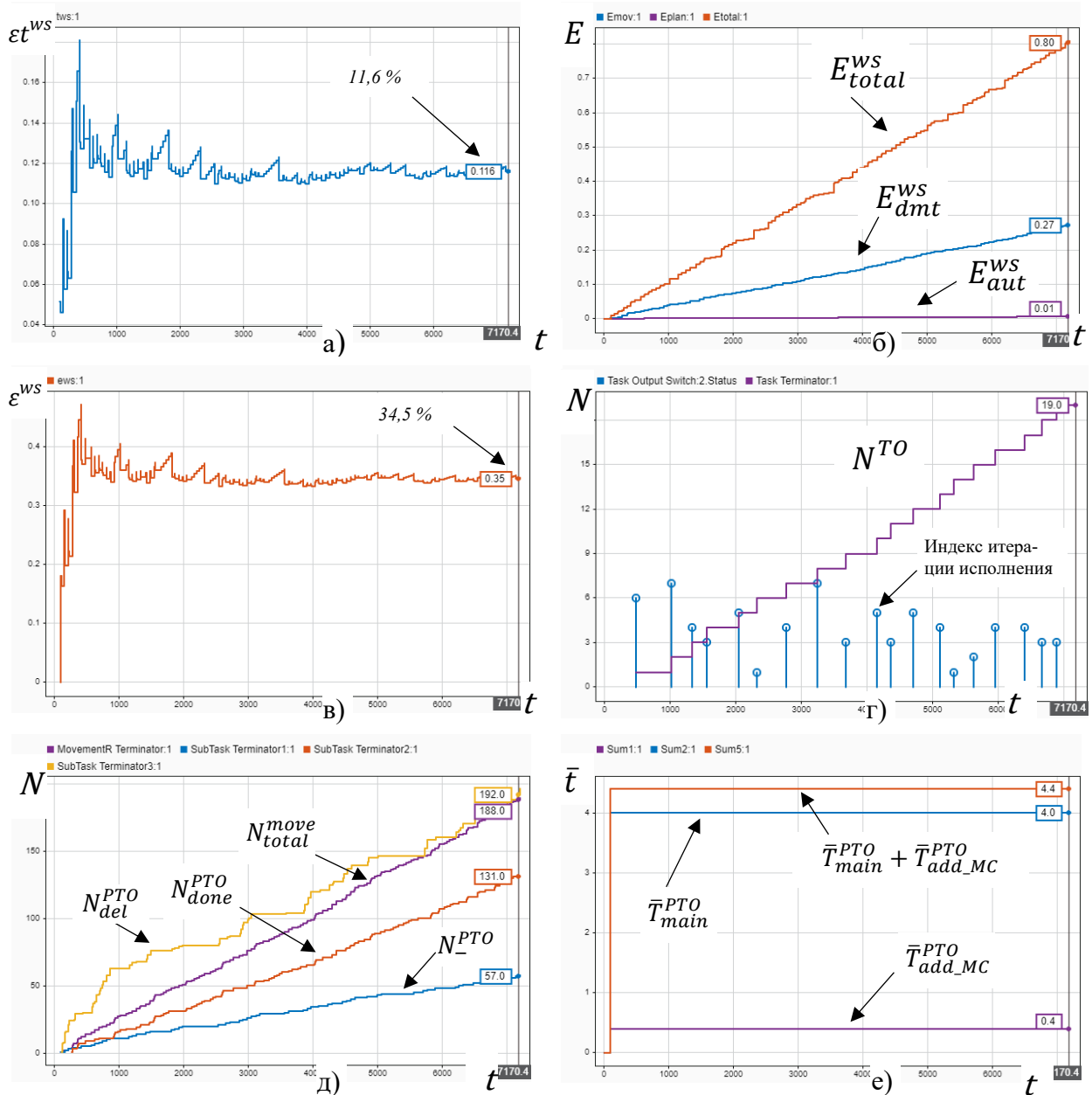


Рисунок 7.20 – Динамика некоторых переменных состояния КРТП для этапа 1 эксперимента при $Pr = 0,3$

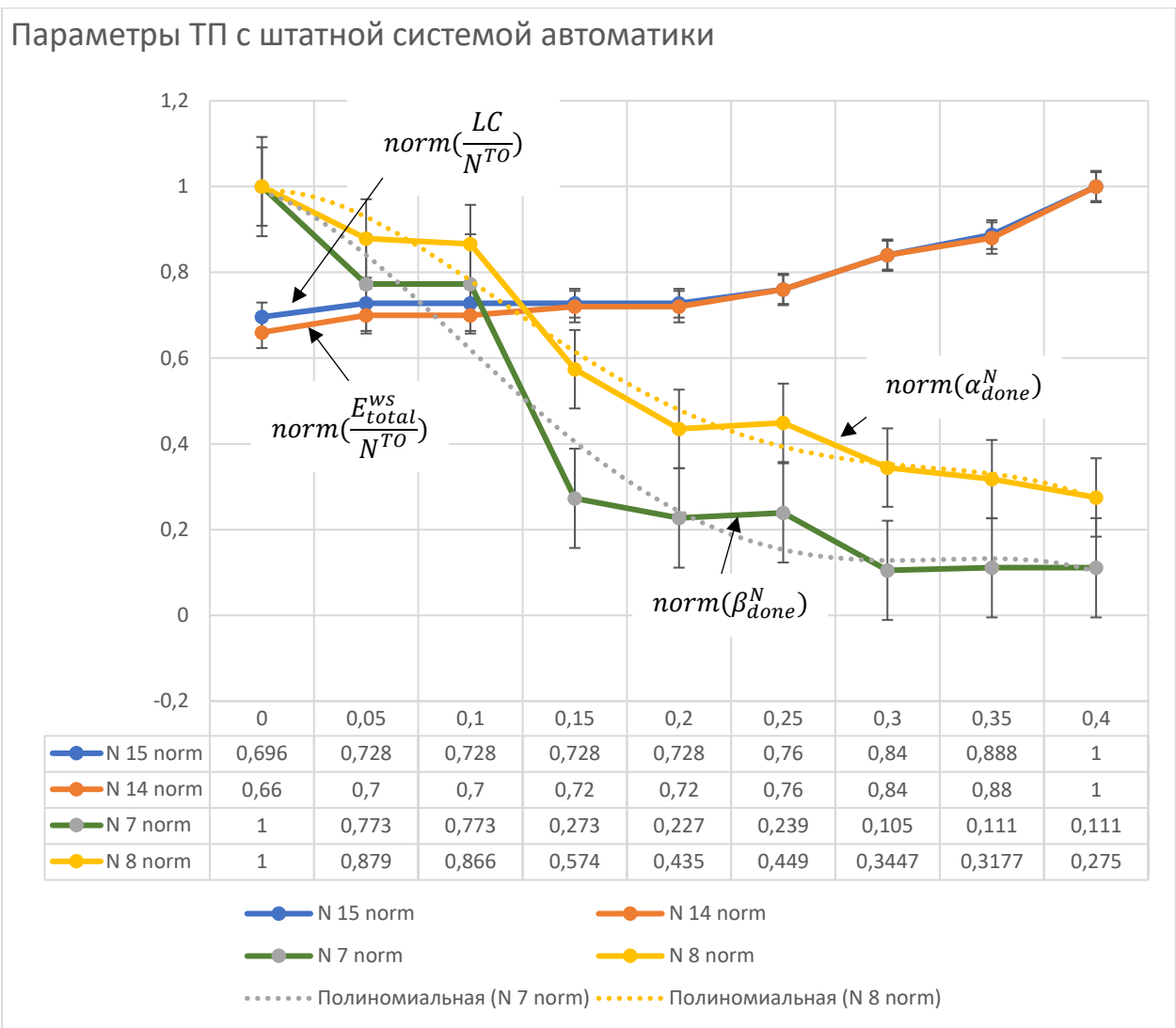


Рисунок 7.21 – Зависимость интегральных показателей эффективности КРТП без системы разрешения коллизий от вероятности возникновения коллизий

Второй этап

Цель. Расчет и оценка интегральных показателей для варианта ТП, характеризующегося недетерминированной рабочей сценой при $Pr = 0.2$, при этом АСУТП оснащена механизмом разрешения коллизий, включающим 4 алгоритма (RRT, CHOMP, PTS, RLOS).

При проведении эксперимента имитация функционирования алгоритмов разрешения коллизий в контуре Movement Control выполнялась на основе сравнительных характеристик движения, полученного каждым из рассматриваемых алгоритмов, с изначальным базовым движением РТР (гл. 5).

Исходные данные: настройки модели выполнены в соответствии с данными, представленными в табл. 7.9, при этом разрешение коллизий осуществляется одним из предложенных алгоритмов: RLOS (1), RRT (2), CHOMP(3), PTS(4).

Таблица 7.9 – Настройки элементов ДСМ

Наименование параметра или переменной	Значение или описание параметра/переменной
Вероятность возникновения коллизий Pr^+	0,2
Тип движения для реализации части ТО	РТР
Продолжительность смены	7200 с (2 ч)
Трудозатраты, LC (Labor Cost)	2 чел/ч
Количество частей ТО в одной ТО	Задано равномерным распределением в интервале [3, 10]
Ограничения редуцированного пространства	Присутствуют
Продолжительность смены	7200 с
$\bar{T}_{pf1}^{TO}$ сервера Task_Decomposition	40 с
$\bar{T}_{pf2}^{TO}$ сервера Task Priority Increasing	10 с
Длительность движения $\bar{T}_{main}^{TO}$ сервера MovementR_Realization (в двух вариантах)	Первый вариант - 4 с; Второй вариант - равномерное распределение в интервале [1, 4] с
Длительность планирования движения типа РТР $\bar{T}_{add_MC1}^{TO}$ сервера Default_MovementR_Planning	Задано равномерным распределением в интервале [0.1, 0.15] с
Длительность проверки движения на наличие коллизий $\bar{T}_{add_MC2}^{TO}$ сервера Collision_checking	Задано равномерным распределением в интервале [0.3, 0.5] с
Длительность процедур разрешения коллизий $\bar{T}_{add_MC3}^{TO}$ сервера Collision_resolution (гл. 3) в разрезе группы алгоритмов:	RLOS – 0,39843 с RRT – 1,9825 с CHOMP – 0,6722 с PTS – 0,13943 с
Длительность планирования части ТО для КР по операционному описанию $\bar{T}_{add_STR}^{TO}$ (сервер SubTaskR_Planning)	20 с
Временные задержки звеньев запаздывания Transport Delay	0,01~0,1 с
Средняя мощность КР в режиме ожидания $\bar{P}_{standby}$	0,3 кВт
Средняя мощность КР в режиме движения с минимальной нагрузкой на фланце $\bar{P}_{mov}$ для базового движения РТР	1,3 кВт
Коэффициент изменения средней потребляемой энергии k_{ratio}^E в разрезе группы алгоритмов	RLOS – 2,09 RRT – 1,12 CHOMP – 2,82 PTS – 1,78

Оцениваемые интегральные показатели: Оцениваемые интегральные показатели приняты аналогичными параметрам этапа 1 эксперимента.

Описание моделируемой АСУ ТП: на втором этапе эксперимента рассматривалась система управления ТП, имеющая в наличии механизм прогнозирования и разрешения коллизий на базе четырех алгоритмов – RLOS, RRT, CHOMP и PTS. Столкновения, которые не удалось избежать с помощью механизма разрешения коллизий, фиксируются штатной системой автоматики, реакция на столкновение – аварийная остановка с передачей управления оператору, при этом все оставшиеся части ТО перепланируются. Вероятность возникновения дополнительных

коллизий уже во время реализации движения по разрешению коллизий в этапе 2 эксперимента принимается нулевой.

Анализ результатов

Значения интегральных показателей в разрезе вариантов моделирования представлены в прил. С, визуализация динамики некоторых показателей для отдельных условий моделирования, в частности для алгоритма PTS, приведены на рис. 7.22 и 7.23. Результаты проведенного эксперимента наглядно демонстрируют существенное улучшение интегральных показателей ТП под управлением ИСУ с механизмами разрешения коллизий по сравнению с ТП под управлением СУ со штатной автоматической системой реагирования на столкновения.

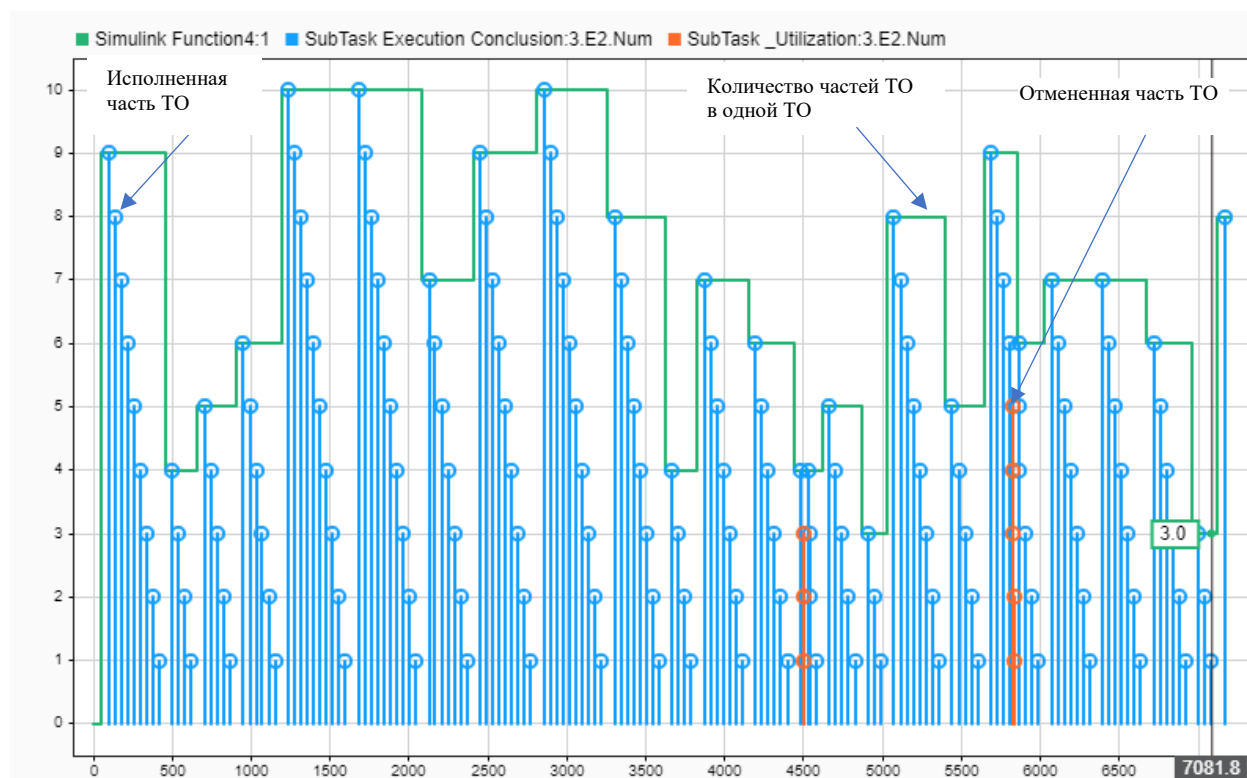


Рисунок 7.22 – Динамика выполнения ТО и частей ТО для этапа 2 эксперимента для алгоритма PTS при $\bar{T}_{main}^{TO} \in [1,4]$, с

В частности, для показавшего наилучшие результаты алгоритма разрешения коллизий, сократилось среднее время исполнения ТО на 6,7 %, что определило увеличение показателя ритма исполнения ТО (τ_{unit}) на 4,5 %; увеличились коэффициенты β_{done}^N и α_{done}^N на 302 % и 113 % соответственно, что оказало влияние на снижение общей потребленной энергии за смену (E_{total}^{ws}) на 8,2 %. При этом энергоемкость ТО снизилась на 11,1 %, удельные трудозатраты снизились на 4,4 %. Необходимо отметить, что снижение показателя ϵt^{ws} на 15,7 % вместе со снижением показателя ϵ^{ws} на 4 % обусловлено значительным сокращением (на порядок) аварийно остановленных движений, сопряженных движений по возвращению КР в технологически приемлемую конфигурацию и отмененных частей ТО, но при этом перепланированные движения, реализующие обход препятствия, априори имеют большую длину траекторию в КП, что требу-

ет в режиме движения КР больших энергозатрат при времени выполнения движения, равному константе.

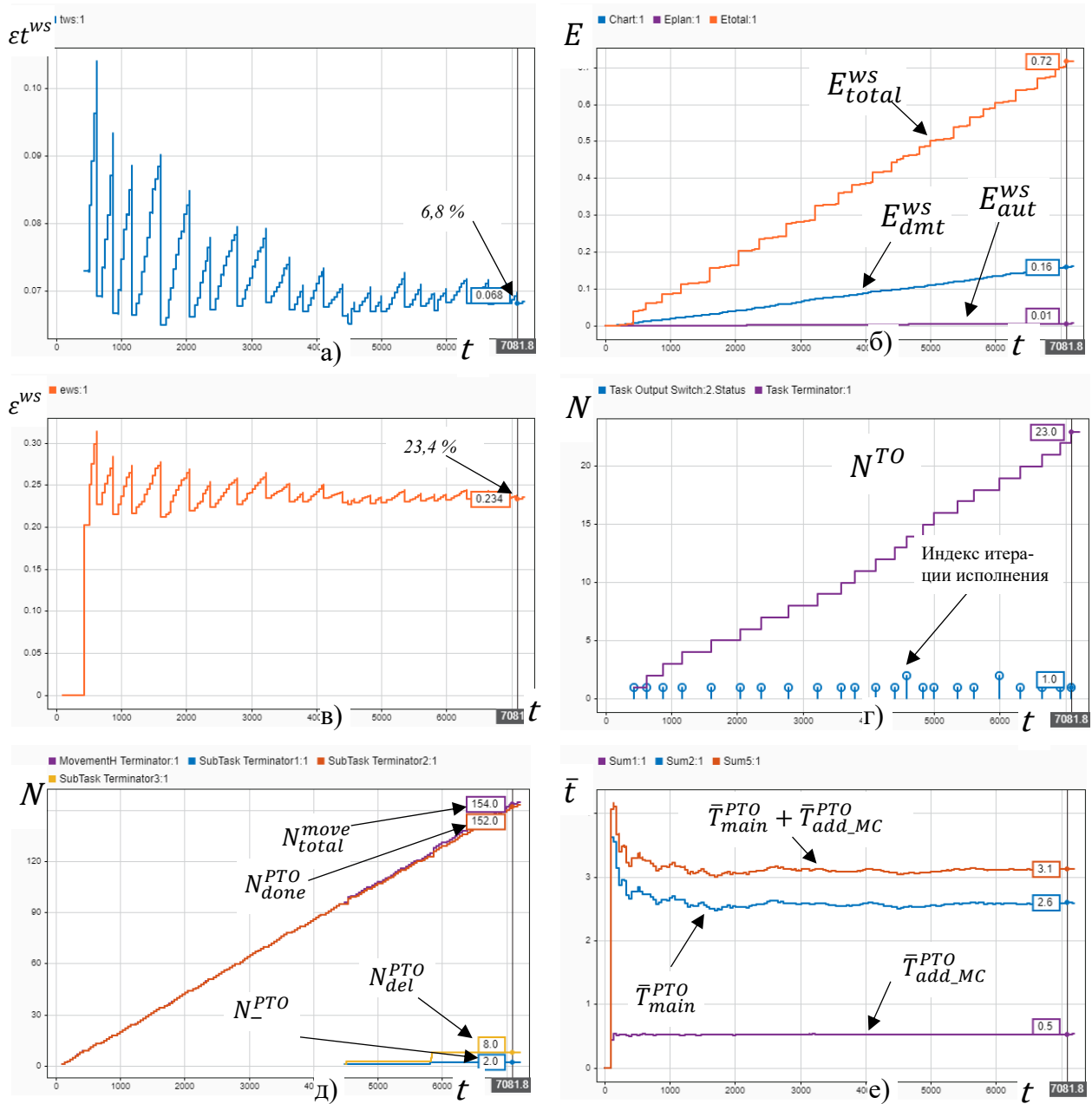


Рисунок 7.23 – Динамика некоторых переменных состояния КРТП для этапа 2 эксперимента (алгоритм PTS) $\bar{T}_{main}^{TO} \in [1, 4]$, с

Представленные факторы в целом обеспечивают снижение интенсивности труда оператора, уровень концентрации внимания остается значительно выше, чем в ТП с постоянным перепланированием движений. Наличие минимального количества неразрешенных коллизий, возникших при моделировании, позволяет сделать заключение о высокой степени безопасности ТП для оператора и оборудования согласно задаче оптимизации 3 (гл. 4). При этом решение задачи о разрешении всего объема коллизий представлено в третьем этапе эксперимента.

Согласно полученным данным (прил. С) очевиден факт дифференциации результатов обработки алгоритмов разрешения коллизий между собой при одновременном общем положительном результате работы. Различия в разрезе шести показателей представлены графически на рис. 7.24.

Для сравнения алгоритмов выбраны нормированные показатели : $\bar{T}_c^{TO}$, β_{done}^N , α_{done}^N , E_{total}^{ws} , $\frac{E_{total}^{ws}}{N^{TO}}$, $\frac{LC}{N^{TO}}$. Сравнение позволяет установить преимущество алгоритма, использующего предустановленные шаблоны траекторий PTS над другими алгоритмами по показателям, определяющим производительность процесса и величину ритма производства. Тем не менее следует отметить, что такое яркое преимущество будет наблюдаться, если части ТО удовлетворяют ограничениям установленного РДП. При этом с точки зрения показателей энергоэффективности алгоритм PTS проигрывает оптимизационному алгоритму RRT приблизительно на 6,9 % (по показателю E_{total}^{ws}). Также необходимо отметить, что оптимизационные алгоритмы CHOMP и RRT в данном эксперименте жестко ограничены временем, выделенным на математическое решение задачи оптимизации. При снятии временных ограничений показатель Pr^+ , несомненно, увеличится, но при этом значительно увеличится и $\bar{T}_{add_MC}^{PTO}$, что негативно скажется на показателе τ_{unit} .

В целом данные, полученные в ходе этапа 2 эксперимента на имитационной модели ТП, подтверждают заключение о целесообразности селективного использования алгоритмов разрешения коллизий в зависимости от системы критериев задачи оптимизации, полученных на имитационной модели КРТК в (см. гл. 5).

Выводы по второму этапу:

- исследован механизм разрешения коллизий, включающий 4 отдельных алгоритма, установлен общий положительный эффект по каждому алгоритму, применение механизма разрешения коллизий позволило сократить среднее время исполнения ТО на 6,7 %, увеличить показатель ритма производства на 4,5 %, снизить общую потребленную энергии за смену (E_{total}^{ws}) на 8,2 %, снизить энергоемкость ТО на 11,1 %, снизить удельные трудозатраты на 4,4 % и в целом обеспечить безопасность оператора и оборудования КРТК;

- на базе имитационного эксперимента получена сравнительная характеристика эффективности алгоритмов RLOS, RRT, CHOMP и PTS при разрешении коллизий в коллаборативном пространстве с высокой степенью вовлеченности человека; наблюдается существенное преимущество алгоритма, использующего предустановленные шаблоны траекторий, PTS в РДП по показателям, определяющих ритм выпуска;

- в ходе эксперимента доказана целесообразность селективного использования алгоритмов разрешения коллизий в зависимости от системы критериев задачи оптимизации и текущего состояния КРТП.

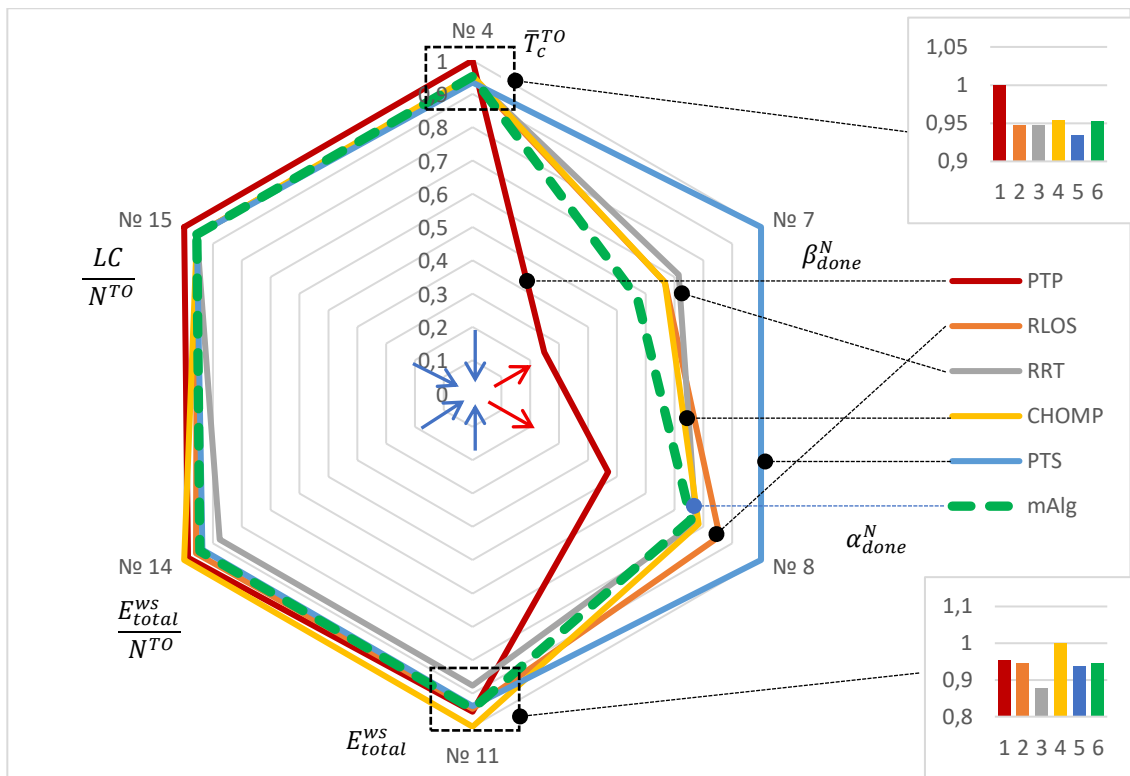


Рисунок 7.24 – Сравнение эффективности алгоритмов разрешения коллизий по группе показателей

Третий этап

Цель. Оценка влияния фактора наличия технически неразрешимых коллизий на интегральные показатели ТП, при этом АСУТП оснащена мультиалгоритмичным механизмом разрешения коллизий, включающим 4 алгоритма (RRT, CHOMP, PTS, RLOS).

Исходные данные: настройки модели выполнены в соответствии с данными, представленными в табл. 7.9 с дополнениями, представленными в табл. 7.10:

Таблица 7.10 – Дополнительные настройки элементов ДСМ для этапа 3 эксперимента, разрешение коллизий осуществляется механизмом mAlg

Наименование параметра или переменной	Значение или описание параметра/переменной
Механизм разрешения коллизий / последовательность включенных алгоритмов	mAlg/RRT-PTS-RLOS-CHOMP (критерий «энергоэффективность»)
Вероятность возникновения технически неразрешимых коллизий $Pr^!$	0,1

Оцениваемые интегральные показатели: Оцениваемые интегральные показатели приняты аналогичными показателям этапа 1 эксперимента.

Описание моделируемой АСУ ТП: на третьем этапе эксперимента рассматривалась система управления ТП, имеющая в наличии механизм multyAlg (mAlg) прогнозирования и разрешения коллизий на базе четырех алгоритмов – RLOS, RRT, CHOMP и PTS. Механизм multyAlg последовательно запускает следующий алгоритм разрешения в цепочке, если решение предыдущего является неудовлетворительным (см. гл. 5). Последовательность алгоритмов определяется согласно установленной системе критериев эффективности (см. гл. 5), в частности для текущего этапа экспе-

римента установлена последовательность RRT-PTS-RLOS-CHOMP, отвечающая критерию энергоэффективности в РКП для ТП сверления горизонтальных поверхностей.

К технически неразрешимым коллизиям отнесены коллизии, возникающие вследствие пересечения траекторий движения КР и движущегося объекта рабочей области, имеющего скорость, значительно превышающую максимальную скорость движения КР (разрешение коллизий с движущимися объектами на допустимых скоростях рассмотрены в гл. 5). Такими объектами, в частности, могут выступать части тела человека, сорвавшийся инструмент, элементы оснастки или изделия. В данном случае единственной защитной мерой остается встроенная система автоматики КР, базирующаяся на силомоментных датчиках и системах видеоаналитики, реакция на столкновение – аварийная остановка с передачей управления оператору, при этом все оставшиеся части ТО перепланируются.

Анализ результатов

Значения интегральных показателей представлены в прил. С, визуализация динамики некоторых показателей приведены на рис. 7.25 – 7.26.

