

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
Дальневосточный федеральный университет

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт автоматизации и процессов управления
Дальневосточного отделения Российской академии наук

На правах рукописи



ГОРНОСТАЕВ ИГОРЬ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СИНТЕЗА СИСТЕМ
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННЫМИ
РОБОТАМИ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ИХ КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность: 2.5.4 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р техн. наук, профессор Филаретов Владимир Федорович

Владивосток – 2022

Оглавление

Введение	5
1 Анализ существующих подходов и методов синтеза систем управления манипуляционными роботами.....	15
1.1 Методы задания режимов движения рабочих инструментов манипуляционных роботов.....	16
1.2 Методы формирования программных сигналов управления для всех степеней подвижности кинематически избыточных манипуляторов	23
1.3 Постановка задачи.....	30
2 Разработка метода синтеза систем управления высокоскоростными движениями манипуляционных роботов	33
2.1 Описание объекта управления.....	33
2.2 Описание метода высокоскоростного управления движением электроприводов манипулятора и конвейера	37
2.3 Моделирование работы системы высокоскоростного управления электроприводами манипулятора и конвейера.....	42
2.4 Выводы.....	45
3 Разработка метода синтеза систем формирования предельно высоких программных скоростей движения рабочих инструментов многостепенных манипуляторов	46
3.1 Описание объекта управления.....	46
3.2 Описание уравнения, определяющего предельно высокую скорость движения рабочего инструмента многостепенного манипулятора по гладким пространственным траекториям, заданным параметрическими сплайнами	48
3.3 Описание работы системы формирования предельно высокой программной скорости движения рабочего инструмента многостепенного манипулятора	56

3.4 Моделирование работы системы формирования предельно высокой программной скорости движения рабочего инструмента многостепенного манипулятора	61
3.5 Выводы.....	65
4 Разработка метода синтеза систем формирования программных сигналов для всех степеней подвижности кинематически избыточных манипуляционных роботов, обеспечивающего расширение их рабочих зон и исключение появлений нештатных ситуаций	66
4.1 Описание общего подхода к решению задачи управления кинематически избыточными манипуляционными роботами.....	67
4.2 Особенности решения обратной задачи кинематики для манипуляторов типа PUMA	70
4.3 Задание индикаторов, сигнализирующих о приближении манипуляционных роботов к их особым положениям.....	79
4.4 Описание алгоритма автоматического выбора исходной конфигурации манипуляционного робота и системы управления его избыточной степенью подвижности	82
4.5 Моделирование работы системы формирования программных сигналов для всех степеней подвижности избыточных манипуляторов	88
4.6 Экспериментальные исследования работы системы формирования программных сигналов для всех степеней подвижности кинематически избыточных манипуляторов	94
4.7 Выводы.....	107
Заключение.....	109
Список литературы	111
Приложение А Акт внедрения ПАО «Дальприбор»	127
Приложение Б Акт внедрения ФГАОУ ВО ДВФУ	128

Список введенных сокращений

- АЧХ – амплитудно-частотная характеристика,
БФС – блок формирования скорости,
БФТ – блок формирования траектории,
МР – манипуляционный робот,
ОЗК – обратная задача кинематики,
ПЗК – прямая задача кинематики,
ПК – персональный компьютер,
ПУ – программное устройство,
РО – рабочий орган,
РИ – рабочий инструмент,
РМВ – реальный масштаб времени,
РТИ – рабочая точка инструмента,
СК – система координат,
СКУ – самонастраивающееся корректирующее устройство,
СУ – система управления,
ТО – технологическая операция,
ТР – типовой регулятор,
ЭП – электропривод.

Введение

Актуальность. В настоящее время в различных областях науки и техники всё более широкое применение находят современные средства автоматизации, в состав которых входят различные манипуляционные роботы (МР). Наиболее массово эти МР используются в промышленности при выполнении широкого спектра технологических операций (ТО), что позволяет значительно повысить качество и снизить себестоимость выпускаемой продукции.

Несмотря на существенные преимущества, обеспечиваемые МР, остается еще множество производственных задач, для решения которых применение МР пока ограничено. Это связано со сложностью МР как объектов управления, а также со спецификой решаемых задач. К таким задачам относится обработка крупногабаритных нежестких деталей, которые целиком не помещаются в рабочие области МР, а траектории движения их рабочих инструментов (РИ) не могут быть просчитаны заранее. В результате для выполнения ТО приходится либо использовать МР в замедленных режимах работы с периодическими переустановками обрабатываемых деталей вблизи МР, либо применять ручной труд высококвалифицированных рабочих, что приводит к высоким издержкам в условиях жесткой мировой конкуренции. Для эффективного решения этих задач с помощью МР без снижения их производительности и динамической точности требуется создание новых современных систем управления (СУ).