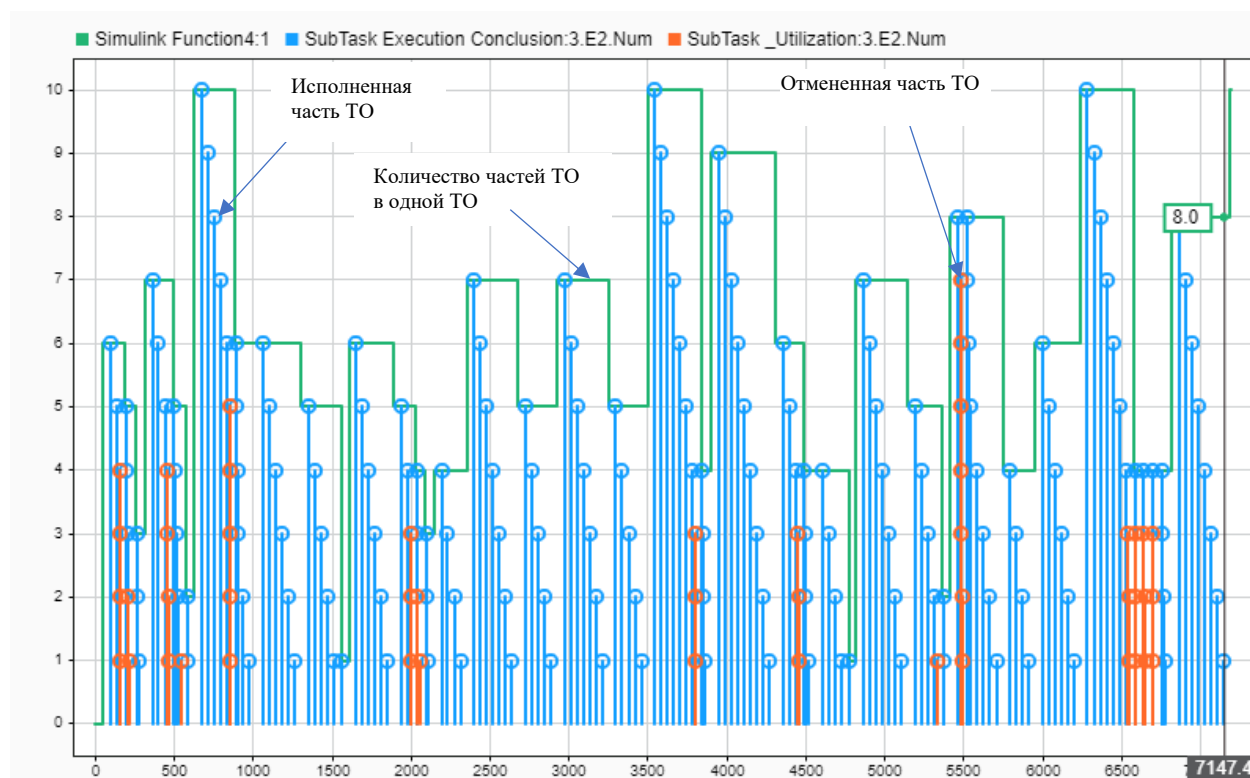


Рисунок 7.25 – Динамика выполнения ТО и частей ТО для этапа 3 эксперимента для механизма mAlg при $\bar{T}_{main}^{TO} = 4$ с, при $Pr^! = 0,1$ $Pr = 0,2$

Результаты проведенного эксперимента наглядно демонстрируют полное исключение технически разрешимых коллизий, что следовало из теоретических расчетов вероятности разрешения коллизии за счет использования механизма mAlg ($Pr_{mAlg}^+ = 0,9983$). В целом значения интегральных показателей ТП для mAlg ниже, чем для алгоритмов, рассмотренных на этапе 2

эксперимента, что прежде всего связано с дополнительным серьёзным фактором в виде наличия технически неразрешимых коллизий. Согласно данным прил. С и радарной диаграммы (рис. 7.24) значения коэффициентов β_{done}^N и α_{done}^N в среднем (для алгоритмов этапа 2) ниже на 11 % и 25 %, коэффициенты E_{total}^{ws} выше на 0,6 %, $\frac{E_{total}^{ws}}{N^{TO}}$ выше на 0,2 %, $\bar{T}_c^{TO}$ выше на 0,6 %, удельные трудозатраты $\frac{LC}{N^{TO}}$ существенно не изменились, в то же время в разрезе частей ТО трудозатраты увеличились, как и интенсивность труда.

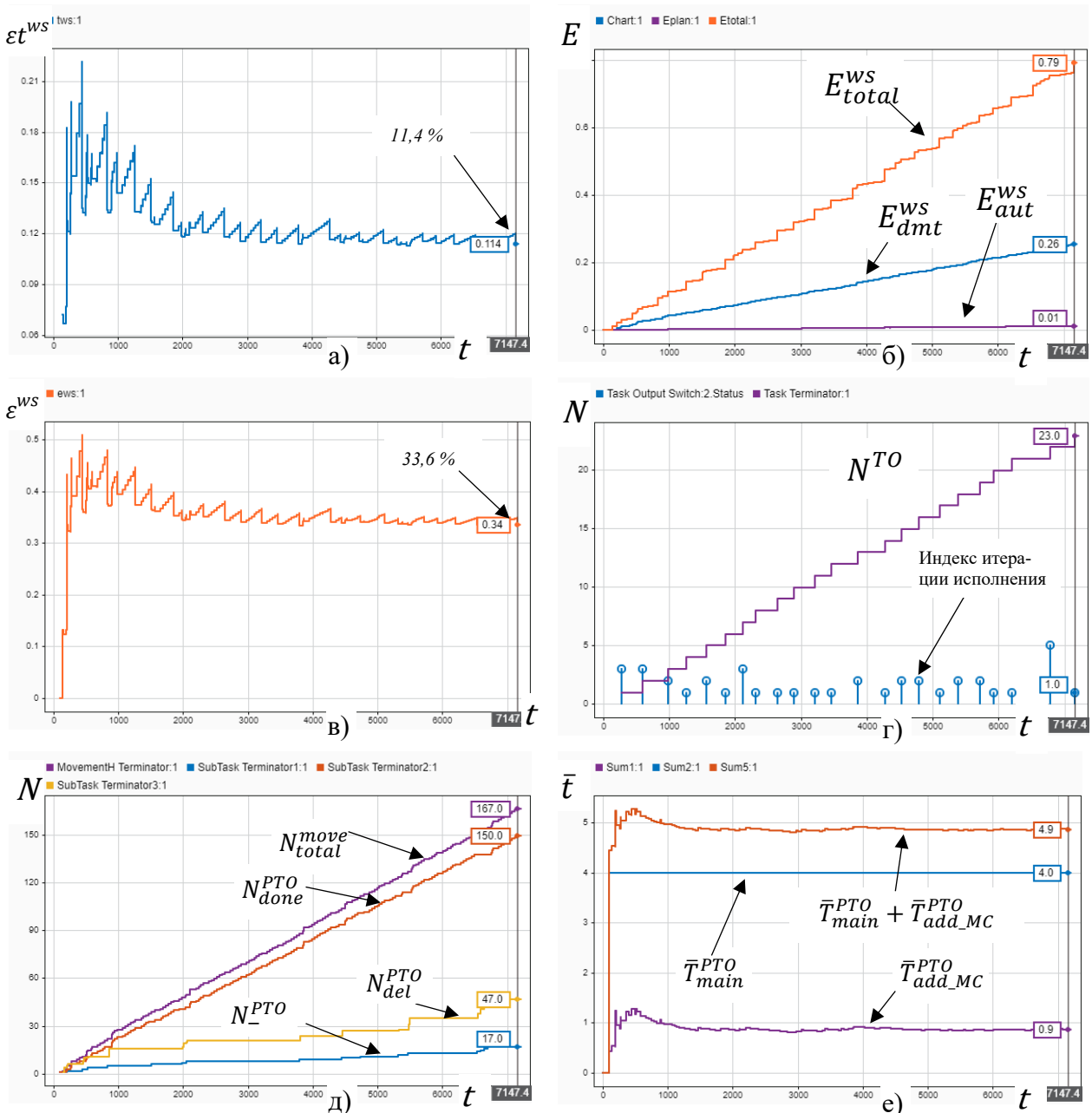


Рисунок 7.26 – Динамика некоторых переменных состояния КРТП для этапа 3 эксперимента (механизма mAlg) $\bar{T}_{main}^{TO} = 4$ с, при $Pr^I = 0,1$ $Pr = 0,2$

При сравнении показателей для ТП с механизмом mAlg при $Pr^1 = 0,1$ $Pr = 0,2$ (в сумме дающие 0,3) с показателями для ТП без механизмов разрешения коллизий с $Pr = 0,3$ (прил. Р), виден факт значительного превосходства АСУТП, оснащенной механизмом mAlg над штатной системой автоматики в целях обеспечения эффективности ТП (рис. 7.27).

Наличие существенного числа технически неразрешимых коллизий в течение ТП на этапе 3 эксперимента ($Pr^1 = 0,1$, по результатам моделирования – 17 коллизий на 167 частей ТО) не позволяет говорить о достижении требуемого уровня безопасности для оператора и оборудования КРТК (задача оптимизации 3 не может быть решена). Факты ава-

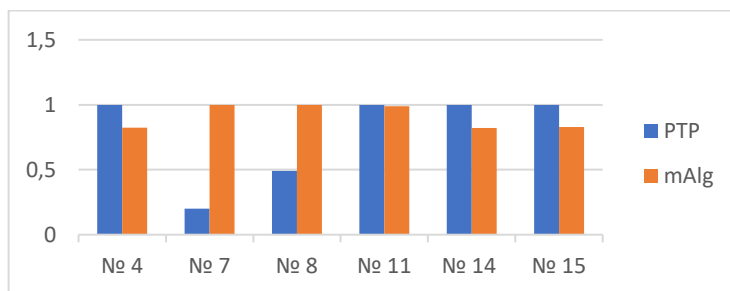


Рисунок 7.27 – Сравнение нормированных показателей $\bar{T}_c^{TO}$, β_{done}^N , α_{done}^N , E_{total}^{ws} , $\frac{E_{total}^{ws}}{N^{TO}}$, $\frac{LC}{N^{TO}}$ (под номерами согласно прил. С соответственно) ТП для двух вариантов: РТР при $Pr = 0,2$ и mAlg при $Pr^1 = 0,1$ $Pr = 0,2$

рийной остановки движений, вызванные сработкой штатной системы автоматики, не могут гарантировать отсутствие травм оператора и повреждений оборудования и инструмента.

Несмотря на удовлетворительные значения количественных показателей эффективности КРТП, нельзя не брать в расчет высокий риск возникновения опасных ситуаций, поэтому предлагается за счет системы ситуационной оценки рабочей зоны и МЧФ (см. гл. 3) своевременно выявлять аномалии течения ТП, блокировать оборудование КРТК и на основе анализа причин возникновения ситуации принимать ряд технологических и организационных решений, устраняющих факторы возникновения аномалий.

Выводы по третьему этапу:

- в условиях ТП исследованы возможности мультиалгоритмического механизма разрешения коллизий mAlg; в пределах моделирования одной смены продолжительностью 2 часа, включающей 150 частей ТО, механизм обеспечил разрешение полного объема технически разрешимых коллизий, при этом показатели эффективности ТП снизились не существенно, по сравнению с отдельными алгоритмами разрешения коллизий;

- в ходе эксперимента представлен вариант селективного использования алгоритмов разрешения коллизий в механизме mAlg по критерию «энергоэффективность», что обеспечило факт незначительного повышения показателей E_{total}^{ws} на 0,6 %, $\frac{E_{total}^{ws}}{N^{TO}}$ на 0,2 %, по сравнению с алгоритмами на этапе 2 эксперимента;

- продемонстрировано существенное влияние показателя величины вероятности возникновения технически неразрешимых коллизий на безопасность ТП, предложено решение делегиро-

вать функции по отслеживанию аномальных событий в рабочей зоне КР системе ситуационной оценки рабочей зоны и МЧФ, реагирующей на признаки опасных ситуаций и опасные ситуации посредством блокировки оборудования и/или технологических и организационных мероприятий.

Выводы

1) В ходе имитационного эксперимента было выполнено моделирование КРТП с высокой степенью вовлеченности человека на ДСМ при различных исходных данных получены расчеты (см. гл. 3) интегральных показателей качества ТП, оценены возможности и доказана целесообразность решения сформулированных задач оптимизации в условиях формализованного ТП.

2) Проведено комплексное исследования предложенных ранее (см. гл. 4, 5) алгоритмов формирования законов управления КР, направленных на разрешение коллизий в ТП для РДП, включая оптимизационные алгоритмы RRT и CHOMP, алгоритм разрешения коллизий на базе предустановленных траекторий PTS, алгоритм на базе нейронной сети – RL-агента и мультиалгоритмического селективного механизма mAlg, доказаны на практике их эффективность при наличии технически разрешимых коллизий.

3) Предложен механизм реагирования при обнаружении технически разрешимых и неразрешимых коллизий в рамках КРТП, обоснована необходимость наличия МЧФ для выявления аномалий при мониторинге рабочей сцены коллаборативной среды.

Выводы по главе 7

Результаты представленных экспериментов подтверждают предлагаемые автором теоретические подходы. Показано, что реализация механизма автоматического планирования и реализации движений по исполнению ТПд, ВП и ВХ методом программного управления в реальном времени на промышленном оборудовании позволяет обеспечить требуемую точность позиционирования ЦТИ в пределах установленных угловых и линейных допусков. При этом удастся оптимизировать движения по исполнению частей ТО в соответствии с актуальными критериями качества в условиях недетерминированной рабочей среды.

Показана возможность реализации предложенных решений на штатном аппаратном обеспечении КРТК общего назначения и возможность интеграции программного обеспечения через интерфейсы ROS2.

В ходе имитационного эксперимента было выполнено моделирование КРТП с высокой степенью вовлеченности человека, при различных исходных данных получены расчеты интегральных показателей качества технологического процесса, оценены возможности и эффекты, доказана целесообразность решения предложенными методами сформулированных задач оптимизации в условиях формализованного ТП.

Заключение

В диссертационной работе при решении научно-исследовательской проблемы современной теории ситуативного управления – идентификации слабоструктурированных объектов управления и выявлению критериев оптимального управления ими – разработан комплекс моделей и методов, а также технологии их синтеза, образующие формализованную методологию оптимального управления движениями робота в недетерминированной среде коллаборативного роботизированного технологического процесса в рамках оригинального подхода применения базы знаний редуцированных пространств. Уникальность подхода заключается в адаптивном использовании методов и алгоритмов оптимального управления движением коллаборативного робота в зависимости от текущего состояния рабочей зоны. Систематизация и интеграция результатов исследований позволила обобщить актуальные знания в форме теоретических основ управления и методов проектирования оптимальных коллаборативных роботизированных технологических процессов в недетерминированной среде.

На основании изложенного сформулированы следующие выводы:

1) Предложенные теоретические основы оптимального управления КРТП расширяют классическую теорию ситуационного управления за счет включения спецификации недетерминированной среды, определенную наличием взаимодействия КР и человека.

2) Сформированы и впервые формализованы функциональные и интегральные взаимосвязи компонентов КРТП промышленных предприятий, что позволяет проектировать производственные системы, включающие КР, на основе оптимальных принципов управления.

3) Показано, что необходимым условием возможности оптимального управления движением КР в совместной с оператором рабочей зоне при различных сценариях недетерминированной среды и типах ТО является наличие комплекса специализированных математических моделей, детерминирующих КРТП.

4) Установлено, что предложенный многофункциональный комплекс математических моделей КРТП и его компонентов, включая МЧФ, позволяет существенно расширить адаптивные свойства АСУ, повысить оперативность синтеза оптимального закона управления с учетом знаний о полной ситуации.

5) Установлена возможность и доказана эффективность применения предложенного метода снижения размерности задач оптимального управления КРТП за счет введения ограничений ОП и КП КР, обеспечивающих эффективные для текущей ТО пространственные расположения ЦТИ.

6) Выявлено, что предложенные подходы к проектированию оптимальных КРТП и алгоритмическое обеспечение по управлению и оптимизации движения КР в недетерминированной

среде позволяют существенно повысить эффективность исполнения ТО по критериям максимизации производительности, минимизации энергопотребления и максимизации степени безопасности оператора в рабочей зоне.

7) Выявлены необходимый набор элементов АО КРТК и комплекс требуемых компонентов ПО ИСУ КРТП, позволяющие обеспечить исполнение алгоритмических, информационных и программных задач по управлению и оптимизации режимов функционирования КРТП.

8) Показана высокая эффективность и работоспособность предложенного механизма автоматического планирования и исполнения движений методом программного управления в недетерминированной среде. Реализация механизма в разработанном специализированном программном обеспечении позволяет гарантировать требуемую точность позиционирования центральной точки инструмента на промышленном роботизированном оборудовании в режиме реального времени в соответствии с настраиваемыми критериями качества

9) Экспериментально доказана и подтверждена эффективность предложенных теоретических подходов и технических решений по оптимальному управлению КРТП в недетерминированной среде при различных типах ТО. Показано, что в среднем удалось сократить среднее время исполнения ТО на 6,7 %, увеличить показатель ритма производства на 4,5 %, снизить общую потребленную энергию за смену (E_{total}^{ws}) на 8,2 %, снизить энергоемкость ТО на 11,1 %, снизить удельные трудозатраты на 4,4 % и в целом обеспечить повышение степени безопасности оператора и сохранность оборудования КРТК.

Перспективы дальнейших разработки темы. Наиболее перспективное направление развитие теории и практики оптимального управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами связано с созданием интегрированных систем управления в рамках концепции цифровых фабрик для человекоориентированных производственных систем. Такие системы являются сложными и комплексными в силу высокой степени недетерминированности входящих в них объектов управления и в настоящее время не созданы и не внедрены на промышленном производстве. Материалы диссертации дают возможность успешного проектирования и синтеза эффективных взаимосвязей внутри систем человекомашинного взаимодействия и развития производственной роботизированной инфраструктуры с целью формирования синергетических эффектов и повышения степени интеллектуализации систем управления.

Личный вклад автора. Все результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. Для всех направлений исследований, представленных в диссертации, автором самостоятельно выполнены работы по обоснованию актуальности, формулированию объекта и предмета, формализации концепции, постановке целей и задач теоретических и экспериментальных исследований, определению методологии, непосредственному проведению теоретических исследований и экспериментов, системному анализу и интерпретации результатов, обобщению полученных результатов и прогнозированию перспектив развития.

Список литературы

1. Автоматизация выбора метода интерполяции при планировании движения коллаборативного робота в технологических операциях механической обработки / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко, В. А. Соловьев, А. И. Горькавый // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2025. – № 3. – С. 96–105.
2. Автоматизация расчёта кинематики шестиосевого промышленного робота и моделирование его траекторных перемещений / М. А. Горькавый, А. И. Горькавый, М. А. Мельниченко, В. П. Егорова // Ученые записки КНАГТУ. – 2023. – № 7(71). – С. 40–49.
3. Автоматизация технологических процессов с использованием робототехнических комплексов на основе цифровых двойников / В. С. Сивков, О. Г. Сайманова, В. В. Борисов, В. Ю. Сайманов // Инфокоммуникационные технологии. – 2024. – Т. 22, № 2(86). – С. 78–93.
4. Алгоритм поиска оптимальных параметров движения при прямолинейных технологических переходах коллаборативного робота / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко, В. А. Соловьев, А. И. Горькавый // Ученые записки КНАГТУ. – 2024. – № 5 (77). – С. 22–35.
5. Алгоритмы поиска энергоэффективного положения комплекса траекторий движения промышленного робота в составе технологического процесса / М. А. Горькавый, А. Ю. Ефимов, В. П. Егорова, В. А. Соловьев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2021. – Т. 64, № 1. – С. 84–91.
6. Алтунян, Л. Л. Задачи и проблемы совершенствования электромеханической системы управления сбалансированного манипулятора шбм–150м / Л. Л. Алтунян, А. А. Даньшина, Г. Я. Пятибратов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Т. 62, № 5. – С. 54–61.
7. Анализ алгоритмов коррекции программной траектории в устройстве формирования управляющего воздействия для приводов робототехнических систем / А. А. Кобзев, Н. А. Новикова, А. В. Лекарева, А. А. Махфуз // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 74.
8. Анализ эффективности алгоритмов интерполяции траекторий перемещения коллаборативного робота-манипулятора в технологическом процессе сверления / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко, В. А. Соловьев, А. И. Горькавый // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2025. – Т. 68, № 1. – С. 38–48.
9. Арабаджиев, Д. И. Система управления робототехническим комплексом для задачи покраски и диагностики / Д. И. Арабаджиев, М. А. Шереужев, Н. А. Мостаков // Экстремальная робототехника. – 2025. – № 1(36). – С. 213–220.
10. Артемьев, В.С. Оптимизация траекторий промышленных манипуляторов методом моментов / В.С. Артемьев, Н.В. Мокрова // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2025. – № 2. – С. 29–42.

11. Афонин, В. Л. Позиционно-силовое управление робототехническим комплексом для высокоточных операций обработки сложных поверхностей / В. Л. Афонин, В. В. Слепцов, М. Г. Яковлев // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2023. – № 2. – С. 83–87.
12. Афонин, В. Л. Позиционно-силовое управление шестикоординатным промышленным роботом при обработке сложных поверхностей / В. Л. Афонин, Л. В. Гаврилина, А. Н. Смоленцев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20, № 1. – С. 34–43.
13. Афонин, В. Л. Экспертная система для интеллектуального технологического комплекса обработки сложных поверхностей / В. Л. Афонин, Л. В. Гаврилина, М. Г. Яковлев // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2022. – № 3. – С. 112–122.
14. Бабич, М. В. Оптимизация траектории распылительного инструмента при роботизированной обработке поверхностей сложного профиля / М. В. Бабич, Н. В. Добрынин, К. В. Змеу // Ученые записки КнАГТУ. – 2022. – № 7(63). – С. 14–22.
15. Бабкин, А. В. Интеллектуальная киберсоциальная экосистема индустрии 5.0: понятие, сущность, модель / А. В. Бабкин, Е. В. Шкарупета, В. А. Плотников // Экономическое возрождение России. – 2021. – № 4(70). – С. 39–62.
16. Буч, Г. Объектно ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++ / Г. Буч; пер. с англ.; под ред. И. Романовского, Ф. Андреева. – 2 е изд. – М.: Бином, 1998. – 560 с.: ил.
17. Виноградова, Е.В. Цифровой профиль: понятие, механизмы регулирования и проблемы реализации / Е.В. Виноградова, Т.А. Полякова, А.В. Минбалеев // Правоприменение. – 2021. – Т. 5, № 4. – С. 5–19.
18. Внедрение интеллектуальных роботизированных систем в производственные процессы судостроительного предприятия / М. А. Горькавый, А. И. Горькавый, А. С. Гудим [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 2–2(52). – С. 97–104.
19. Ворощенко, В. Д. Интеллектуальный модуль оптимизации и управления эффективностью производственного процесса на базе агентной имитационной модели / В. Д. Ворощенко, В. П. Егорова, М. А. Горькавый // Ученые записки КнАГТУ. – 2023. – № 1(65). – С. 85–93.
20. Ворощенко, В. Д. Концепция цифрового двойника коллаборативного роботизированного комплекса / В. Д. Ворощенко, М. А. Горькавый // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы IV Всеросс. науч.-практ. конф., посвященной 70-летию со дня образования КнАГУ, Комсомольск-на-Амуре, 07–08 октября 2025 года. – Комсомольск-на-Амуре: КнАГУ, 2025. – С. 238–242.
21. Ворощенко, В. Д. Моделирование столкновений подвижных объектов в роботизированном технологическом процессе / В. Д. Ворощенко, М. А. Горькавый // Ученые записки КнАГТУ. – 2024. – № 1(73). – С. 82–89.
22. Ворощенко, В. Д. Оптимизация процессов энергопотребления коллаборативным роботом в рамках киберфизической системы / В. Д. Ворощенко, М. А. Горькавый, А. И. Горькавый // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению : Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. мо-

- лодых ученых. В 2-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 05–11 декабря 2022 года / Редколлегия: С.И. Сухоруков (отв. ред.) [и др.]. Том Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: КНАГУ, 2023. – С. 333–335.
23. Гельштейн, А.К. Автоматизация процесса обслуживания станка коллаборативным роботом на основе шаблонно ориентированного программирования / А.К. Гельштейн, А.М. Кашевник // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2020. – № 9(244). – С. 22–25.
24. Гилат, А. MATLAB. Теория и практика. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 416 с.
25. Го, У. Реализация задачи сборки коллаборативной робототехнической ячейки с применением системы визуального контроля действий человека / У. Го, В. В. Серебряный, М. А. Шереужев // Экстремальная робототехника. – 2024. – № 1(34). – С. 240–245.
26. Горькавый, А. И. Компенсация возмущений в системе управления мехатронным модулем с оптимальным регулятором / А. И. Горькавый, М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – № 6. – С. 57–61.
27. Горькавый, А. И. Синтез модели электромеханической системы мехатронного модуля / А. И. Горькавый, М. А. Мельниченко, А. В. Берх // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению : Материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 16–26 февраля 2021 года / Редколлегия: С.И. Сухоруков (отв. ред.), А.С. Гудим, Н.Н. Любушкина. – Комсомольск-на-Амуре: КНАГУ, 2021. – С. 175–179.
28. Горькавый, М. А. Автоматизация синтеза нечетких подсистем экспертной системы промышленного предприятия / М. А. Горькавый, В. А. Соловьев // Ученые записки КНАГТУ. – 2010. – Т. 1, № 1. – С. 27–35.
29. Горькавый, М. А. Алгоритм планирования движения коллаборативного робота при разрешении коллизий на базе RL агента / М. А. Горькавый // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2026. – Т. 25, № 2. – С. 172–184.
30. Горькавый, М. А. Дискретно-событийная модель автоматизированного технологического процесса нанесения лакокрасочных покрытий на крупногабаритные детали сборочных единиц / М. А. Горькавый, А. И. Кучерова, А. И. Горькавый // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – № 4–3(70). – С. 99–109.
31. Горькавый, М. А. Модели, методы и средства управления и интегрированной информационной поддержки производственных процессов предприятия металлургической отрасли : дис. ... канд. техн. наук / Горькавый Михаил Александрович ; [Место защиты: Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т]. – Комсомольск-на-Амуре, 2010. – 168 с.: ил.
32. Горькавый, М. А. Нечеткий подход к оценке компетентности технического персонала промышленного предприятия / М. А. Горькавый, В. А. Соловьев // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2010. – № 3(18). – С. 63–72.
33. Горькавый, М. А. Оптимизация режима позиционного управления коллаборативным роботом в технологическом процессе / М. А. Горькавый // Ученые записки КНАГТУ. – 2025. – № 7(87). – С. 58–65.

34. Горькавый, М. А. Оптимизация роботизированного технологического процесса на базе нейросетевой имитационной модели энергопотребления / М. А. Горькавый, А. И. Горькавый, М. А. Мельниченко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2023. – Т. 66, № 2. – С. 85–95.
35. Горькавый, М. А. Планирование и оптимизация движений коллаборативного робота при разрешении коллизий в ограниченном операционном пространстве / М. А. Горькавый // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2025. – Т. 68. – № 3. – С. 56–69.
36. Горькавый, М. А. Последовательное применение алгоритмов разрешения коллизий в технологическом методе планирования движений коллаборативного робота / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко // Программные продукты и системы. — 2026.
37. Горькавый, М. А. Синтез имитационной модели энергопотребления промышленного робота на базе нейросетевых модулей систем управления электрическим приводом / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко, В. Д. Ворощенко // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – № 2–1(68). – С. 317–325.
38. Горькавый, М. А. Синтез нечеткой модели компетенций технического персонала промышленного предприятия / М. А. Горькавый, В. А. Соловьев // Информатика и системы управления. – 2010. – № 1(23). – С. 128–140.
39. Горькавый, М. А. Функциональная модель инфраструктуры синтеза коллаборативных роботизированных технологических процессов / М. А. Горькавый, А. И. Кучерова, А. И. Горькавый // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – № 4–3(70). – С. 76–85.
40. ГОСТ 3.1109 82. Термины и определения основных понятий : [Электронный ресурс]. – М.: Стандартинформ, 2012. – 14 с.
41. ГОСТ 60.1.2.1–2016/ИСО 10218 1:2011: Роботы и робототехнические устройства. Требования по безопасности для промышленных роботов : национальный стандарт Российской Федерации. – Введ.: 01.01.2017. – М.: Стандартинформ, 2016. – 48 с.
42. ГОСТ ИСО 13855 2006: Безопасность оборудования. Расположение защитных устройств с учетом скоростей приближения частей тела человека : межгосударственный стандарт. – Введ.: 01.01.2008. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2007. – 20 с.
43. ГОСТ Р 60.0.0.4–2019 (ИСО/МЭК 8373:2012). Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения. – Введ. 2020 05 01. – Москва : Стандартинформ, 2019.
44. ГОСТ Р 60.1.2.3–2021/ISO/TS 15066:2016. Роботы и робототехнические устройства. Требования безопасности для роботов, работающих совместно с человеком : национальный стандарт Российской Федерации. – Введ. 2022 04 01. – Москва : Стандартинформ, 2021.
45. ГОСТ Р ИСО 27500 2024: Эргономика организации, ориентированной на человека. Общие принципы : национальный стандарт Российской Федерации. – Введ.: 01.01.2025. – М.: Стандартинформ, 2024. – 20 с.
46. ГОСТ Р МЭК 62061 2015: Безопасность оборудования. Функциональная безопасность систем управления электрических, электронных и программируемых электронных, связанных с безопасно-

стью : национальный стандарт Российской Федерации. – Введ.: 01.01.2017. – М.: Стандартиформ, 2016. – 64 с.

47. Грабарь, Д. М. Гибридный подход к распознаванию действий человека-оператора в коллаборативных роботизированных средах с использованием больших языковых моделей и компьютерного зрения / Д. М. Грабарь, Ю. С. Иванов // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2025. – № 15. – С. 62–64.

48. Грабарь, Д.М. Исследование методов и алгоритмов распознавания образов на изображениях / Д.М. Грабарь, Ю.С. Иванов // Ученые записки КнАГТУ. – 2023. – № 7(71). – С. 20–27.

49. Дивеев, А.И. Вариационный генетический алгоритм для решения задачи оптимального управления / А.И. Дивеев, Е.Ю. Шмалько // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1. – С. 193.

50. Дивеев, А.И. Исследование практической сходимости эволюционных алгоритмов оптимального программного управления колесным роботом / А.И. Дивеев, С.В. Константинов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2018. – № 4. – С. 80–106.

51. Динамическая коррекция управляющего воздействия в робототехнических системах на базе нейросетевой технологии с онлайн-обучением / А. А. Кобзев, А. В. Лекарева, Н. А. Новикова, О. С. Сидорова // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 12–2. – С. 282–288.

52. Дли, М. И. Построение локальных нечетких моделей для ситуационного управления сложными объектами на основе прецедентов / М. И. Дли, А. М. Соколов, М. Ю. Воротилова // Программные продукты и системы. – 2025. – № 3. – С. 389–402.

53. Дядькина, А.С. Международный опыт моделирования психологического портрета пользователя по цифровым следам в сети Интернет / А.С. Дядькина // Молодой ученый. – 2020. – № 26 (316). – С. 26–28.

54. Егоров, И. Н. Позиционно-силовое управление в робототехнической системе механической обработки / И. Н. Егоров, В. П. Умнов // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 12–3. – С. 417–421.

55. Ефимов, А. Ю. Идентификация нелинейных зависимостей энергопотребления промышленного робота в задачах повышения эффективности управления автоматизированным технологическим процессом / А. Ю. Ефимов, М. А. Горькавый, В. А. Соловьев // Электротехнические системы и комплексы. – 2020. – № 2(47). – С. 64–71.

56. Ефимов, А. Ю. Исследование потенциала оптимизации роботизированных процессов / А. Ю. Ефимов, М. А. Горькавый, В. П. Егорова // EurasiaScience : Сборник статей XXVIII междунар. науч.-практ. конф., Москва, 31 марта 2020 года. – Москва: ООО "Актуальность.РФ", 2020. – С. 66–68.

57. Жестовое управление коллаборативным роботом / И. А. Кагиров, И. М. Толстой, А. И. Савельев, А. А. Карпов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2019. – Т. 7, № 2. – С. 139–144.

58. Жиганов, С. В. Исследование нейросетевых алгоритмов прогнозирования движений человека на базе LSTM и трансформеров / С. В. Жиганов, Ю. С. Иванов, Д. М. Грабарь // Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления. – 2023. – Т. 514, № 2. – С. 364–374.
59. Забихифар, С. Х. Адаптивная нейросетевая система управления манипулятором / С. Х. Забихифар, А. С. Ющенко // Экстремальная робототехника. – 2018. – № 1(29). – С. 485–491.
60. Забихифар, С. Х. Нечеткое управление скользящего типа манипуляторами / С. Х. Забихифар, А. С. Ющенко // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 2(7). – С. 66–70.
61. Иванов, Ю. С. Анализ устойчивости предиктивных моделей к состязательным атакам в робототехнических комплексах / Ю. С. Иванов, М. А. Горькавый, Д. М. Грабарь // Ученые записки КНАГТУ. – 2023. – № 1(65). – С. 109–115.
62. Илюшин, И. Э. Алгоритм оптимизации роботизированного технологического комплекса для лазерной резки / И. Э. Илюшин, М. М. Кожевников, А. В. Господ // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. – 2023. – № 1(40). – С. 8–16.
63. Индустрия 5.0: понятие, формирование и развитие / А. В. Бабкин, А. А. Федоров, И. В. Либберман, П. М. Клачек // Экономика промышленности. – 2021. – Т. 14, № 4. – С. 375–395.
64. Интеграция робототехнических решений на базе коллаборативных роботов в технологические процессы предприятия / К. А. Кузнецова, К. А. Воронин, Л. О. Федосова [и др.] // Экстремальная робототехника. – 2025. – № 1(36). – С. 261–267.
65. Интеллектуальный робототехнический комплекс для финишной обработки проточной части лопаток газотурбинных двигателей / В. Л. Афонин, Ю. В. Илюхин, М. Г. Яковлев [и др.] // Вестник МГТУ "Станкин". – 2019. – № 3(50). – С. 49–56.
66. Инь, Ш. Диалоговая система управления роботом на базе теории конечных автоматов / Ш. Инь, А. С. Ющенко // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20, № 11. – С. 686–695.
67. Исследование алгоритмов динамической коррекции движения в робототехнических системах / А. А. Кобзев, Н. А. Новикова, А. В. Лекарева, А. А. Махфуз // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – С. 114.
68. Исследование особенностей применения метода функциональной декомпозиции при разработке имитационных моделей цифрового двойника роботизированного процесса / М. А. Горькавый, В. П. Егорова, А. И. Горькавый, М. А. Мельниченко // Ученые записки КНАГТУ. – 2022. – № 3(59). – С. 27–34.
69. Исследование процессов энергопотребления промышленного робота-манипулятора с помощью систем внешней сенсорики / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко, Р. Д. Григорец, Н. С. Шушарин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 5. – С. 486–491.
70. Карпов, В. Э. Модели социального поведения в групповой робототехнике / В. Э. Карпов // Управление большими системами: сборник трудов. – 2016. – № 59. – С. 165–232.
71. Ким, Д.П. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Д.П. Ким. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. – 440 с.

72. Кларк, Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач : [пер. с англ.] / Дж. Кларк ; пер. М.А. Зуев; под ред. А.И. Горлина. – М.: Радио и связь, 1990. – 534 с.
73. Кобзев, А. А. Исследование алгоритмов адаптации управляющего воздействия для приводов робототехнических систем с помощью симулятора межкоординатных возмущений / А. А. Кобзев, Н. А. Новикова, А. В. Лекарева // Известия высших учебных заведений. Электро-механика. – 2015. – № 3. – С. 50–56.
74. Когнитивное интеллектуальное управление. Часть 2: квантовый алгоритм нечеткого вывода в интеллектуальной когнитивной робототехнике / С. В. Ульянов, Д. П. Зрелова, А. В. Шевченко, А. А. Шевченко // Робототехника и техническая кибернетика. – 2023. – Т. 11, № 2. – С. 133–146.
75. Козелков, О. В. технико-экономическое обоснование применения робота-манипулятора для выполнения ремонтных работ под напряжением на ВЛЭП 110 кВ / О. В. Козелков, Н. А. Малев, В. Ю. Корнилов // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2025. – Т. 3, № 11(164). – С. 132–139.
76. Коллаборативные роботы для дуговой сварки / М. А. Шолохов, А. М. Фивейский, Д. С. Бузори-на [и др.] // Сварка и диагностика. – 2021. – № 4. – С. 57–61.
77. Кравченко, В. Н. Исследование двухканальных приводов технологических роботов с независи-мым позиционно-силовым управлением в режиме переключения / В. Н. Кравченко, Н. Г. Рассказчи-ков, И. Н. Егоров // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11–3. – С. 452–457.
78. Крахмалев, О. Н. Генетическое программирование и объектное моделирование манипуляцион-ных роботов / О. Н. Крахмалев // Computational Nanotechnology. – 2023. – Т. 10, № 2. – С. 16–25.
79. Крахмалев, О. Н. Объектно-ориентированное моделирование манипуляционных систем робо-тов / О. Н. Крахмалев // Робототехника и техническая кибернетика. – 2018. – № 4(21). – С. 41–47.
80. Крахмалев, О.Н. Объектно-ориентированное моделирование динамики манипуляционных си-стем на основе матриц преобразования однородных координат / О.Н. Крахмалев // Робототехника и техническая кибернетика. – 2017. – № 2(15). – С. 32–36.
81. Кузнецов, О.П. Автоматы / О.П. Кузнецов, Г.М. Адельсон-Вельский // Дискретная математика для инженера. – М.: Энергия, 1980. – 344 с.
82. Кулагина, И. В. Моделирование практик агрессии в социо-киберфизической среде / И. В. Кула-гина, А. О. Исхакова, Р. Р. Галин // Вестник Томского государственного университета. Философия. Социология. Политология. – 2019. – № 52. – С. 147–161.
83. Куприянов, М.С. Нечеткие методы самоорганизации информационных систем : монография / под ред. С.В. Прокопчиной. – М.: Издательский Дом «Научная библиотека», 2017.
84. Кучерова, А. И. Исследование роботизированных процессов покраски деталей сборочных еди-ниц авиационного назначения / А. И. Кучерова, Е. П. Иванкова, М. А. Горькавый // Ученые записки КНАГТУ. – 2025. – № 7(87). – С. 35–42.
85. Кучерова, А. И. Управление технологическим процессом роботизированной покраски на базе дискретно-событийной модели / А. И. Кучерова, М. А. Горькавый // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы IV Всеросс. науч.-практ. конф., посвященной 70-летию со дня об-

разования КНАГУ, Комсомольск-на-Амуре, 07–08 октября 2025 года. – Комсомольск-на-Амуре: КНАГТУ, 2025. – С. 286–289.

86. Латынов, В.В. Прогнозирование психологических характеристик человека на основании его цифровых следов / В.В. Латынов, В.В. Овсянникова // Психология. Журнал высшей школы экономики. – 2020. – Т. 17, № 1. – С. 166–180.

87. Лафоре, Р. Объектно ориентированное программирование в C++ / Р. Лафоре ; пер. с англ. – 4 е изд. – М.: Вильямс, 2004. – 1048 с.: ил.

88. Ледовая, Я.А. Социальные сети как новая среда для междисциплинарных исследований поведения человека / Я.А. Ледовая, Р.В. Тихонов, О.Н. Боголюбова // Вестник СПбГУ. Психология и педагогика. – 2017. – Т. 7, Вып. 3. – С. 193–210.

89. Лекарева, А. В. Особенности построения мобильного РТК гидроабразивной резки труб нефтепроводов / А. В. Лекарева, А. А. Кобзев, А. А. Махфуз // Экстремальная робототехника. – 2018. – № 1(29). – С. 367–376.

90. Лепехина, С.Ю. Комплекс алгоритмов работы системы управления роботизированного комплекса трёхмерной печати / С.Ю. Лепехина, С.И. Сухоруков, Ю.А. Давыдов // Ученые записки КНАГТУ. – 2023. – № 1(65). – С. 68–75.

91. Логическое управление робототехническим комплексом листовой штамповки титановых сплавов / Э. Б. Мандаров, Н. С. Улаханов, Ц. А. Батуев [и др.] // Вестник Бурятского государственного университета. Математика, информатика. – 2018. – № 4. – С. 48–57.

92. Лямин, М. А. Многокаскадная нечеткая система согласованного управления взаимосвязанными электроприводами роботизированной транспортной платформы / М. А. Лямин, С. П. Черный, С. И. Сухоруков // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – № 4–3(70). – С. 120–127.

93. Медицинская робототехника для нейрохирургии / Д. Д. Климов, А. А. Воротников, М. А. Соловьев [и др.] // Вестник МГТУ "Станкин". – 2019. – № 1(48). – С. 32–37.

94. Мельниченко, М.А. Разработка интеллектуальных моделей и алгоритмов повышения эффективности функционирования роботизированных технологических процессов : дис. ... канд. техн. наук : 2.3.3 / Мельниченко Маркел Андреевич. – Комсомольск-на-Амуре, 2024. – 209 с.

95. Мишулин, Ю. Е. Система управления адаптивным сборочным роботом с моделью технологического процесса / Ю. Е. Мишулин, И. Н. Егоров, В. В. Буненков // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12–4. – С. 707–712.

96. Моделирование автоматизированной системы коррекции перемещений инструментального центра промышленного робота-манипулятора при выполнении технологических операций по сложному криволинейному контуру / Н. А. Сазонникова, В. Н. Илюхин, Е. К. Ермаков, Д. А. Мезенцев // Динамика и виброакустика. – 2025. – Т. 11, № 1. – С. 14–26.

97. Модель коллаборативного робота KUKA LBR IIWA 7 R800 в формате URDF: [Электронный ресурс]. – URL: https://github.com/kuka-isir/iiwa_description (дата обращения: 16.12.2025).

98. Модель управления многозвенным роботом-манипулятором в условиях неопределенности внешней среды / М. И. Дли, Н. Н. Прокимнов, А. М. Соколов, М. Ю. Воротилова // Прикладная информатика. – 2025. – Т. 20, № 1(115). – С. 68–84.
99. Мокаева, А. А. Повышение производительности труда за счет применения трансформируемой сборочной системы с использованием коллаборативной робототехники / А. А. Мокаева, В. В. Серебрянный, Д. В. Лапин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 7(209). – С. 92–101.
100. Мягкие роботы / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова [и др.] // Ученые записки КнАГТУ. – 2021. – № 1(49). – С. 83–91.
101. Научно-технические аспекты автоматизации гидропрессовой сборки соединений с натягом с использованием робота / А. И. Абрамов, Ю. Р. Никитин, А. В. Романов [и др.] // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 3–9.
102. Нестеров, А.В. Взаимодействие программы управления виртуальной трехмерной моделью робота манипулятора на основе UNITY3D с программным обеспечением masterscada 4D при помощи стандарта OPC UA / А.В. Нестеров // Наукосфера. – 2025. – № 4 2. – С. 13 21.
103. Норенков, И.П. Информационная поддержка наукоемких изделий : CALS технологии / И.П. Норенков, П.К. Кузьмик. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.
104. Обзор манипуляторов грузоподъемностью до семи килограммов / А. А. Рогачев, К. В. Климов, Р. М. Щербов, А. А. Романов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2025. – № 9(786). – С. 3–10.
105. Оптимально-модальный регулятор в мехатронном модуле производственного оборудования / А. И. Горькавый, А. А. Кузнецов, О. С. Баталова, М. А. Горькавый // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению : Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. В 2-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 05–11 декабря 2022 года / Редколлегия: С.И. Сухоруков (отв. ред.) [и др.]. Том Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: КнАГТУ, 2023. – С. 342–344.
106. Оптимальный ПИД-регулятор в структуре мехатронного модуля производственного оборудования / А. И. Горькавый, А. В. Берх, А. А. Кузнецова, М. А. Горькавый // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению : Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. В 2-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 05–11 декабря 2022 года / Редколлегия: С.И. Сухоруков (отв. ред.) [и др.]. Том Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: КнАГТУ, 2023. – С. 339–341.
107. Оптимизация процессов интеллектуального управления в реальном времени на физической модели робота-манипулятора с помощью генетического алгоритма / С. В. Ульянов, А. Г. Решетников, М. С. Катулин, А. Р. Рябов // Программные продукты и системы. – 2024. – № 3. – С. 301–309.
108. Оптимизация режимов работы роботизированных технологических процессов средствами вычислительного интеллекта / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко, В. А. Соловьев, Д. М. Грабарь. – Старый Оскол : ООО "Тонкие наукоемкие технологии", 2026. – 192 с. – ISBN 978-5-94178-924-5.

109. Особенности прототипирования кинематических движений конечностей человека при реализации демонстрационных роботов / С. О. Никифоров, Т. В. Кочева, Б. Е. Мархадаев [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. – 2020. – Т. 74, № 7. – С. 317–320.
110. Оценка влияния характеристик измерительной системы на точность оценки перемещений промышленного робота в процессе инкрементального формообразования / Н. А. Сазонникова, В. Н. Илюхин, С. В. Сурудин, Р. В. Уклеин // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2024. – № 3(70). – С. 49–58.
111. Патент № 2831288 С1 РФ, МПК В25J 9/00. Способ оптимизации положения обрабатываемой заготовки для сокращения энергозатрат промышленного робота в технологическом процессе механообработки: № 2024105025: опубл. 03.12.2024 / М. А. Мельниченко, М. А. Горькавый, А. С. Гудим.
112. Патент № 2831288 С1 РФ, МПК В25J 9/00. Способ оптимизации положения обрабатываемой заготовки для сокращения энергозатрат промышленного робота в технологическом процессе механообработки: № 2024105025: опубл. 03.12.2024 / М. А. Мельниченко, М. А. Горькавый, А. С. Гудим.
113. Планирование траекторий роботов-манипуляторов в технологическом процессе точечной контактной сварки / М. М. Кожевников, И. Э. Илюшин, А. В. Старовойтов, В. Н. Косырев // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2016. – № 2(65). – С. 3-10.
114. Повышение точности перемещений промышленного робота в процессе инкрементального формообразования / Н. А. Сазонникова, В. Н. Илюхин, С. В. Сурудин, Д. А. Мезенцев // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2024. – Т. 23, № 2. – С. 143–156.
115. Повышение точности электроприводов промышленных роботов за счет применения идентификаторов состояния в следящих системах управления / В. Л. Афонин, В. В. Слепцов, А. Д. Лагунова, Л. В. Гаврилина // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2025. – № 1. – С. 77–83.
116. Поливанов, А. Ю. Методика определения координат сварочных стыков в системе технического зрения робота для дуговой сварки / А. Ю. Поливанов, Ю. Дабул // Вестник МГТУ "Станкин". – 2025. – № 1(72). – С. 16–25.
117. Половко, А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров. – 2 е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ–Петербург, 2006. – 704 с.: ил. ISBN 5 94157 541 6.
118. Пospelов, Д.А. Ситуационное управление: теория и практика / Д.А. Пospelов. – Москва: Наука, 1986. – 288 с.
119. Прикладные вопросы экспериментального исследования структурной динамики промышленных роботов на примере KUKA Kr 10 / М. Н. Невмержицкий, А. В. Вара, Б. С. Ноткин, К. В. Змеу // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 4–2. – С. 276–284.
120. Применение и программирование промышленных роботов (Training Guide V4) / KUKA Roboter GmbH. – 2014.

121. Применение метода обучения с подкреплением в роботизированных и автоматизированных системах лесной промышленности / А. А. Толстых, Д. С. Ступников, С. В. Малюков [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2020. – Т. 10, № 1 (37). – С. 256–265.
122. Проектирование робототехнических манипуляторов с системой компьютерного зрения для сбора томатов / А. В. Рыбаков, А. М. Лихтер, А. Б. Погожева [и др.] // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2020. – № 3(51). – С. 135–147.
123. Прокофьев, Г.И. Методы IDEF в моделировании организаций / Г.И. Прокофьев, Р.В. Шубин // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2020. – № 6. – С. 37–43.
124. Пучков, А. Ю. Метод решения обратной задачи кинематики на основе обучения с подкреплением при управлении роботами-манипуляторами / А. Ю. Пучков, М. И. Дли, М. Г. Тиндова // Прикладная информатика. – 2023. – Т. 18, № 6(108). – С. 120–133.
125. Пятибратов, Г. Я. Синтез и исследование адаптивной системы управления силовыми взаимодействиями в упругих механизмах многозвенных манипуляторов / Г. Я. Пятибратов, Л. Л. Алтунян, А. А. Прудий // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – Т. 65, № 2. – С. 35–44.
126. Рабочий элемент мягкого захватного устройства / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова, В. А. Карпенко // Ученые записки КНАГТУ. – 2021. – № 5(53). – С. 70–78.
127. Радченко, Т.В. Разработка VR приложения для удаленного управления роботом / Т.В. Радченко, А.В. Малолетов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2025. – № 9(304). – С. 45–52.
128. Разработка архитектуры системы управления роботизированным производственным процессом на базе технологии цифрового двойника / М. А. Горькавый, В. П. Егорова, В. А. Соловьев [и др.] // Ученые записки КНАГТУ. – 2023. – № 1(65). – С. 40–46.
129. Разработка интеллектуальных алгоритмов для построения коллаборативных роботизированных систем управления, функционирующих в недетерминированной среде : отчет о НИР (заключительный) / Российский научный фонд ; рук. Горькавый М.А. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», 2025. – № соглашения 25-21-00292.
130. Разработка управляющей программы робота для завинчивания винтов при сборке малого космического аппарата с применением СПРУТКАМ-программы и разработанного постпроцессора / Д. В. Антипов, М. А. Михеев [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 9. – С. 209–218.
131. Распознавание и отслеживание механических инструментов в коллаборативной робототехнической ячейке с применением механизма внимания / Г. У, В. В. Серебрянный, М. А. Шереужев [и др.] // Вестник МГТУ "Станкин". – 2023. – № 4(67). – С. 8–18.
132. Рассказчиков, Н. Г. Вопросы разработки приводов роботов с переменными инерционными и силовыми параметрами / Н. Г. Рассказчиков, И. Н. Егоров, А. А. Назаров // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12–2. – С. 325–330.

133. Регулярные аппроксимации наибо́льшего движения мобильного робота при ограниченных фазовых координатах / А. Н. Дарьина, А. И. Дивеев, Д. Ю. Карамзин [и др.] // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2022. – Т. 62, № 9. – С. 1564–1584.
134. Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение. CALS: Continuous Acquisition and Life Cycle Support / Ред.-сост. А.Г. Братухин ; под общ. ред. А.Г. Братухина. – М.: Авиаиздат, 2008. – 608 с.
135. Сарин, К.С. Методика построения интерпретируемых нечетких классификаторов для систем объяснимого искусственного интеллекта / К.С. Сарин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2025. – Т. 28, № 2. – С. 73–87.
136. Сафонов, Ю. М. Определение оптимальной скорости обработки траектории коллаборативным роботом / Ю. М. Сафонов, Н. Н. Дульнев, Н. Н. Федорцов // Технический оппонент. – 2018. – № 1(1). – С. 24–33.
137. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2020664545 РФ. Программа оптимизации комплекса траекторий движения и повышения энергоэффективности промышленного робота, входящего в состав автоматизированного технологического процесса: № 2020617707: опубл. 13.11.2020 / М. А. Горькавый, А. Ю. Ефимов, В. В. Болдырев, В. П. Егорова.
138. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022668069 РФ. Программа синтеза нейросетевой имитационной модели энергопотребления и оптимизации комплекса траекторий перемещений робота манипулятора в ограниченном пространстве задач технологического процесса позиционирования: № 2022666799: опубл. 04.10.2022 / М. А. Горькавый, А. И. Горькавый, В. П. Егорова [и др.].
139. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023614080 РФ. «программа управления коллаборативным роботом с внешнего устройства на базе нейросетевых алгоритмов»: опубл. 22.02.2023 / М. А. Горькавый, М. А. Лямин, М. А. Мельниченко [и др.].
140. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023666745 РФ. «программа обнаружения факта коллизии аппроксимирующих тел моделей подвижных объектов роботизированного комплекса»: № 2023666051: опубл. 04.08.2023 / В. Д. Ворощенко, М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко, А. И. Горькавый.
141. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023667029 РФ. «программа для автоматизированного расчета прямой задачи кинематики общепромышленных и коллаборативных роботов KUKA»: № 2023666318: опубл. 09.08.2023 / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко, А. И. Горькавый [и др.].
142. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024617307 РФ. «программа оптимизации траектории перемещения коллаборативного робота в пространстве задач по взвешенной сумме критериев максимизации производительности и энергоэффективности»: № 2024616250: опубл. 01.04.2024 / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко, Ю. С. Иванов [и др.].

143. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024660568 РФ. «программа поиска энергоэффективного положения заготовки детали внутри рабочей зоны робота-манипулятора, входящего в состав роботизированного технологического комплекса механической обработки» : № 2024618944: опублик. 08.05.2024 / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко, Ю. С. Иванов [и др.].
144. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024688368 РФ. Программа обнаружения коллизий и перепланирования отдельных траекторий перемещения коллаборативного робота : № 2024687316: опублик. 27.11.2024 / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко, А. И. Горькавый, Д. М. Грабарь.
145. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024688555 РФ. Программа оптимизации траекторий вспомогательных переходов коллаборативного робота в технологическом процессе сверления : № 2024687081: опублик. 28.11.2024 / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко, А. И. Горькавый, Д. М. Грабарь.
146. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024688595 РФ. Программа обучения RL DDPG агента для планирования энергоэффективной траектории коллаборативного робота по критерию минимизации затрат электрической энергии: № 2024687312: опублик. 28.11.2024 / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко, В. Д. Ворощенко, А. И. Горькавый.
147. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025661813 РФ. «программа вычисления параметров движения коллаборативного робота в конфигурационном пространстве для задачи перемещения центральной точки инструмента по прямолинейной траектории в операционном пространстве»: опублик. 13.05.2025 / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко, А. И. Горькавый, С. Е. Мельникова.
148. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025661923 РФ. «программа вычисления параметров движения коллаборативного робота в конфигурационном пространстве для задачи перемещения центральной точки инструмента по дуге окружности в операционном пространстве»: опублик. 14.05.2025 / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко, А. И. Горькавый, В. В. Геращенко.
149. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025662013 РФ. «программа вычисления параметров движения коллаборативного робота в конфигурационном пространстве для задачи перемещения центральной точки инструмента от точки к точке в операционном пространстве»: опублик. 16.05.2025 / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко, А. И. Кучерова, Н. П. Бобровский.
150. Серебрeнный, В.В. Использование УЗ датчика для обеспечения безопасности движения коллаборативного манипуляционного робота / В.В. Серебрeнный // Робототехника и техническая кибернетика. – 2023. – Т. 11, № 4. – С. 267 273.
151. Серебрeнный, В.В. Основные вопросы разработки коллаборативных робототехнических систем промышленного назначения / В.В. Серебрeнный, М.А. Шерeужев // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2018. – № 6 3(86). – С. 106 113.

152. Синтез нечеткой модели энергопотребления промышленного робота на базе гибридных систем управления электрическим приводом / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко, А. И. Горькавый, А. С. Гудим // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2024. – Т. 67, № 2. – С. 45–55.
153. Соколов, В. С. Прототип робастной системы сборки резьбового соединения на базе роботоманипулятора методами силомоментного управления / В. С. Соколов, Д. Д. Кульминский // Робототехника и техническая кибернетика. – 2024. – Т. 12, № 4. – С. 296–304.
154. Соловьев, А. В. Моделирование влияния человеческого фактора на функционирование информационных систем / А. В. Соловьев // Труды Института системного анализа Российской академии наук. – 2021. – Т. 71, № 1. – С. 34–43.
155. Соломенцев, Ю. М. Планирование в современных системах управления производством / Ю. М. Соломенцев, Р. Р. б. Загидуллин, Е. Б. Фролов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2010. – № 4. – С. 77–87.
156. Специфика архитектуры цифрового двойника коллаборативного роботизированного процесса на базе мультиагентных систем / М. А. Горькавый, А. И. Горькавый, В. А. Соловьев [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 4. – С. 147–156.
157. Степанян, И. В. Технология ремонта реактора гидроочистки на базе роботизированного комплекса автоматизированной наплавки с машинным обучением / И. В. Степанян, Т. Р. Сулутдинов, А. Д. Горохов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2024. – № 3. – С. 134–138.
158. Технология виртуального сопряжения в процессе имитационного моделирования сложнфункциональных модулей систем управления промышленных роботов и многокоординатных мехатронных систем / А. А. Зеленский, М. М. Жданова, Т. Х. Абдуллин, В. В. Воронин // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2022. – Т. 26, № 1. – С. 92–115.
159. Технология квантовых мягких вычислений в программно-алгоритмической платформе робастной интеллектуальной системы управления роботом-манипулятором / С. В. Ульянов, А. Г. Решетников, А. В. Николаева, В. В. Боровинский // Программные продукты и системы. – 2025. – № 2. – С. 218–233.
160. Ткаченко, И. С. Методические подходы к созданию и функционированию серийного роботизированного производства малых космических аппаратов / И. С. Ткаченко // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2024. – Т. 23, № 3. – С. 178–194.
161. Топорин, А.А. Система предотвращения столкновений человека и кобота в процессе работы производственной коллаборативной ячейки сборки / А.А. Топорин // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2023. – № 11. – С. 50–57.
162. Ульянов, С. В. Интеллектуальное робастное управление роботом-манипулятором на основе квантовых мягких вычислений / С. В. Ульянов, А. В. Николаева // Программные продукты и системы. – 2014. – № 1. – С. 115–123.