Очевидно, что для увеличения производительности промышленных роботов требуется предельное увеличение скорости выполнения ТО, при которой должна сохраняться высокая точность движения РИ по заданным траекториям и при этом не нарушается технологический процесс. В настоящее время для скоростного управления МР используются уже разработанные методы [14, 60, 134, 144], в которых предлагается использовать различные профили скоростей, а также оптимальные и адаптивные системы, но, как показали проведенные исследования, они не позволяют одновременно учитывать, изменения нагрузочных параметров электроприводов МР, обусловленных изменением массы переносимых ими

грузов, и ограничения мощности усилительных и исполнительных элементов, так как с увеличением скоростей движения РИ одновременно возрастают негативные эффекты динамических взаимовлияний между степенями подвижности МР, для снижения негативных последствий которых, как показано в работе [68], требуется увеличивать сигналы управления, часто приводящие к насыщениям усилителей и приводов МР. Если же в процессе выполнения ТО один или сразу несколько электроприводов МР входят в режим насыщения, то динамическая точность резко снижается, РИ сходят с предписанных траекторий движения, приводя к возникновению аварийных ситуаций.

Кроме того, точность работы МР резко снижается, когда в процессе движения РИ по заданным траекториям некоторые их степени подвижности неожиданно выходят на свои механические ограничения или текущие конфигурации МР подходят к особым (сингулярным) положениям, характеризующимся неоднозначностью в решении обратных задач кинематики (ОЗК). В результате в некоторых степенях подвижности МР начинают отрабатываться заранее непредсказуемые реверсы, требующие затрат времени на их завершение. При этом остальные степени подвижности должны быть замедлены, иначе будет нарушена согласованность их движений, что также приведет к сходу РИ с задаваемых траекторий. Для исключения негативных эффектов этих реверсов требуется менять закон формирования программных значений всех обобщенных координат, проводя предварительные трудоемкие исследования работы МР, что не всегда возможно.

Для непрерывной обработки крупногабаритных деталей или сразу нескольких объектов требуется учитывать ограниченность рабочих областей этих МР, в которых их РИ должны подходить к обрабатываемым участкам с заданными углами сервиса. Обычно, если в какой-то момент РИ достигнет границы рабочей области МР, то происходит остановка его работы, а для продолжения движения требуется установка детали в новое положение вблизи МР.

Указанные негативные эффекты, связанные с приближением степеней подвижности МР к ограничениям, самого МР – к особым положениям и РИ – к

границе рабочей области, могут быть полностью исключены за счет дополнительного перемещения основания МР вблизи объектов работ. Однако это перемещение, обеспечиваемое установкой манипулятора на подвижное основание, требует введения одной или нескольких избыточных степеней подвижности, и, следовательно, – нового решения ОЗК для конкретных кинематических схем МР. Однако существующие методы решения ОЗК [12, 13, 37, 84, 132, 141] для кинематически избыточных МР или не гарантируют исключения появления реверсов в их степенях подвижности, или слишком сложны с вычислительной точки зрения, что существенно ограничивает их применение в реальном масштабе времени (РМВ).

Степень разработанности темы. Значительный вклад в описание динамики и создание СУ МР внесли отечественные и зарубежные ученые С.Л. Зенкевич, Д.Е. Охоцимский, Ю.В. Подураев, Е.П. Попов, Е.И. Юревич, А.С. Ющенко, S. Dubowsky, B. Siciliano, D. Stokic, M. Vukobratovic и другие. В настоящее время работы по созданию новых СУ МР ведутся во многих российских научных организациях: в институте механики МГУ, ИПМ им. Келдыша, ИПМех им. Ишлинского, ИПУ им. Трапезникова, МГТУ им. Баумана, МГТУ СТАНКИН, НГТУ, СевГУ, ЦНИИ РТК, а также в ведущих зарубежных институтах и университетах: в Массачусетском технологическом институте, университете Карнеги-Меллона, университете Пенсильвании, Мичиганском университете, технологическом институте Джорджии и др.