163. Ульянов, С. В. Когнитивное интеллектуальное управление. Часть I: Система оценки эмоций оператора с применением глубокого машинного обучения на основе мягких вычислений / С. В. Ульянов, А. В. Шевченко, А. А. Мамаева // Робототехника и техническая кибернетика. – 2020. – Т. 8, № 3. – С. 217–232.
164. Умнов, В. П. Распределение параметров в исполнительной кинематической цепи комплексированной манипуляционной системы роботов для обработки крупногабаритных объектов / В. П. Умнов, И. Н. Егоров // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–9. – С. 1921–1925.
165. Умнов, В. П. Система управления роботизированным технологическим процессом лазерного термоупрочнения / В. П. Умнов, Д. А. Старостин // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–8. – С. 1703–1708.
166. Умнов, В. П. Формирование пространства состояний управления исполнительными системами манипуляционных роботов / В. П. Умнов, И. Н. Егоров // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10–15. – С. 3419–3422.
167. Умнов, В. П. Функциональные связи в комплексированных исполнительных системах технологических роботов и их нарушения / В. П. Умнов, И. Н. Егоров // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12–5. – С. 955–959.
168. Филаретов, В. Ф. метод формирования гладких траекторий движения мобильных роботов в неизвестном заранее окружении / В. Ф. Филаретов, Д. А. Юхимец // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2017. – № 4. – С. 174–184.
169. Филаретов, В. Ф. Согласованная работа двух мобильных роботов при автоматическом выполнении операций в сложной окружающей обстановке / В. Ф. Филаретов, А. А. Кацурин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2022. – Т. 65, № 9. – С. 656–667.
170. Филимонов, А. Б. Некоторые проблемные аспекты нечеткого ПИД регулирования / А. Б. Филимонов, Н. Б. Филимонов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – Т. 19, № 12. – С. 762–769.
171. Филимонов, А. Б. Ситуационный подход в задачах автоматизации управления техническими объектами / А. Б. Филимонов, Н. Б. Филимонов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – Т. 19, № 9. – С. 563–578.
172. Фоминых, А.В. Метод решения задачи оптимального управления в форме Майера с квазидифференцируемым функционалом при наличии фазовых ограничений / А.В. Фоминых, В.В. Карелин, Л.Н. Полякова // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2023. – Т. 19, № 1. – С. 120–134.
173. Формализация рабочего пространства и онтология технологического процесса для выполнения технологических работ коллаборативной робототехнической ячейкой / М. А. Шереужев, Л. А. Пак, П. Д. Карасев, А. О. Винокуров // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2022. – № 6(110). – С. 134–143.

174. Черный, С.П. Особенности моделирования систем управления сложными объектами, требующими учёта геометрических параметров / С.П. Черный, Д. О. Савельев, Н. Р. Сбитнев, П. О. Саяпина // Ученые записки КНАГТУ. – 2024. – № 1(73). – С. 4–10.
175. Черный, С.П. Применение многокаскадных нечётких систем для реализации процедур управления в производственно-технологических процессах / С.П. Черный // Ученые записки КНАГТУ. – 2025. – № 7(87). – С. 43–48.
176. Швандт, А. Программирование коллаборативных манипуляционных роботов с использованием интерфейса дополненной реальности / А. Швандт, А.С. Ющенко // Робототехника и техническая кибернетика. – 2020. – Т. 8, № 2. – С. 139–149.
177. Шереужев, М. А. Вопросы разработки коллаборативной робототехнической ячейки для сборочного производства / М. А. Шереужев, Г. У., В. В. Серебряный // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1(72). – С. 8–15.
178. Шереужев, М. А. Моделирование алгоритма предотвращения столкновений в робототехнических коллаборативных системах / М. А. Шереужев, Д. И. Арабаджиев, И. В. Семянников // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2024. – Т. 26, № 6. – С. 67–81.
179. Шолохов, М. А. Обеспечение качества сварных соединений путем применения алгоритма выбора параметров режима при роботизированной сварке / М. А. Шолохов, А. Ю. Мельников, Д. С. Бузорова // Сварка и диагностика. – 2020. – № 2. – С. 57–60.
180. Экспериментальные исследования алгоритмов планирования движений коллаборативных роботов в автоматизированных технологических комплексах / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко, В. Д. Ворощенко, Е. П. Иванкова // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – № 4–3(70). – С. 66–75.
181. Эффективное функционирование смешанной неоднородной команды в коллаборативной робототехнической системе / Р. Р. Галин, А. А. Широкий, Е. А. Магид [и др.] // Информатика и автоматизация. – 2021. – Т. 20, № 6. – С. 1224–1253.
182. Эффективность внедрения роботизированной сварки при изготовлении элементов электровозов / М. А. Шолохов, Т. Брэгер, А. Ю. Мельников [и др.] // Сварка и диагностика. – 2020. – № 6. – С. 51–56.
183. Юхимец, Д. А. Метод формирования пространственных траекторий мобильного робота в неизвестной обстановке / Д. А. Юхимец, А. С. Губанков, А. В. Зуев // Робототехника и техническая кибернетика. – 2018. – № 2(19). – С. 46–51.
184. Ющенко, А. С. Диалоговое управление коллаборативными роботами с помощью искусственных нейронных сетей / А. С. Ющенко, И. Шуай // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2021. – Т. 22, № 11. – С. 567–576.
185. Ющенко, А.С. Эргономические проблемы коллаборативной робототехники / А.С. Ющенко // Робототехника и техническая кибернетика. – 2019. – Т. 7, № 2. – С. 85–93.
186. Ющенко, А.С. Эргономические проблемы коллаборативной робототехники / А.С. Ющенко // Робототехника и техническая кибернетика. – 2019. – Т. 7, № 2. – С. 85–93.

187. 3D collision avoidance strategy and performance evaluation for human–robot collaborative systems / G. Boschetti, M. Faccio, I. Granata, [et al.] // *Computers & Industrial Engineering*. – 2023. – Vol. 179. – Art. 109225.
188. A digital twin-driven human–robot collaborative assembly-commissioning method for complex products / X. Sun, R. Zhang, S. Liu [et al.] // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2022. – Vol. 118, Iss. 9 10. – Pp. 3389 3402.
189. A Methodology for Flexible Implementation of Collaborative Robots in Smart Manufacturing Systems / H. Giberti, T. Abbattista, M. Carnevale [et al.] // *Robotics*. – 2022. – Vol. 11, Iss. 1. – Art. 9.
190. A multi-objective optimization design of industrial robot arms / S. Kouritem, M. Abouheaf, N. Nahas [et al.] // *Alexandria Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 61. – P. 12847–12867.
191. A Real-Time Failure Recovery and Data Collection System for Robotic Manipulation / E. Galbally, A. Piedra, C. Brosque, O. Khatib // *arXiv.org*. – 2022. – Art. no. 2208.11845. – DOI: 10.48550/arXiv.2208.11845.
192. A ROS2 based communication architecture for control in collaborative and intelligent automation systems / E. Erős, M. Dahl, K. Bengtsson [et al.] // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – Vol. 38. – Pp. 349 357.
193. A ROS integrated API for the KUKA LBR iiwa collaborative robot / S. Mokaram, J. Aitken, U. Martinez-Hernandez [et al.] // *IFAC-PapersOnLine*. – 2017.
194. UML based reconfiguration rate analysis of assembly line depending on robot integration / A. Beauville dit Eynaud, N. Klement, L. Roucoules [et al.] // *IFAC-PapersOnLine*. – 2018. – Vol. 51, Iss. 11. – Pp. 1168 1173.
195. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing / R. Rosen, G. Wichert, G. Lo [et al.] // *IFAC-PapersOnLine*. – 2015. – Vol. 48, no. 3. – P. 567–572.
196. Adaptive threshold for robot manipulator collision detection using fuzzy system / O. Abdelaziz , M. Luo, G. Jiang, S. Chen // *SN Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 2. – Art. № 319.
197. Adversarial discriminative sim-to-real transfer of visuo-motor policies / F. Zhang, J. Leitner, Z. Ge [et al.] // *The International Journal of Robotics Research*. – 2019. – Vol. 38. – Art. no. 0278364919870227.
198. Akima, Hiroshi. A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting based on local procedures / Hiroshi Akima // *Communications of the ACM*. – 1974. – Vol. 17, Iss. 1. – Pp. 18 20.
199. Akima, Hiroshi. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures / Hiroshi Akima // *Journal of the ACM (JACM)*. – 1970. – Vol. 17, Iss. 4. – Pp. 589 602.
200. Algorithm of fuzzy controller membership function allocation at fuzzification stage / S. P. Cherniy, A. V. Buzikayeva, V. I. Susdorf, S. A. Vasilchenko // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2021. – Vol. 200. – P. 117–125.
201. Algorithmization and principles of construction of information support of the automated module for energy outlays optimization of technological processes at robotized productions / M.A. Gorkavyy, A.S. Gudim, A.Y. Efimov, D.B. Solovev // *Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. – Vladivostok, 2018. – P. 8602433.

202. An artificial neural network and Levenberg-Marquardt training algorithm-based mathematical model for performance prediction / F. Bano, S.H. Serbaya, A. Rizwan [et al.] // *Applied Mathematics in Science and Engineering*. – 2024.
203. An ontology and rule-based method for human–robot collaborative disassembly planning in smart re-manufacturing / Y. Hu, C. Liu, M. Zhang [et al.] // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2024. – Vol. 89. – Art. 102766.
204. Application of lean Six Sigma methodology using DMAIC approach for the improvement of bogie assembly process in the railcar industry / I. Daniyan, A. Adeodu, K. Mpofu [et al.] // *Heliyon*. – 2022. – Vol. 8, Iss. 3.
205. Armstrong, B. Friction Modeling and Compensation / B. Armstrong, C.C. de Wit // *The Control Handbook* / Ed. by W.S. Levine. – Boca Raton : CRC Press, 1995.
206. Automated method based on a neural network model for searching energy-efficient complex movement trajectories of industrial robot in a differentiated technological process / M. A. Gorkavyy, A. I. Gorkavyy, V. P. Egorova, M. A. Melnichenko // *Frontiers in Energy Research*. – 2023. – Vol. 11.
207. Automatic Collision-Free Trajectory Generation for Collaborative Robotic Car-Painting / K. Zbiss, A. Kacem, M. Santillo [et al.] // *IEEE Access*. – 2022. – Vol. 10. – P. 9950–9959.
208. Ayten, K. Optimum Trajectory Generation for Redundant/Hyper-Redundant Manipulators / K. Ayten, M. Necip Sahinkaya, A. Dumlu // *IFAC-PapersOnLine*. – 2016. – Vol. 49. – P. 493–500.
209. Bonnaud, S. Industry 4.0 and Cognitive Manufacturing Architecture Patterns, Use Cases and IBM Solutions / Serge Bonnaud, Christophe Didier, Arndt Kohler // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL (<https://www.techrepublic.com/resource-library/whitepapers/industrie-4-0-cognitive-manufacturing-architecture-patterns-use-cases-ibm-solution/>) (дата обращения: [21.07.2026]). – Загл. с экрана.
210. Brain Computer Interface and Hand Guiding Control in a Human Robot Collaborative Assembly Task / Y. Dmytryiev, F. Insero, M. Carnevale, H. Giberti // *Machines*. – 2022. – Vol. 10. – Art. 654.
211. Byrd, R.H. A Trust Region Method Based on Interior Point Techniques for Nonlinear Programming / R.H. Byrd, J.C. Gilbert, J. Nocedal // *Mathematical Programming*. – 2000. – Vol. 89, No. 1. – Pp. 149–185.
212. Calvo, R. Evaluation of Collaborative Robot Sustainable Integration in Manufacturing Assembly by Using Process Time Savings / R. Calvo, P. Gil // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, Iss. 2. – Art. № 611.
213. Chawda, V. Toward torque control of a KUKA LBR IIWA for physical human-robot interaction / V. Chawda, G. Niemeyer // *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) : conference proceedings, Vancouver, BC, Canada, September 24–28, 2017*. – Piscataway, NJ : IEEE, 2017. – P. 6387–6392.
214. Cherniy, S.P. A model of multi-cascade fuzzy logic controller implemented using different variations of inference algorithms / S.P. Cherniy, A.V. Buzikayeva, A.S. Gudim, // *Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. – 2019. – Pp. 91–96.
215. Chettibi, T. Smooth point-to-point trajectory planning for robot manipulators by using radial basis functions / T. Chettibi // *Robotica*. – 2019. – Vol. 37, Iss. 3. – Pp. 539–559.

216. CHOMP: Gradient Optimization Techniques for Efficient Motion Planning / N. Ratliff, S. Srinivasa, M. Zucker, A. Bagnell // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. – Kobe, Japan, 2009. – Pp. 489 494.
217. Coleman, T.F. An Interior, Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds / T.F. Coleman, Y. Li // SIAM Journal on Optimization. – 1996. – Vol. 6. – Pp. 418 445.
218. Coleman, T.F. On the Convergence of Reflective Newton Methods for Large-Scale Nonlinear Minimization Subject to Bounds / T.F. Coleman, Y. Li // Mathematical Programming. – 1994. – Vol. 67, № 2. – Pp. 189 224.
219. Collaborative Welding and Joint Sealing Robots With Haptic Feedback / C. Brosque, E. Herrero, Y. Chen [et al.] // Proceedings of the 38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2021) : conference proceedings, Dubai, UAE, November 2–4, 2021. – International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 2021.
220. Configuration Space Decomposition for Learning-based Collision Checking in High-DOF Robots / Y. Han, W. Zhao, J. Pan, Y.-J. Liu // 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) : conference proceedings, Las Vegas, NV, USA, 24–29 Oct. 2020. – Piscataway, NJ : IEEE, 2020. – P. 5678–5684.
221. Constrained probabilistic movement primitives for robot trajectory adaptation / F. Frank, A. Paraschos, P. van der Smagt [et al.] // IEEE Transactions on Robotics. – 2021. – Vol. 38, no. 2. – P. 606–624.
222. Contact-based object inspection with mobile manipulators at near-optimal base locations / H. Tugal, K. Cetin, Y. Petillot [et al.] // Robotics and Autonomous Systems. – 2023. – Vol. 161. – Art. 104345.
223. Continuous control with deep reinforcement learning / T. P. Lillicrap, J. J. Hunt, A. Pritzel [et al.] // ArXiv:1509.02971 [Cs, Stat]. – September 9, 2015.
224. Corke, P. Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB® / P. Corke. – 3rd ed. – Cham : Springer Nature Switzerland AG, 2023.
225. Cruz-Villalobos, L. The Nature of Emotions (Plutchik, 2001) / L. Cruz-Villalobos // American Scientist. – 2001. – Vol. 89, Iss. 4. – Pp. 344 350
226. Darshi, R. Prediction of short-term electricity consumption by artificial neural networks levenberg-marquardt algorithm in hormozgan province, Iran / R. Darshi, M.A. Bahreini, S.A. Ebrahim // Proceedings of the Iranian Conference on Signal Processing and Intelligent Systems (ICSPIS). – 2019. – Pp. 1 4.
227. De Boor, C. A practical guide to splines / C. De Boor. – New York : Springer, 1978. – Vol. 27. – 325 p.
228. Deep reinforcement learning based proactive dynamic obstacle avoidance for safe human-robot collaboration / X. Wanqing, L. Yuqian, X. Weiliang, X. Xun // Manufacturing Letters. – 2024. – Vol. 41. – Pp. 1246 1256.
229. Design of intelligent decision support system for robotized welding technological processes optimization / A.Y. Efimov, M.A. Gorkavyy, V.P. Egorova, D.B. Solovev // Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, 2019. – P. 8933908.

230. Digital twin-driven human-robot collaborative assembly-commissioning method for complex products / X. Sun, R. Zhang, S. Liu [et al.] // Research Square. – 2021. – Art. no. rs.506544/v1.
231. Dijkstra, E.W. A note on two problems in connexion with graphs / E.W. Dijkstra // *Numerische Mathematik*. – 1959. – Vol. 1, Iss. 1. – Pp. 269 271.
232. Distributed receding horizon control for multi-agent systems with conflicting signal temporal logic tasks / X. Zhou, Y. Zou, S. Li, H. Fang // 2020 2nd International Conference on Industrial Artificial Intelligence (IAI): conference proceedings, Shenyang, China, 23–25 Oct. 2020. – Piscataway, NJ : IEEE, 2020. – P. 1–6.
233. Dmytriiev, Y. Enhancing flexibility and safety: collaborative robotics for material handling in end-of-line industrial operations / Y. Dmytriiev M. Carnevale, H. Giberti // *Procedia Computer Science*. – 2024. – Vol. 232. – Pp. 2588 2597.
234. Doliwa, S. Calculation of the inverse kinematics for the KUKA LBR iiwa R800 (7 DOF) / Sebastian Doliwa // [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – DOI: 10.5281/zenodo.4063575.
235. Duarte, L. Benchmarking human-robot collaborative assembly tasks / L. Duarte, M. Neves, P. Neto // *Results in Engineering*. – 2024. – Vol. 22. – Art. 102042.
236. Dupac, M. Mathematical modeling and simulation of the inverse kinematic of a redundant robotic manipulator using azimuthal angles and spherical polar piecewise interpolation / M. Dupac // *Mathematics and Computers in Simulation*. – 2023. – Vol. 209. – Pp. 282 298.
237. Dynamic Collision and Deadlock Avoidance for Multiple Robotic Manipulators / N. Gafur, G. Kana-galingam, A. Wagner, [et al.] // *IEEE Access*. – 2022. – Vol. 10. – Pp. 55766 55781.
238. Efimov, A. Predicting power consumption of robotic complex based on neuro-fuzzy system / A. Efimov, M. Gorkavyy, A. Gorkavyy // *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. – Sochi, 2020. – P. 9112066.
239. Elprama, B. Acceptance of collaborative robots by factory workers : a pilot study on the importance of social cues of anthropomorphic robots / B. Elprama, I. El Makrini, A. Jacobs // *Proceedings of the International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*. – New York, NY, USA, 26 31 August 2016. – Vol. 7.
240. Energy consumption modeling of industrial robot based on simulated power data and parameter identification / A. Liu, H. Liu, B. Yao [et al.] // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2018. – Vol. 10. – Art. no. 1687814018773852.
241. Energy Efficient Path and Trajectory Optimization of Manipulators with Task Deadline Constraints / Otani T. [et al.] // *IEEE Access*. – 2023.
242. Energy Efficient Trajectories for an Industrial ABB Robot / K. Paes, W. Dewulf, K. Elst, K. Kellens, P. Slaets // *Procedia CIRP*. – 2014. – Vol. 15. – P. 105–110.
243. Energy-efficient trajectory planning for a class of industrial robots using parallel deep reinforcement learning / Wang X. [et al.] // *Nonlinear Dynamics*. – 2024. – Pp. 1 21.
244. Erleben, K. Solving inverse kinematics using exact Hessian matrices / K. Erleben, S. Andrews // *Computers and Graphics*. – 2019. – Vol. 78. – Pp. 1 11.

245. Extended Jacobian For Redundant Robots Obtained From The Kinematics Constraints / H. Simas, A. Dias, D.Martins [et al.] // Proceedings of COBEM 2011. – 2012.
246. Featherstone, R. Rigid Body Dynamics Algorithms / Roy Featherstone. – New York : Springer, 2008.
247. Featherstone, R. Rigid Body Dynamics Algorithms / Roy Featherstone. – Springer US, 2008.
248. Fritsch, F.N. Monotone Piecewise Cubic Interpolation / F.N. Fritsch, R.E. Carlson // SIAM Journal on Numerical Analysis. – 1980. – Vol. 17. – Pp. 238 246.
249. Frolov, A.V. Installation of automatic welding of elements of ship pipelines / A.V. Frolov // Marine Intellectual Technologies. – 2021. – Vol. 2, № 2 (52). – Pp. 91 96.
250. Generalized functioning algorithm and conceptual description of the main models of a synergetic system based on a collaborative robot / M.A. Gorkavyy, Y.S. Ivanov, M.A. Melnichenko, D.B. Solovev // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2910. – Art. 020149.
251. Genetic Algorithm-Based Trajectory Optimization for Digital Twin Robots / X. Liu, D. Jiang, B. Tao [et al.] // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. – 2022. – Vol. 9. – Art. no. 793782.
252. GitHub, Inc. URL: https://github.com/kuka-isir/iiwa_description (дата обращения: [10.01.2025]).
253. Gorkavyy, M. A. Process automation for robot-based manufacturing components of prospective aviation complexes / M. A. Gorkavyy, V. P. Egorova, A. Y. Efimov // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 200. – P. 187–195.
254. Gorkavyy, M. Development of a system for detecting production parts within the framework of technological processes in the aviation industry / M. Gorkavyy, A. Gudim, A. D. Grabar // International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2024). – 2024. P. 992–997.
255. Gorkavyy, M. Improving collaborative robotic complex efficiency: an approach to the intellectualization of the control system / M. Gorkavyy, Y. Ivanov, S. Sukhorukov, S. Zhiganov, M. Melnichenko, A. Gorkavyy, D. Grabar // Engineering Proceedings. – 2023. – Vol. 33, iss. 1. – Article 18.
256. Gorkavyy, M. Research the potential for energy saving and maximizing productivity in rectilinear transitions of a collaborative robot / M. Gorkavyy, Y. Ivanov, M. Melnichenko // Materials of the International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). – 2024. – P. 912.
257. Gorkavyy, M.A. Conceptual model of intelligent system supporting situation evaluation, forecast and control at power grid companies / M.A. Gorkavyy, A.I. Gorkavyy, V.A. Solovyev // Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Chelyabinsk, 2017. – P. 8076136.
258. Gorkavyy, M.A. Development of RL DDPG agent for planning energy-efficient trajectory of collaborative robot / M.A. Gorkavyy, V.D. Voroshchenko, A.I. Gorkavyy // Materials of the International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). – Sochi, Russia, 2025. – P. 472–476.
259. Gorkavyy, M.A. Identification of the functioning modes of a robotic technological process based on a discrete event model / M.A. Gorkavyy, Y.S. Ivanov, D.M. Grabar // International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2023). – 2023. – P. 796–800.

260. Gorkavyy, M.A. Modeling of operator poses in an automated control system for a collaborative robotic process / M.A. Gorkavyy, V.D. Voroshchenko, A.S. Gudim // International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2023). – 2023. – P. 680–684.
261. Gorkavyy, M.A. Research of the impact of trajectory algorithms interpolation on energy efficiency and operation execution time for collaborative robots / M.A. Gorkavyy, V.D. Voroshchenko, Y.S. Ivanov // Intelligent Systems : Proceedings of the 16th International Conference on Intelligent Systems (INTELS 2024, Moscow, Russia, December 2–4, 2024). – Moscow : Bauman Moscow State Technical University Publishing House, 2025. – P. 285–299. – (Communications in Computer and Information Science ; vol. 1770).
262. Grabar, D.M. Determination of Atomic Actions of a Human Operator in a Collaborative Robotic Environment Using LLM / D.M. Grabar, Y.S. Ivanov, A.S. Gudim // Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2025. – Pp. 777 782.
263. Grabar, D.M. Software and hardware platform development for the synthesis of adaptive algorithms and methods for controlling the behavior of collaborative robotic system / D.M. Grabar, M.A. Gorkavyy, Y.S. Ivanov // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2024). – 2024. – P. 824–830.
264. Hahn, H. Rigid Body Dynamics of Mechanisms : Theoretical Basis / Hubert Hahn. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 2002.
265. Hartono, N. Optimisation of robotic disassembly plans using the Bees Algorithm / N. Hartono, F. Ramírez, D. Pham // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2022. – Vol. 79. – Art. № 102411.
266. Hozdić, E. Concept of socio-cyber-physical work systems for Industry 4.0 / E. Hozdić, P. Butala // Tehnicki vjesnik - Technical Gazette. – 2020. – Vol. 27, no. 2. – P. 339–410.
267. Huang, J. Towards instructional collaborative robots: From video-based learning to feedback-adapted instruction / Jinyi Huang, Xun Xu, Jan Polzer // Journal of Manufacturing Systems. – 2025. – Vol. 83. – Pp. 29 45.
268. HUCOM : a model for human comfort estimation in personalized human–robot collaboration / W. Wang, N. Liu, R. Li, [et al.] // Dyn. Syst. Control Conf. – 2018. – Vol. 51906. – Art. V002T23A006.
269. Human factor modelling in the collaborative robotic process control system / M.A. Gorkavyy, Y.A. Tyurina, Y.S. Ivanov, D.M. Grabar // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): Proceedings. – Sochi, 15–19 May 2023. – P. 954–960.
270. Human Robot Collaboration in Industrial Environments / G. Michalos, P. Karagiannis, N. Dimitropoulos [et al.] // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – Vol. 1378. – P. 19–26.
271. Human robot collaboration in industrial environments / G. Michalos, P. Karagiannis, N. Dimitropoulos [et al.] // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – Vol. 1378. – P. 19–26.
272. Human–robot collaborative handling of curtain walls using dynamic motion primitives and real-time human intention recognition / F. Li, H. Sun, E. Liu [et al.] // Biomimetic Intelligence and Robotics. – 2024. – Art. 100183.

273. Hybrid approach to synthesis of electromechanical block control system of mechatronic module / A.I. Gorkavyy, M.A. Gorkavyy, M.A. Melnichenko, A.A. Kuznetsov // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2700. – Art. 040010.
274. Hybrid model process design of joint operator-robot interaction within a synergistic system / M. A. Gorkavyy, Y. S. Ivanov, D. M. Grabar, D. B. Solovev // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2910, iss. 1. – Art. 020150.
275. Improved particle swarm optimization for parameter identification of permanent magnet synchronous motor / S. Zhou, D. Wang, Y. Ni, Keling Song [et al.]// Computers, Materials and Continua. – 2024. – Vol. 79, Iss. 2. – Pp. 2187 2207.
276. Improving the efficiency of automated precision robotics-enabled positioning and welding / A.Y. Efimov, M.A. Gorkavyy, A.I. Gorkavyy, D.B. Solovev // Proceedings of the International Science and Technology Conference «EastConf». – Vladivostok, 2019. – P. 8725362.
277. Improving the functioning of the cybernetic control system of the mechatronic module of the robotic complex / A. I. Gorkavyy, M. A. Gorkavyy, M. A. Melnichenko, A. V. Berkh // Informatics and Cybernetics in Intelligent Systems. Proceedings of 10th Computer Science On-line Conference 2021, Vol. 3: Proceedings of 10th Computer Science On-line Conference, online, 2021. – P. 702–709.
278. Industry 5.0: A Transformative Vision for Europe : [Официальное издание Европейской комиссии] / Directorate General for Research and Innovation ; European Commission. – Brussels, 2022. – ISBN 978 92 76 43352 1.
279. Intelligent system for prognostication and optimization of power expenses of technological processes at robotized productions / M.A. Gorkavyy, A.S. Gudim, A.Y. Efimov, D.B. Solovev // Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, 2018. – P. 8602503.
280. Joint angle synergy-based humanoid robot motion generation with fascia-inspired nonlinear constraints / S. Yu, Y. Nakata, Y. Nakamura [et al.] // Robotica. – 2024. – Vol. 42. – P. 2566–2588.
281. Kabir, A.M. Trajectory planning for manipulators operating in confined workspaces / A.M. Kabir, B.C. Shah, S.K. Gupta // IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). – 2018. – Pp. 84 91.
282. Kahaner, David; Moler, Cleve; Nash, Stephen. Numerical Methods and Software. – Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 1988.
283. Kopp, T. Success factors for introducing industrial human robot interaction in practice: an empirically driven framework / T. Kopp, M. Baumgartner, S. Kinkel // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 112. – Pp. 685 704.
284. KoPro - Configurable process chains for human-robot collaborative assembly / P. Kranz, F. Schirmer, A. Müller [et al.] // ER 2023: Companion Proceedings of the 42nd International Conference on Conceptual Modeling : conference proceedings, Lisbon, Portugal, November 6–9, 2023. – New York, NY : ACM, 2024. – Art. no. 15.

285. KR AGILUS sixx V variants of execution W and C : operating instructions. – Augsburg: KUKA Roboter GmbH, 2015.
286. Kuffner, J.J. RRT Connect: An Efficient Approach to Single Query Path Planning / J.J. Kuffner, S.M. LaValle // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. – San Francisco, CA, USA, 2000. – Vol. 2. – Pp. 995–1001.
287. KUKA Robots LBR iiwa 7 R800 : Specification / KUKA Laboratories GmbH. – Issued: 16 10 2014.
288. KUKA youBot User Manual: [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://github.com/ChefOtter/youbot_documentation/blob/master/KUKA-youBot_UserManual.pdf (дата обращения: 22.07.2026). – Загл. с экрана.
289. Kumpanya, D. Parameter identification of BLDC motor model via metaheuristic optimization techniques / D. Kumpanya, S. Thaiparnat, D. Puangdownreong // Procedia Manufacturing. – 2015. – Vol. 4. – Pp. 322–327.
290. Li, S. Research on planning and optimization of trajectory for underwater vision welding robot / S. Li, X. Zhang // Array. – 2022. – Vol. 16. – Art. 100253.
291. Liang, J. Path Planning of Multi-Axis Robotic Arm Based on Improved RRT* / J. Liang, W. Luo, Y. Qin // Computers, Materials and Continua. – 2024. – Vol. 81, Iss. 1. – Pp. 1009–1027.
292. Luo, S. Reinforcement Learning in Robotic Motion Planning by Combined Experience-based Planning and Self-Imitation Learning / S. Luo, L. Schomaker // arXiv.org. – 2023. – Art. no. 2306.06754.
293. Lynch, K.M. Modern Robotics: Mechanics, Planning and Control / Kevin M. Lynch, Frank C. Park. – Cambridge : Cambridge University Press, 2017.
294. Machine learning meets advanced robotic manipulation / S. Nahavandi, R. Alizadehsani, D. Nahavandi [et al.] // Information Fusion. – 2024. – Vol. 105. – Art. 102221.
295. Machine learning-based framework for optimally solving the analytical inverse kinematics for redundant manipulators / M.N. Vu, F. Beck, M. Schwegel, [et al.] // Mechatronics. – 2023. – Vol. 91. – Art. 102970.
296. Manipulator trajectory optimization using reinforcement learning on a reduced-order dynamic model with deep neural network compensation / Chen Y.H. [et al.] // Machines. – 2023. – Vol. 11, Iss. 3. – Art. 350.
297. Mashayekhi, A. Identification and optimization of the operator's hand and a haptic device dynamic, using artificial intelligence methods / A. Mashayekhi, M. Mashayekhi, B. Siciliano // International Journal of Dynamics and Control. – 2023. – Vol. 11. – P. 1–10.
298. MATLAB: [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com> (дата обращения: [06.06.2025]). – Загл. с экрана.
299. Melnichenko, M. A. Combined control in the system with modal pi-regulator / M. A. Melnichenko, A. I. Gorkaviy, M. A. Gorkaviy // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 200. – P. 507–517.
300. Melnichenko, M.A. Mathematical description of atypical scenarios in a robotic process discrete event model / M.A. Melnichenko, A.I. Kucheroва, M.A. Gorkavyi // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2025): Conference Proceedings. – Sochi, 2025. – P. 649–654. – (Lecture Notes in Mechanical Engineering ; vol. 11236).