Многие авторы отмечают, что для повышения производительности современных МР требуется разрабатывать новые методы формирования программных сигналов, задающих режимы движения МР. Известные методы формирования программных скоростей движения РИ МР основаны на применении различных профилей скорости, оптимальных по быстродействию и адаптивных СУ. Но все они либо не обеспечивают высокую производительность промышленного оборудования, либо могут быть применены только для решения частных задач. Для формирования программных сигналов для всех степеней подвижности кинематически избыточных МР применяются аналитические и

численные методы, а также методы машинного обучения, использующие нейронные сети, нечеткую логику и генетические алгоритмы. Но их применение ограничено конструкциями МР, вычислительной сложностью или невозможностью обхода МР всех их нежелательных положений.

Целью диссертации является создание новых решений и методов синтеза СУ МР, способных обеспечить предельно высокую скорость перемещения их РИ в процессе выполнения ТО без снижения заданной динамической точности, а также без входа механизмов МР в ограничения и особые положения с одновременным увеличением их рабочих областей.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать метод синтеза систем автоматического управления электроприводами МР, которые обеспечивали бы их движение на предельно высоких скоростях без ухудшения заданной динамической точности управления с учетом ограничений входных сигналов их исполнительных элементов.

2. Разработать метод построения гладких пространственных траекторий и автоматического задания режимов движения РИ МР по этим траекториям на предельно высоких скоростях с сохранением заданной динамической точности работы роботов с учетом взаимовлияний между всеми их степенями подвижности и ограничений на входные напряжения электроприводов.

3. Разработать метод синтеза систем формирования программных сигналов для всех степеней подвижности МР, которые позволят сохранить требуемую динамическую точность управления с учетом конструктивных ограничений во всех степенях подвижности МР и возможных появлений особых расположений их звеньев в пространстве.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Предложен метод синтеза систем автоматического управления электроприводами МР, гарантирующий точное выполнение ТО с учетом возможных изменений параметров нагрузки их электроприводов и ограничений мощности их исполнительных элементов за счет обеспечения постоянной работы этих элементов в преднасыщенном состоянии.

2. Предложен метод синтеза систем автоматического формирования предельно высоких программных скоростей движения РИ МР по пространственным траекториям, обеспечивающих сохранение требуемой динамической точности управления за счет непрерывной работы хотя бы одного из электроприводов МР вблизи зоны насыщения и без входа в нее.

3. Предложен метод синтеза систем формирования программных сигналов для всех степеней подвижности кинематически избыточных МР, обеспечивающих сохранение требуемой динамической точности управления за счет использования избыточных степеней подвижности для исключения в приводах этих МР нежелательных реверсов, связанных со входом манипуляторов в особые положения и аварийными остановками в процессе выполнения ТО при подходе некоторых степеней подвижности к ограничениям или РИ – к границам рабочих областей МР.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

С использованием представленных в диссертации методов могут создаваться высокоскоростные и высокоточные СУ МР, позволяющие повысить производительность многих, в том числе кинематически избыточных, МР. Как показали проведенные исследования, эти СУ используют типовое оборудование и многие типовые программы для ЭВМ.

Полученные в диссертации результаты уже были использованы при выполнении научно-исследовательских работ в научно-образовательном центре «Автоматизация и управление высокотехнологичными производствами» ДВФУ по государственному заданию Министерства образования и науки РФ №2.11216.2018/11.12, а также в учебном процессе ДВФУ при подготовке бакалавров по направлению 15.03.06 “Мехатроника и робототехника” и при выполнении грантов РФФИ (№ 20-38-70161, 20-08-00701, 18-08-01204, 16-38-00187, 16-29-04195, 16-07-00718, 16-07-00300). Эти результаты также планируется использовать в ПАО «Дальприбор» (г. Владивосток) при управлении промышленным роботом «Kuka».

Методология и методы исследования. В процессе решения поставленных в диссертации задач использовались методы теории автоматического управления,

дифференциальных уравнений, теоретической механики, методы аналитического решения ОЗК, а также методы численного моделирования разработанных СУ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод синтеза систем автоматического управления электроприводами МР, обеспечивающих точное и предельно быстрое выполнение ТО при наличии ограничений на мощности исполнительных элементов этих МР и при изменениях параметров нагрузки их электроприводов.

2. Метод синтеза систем для автоматического формирования предельно высоких программных скоростей движения РИ МР по гладким пространственным траекториям, обеспечивающих сохранение требуемой динамической точности управления при наличии взаимовлияний между всеми степенями подвижности МР и ограничений мощности их исполнительных элементов.

3. Метод синтеза систем формирования программных сигналов для всех степеней подвижности кинематически избыточных МР, обеспечивающих сохранение требуемой динамической точности управления при наличии конструктивных ограничений во всех степенях их подвижности и особых положений звеньев этих МР и расширяющих их рабочие области.

Обоснованность и достоверность полученных результатов работы обеспечивается корректным применением использованных в работе теоретических методов, а также подтверждается полученными в диссертации результатами численного моделирования и проведенными экспериментами.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

– Всероссийских научно-технических конференциях с международным участием «Робототехника и искусственный интеллект» (Железногорск, 2015 и 2017 гг.);

– International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications (Джакарта, Индонезия, 2016 г.);

– International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (Санкт-Петербург, 2017 г.);

- Международных научно-технических конференциях «Автоматизация, мехатроника, информационные технологии» (Омск, 2017, 2018 и 2019 гг.);
- Всероссийской научно-технической конференции «Интеллектуальные системы, управление и мехатроника» (Севастополь, 2017 г.);
- Всероссийской конференции «Технические проблемы освоения мирового океана» (Владивосток, 2017 г.);
- International Russian Automation Conference (Сочи, 2019 г.);
- International Multi-Conferences on Industrial Engineering and Modern Technologies (Владивосток, 2019 и 2021 гг.);
- International Conference on Interactive Collaborative Robotics (Санкт-Петербург, 2020 г.).

В соответствии с поставленными выше задачами была определена **структура** диссертационной работы, состоящей из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 145 наименований, и 2 приложения. Общий объем диссертации составляет 128 страниц, включая 34 рисунка и 1 таблицу.

В первой главе проведен анализ опубликованных работ по синтезу СУ, обеспечивающих выполнение ТО с помощью МР.

Показано, что среди подходов для решения задачи формирования программных скоростей движения РИ МР наибольшее распространение получил подход, основанный на использовании профилей скорости, который, несмотря на простоту реализации, предполагает настройку скорости, исходя из наиболее нагруженных режимов работы МР, что приводит к ее значительному занижению даже в благоприятных условиях работы. Другим подходом является применение оптимальных по быстродействию СУ, общим недостатком которых является то, что они не учитывают одновременно наличие ограничений управляющих сигналов и изменения параметров нагруженных электроприводов МР в процессе работы, что существенно ограничивает их область применения. Наиболее универсальным подходом к формированию программных скоростей движения РИ МР является применение автоматических систем, настраивающих указанные

скорости по непрерывно измеряемым в процессе работы значениям входных напряжений, якорных токов и динамических ошибок. Недостатком этого подхода является то, что он позволяет только косвенно учесть вход в насыщение усилителей мощности и электроприводов МР, из-за чего для их использования необходимо заранее проводить многократное тестовое моделирование движения РИ МР для каждой конкретной траектории, настраивая параметры синтезируемых СУ. Анализ этих подходов показал, что решить задачу повышения производительности МР можно за счет формирования таких программных скоростей движения РИ, при которых хотя бы один из электроприводов МР непрерывно работает в преднасыщенном состоянии (на пределе мощности) с учетом возможных изменений параметров нагрузки этих электроприводов.

Также в первой главе проведен анализ существующих методов, позволяющих формировать программные сигналы управления для всех степеней подвижности кинематически избыточных МР. Наибольшее распространение среди них получили аналитические и численные методы решения ОЗК, а также методы машинного обучения. Достоинством аналитических методов является низкая вычислительная сложность, но их применение ограничено конкретными кинематическими схемами. Численные методы более универсальны, но требуют использования мощных вычислительных средств, что не позволяет применять их, когда все расчеты должны выполняться непосредственно в процессе выполнения ТО. Другим подходом является применение методов машинного обучения, но они не гарантируют, что на каких-либо участках траекторий движения РИ манипуляторы не войдут в особые положения, в которых выполнение ТО нарушается. Анализ этих подходов показал, что сохранить требуемую динамическую точность движения РИ МР по гладким пространственным траекториям можно за счет управления избыточными степенями подвижности, исключая вход всех степеней подвижности МР в ограничения, самих МР – в особые положения, а их РИ – на границы рабочих областей этих МР.