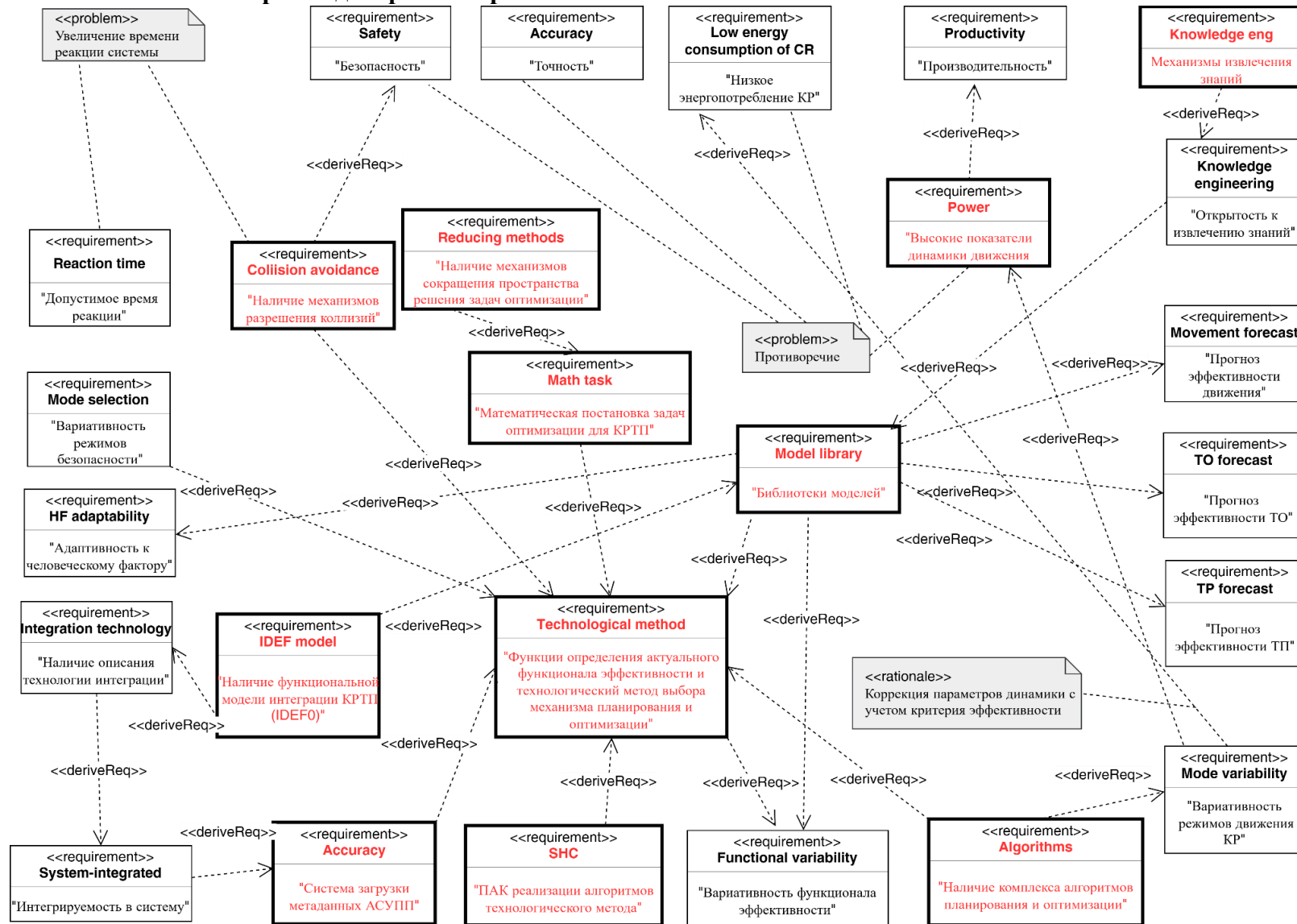
301. Micheler, S. A transformation of human operation approach to inform system design for automation / S. Micheler, Y. M. Goh, N. Lohse // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2021. – Vol. 32. – P. 1789–1805.
302. Minimization of the energy consumption in industrial robots through regenerative drives and optimally designed compliant elements / I. Palomba, E. Wehrle, G. Carabin, R. Vidoni // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2020. – Vol. 10, Iss. 21. – Art. № 7475. – Pp. 1 18.
303. Mirning, N. To Err Is Robot : How Humans Assess and Act toward an Erroneous Social Robot / N. Mirning, G. Stollnberger, M. Miksch // *Frontiers in Robotics and AI. Sec.: Humanoid Robotics*. – 2017. – 31 May.
304. Modular Deep Q Networks for Sim-to-real Transfer of Visuo-motor Policies / F. Zhang, J. Leitner, M. Milford, P. Corke // *arXiv.org*. – 2017. – Art. no. 1707.04389.
305. Monforte, M. Multifunctional Principal Component Analysis for Human-Like Grasping / M. Monforte, F. Ficuciello, B. Siciliano // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2019. – Vol. 1037. – P. 35–43.
306. Morrison, D. Learning robust, real-time, reactive robotic grasping / D. Morrison, P. Corke, J. Leitner // *The International Journal of Robotics Research*. – 2019. – Vol. 39. – Art. no. 0278364919859066.
307. Multimodal Integration of Emotional Signals from Voice, Body, and Context: Effects of (In)Congruence on Emotion Recognition and Attitudes Towards Robots / C. Tsiourti, A. Weiss, K. Wac [et al.] // *International Journal of Social Robotics*. – 2019. – Vol. 11, Iss. 2. – Pp. 555 573.
308. Multi-Prioritized Torque-Based Control Framework with Cartesian and Joints Constraints and its Medical Robotics Application / G. Esposito, V. Schettino, V. Perfetta, B. Siciliano [et al.] // *19th International Symposium on Experimental Robotics (ISER 2025) : conference proceedings, Santa Fe, NM, USA, July 6–11, 2025*. – Cham : Springer, 2025.
309. Neuromorphic vision based control for the precise positioning of robotic drilling systems / A. Ayyad, M. Halwani, D. Swart [et al.] // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2023. – Vol. 79. – Art. 102419.
310. Nocedal, J. Numerical optimization / J. Nocel, S. J. Wright. – New York, NY : Springer, 1999. — 654 p.
311. No-code robotic programming for agile production: A new markerless-approach for multimodal natural interaction in a human-robot collaboration context / J. Halim, P. Eichler, S. Krusche [et al.] // *Frontiers in Robotics and AI*. – 2022. – Vol. 9. – Art. no. 1001955.
312. Nokleby, S.B. Reciprocity-based resolution of velocity degeneracies singularities for redundant manipulators / S.B. Nokleby, R.P. Podhorodeski // *Mechanism and machine theory*. – 2001. – Vol. 36. – Pp. 397 409.
313. Nondestructive identification of softness via bioinspired multisensory electronic skins integrated on a robotic hand / Y. Qiu, S. Sun, X. Wang [et al.] // *Flexible Electronics*. – 2022. – Vol. 6. – Art. no. 45.
314. OMG Systems Modeling Language™. Version 1.5 : [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.omg.org/spec/SysML/1.5> (дата обращения: 12.06.2025)). – Загл. с экрана.
315. Open Robotics. Документация ROS 2 (Rolling Ridley) [Электронный ресурс] / Open Robotics. — Электронные данные. — Режим доступа: <https://docs.ros.org/en/rolling/index.html>, свободный. — Загл. с экрана. — Дата обращения: 27.07.2026.

316. Optimal time-jerk trajectory planning for industrial robots / J. Huang, P. Hu, K. Wu, [et al.] // *Mechanism and Machine Theory*. – 2018. – Vol. 121. – Pp. 530–544.
317. Optimisation process for robotic assembly of electronic components / K.T. Andrzejewski, M.P. Cooper, C.A. Griffiths, C. Giannetti // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 99, Iss. 9–12. – Pp. 2523–2535.
318. Optimising robot motion planning through the integration of diverse process simulation tools / F. McEntegart, A. K. Ramasubramanian, M. Zeinali [et al.] // *Procedia CIRP*. – 2025. – Vol. 136. – P. 918–923.
319. Optimization of sliding mode control to save energy in a SCARA robot / L.A. Soriano, J.J. Rubio, E. Orozco [et al.] // *Mathematics*. – 2021. – Vol. 9, Iss. 24. – Art. № 3160.
320. Optimization of technological parameters of robotized mechanical processing processes of aviation products / A. Y. Efimov, M. A. Gorkavyy, V. P. Egorova, A. I. Gorkavyy // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2021. – Vol. 200. – P. 204–215.
321. Parisi, F. Optimal Trajectory Planning for a Robotic Manipulator Palletizing Tasks / F. Parisi, A.M. Mangini, M.P. Fanti // *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. – 2020. – Pp. 2901–2906.
322. Path Planning of 6-DOF Free-Floating Space Robotic Manipulators Using Reinforcement Learning / A. Al Ali, J.-F. Shi, J. Shi, Z. H. Zhu // *Acta Astronautica*. – 2024. – Vol. 224. – P. 367–378.
323. Pick the right co-worker: online assessment of cognitive ergonomics in human-robot collaborative assembly / M. Lagomarsino, M. Lorenzini, P. Balatti [et al.] // *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*. – 2022. – Vol. PP. – P. 1–11.
324. Plan a Reaching Trajectory with Kinematic Constraints: [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/robotics/ug/plan-a-reaching-trajectory-with-kinematic-constraints.html> (дата обращения: 22.07.2026). – Загл. с экрана.
325. Planning optimal minimum-jerk trajectories for redundant robots / F. Lozer, L. Scalera, P. Boscariol [et al.] // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2025. – Vol. 192. – Art. 105049.
326. Polynomial-Based Smooth Trajectory Planning for Fruit-picking Robot Manipulator / H. Wang, Q. Zhao, H. Li, R. Zhao // *Information Processing in Agriculture*. – 2021. – Vol. 9. – Art. 100001.
327. Qin, L. Recent progress and challenges of key technologies in robotic assembly / L. Qin // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. – 2026. – Vol. 39. – Art. 100032.
328. Recurrent neural network for motion trajectory prediction in human robot collaborative assembly / J. Zhang, H. Liu, Q. Chang [et al.] // *CIRP Annals*. – 2020.
329. Reinforcement Learning Toolbox™: [Электронный ресурс] / MathWorks. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/products/reinforcement-learning.html> (дата обращения: [12.12.2025]).
330. Reyes, M. Robotics facial expression of anger in collaborative human–robot interaction / M. Reyes, I. Meza, L. Pineda // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. – 2019. – Vol. 16, No. 1.
331. Robot learning towards smart robotic manufacturing: A Review / Z. Liu, Q. Liu, W. Xu [et al.] // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2022.

347. Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications / V. Villani, F. Pini, F. Leali [et al.] // *Mechatronics*. – 2018. – Vol. 55. – P. 248–266.
348. Synthesis of an adaptive system for diagnosing the quality of automated welding products / V.P. Egorova, M.A. Gorkavyy, A.Y. Efimov, D.B. Solovev // *Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. – Vladivostok, 2019. – P. 8934286.
349. Synthesis of an optimally-modal PI-regulator in a position control system of mechatronic module / M.A. Melnichenko, A.I. Gorkaviy, M.A. Gorkaviy, D.B. Solovev // *Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. – Vladivostok, 2020. – P. 9271322.
350. Synthesis of modal PI-regulator with multiple integration / A.I. Gorkaviy, M.A. Gorkaviy, M.A. Melnichenko, D.B. Solovev // *Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. – Vladivostok, 2019. – P. 8934225.
351. Target recognition of industrial robots using machine vision in 5G environment / Z. Jin, L. Liu, D. Gong, L. Li // *Frontiers in Neurorobotics*. – 2021. – Vol. 15.
352. Task Space Trajectory Planning for Robot Manipulators to Follow 3-D Curved Contours / J. Kim, M. Jin, S. H. Park [et al.] // *Electronics*. – 2020. – Vol. 9, no. 9. – Art. no. 1424.
353. Terei, N. ROS-Based Control of an Industrial Micro Assembly Robot / N. Terei, R. Wiemann, A. Raatz // *Procedia CIRP*. – 2024. – Vol. 130. – Pp. 909 914.
354. The integration of collaborative robot systems and their environmental impacts / L.S. Grigore, I. Priescu, D. Joita, I. Oncioiu // *Processes*. – 2020. – Vol. 8, Iss. 4. – Art. № 494.
355. Time Optimal Path Planning for Industrial Robots Using STL Data Files / E. Abele, F. Haehn, M. Pischman, F. Herr // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 55. – Pp. 6 11.
356. Towards dynamic human–robot collaboration: a holistic framework for assembly planning / F. Schirmer, P. Kranz, C. Rose [et al.] // *Electronics*. – 2025. – Vol. 14, no. 1. – Art. no. 190.
357. Towards efficient human-robot collaboration with robust plan recognition and trajectory prediction / Y. Cheng, L. Sun, C. Liu, M. Tomizuka // *IEEE Robotics and Automation Letters*. – 2020. – Vol. 5, No. 2. – Pp. 2602 2609.
358. Tuli, T. Real Time Motion Tracking for Humans and Robots in a Collaborative Assembly Task / T. Tuli, M. Manns // *Proceedings of the European Control Conference (ECC)*. – 2019. – Vol. 42. – Art. 06636.
359. Tyatyushkina, O.Yu. Quantum software industrial engineering and intelligent cognitive robotics in Industry 4.0 as control objects - prototypes of Industry 5.0 models: Introduction / O.Yu. Tyatyushkina, S.V. Ulyanov // *Системный анализ в науке и образовании*. – 2023. – № 1. – Pp. 46 94.
360. Ulyanov, S. V. Industrial robotic intelligent robust control system: applying quantum soft computing technologies and quantum software engineering in unpredicted control situations / S. V. Ulyanov, A. G. Reshetnikov, D. P. Zrelova // *Software & Systems*. – 2023. – No. 1. – P. 26–45.

361. Using an Ensemble of Deep Neural Networks to Detect Human Keypoints in the Workspace of a Collaborative Robotic System / Y. Ivanov, S. Zhiganov, M. Gorkavyi [et al.] // *Engineering Proceedings*. – 2023. – Vol. 33. – Art. no. 19.
362. Vaisi, B. A review of optimization models and applications in robotic manufacturing systems: Industry 4.0 and beyond // *Decision Analytics Journal*. – 2022. – Vol. 2, Art. 100031.
363. ValkyrieRobot.jl: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/tkoolen/ValkyrieRobot.jl> (дата обращения: 27.06.2026). – Загл. с экрана.
364. Vision-Based Reaching Using Modular Deep Networks: from Simulation to the Real World / F. Zhang, J. Leitner, B. Upcroft, P. Corke // *arXiv.org*. – 2016. – Art. no. 1610.06781.
365. Voroshchenko, V.D. Development of an automation module for planning trajectories for painting aircraft fuselage elements / V.D. Voroshchenko, M.A. Gorkavyi, A.S. Gudim // *Advances in Automation VI (RusAutoCon 2024) : Conference Proceedings*. – Springer, 2025. – P. 75–84. – (Lecture Notes in Electrical Engineering ; vol. 1324).
366. Webots Reference Manual: [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://cyberbotics.com/doc/reference/robot?tab-language=python#!> (дата обращения: 22.07.2026). – Загл. с экрана.
367. Woliński, L. An inverse kinematics solution with trajectory scaling for redundant manipulators / L. Woliński, M. Wojtyra // *Mechanism and Machine Theory*. – 2024. – Vol. 191. – Art. 105493.
368. Yan, Y. A Review on Human Comfort Factors, Measurements, and Improvements in Human–Robot Collaboration / Y. Yan, Y. Jia // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, Iss. 19.
369. Yao, J. RRT algorithm learning and optimization / Jiajun Yao // *Applied and Computational Engineering*. – 2024. – № 53. – Pp. 296–302.
370. Yin, S. A machine learning based energy efficient trajectory planning approach for industrial robots / S. Yin, Ji, W., Wang, L. // *Procedia CIRP*. – 2019.
371. Yin, Sh. Collaborative robot - surgeon assistant / Sh. Yin, A. S. Yuschenko // *Extreme Robotics*. – 2019. – No. 1(30). – P. 568–575.
372. Yu, T. Reinforcement Learning Based User-Guided Motion Planning for Human-Robot Collaboration / T. Yu, Q. Chang // *arXiv.org*. – 2022. – Art. no. 2207.00492.
373. Zhiganov, S. V. Investigation of Neural Network Algorithms for Human Movement Prediction Based on LSTM and Transformers / S. V. Zhiganov, Y. S. Ivanov, D. M. Grabar // *Doklady Mathematics*. – 2023. – Vol. 108, Suppl. 2. – P. S484–S493.
374. Zhou, Y. A Scientometric Review of Soft Robotics: Intellectual Structures and Emerging Trends Analysis (2010–2021) / Yitong Zhou, Haonan Li // *Frontiers in Robotics and AI*. – 2022.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Расширение диаграммы требований



ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Функциональная модель процесса разработки синергетической системы

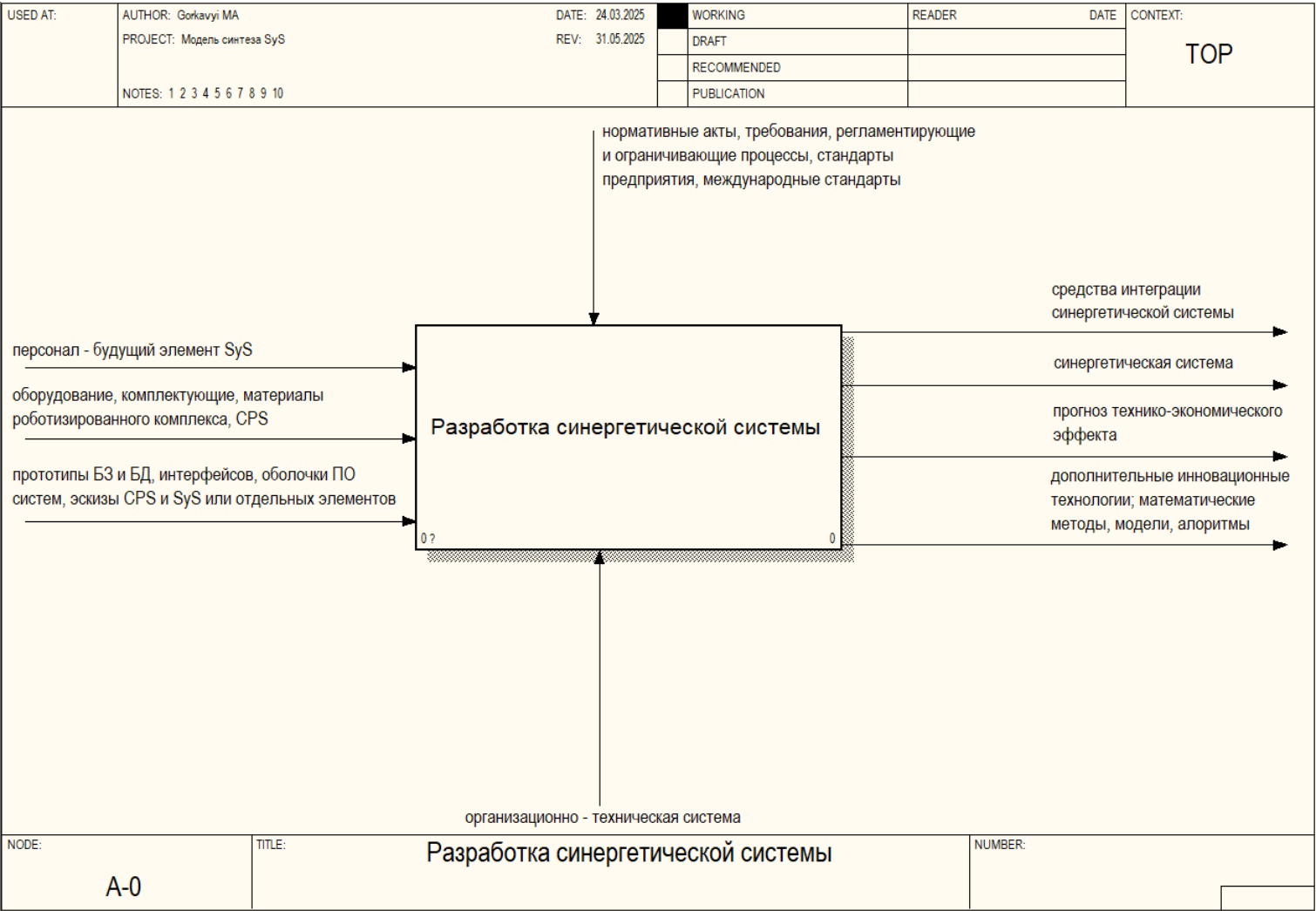


Рис. Б.1 – Контекстный уровень A0 функциональной модели синтеза синергетической системы

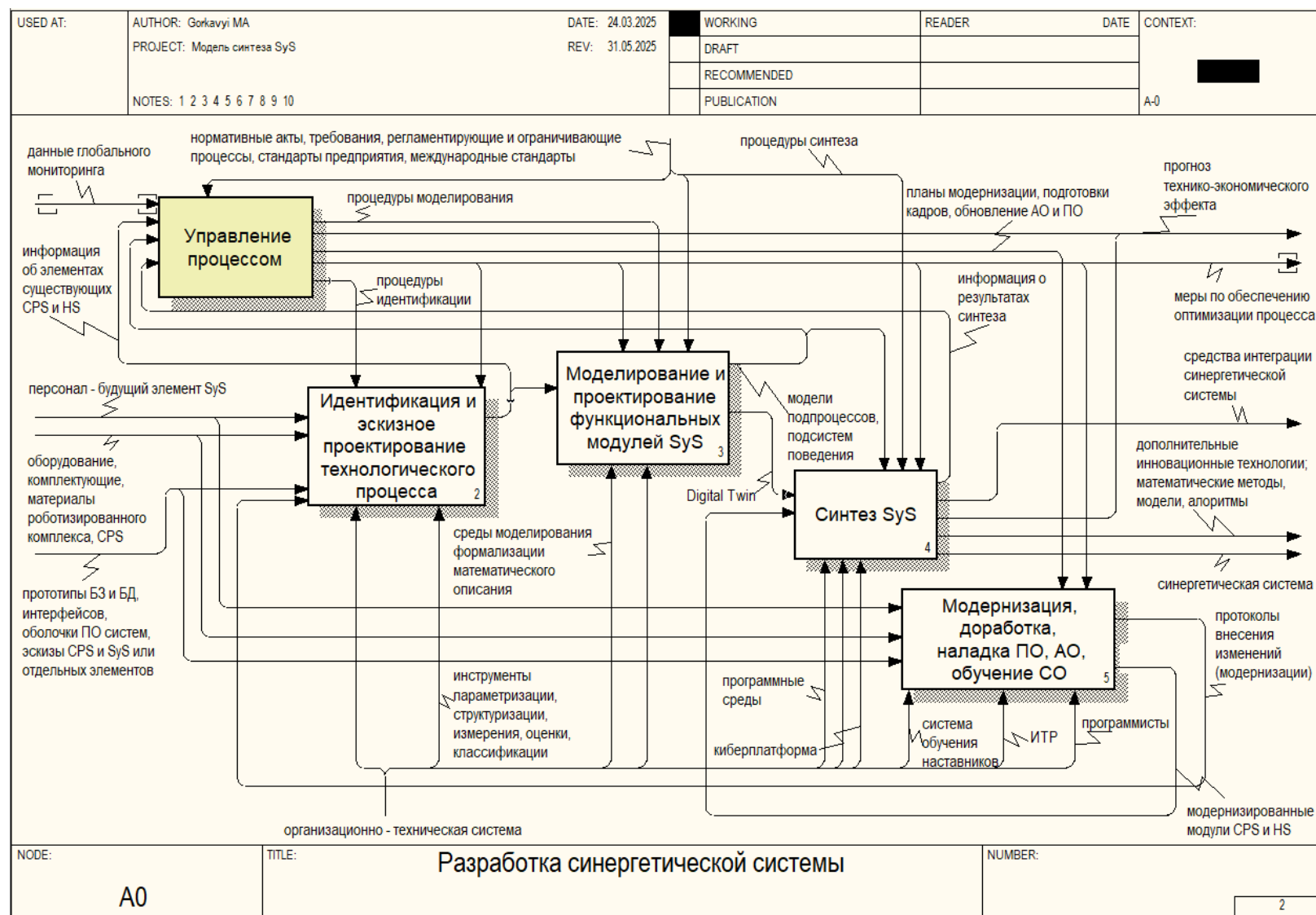


Рис. Б.2 – Уровень A0 функциональной модели синтеза синергетической системы

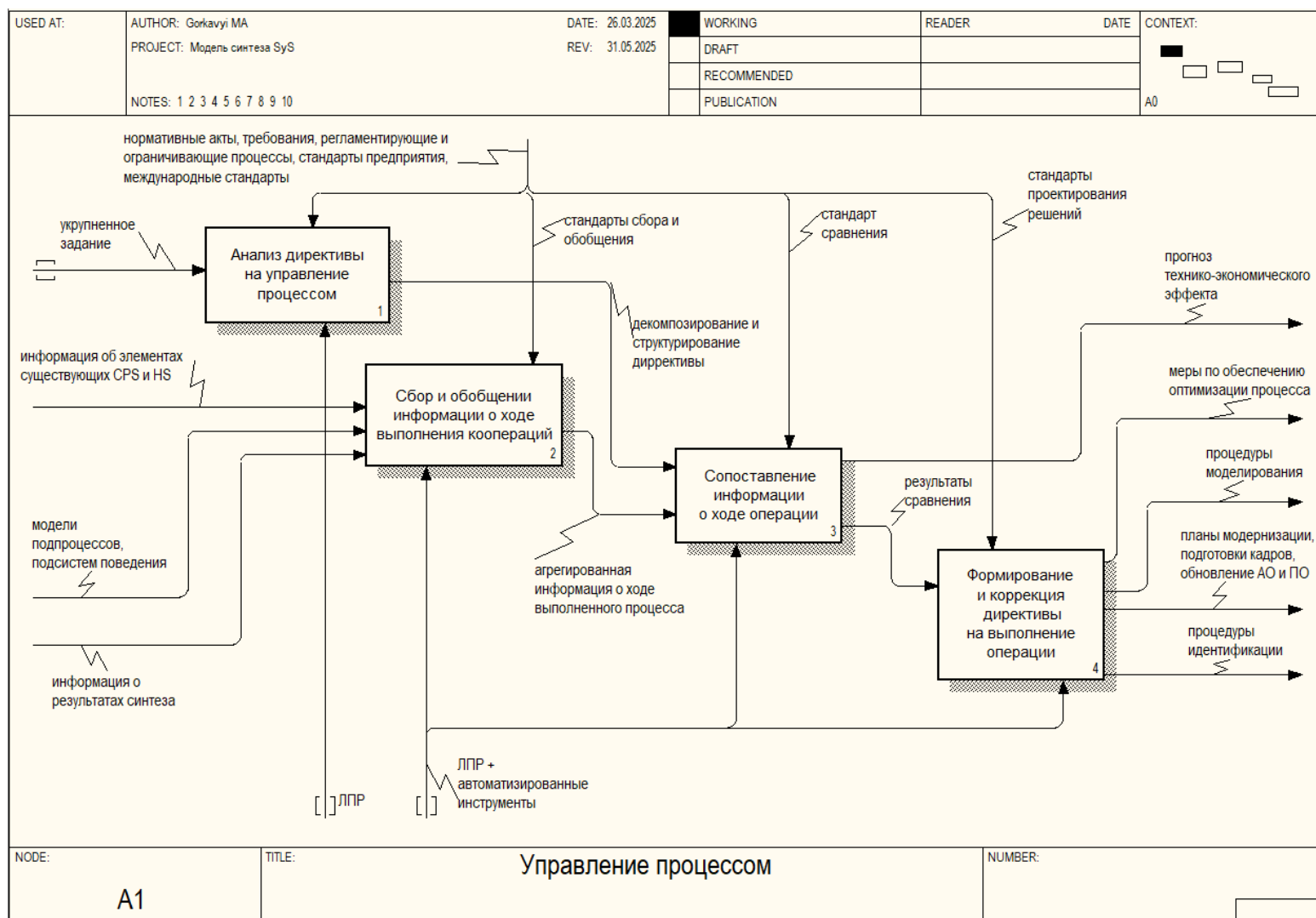


Рис. Б.3 – Декомпозиция процесса A1 «Управление процессом»