На основе проведенного анализа известных методов в последнем разделе первой главы дана постановка задачи исследования по разработке новых методов

синтеза СУ, направленных на повышение производительности МР при сохранении требуемой точности выполняемых работ.

Во второй главе предложен метод синтеза систем автоматического управления движениями МР при изменениях параметров нагрузки их электроприводов. Эти системы позволяют обеспечить высокую скорость работы роботов за счет использования релейного управления, при котором их разгон и торможение осуществляются на пределе мощности используемых усилительных и исполнительных элементов. При этом длительности интервалов, на которых подаются напряжения одного знака, рассчитываются автоматически с использованием математического описания электроприводов, переменных параметров их нагрузки и ограничений входных напряжений, что позволяет обеспечивать точные перемещения валов этих электроприводов из одного положения в другое. С использованием этого метода создана СУ технологическим процессом, для осуществления которого отрабатываются синхронные перемещения одностепенного робота и конвейера, перемещающего в рабочую область манипулятора объекты. Эффективность созданной СУ подтверждена результатами численного моделирования указанного технологического процесса.

В третьей главе вначале представлены результаты разработки метода построения гладких пространственных траекторий движения РИ МР с использованием математического аппарата параметрических сплайнов. Применение этого метода позволяет обеспечивать плавные движения РИ МР по указанным траекториям точно с требуемой скоростью. Затем с его помощью выполнена разработка нового метода синтеза систем для автоматического формирования предельно высоких программных скоростей движения РИ, позволяющих повысить производительность МР и одновременно сохранить динамическую точность управления с учетом динамических взаимовлияний между всеми их степенями подвижности и заданных ограничений на входные сигналы электроприводов. На основе предложенного метода синтезирована СУ МР, математическое моделирование работы которой подтвердило ее способность существенно повысить скорость движения РИ за счет непрерывной работы хотя

бы одного из электроприводов манипулятора вблизи зоны насыщения и без входа в него. При этом повышение быстродействия СУ происходило без существенного уменьшения точности. Разработанный метод может быть применен для синтеза СУ МР с различными кинематическими схемами.

В четвертой главе предложен метод построения систем формирования программных сигналов для всех степеней подвижности кинематически избыточных МР. Этот метод, рассчитывая значения нескольких специальных функций-индикаторов, позволяет оценивать приближение текущей конфигурации МР к нежелательным положениям, в которых выполнение ТО нарушается. К этим положениям относятся те, в которых отдельные степени подвижности МР входят в ограничения, сам МР – в особые положения, а его РИ выходит на границу рабочей области. Затем с использованием этих индикаторов определяется направление смещения основания МР по одной или нескольким избыточным степеням подвижности. Отработка этого смещения автоматически исключает возможность входа МР в указанные нежелательные положения, тем самым сохраняя точность выполнения ТО без вынужденного снижения скорости движения РИ по программным траекториям. Причем эти траектории могут быть заранее определены или сформированы в процессе выполнения ТО, для чего смещения основания МР тоже отрабатываются в процессе движения РИ. Для исследования работоспособности и эффективности предлагаемого метода были проведены численные и натурные исследования разработанной СУ МР. Для этого были разработаны и зарегистрированы новые программы для ЭВМ. Результаты исследований полностью подтвердили высокое качество созданной СУ.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в ходе проведения исследований, а также приведены обобщающие выводы по ним.

По теме диссертации опубликовано 39 научных работ, в том числе 5 – в научных журналах, рекомендуемых ВАК, 5 патентов на изобретения, 16 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Основные положения диссертации докладывались на девяти международных (6 из них проиндексированы в базах Scopus и 2 – в WoS) и на четырех Всероссийских конференциях.

1 Анализ существующих подходов и методов синтеза систем управления манипуляционными роботами

В работах [4, 5, 14, 73, 75, 78, 120, 133, 142], где рассмотрены перспективы развития промышленной робототехники, показано, что увеличение производительности МР может обеспечиваться в основном за счет увеличения скоростей выполнения ТО. При этом должна сохраняться высокая точность движения РИ по заданным пространственным траекториям. Но, как известно из теории управления МР [55], с увеличением скоростей движения их РИ происходит одновременный нелинейный рост динамических взаимовлияний между всеми степенями подвижности роботов, для компенсации которых необходимо использовать специальные адаптивные регуляторы. Введение этой компенсации приводит к увеличению сигналов управления, подаваемых на входы исполнительных электроприводов, которые могут войти в режим насыщения. Если это происходит, то приводные механизмы становятся не способны обработать сигналы любых программных движений МР, из-за чего их РИ неизбежно сходят с задаваемых траекторий, что приводит к браку или даже к возникновению аварийных ситуаций. Таким образом, для предельного повышения производительности МР требуется непрерывно в процессе выполнения ТО подстраивать скорости движения их РИ по траекториям, учитывая ограничения управляющих сигналов и математические зависимости, описывающие изменения указанных динамических взаимовлияний.

Но даже при осуществлении такой настройки скорости возможен вход конфигураций МР в положения, в которых выполнение ТО становится невозможным. К этим положениям относятся те, в которых отдельные степени подвижности МР входят в ограничения, сами МР – в особые положения, а их РИ выходят на границы рабочих областей МР. Как указывают некоторые авторы [141], исключить возможность входа МР в эти положения можно за счет одновременного управления основными и избыточными степенями подвижности, расположенными в подвижном основании.

В связи с отмеченным ниже будет проведен анализ опубликованных работ по подходам и методам, направленным на решение двух задач. Первая задача состоит в задании режимов движения РИ МР, а вторая – в формировании программных сигналов управления для всех степеней подвижности кинематически избыточных МР. После этого будут сформулированы цели и задачи всей диссертационной работы.

1.1 Методы задания режимов движения рабочих инструментов манипуляционных роботов

Известные методы задания режимов движения РИ МР можно условно разделить на три группы. К первой относятся методы, использующие различные профили скорости, ко второй – управление с обеспечением максимального быстродействия, а к третьей – адаптивные системы, настраивающие программные скорости движения РИ в зависимости от непрерывно измеряемых переменных параметров.

1.1.1 Управление с использованием профилей скорости

Наиболее распространенным подходом к решению задачи формирования программной скорости движения РИ МР является применение профилей скорости [14, 134], определяющих зависимость этой скорости от времени. Эти профили состоят из трех последовательных участков – разгона, движения с постоянной скоростью и торможения. В наиболее простом случае этапы разгона и торможения выполняются с постоянным ускорением [134] (см. рис. 1.1а), но при смене этапов движения это приводит к появлению рывков и снижению качества управления. Исключить появление нежелательных рывков можно за счет плавных изменений ускорений на этапах разгона и торможения [14] (см. рис. 1.1б). Однако в этом случае осложняется выбор закона изменения ускорений на указанных этапах движения, поскольку при слишком медленном изменении формируемой программной скорости производительность МР будет снижаться, а при слишком быстром могут появляться рывки.

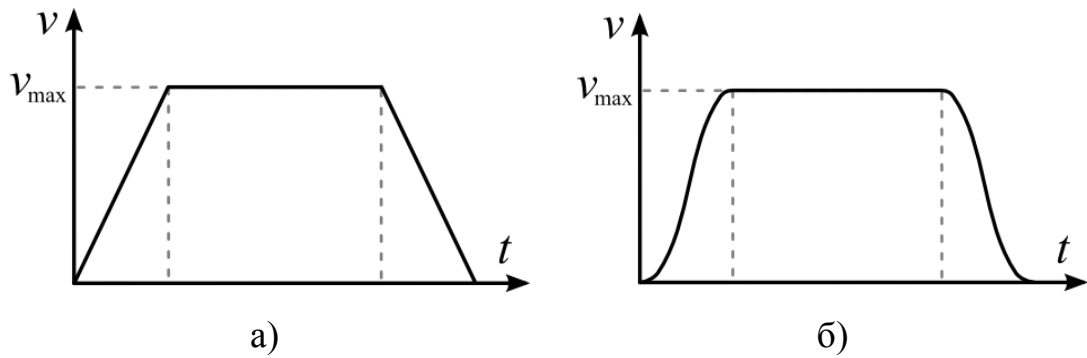


Рисунок 1.1 – Примеры профилей скорости

Для устранения указанного факта в ряде работ [2, 81, 128, 135] формирование плавного профиля скорости на этапах разгона и торможения осуществляют с помощью релейного закона изменения рывка (производной ускорения по времени). Такой подход позволяет учесть не только ограничения на рывок, но также на ускорение и скорость, которые связаны с техническими параметрами электроприводов и предполагаются заранее известными. В работах [2, 135] для снижения вычислительной сложности используемого метода моменты изменения знака рывка рассчитывают аналитически. Это позволяет применять его в РМВ. В работе [81] используют комбинированный аналитико-численный метод, а в работе [128] предлагается формировать ассиметричный сглаженный профиль скорости, который обеспечивает более плавное движение РИ на этапе торможения для уменьшения вибрационных нагрузок. Для регулирования длительности этапа торможения вводится настраиваемый параметр, который подбирается экспериментально перед выполнением каждой новой ГО.