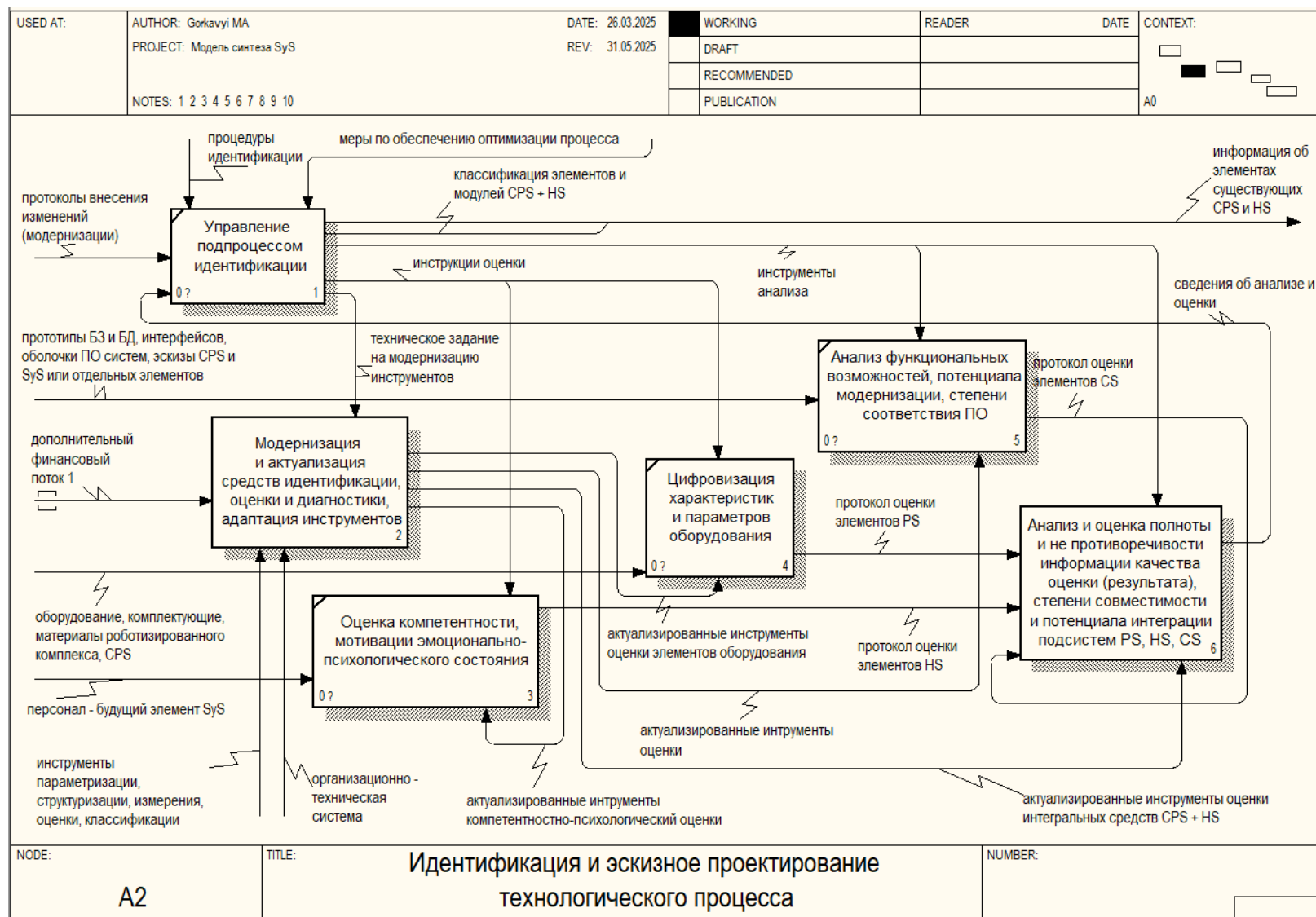


Рис. Б.4 – Декомпозиция процесса А2 «Идентификация и эскизное проектирование ТП»

Рис. Б.5 – Декомпозиция процесса АЗ «Моделирование и проектирование функциональных модулей SyS»

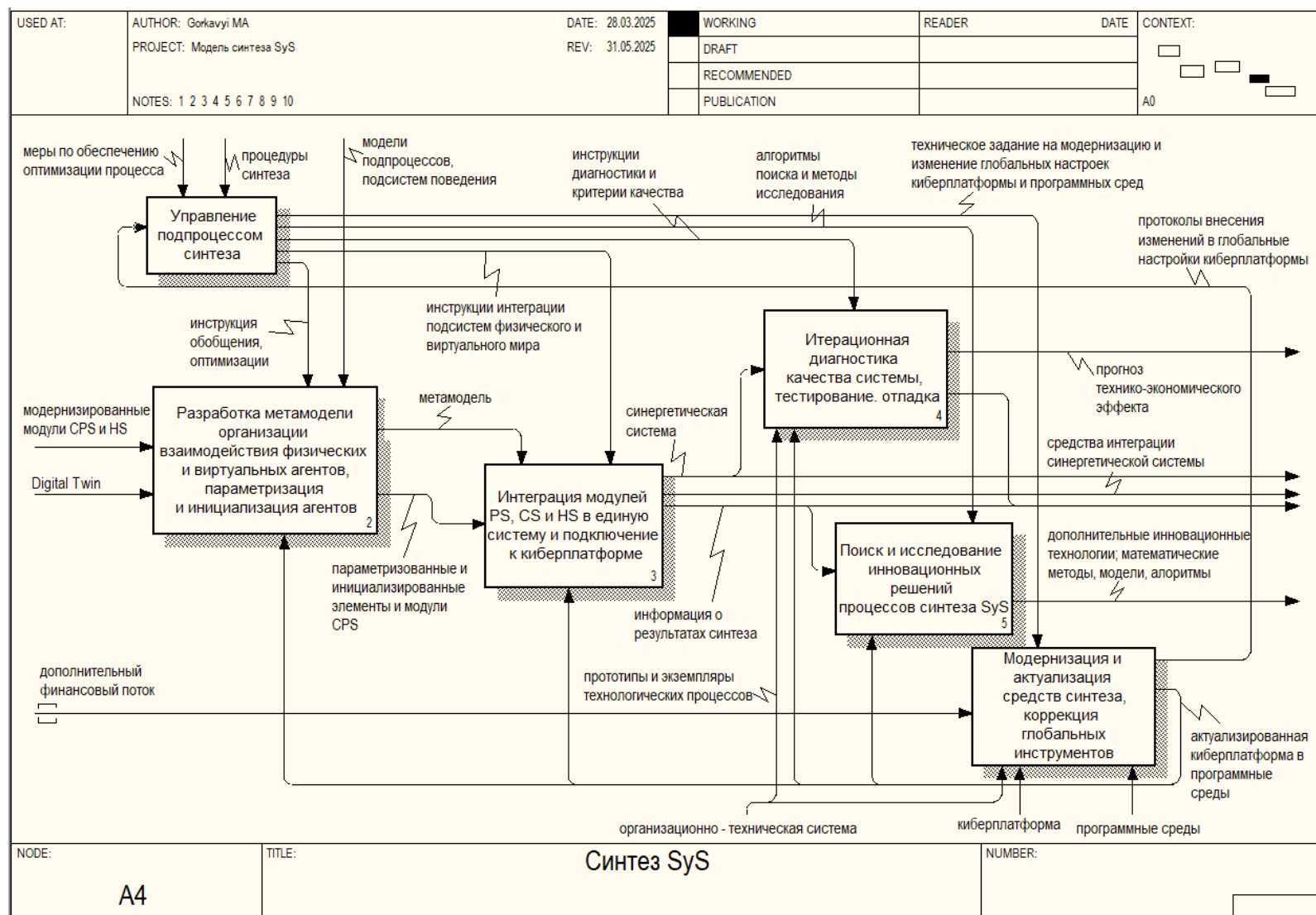


Рис. Б.6 – Декомпозиция процесса A4 «Синтез синергетической системы»

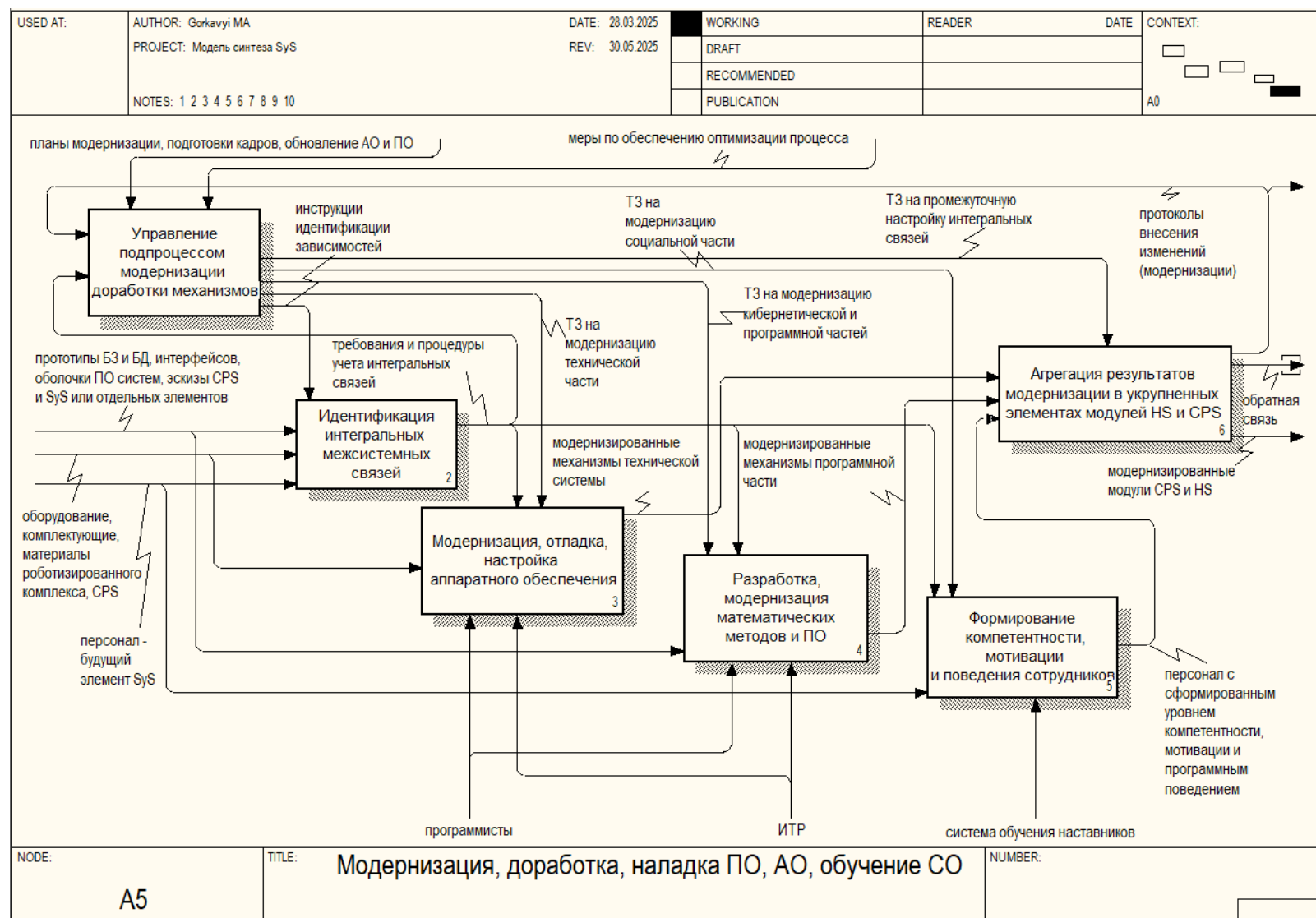


Рис. Б.7 – Декомпозиция процесса А5 «Модернизация, доработка, наладка, ПО, АО, обучение и тренировка СО»

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Акты внедрения

Акт внедрения ПАО «ОАК» Комсомольский-на-Амуре авиационный завод имени Ю.А. Гагарина

АКТ

об использовании интеллектуальных моделей, методов и алгоритмов
повышения эффективности функционирования роботизированных
технологических процессов

Настоящим подтверждаем, что при проектировании средств модернизации АСУ ТП камеры роботизированной покраски на базе манипуляторов серии ABB IRB 5500-22 в гальваническом цехе 96 Филиала Публичного акционерного общества «Объединенная авиастроительная корпорация» – Комсомольский – на – Амуре авиационный завод имени Ю.А. Гагарина использовались методы и алгоритмы повышения энергетической эффективности роботизированных устройств и производительности технологических комплексов, разработанные в диссертации Горькавого М.А. при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-71-10093 от 29.07.2022 «Разработка и синтез перспективных мультимодальных адаптивных алгоритмов и методов управления поведением коллаборативных робототехнических систем с учетом нештатных ситуаций и экстремальных условий в недетерминированной среде», в частности:

- модели, методы и алгоритмы построения цифровых интеллектуальных систем управления производственными процессами, учитывающих человеко-машинное взаимодействие;
- алгоритмы планирования оптимальных траекторий перемещения роботов в рамках специализированных интеллектуальных систем управления производственными процессами предприятия авиационной промышленности, в том числе на базе технологий RL, позволяющий реализовать предложенный адаптивный интеллектуальный метод поиска оптимальных комплексов траекторий по критериям «энергоэффективность», «производительность», «безопасность».

Апробация предложенных решений в задачах оптимизации роботизированных технологических процессов демонстрирует целесообразность интеллектуализации промышленных роботизированных систем с целью увеличения производительности и сокращения издержек на производство.

Главный научный сотрудник –
руководитель научно-производственного
инжинирингового центра, канд. техн. наук,
доцент

Р.Ф. Крупский

Подпись Крупского Р.Ф. заверяю,
Начальник ОК

Корсунов А.М.



Акт внедрения ПАО «Амурский судостроительный завод»



ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«АМУРСКИЙ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫЙ
ЗАВОД» (ПАО «АСЗ»)
ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР

Аллея Труда, 1, г. Комсомольск-на-Амуре, 681000,
тел: +7(4217)57-34-83, 54-13-88, 59-11-12,
Факс: +7(4217)54-91-00, 57-30-00;
email@amurshipyard.ru, www.aszkmsrf
ОКПО 08848824, ОГРН 1022700514605,
ИНН 2703000015

АКТ

об использовании
научных результатов диссертационной работы
Горькавого Михаила Александровича

Мы, нижеподписавшиеся, заместитель главного инженера ПАО «Амурский судостроительный завод» Илья Иванович Айрих и заместитель начальника инженерного управления Александр Викторович Кравченко подтверждаем, что результаты, полученные в диссертационной работе Горькавого Михаила Александровича на тему «Теоретические основы управления и методология проектирования оптимальных коллаборативных роботизированных технологических процессов в недетерминированной среде», могут быть использованы при модернизации существующих и проектировании новых технологических процессов ПАО «Амурский судостроительный завод» с применением роботизированных технологических комплексов и автоматизированных систем управления в целях повышения общей эффективности механообрабатывающих и механосборочных производств предприятия.

Заместитель главного инженера

ПАО «Амурский судостроительный завод»

/И.И. Айрих/

17.08.26

Заместитель начальника ИУ

ПАО «Амурский судостроительный завод»

/А.В. Кравченко/



Акт внедрения Ф

ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

УТВЕРЖДАЮ:

И.о. проректора по научной работе

А. В. Космыгин/

« 10 »



AKT

АКТ
о внедрении в учебный процесс

Комиссия в составе председателя: декана ФЭУ, доцента Гудима А.С. и членов комиссии: доцента кафедры ПЭИТ, доцента Копытова С.М., доцента кафедры ПЭИТ, доцента Марущенко С.Г., доцента кафедры ПЭИТ, доцента Ивановой Е.П., составили настоящий акт в том, что с 2023 года в Комсомольском-на-Амуре государственном университете внедрены в учебный процесс кафедры ПЭИТ для направлений подготовки 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника», профиль «Промышленная электроника»; 27.04.04 «Управление в технических системах», профиль «Управление инновациями в производственных системах» результаты диссертационной работы Горькавого М.А.

Вид внедренных результатов:

- Вид внедренных результатов:
1. Алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированных систем управления коллаборативными роботизированными технологическими процессами;
 2. Теоретические основы формализованного описания, моделирования, управления и метод проектирования оптимальных коллаборативных роботизированных технологических процессов.

Результаты используются в курсах «Управление производственными процессами», «Анализ и синтез автоматизированных систем», «Интеллектуальные системы управления технологическими и производственными процессами» а также в курсовом проектировании и при выполнении ВКР и магистерских диссертаций.

Подпись председателя комиссии:

Подпись председ
члены комиссии:

/А.С. Гудим/

/С.М. Копытов /

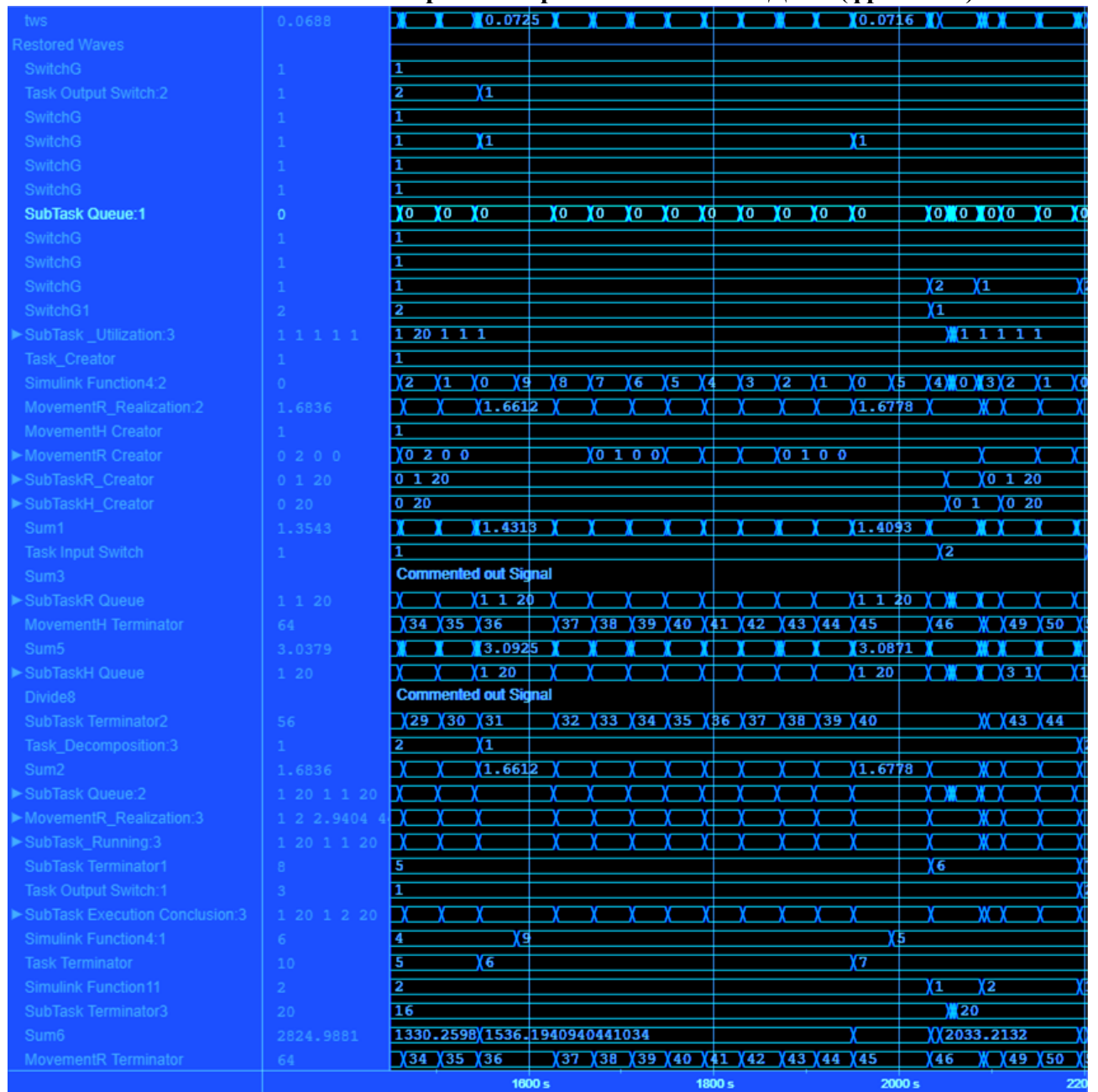
— /С.М. Копытов /
— /С.Г. Марущенко/

/Е.П. Иванкова /

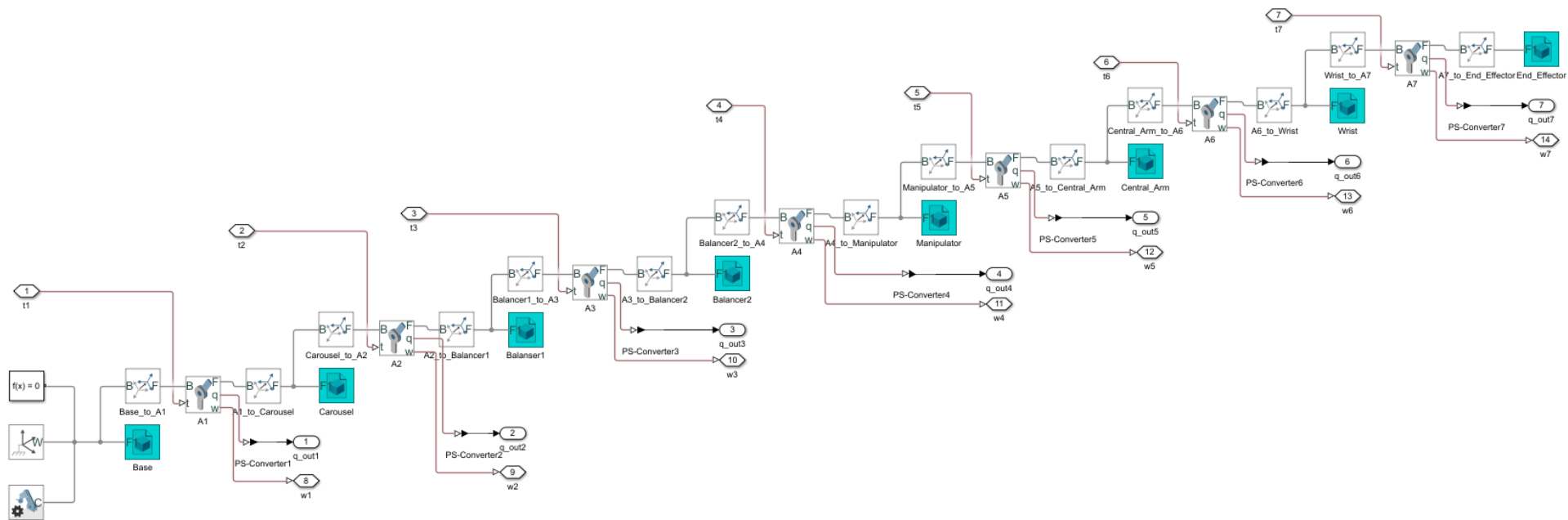
/Е.П. Иванко
/Г.В. Нагаев/

Зам. начальника УМУ

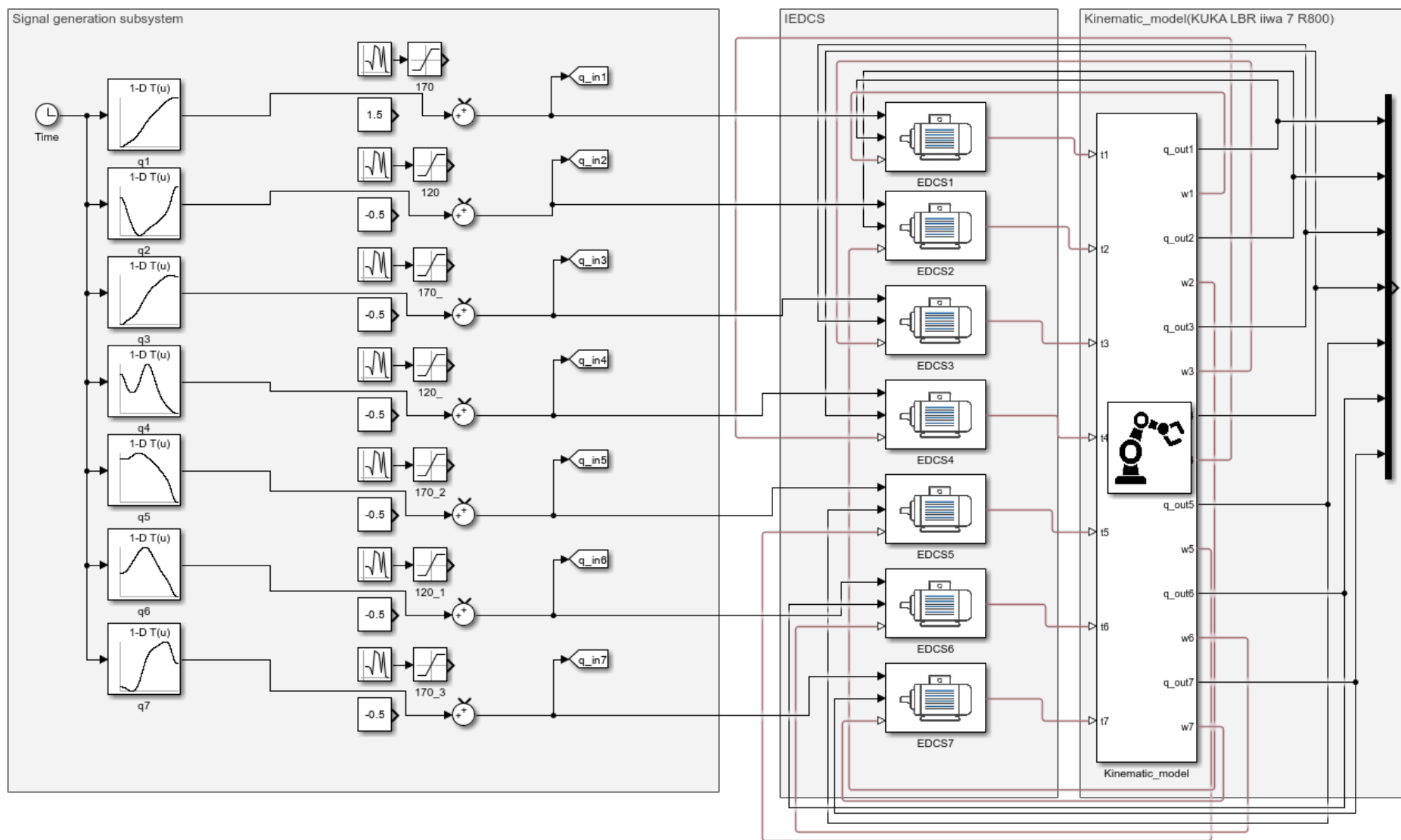
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Логика режимов работы элементов ДСМ (фрагмент)



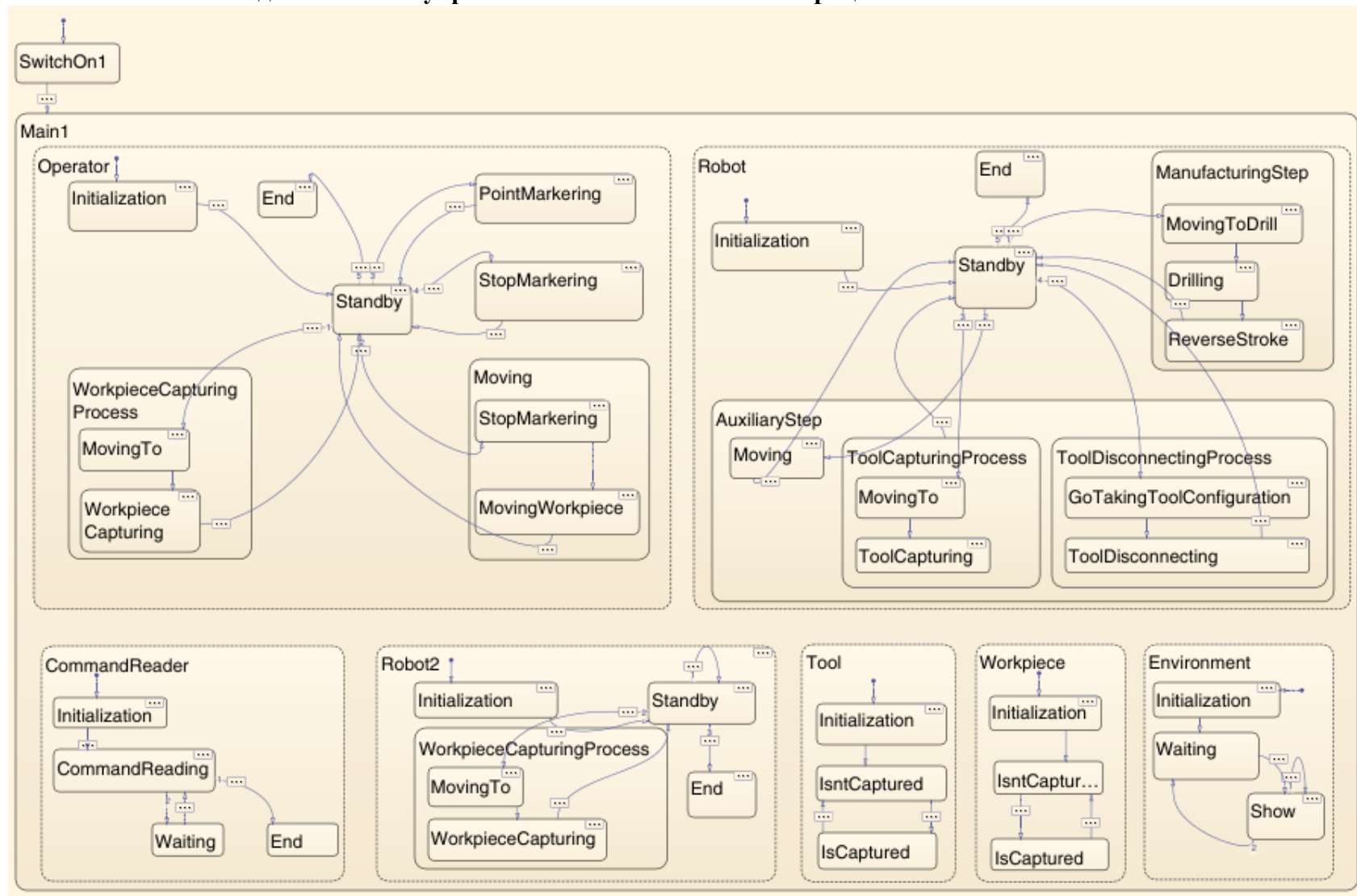
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Кинематическая модель KUKA LBR IIWA 7 R800



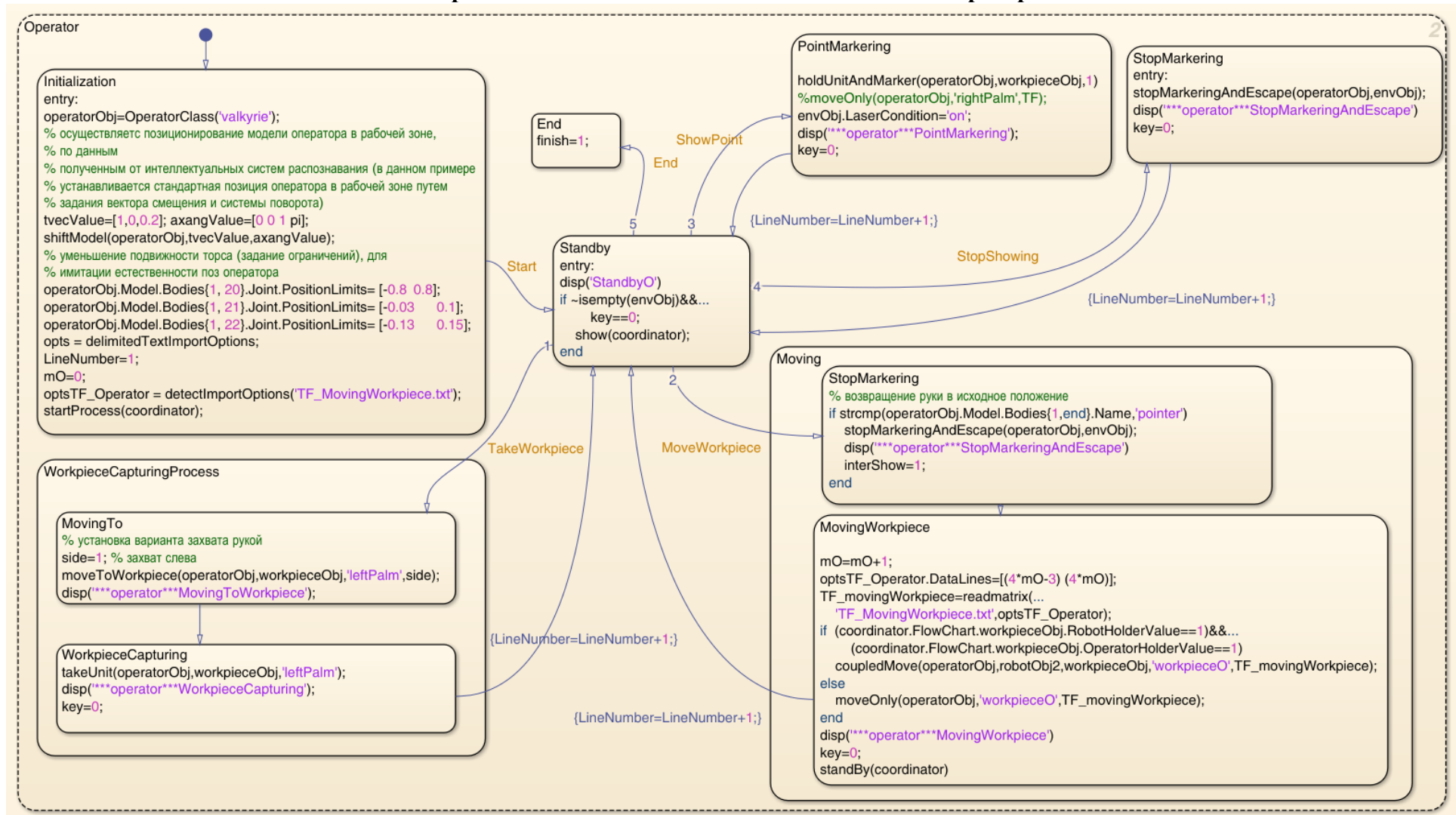
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Структурная схема имитационной модели КР KUKA LBR iiwa 7 R800



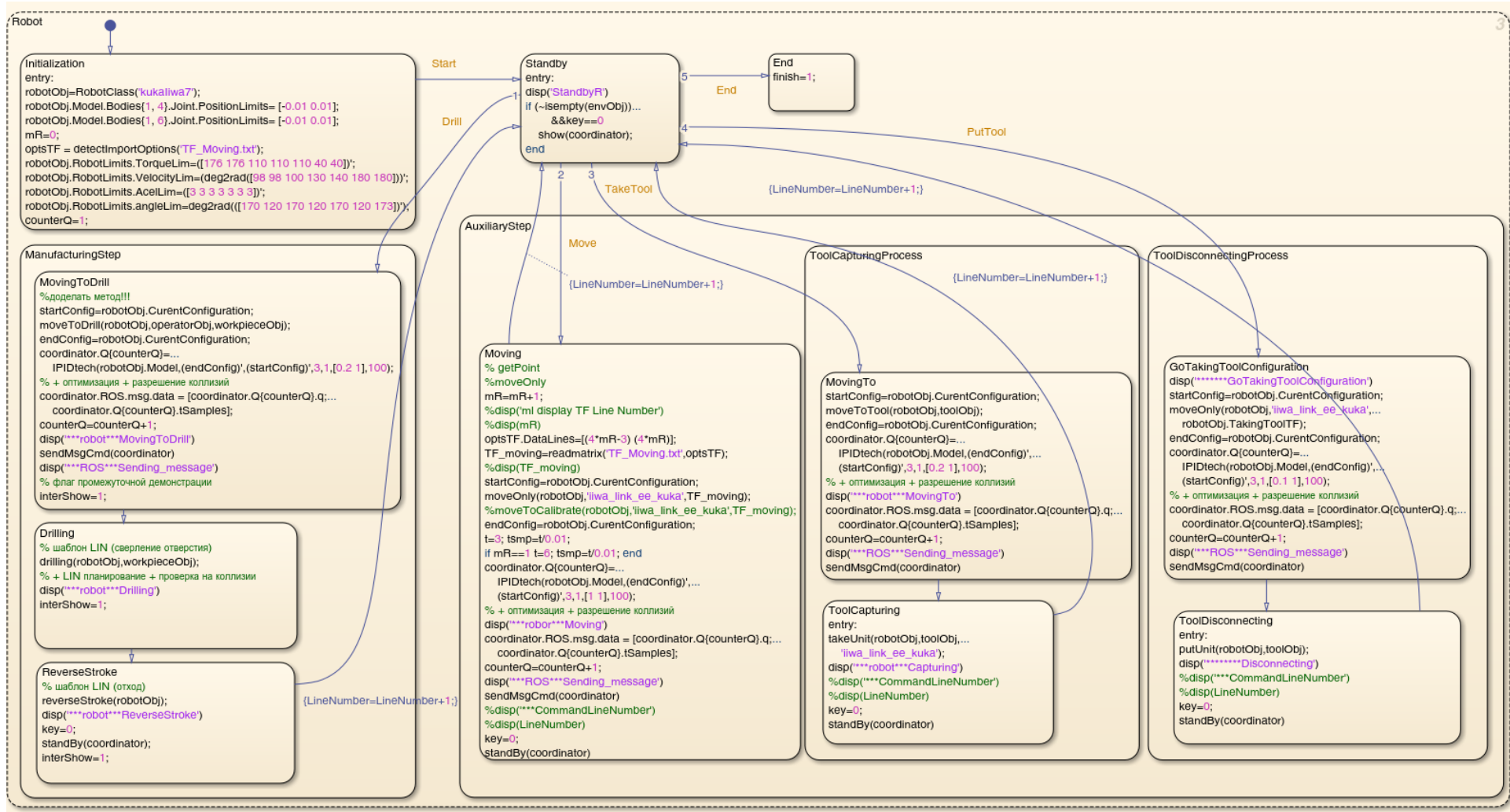
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Модель системы управления технологической операцией



ПРИЛОЖЕНИЕ И. Состояние «Operator» – имитационная модель движения оператора



ПРИЛОЖЕНИЕ К. Состояние «Robot» – имитационная модель движения КР



ПРИЛОЖЕНИЕ Л. Визуализация динамики интегральных переменных и переменных состояния КР по линеаризованной модели

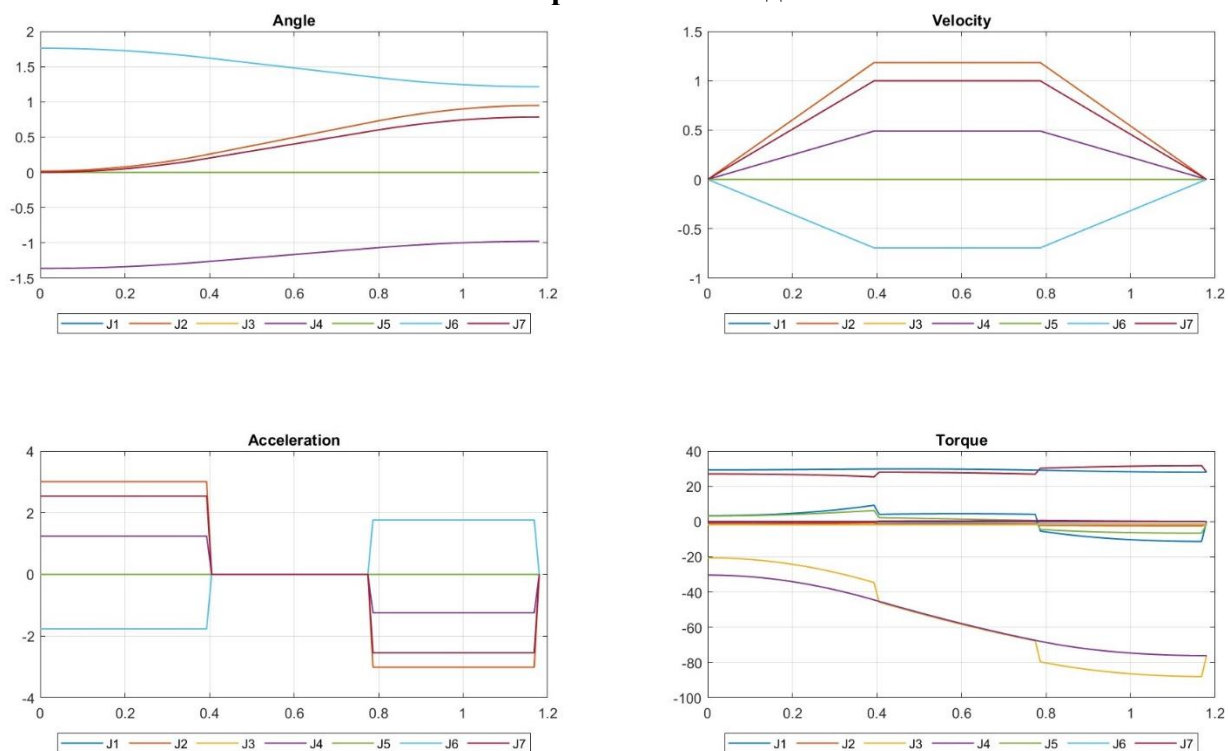


Рис. Л.1 – Характеристики и переменные состояния КР при движении по оригинальной траектории перемещения: Angle – угол положения, рад; Velocity – угловая скорость, рад/с; Acceleration – угловое ускорение, рад/с²; Torque – момент сил на осях механизма, Н·м

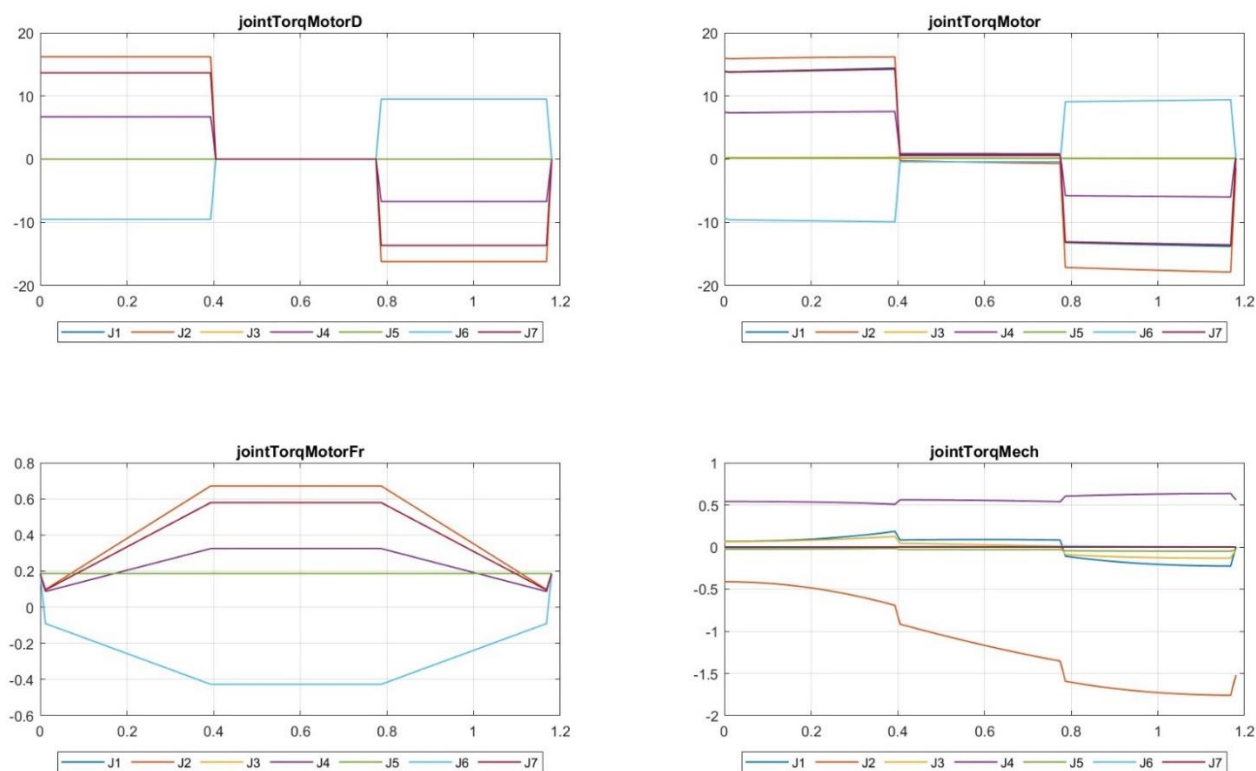


Рис. Л.2 – Характеристики и переменные состояния КР при движении по оригинальной траектории перемещения: jointTorqMotorD – динамический момент двигателя; jointTorqMotor – момент двигателя, Н·м; jointTorqMotorFr – момент сил трения, Н·м; jointTorqMech – приведенный к двигателю результирующий момент, Н·м

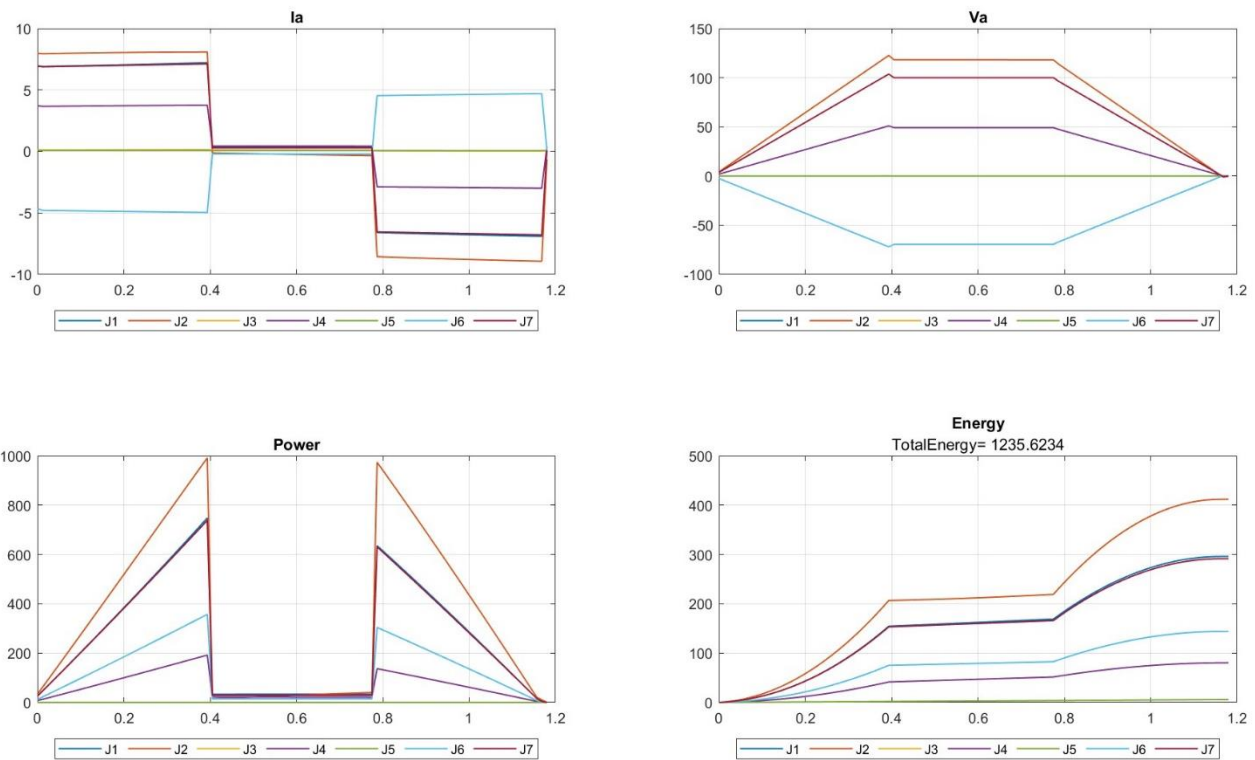


Рис. Л.3 – Характеристики и переменные состояния КР при движении по оригинальной траектории перемещения: I_a – ток якорной цепи, А; V_a – напряжение обмотки якорной цепи, В; Power – потребляемая мощность, Вт; Energy – затрачиваемая энергия в Дж

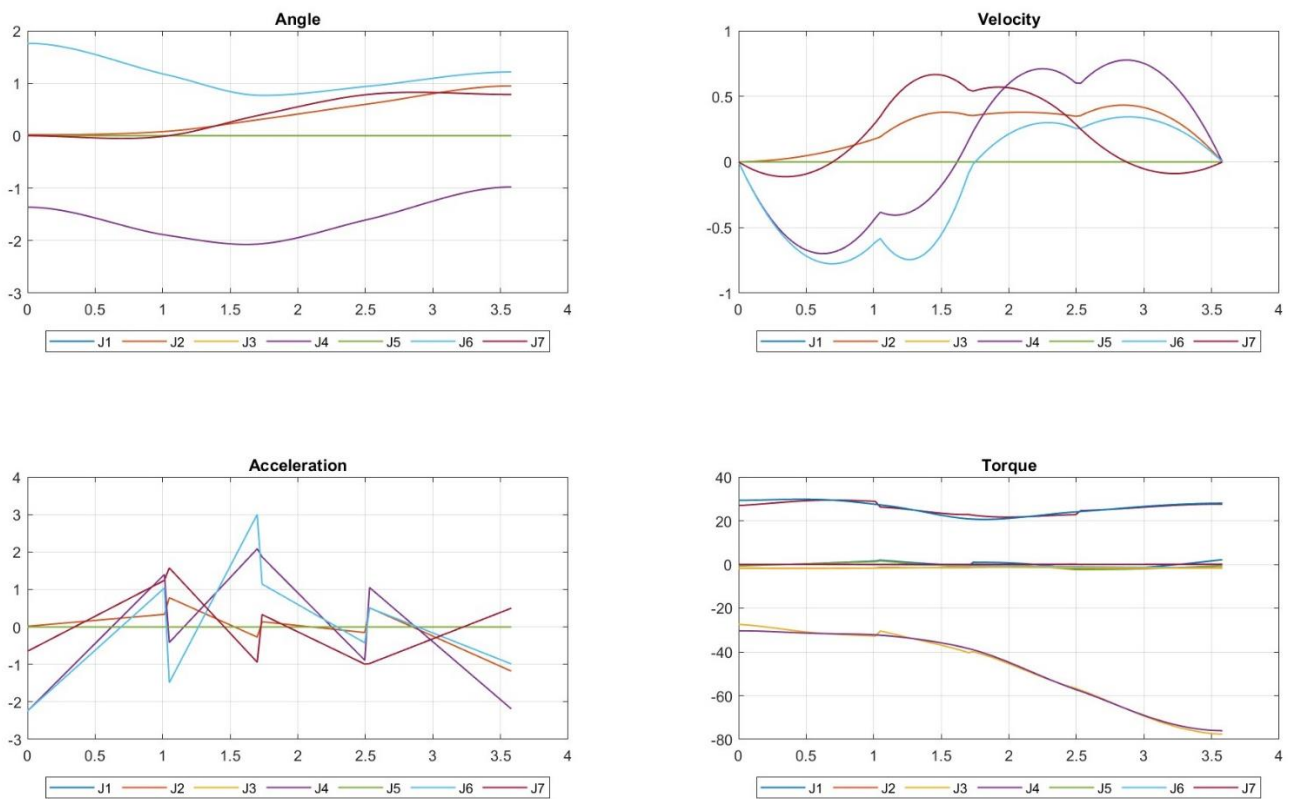


Рис. Л.4 – Характеристики и переменные состояния КР при движении, полученным алгоритмом cubicSmooth/makima; Angle – угол положения, рад; Velocity – угловая скорость, рад/с; Acceleration – угловое ускорение, рад/с²; Torque – момент сил на осях механизма, Н·м

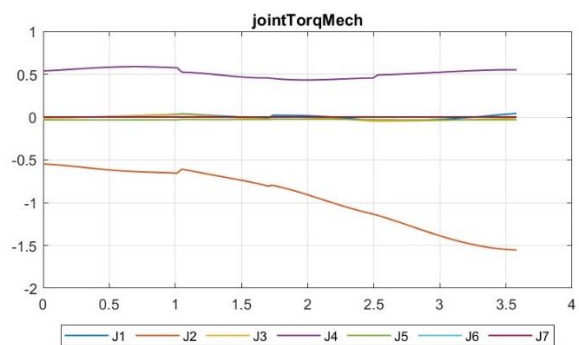
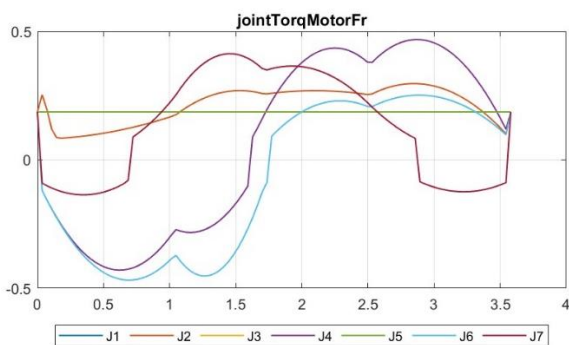
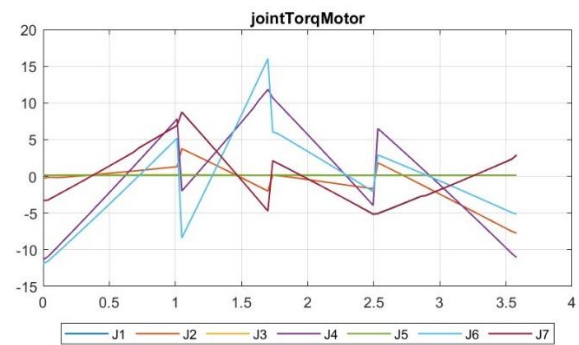
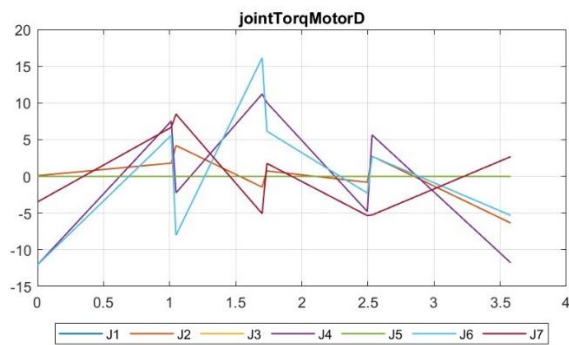


Рис. Л.5 – Визуализация характеристик и переменных состояния КР при движении, полученным алгоритмом cubicSmooth/makima; jointTorqMotorD – динамический момент двигателя, Н·м; jointTorqMotor – момент двигателя, Н·м; jointTorqMotorFr – момент сил трения, Н·м; jointTorqMech – приведенный к двигателю результирующий момент, Н·м

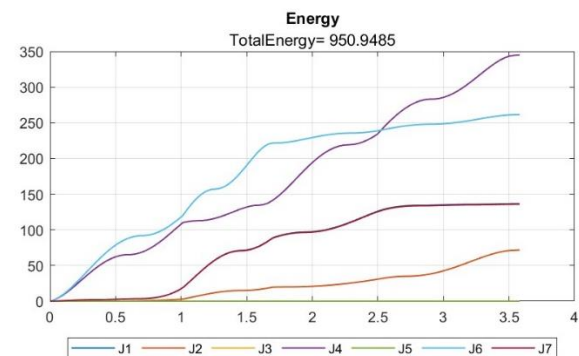
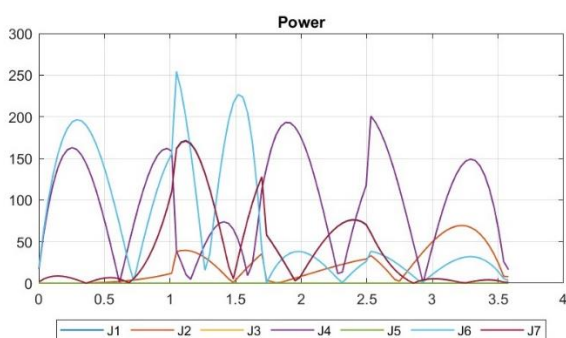
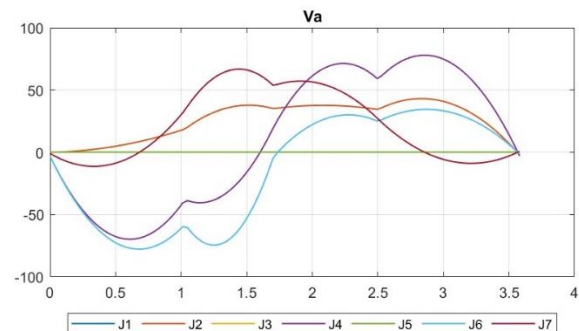
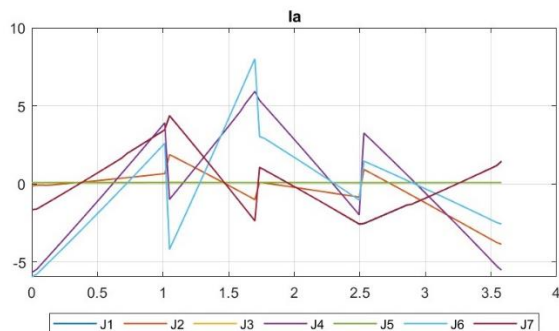
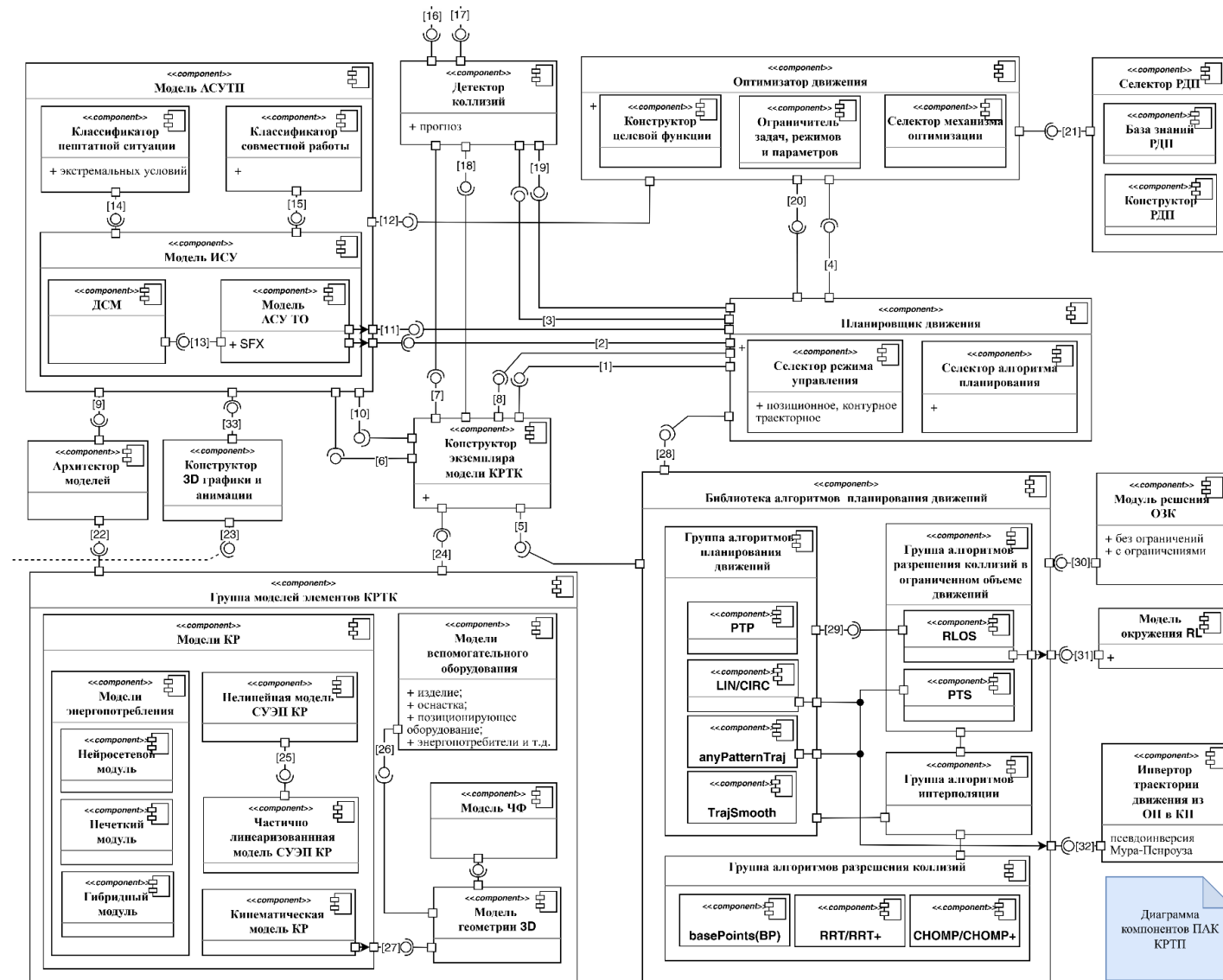


Рис. Л.6 – Визуализация характеристик и переменных КР при движении, полученным алгоритмом cubicSmooth/makima; Ia – ток якорной цепи, А; Va – напряжение обмотки якорной цепи, В; Power – потребляемая мощность, Вт; Energy – затрачиваемая энергия, Дж

ПРИЛОЖЕНИЕ М. Диаграмма компонентов программной части ПАК КРТП



ПРИЛОЖЕНИЕ Н. Диаграмма артефактов отдельных компонентов программной части ПАК КРТП

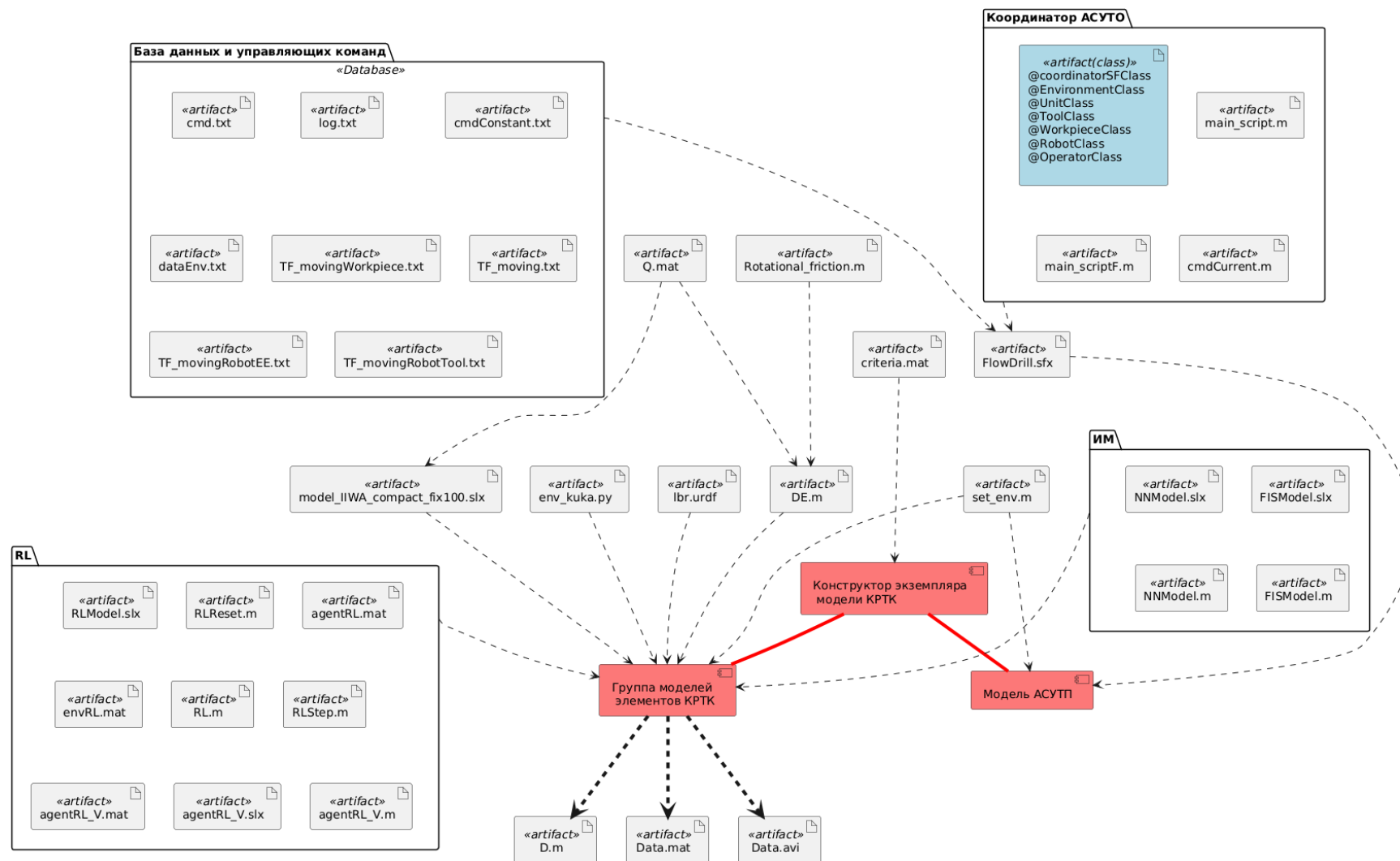


Рис. П.1 – Диаграмма артефактов отдельных компонентов программной части ПАК КРТП (первый фрагмент)

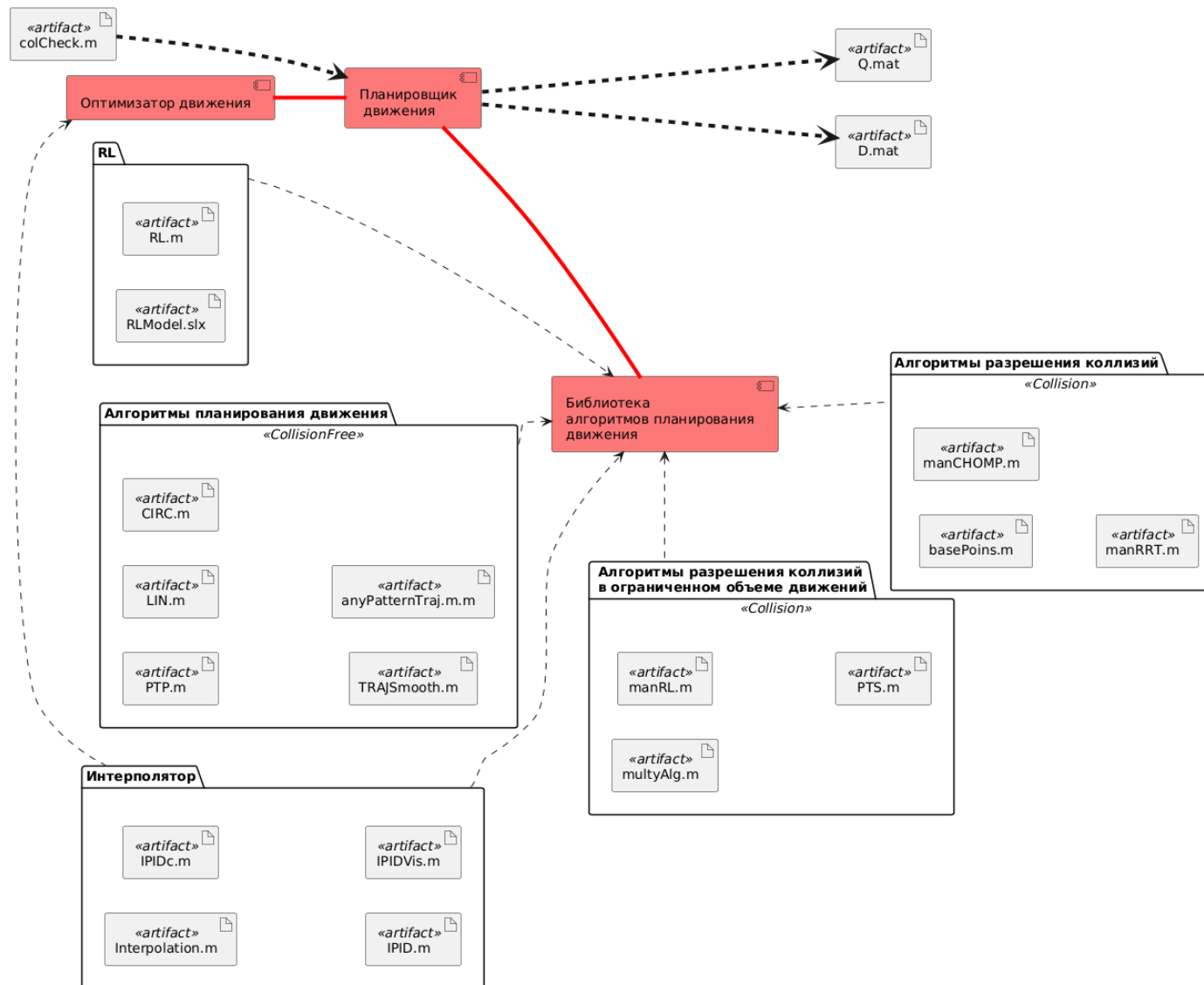


Рис. П.2 – Диаграмма артефактов отдельных компонентов программной части ПАК КРТП (второй фрагмент)

ПРИЛОЖЕНИЕ П. Графики изменения переменных состояния КР

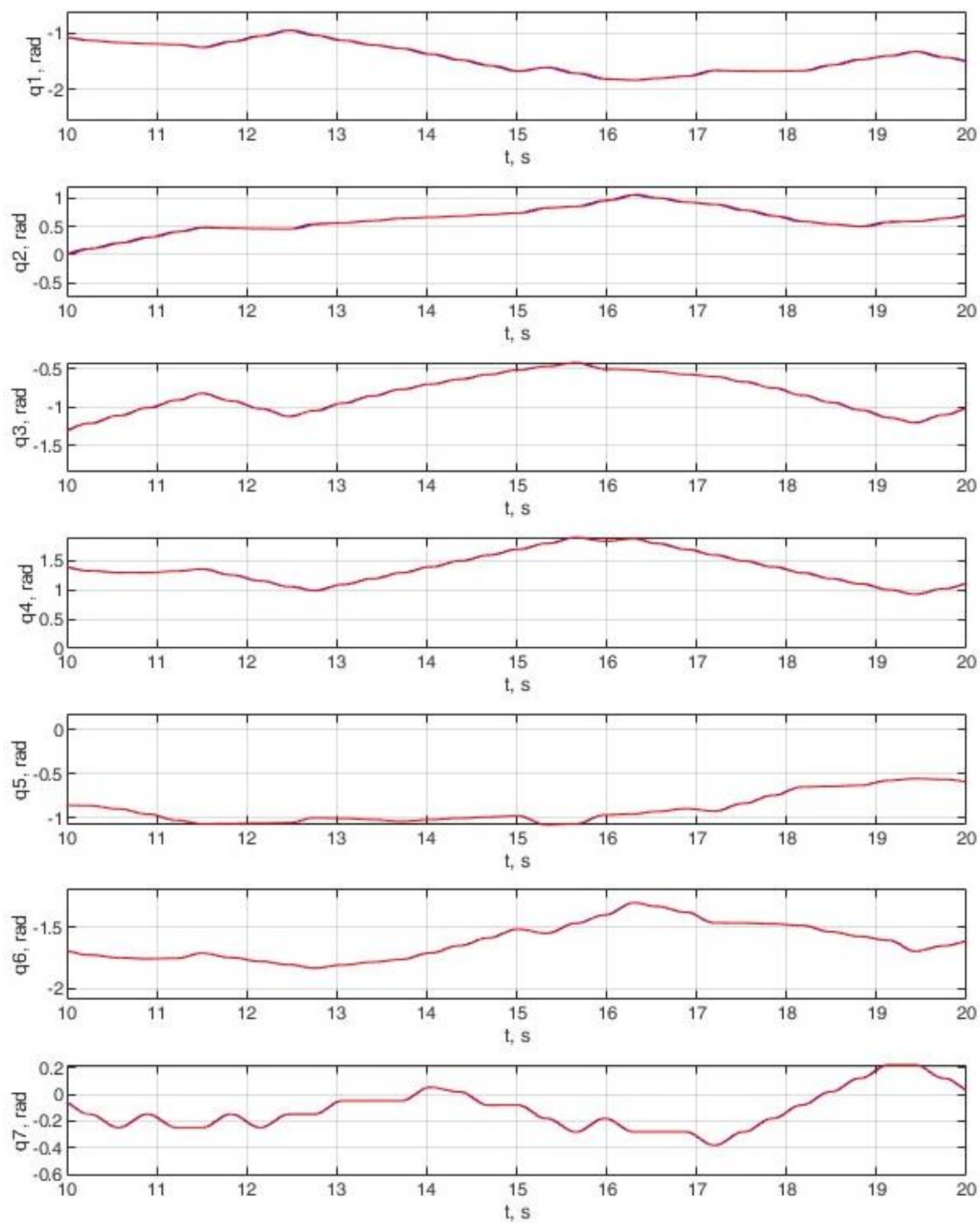


Рис. П.1 – Изменение углов положения шарниров КР в рамках движения 1

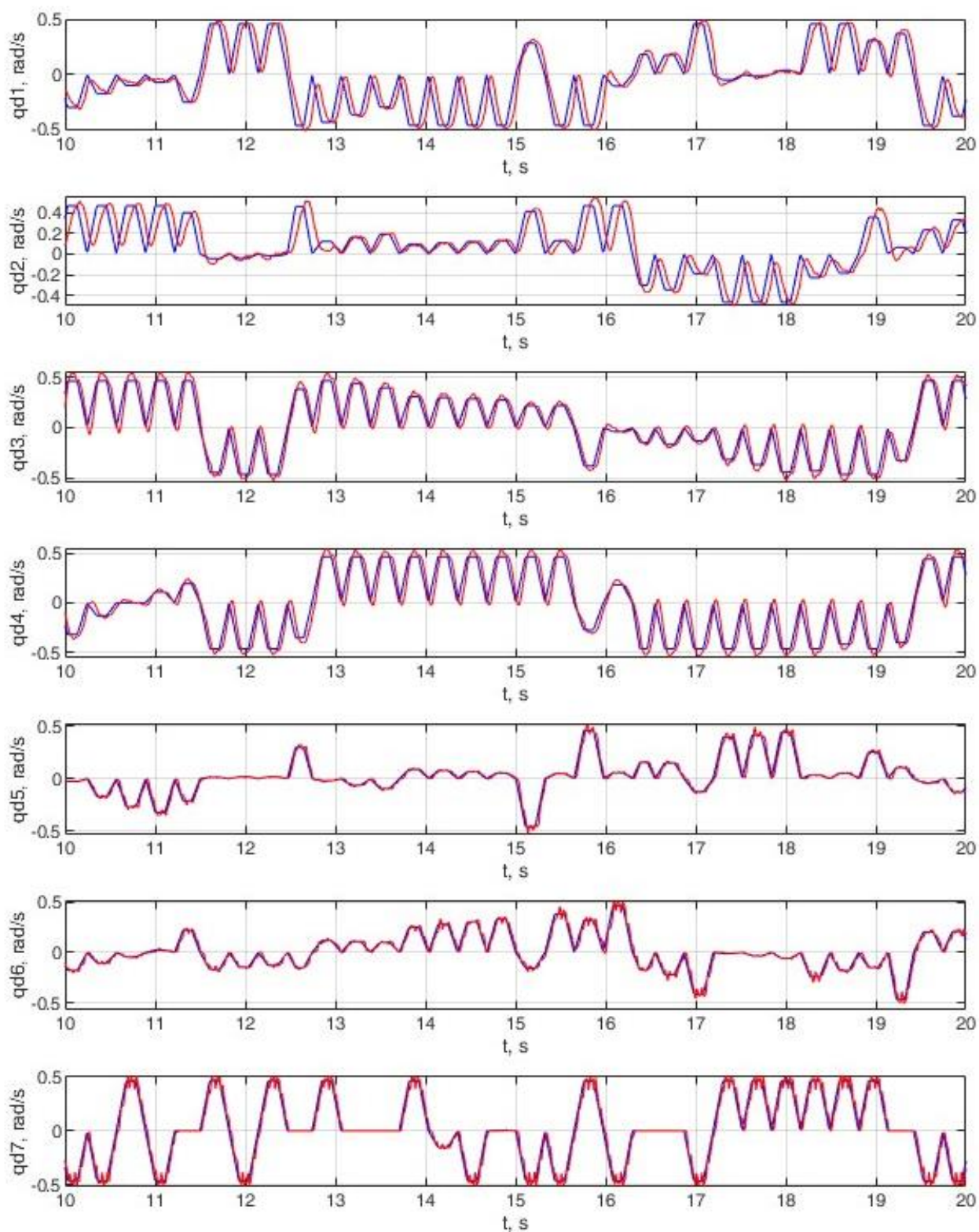


Рис. П.2 – Изменение угловых скоростей шарниров КР в рамках движения 1

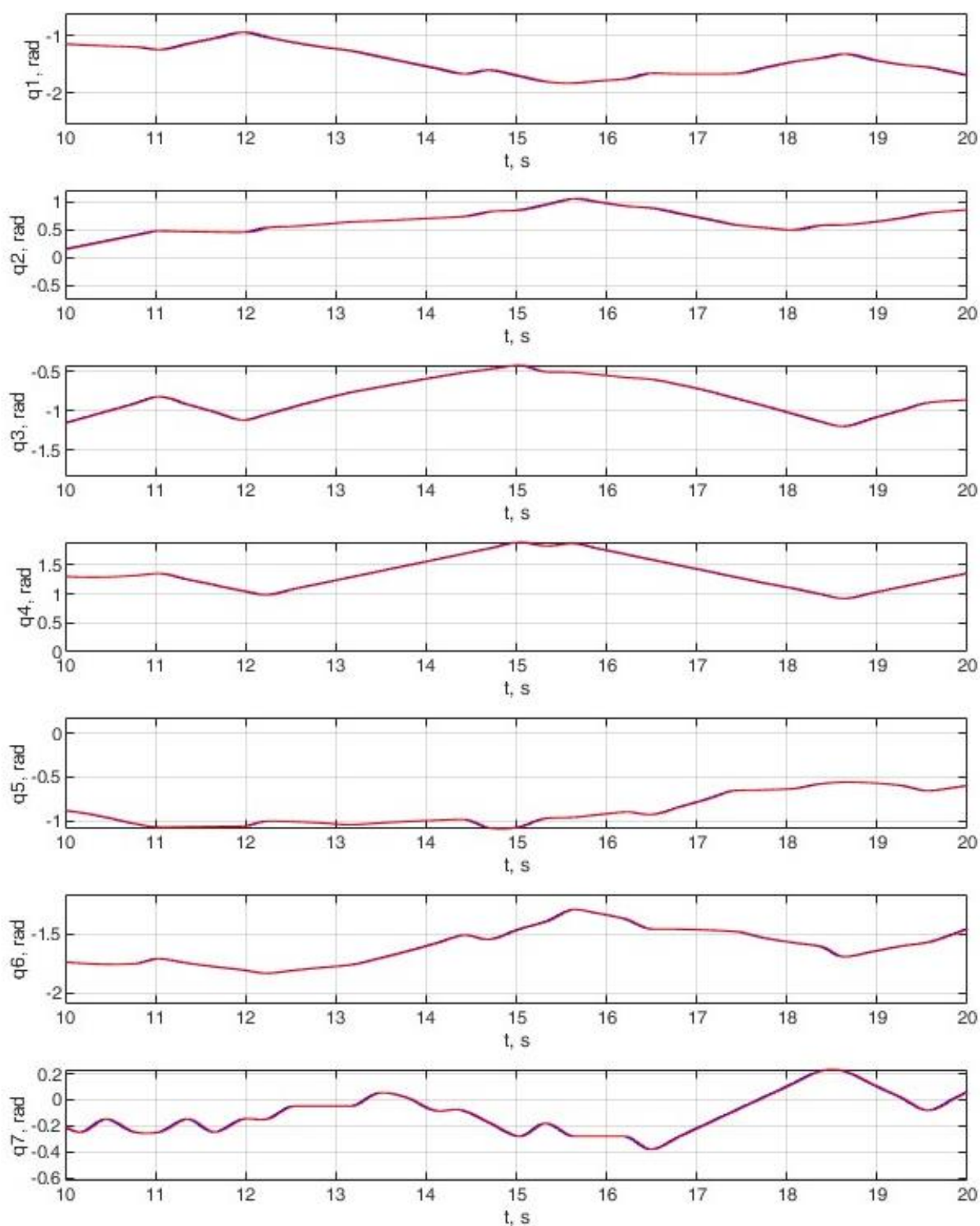


Рис. П.3 – Изменение углов положения шарниров КР в рамках движения 5

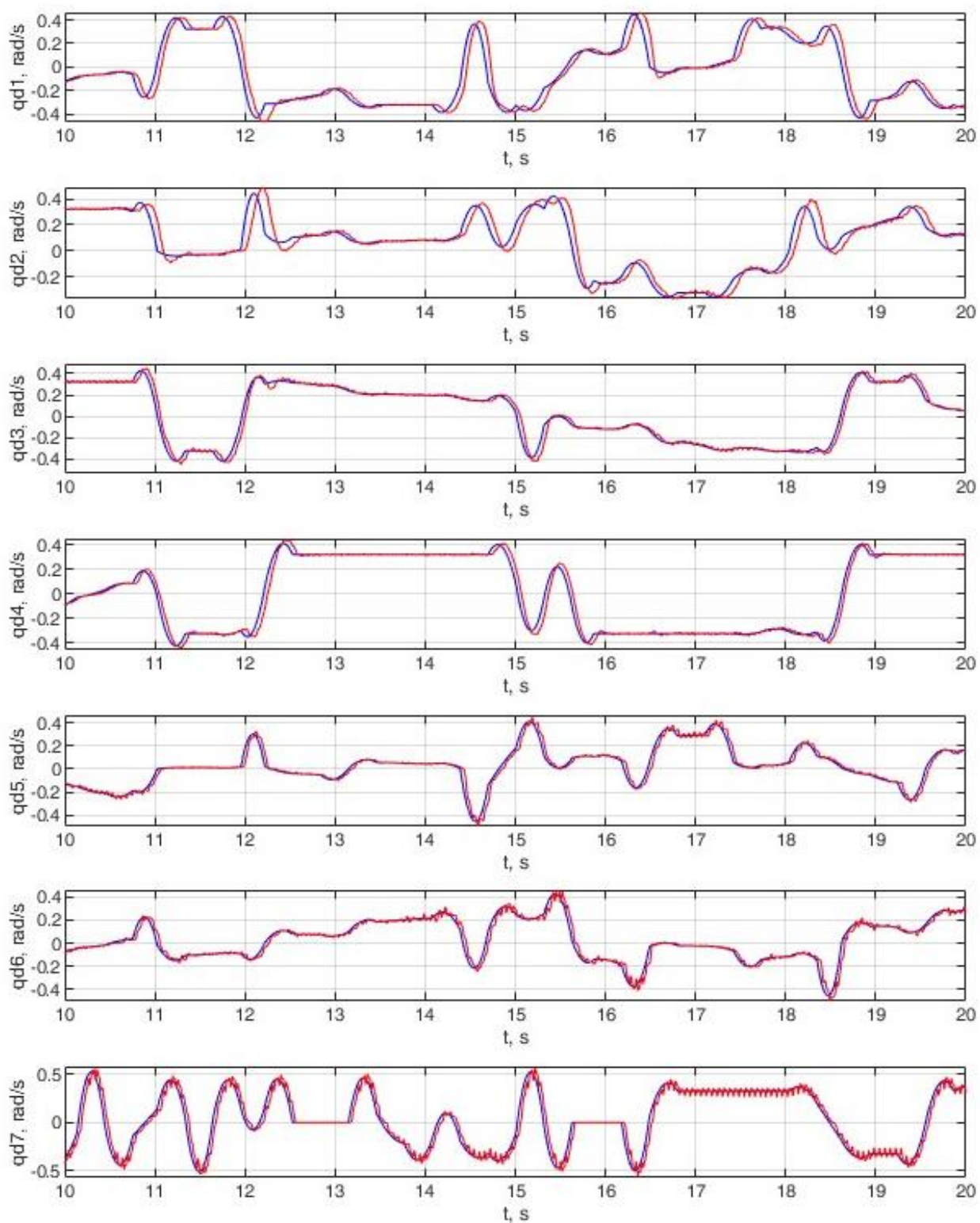


Рис. П.4 – Изменение угловых скоростей шарниров КР в рамках движения 5

ПРИЛОЖЕНИЕ Р. Результаты моделирования для этапа 1 (оценка степени влияния степени недетерминированности рабочей сцены на интегральные показатели ТП)

Таблица – Результаты моделирования для этапа 1 «Оценка степени влияния степени недетерминированности рабочей сцены на интегральные показатели ТП»										
№	Показатель	Вероятность возникновения коллизии, Pr								
		0	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,4
1)	Время завершения крайней ТО, с	7072	7169	7199	7175	7179	7129	7170	7199	7138
2)	N^{TO} , ед. ТО	23	22	22	22	22	21	19	18	16
3)	τ_{unit} , ед. ТО/смена	23	22	22	22	22	21	19	18	16
4)	$\bar{T}_c^{TO}$, с	304,48	325,86	327,23	326,13	326,32	339,48	377,36	399,94	446,12
5)	$\bar{T}_{add}^{TO}$, с (*)	260,78	281,86	283,27	282,13	282,31	295,48	333,36	355,94	442,12
6)	$\bar{T}_{main}^{TO}$, с	4	4	4	4	4		4	4	4
7)	$\beta_{done}^N = \frac{N_+^{TO}}{N^{TO}} \cdot \frac{1}{t}$, с ⁻¹	1	0,773	0,773	0,273	0,227	0,239	0,105	0,111	0,111
8)	$\alpha_{done}^N = \frac{N_{done}^{PTO}}{N_{total}^{PTO}} \cdot \frac{1}{t}$, с ⁻¹	1	0,879	0,866	0,574	0,435	0,449	0,3447	0,3177	0,275
9)	εt^{ws}	0,093	0,099	0,101	0,113	0,1154	0,111	0,1160	0,111	0,112
10)	ε^{ws}	0,293	0,306	0,311	0,339	0,3447	0,337	0,3459	0,334	0,337
11)	E_{total}^{ws} , кВт*ч	0,751	0,762	0,760	0,794	0,8018	0,7894	0,8033	0,792	0,793
12)	E_{aut}^{ws} , кВт*ч	0,005	0,005	0,005	0,006	0,0062	0,006	0,0063	0,006	0,003
13)	E_{dmt}^{ws} , кВт*ч	0,215	0,228	0,231	0,263	0,2701	0,259	0,2716	0,256	0,261
14)	$\frac{E_{total}^{ws}}{N^{TO}}$, кВт*ч/ед ТО	0,033	0,035	0,035	0,036	0,036	0,038	0,042	0,044	0,050
15)	$\frac{LC}{N^{TO}}$, чел*час/ед. ТО	0,087	0,091	0,091	0,091	0,091	0,095	0,105	0,111	0,125
* расчет для переменной $\bar{T}_{add}^{TO} = \bar{T}_c^{TO} - \bar{T}_{pf1}^{TO} - \bar{T}_{main}^{TO}$										

Таблица – Результаты моделирования для этапа 2 «Оценка интегральных показателей эффективности ТП в разрезе 4-х алгоритмов разрешения коллизий»

[illegible]

* расчет для переменной $\bar{T}_{add}^{TO} = \bar{T}_c^{TO} - \bar{T}_{pf1}^{TO} - \bar{T}_{main}^{TO}$

** multyAlg в комбинации RRT-PTS-RLOS-CHOMP ($W=[1 \ 1 \ 10 \ 1 \ 1 \ 1]$ энергосбережение)