В работах [124, 143] формирование профиля скорости выполнялось с целью обеспечения максимальной энергоэффективности работы электроприводов. При этом используется подход, согласно которому сначала формируется трапецеидальный профиль скорости (см. рис. 1.1а), а затем он сглаживается (см. рис. 1.1б) с целью обеспечения требуемого качества управления и соблюдения ограничений на развиваемые ускорения.

При практическом применении сформированных с помощью представленных методов профилей скорости могут возникать нежелательные

малые рывки в движении РИ, связанные с большим шагом дискретизации контроллера робота или взаимодействиями МР со средой. В этом случае скорость движения МР в какой-то момент времени может превысить программные ограничения, что приведет к аварийной остановке робота с сообщением об ошибке. Для решения этой проблемы в работе [115, 117] предлагается метод дополнительной настройки профиля скорости в РМВ, который на различных участках траектории движения РИ позволяет корректировать его скорость, обеспечивая соблюдение указанных требований, но не прерывая выполнение ТО.

Несмотря на простоту реализации, общим недостатком применения профилей скорости является то, что оно предполагает настройку режимов движения с постоянной скоростью, исходя из наиболее нагруженных режимов работы МР, что приводит к ее значительному занижению даже в благоприятных условиях работы. Это снижает производительность создаваемых на его основе СУ. Кроме того, при формировании профилей скорости представленными методами не учитываются сложные динамические взаимовлияния между всеми степенями подвижности МР, которые, как указано в работах [83, 144], влияют на ограничения рывков и развиваемых электроприводами ускорений, используемых при формировании этих профилей скорости.

1.1.2 Управление с использованием критерия максимального быстродействия

Для выполнения ТО с помощью МР за минимальное время необходимо поддержание максимально высокой скорости движения его РИ на всей пространственной траектории. Но при этом исполнительные устройства МР могут создавать только ограниченные по величине силы и моменты, учитывая ограничения управляющих сигналов и параметров электроприводов. Решение задачи оптимального по быстродействию управления МР с учетом заданных ограничений описано в работах [1, 17, 74, 104, 121, 137, 144].

В работах [104, 137] для управления МР также используются профили скорости, при формировании которых за счет настройки параметров изменения рывка обеспечивается максимальное быстродействие. При этом в работе [104]

используется релейный закон изменения рывка, моменты изменения которого рассчитываются аналитически, а в работе [137] – гармонический закон изменения рывка, параметры которого определяются численно. В работе [104] показано, что сформированные профили скорости могут применяться и для управления семистепенными МР.

В работе [121] решается задача оптимального по быстродействию управления МР, в результате которого обеспечивается автоматическое формирование профилей скорости движения электроприводов МР с учетом ограничений на вязкие трения, развиваемые моменты электроприводов и рывок. Особенностью метода является низкая вычислительная сложность, обеспеченная применением методов линейного программирования.

Но перечисленные методы [104, 121, 137] обладают теми же недостатками, что и описанные выше методы, использующие профили скорости.

В работе [1] представлены результаты аналитического синтеза оптимального по быстродействию управления электроприводом с учетом максимальных значений напряжения. Предлагается использовать релейные законы управления, а моменты для точного перехода системы из начального в конечное состояние определять с учетом граничных условий и параметров электропривода. Однако изменения этих параметров в процессе выполнения ТО не учитываются. Если же параметры изменяются, то определить необходимые моменты переключения с использованием этого метода невозможно. Кроме того, предложенный в работе подход применим для управления только одностепенными МР.

В работе [17] представлены алгоритмы оптимального и квазиоптимального по быстродействию контурного управления МР с учетом ограничений на управляющие моменты в электроприводах. Но их применение на практике заставляет СУ работать в режиме высокочастотных переключений со всеми присущими этому режиму недостатками.

В работах [74, 83, 85, 131] описаны методы формирования оптимальной (предельно высокой) переменной скорости движения РИ многостепенных МР при

их перемещениях по заранее известным пространственным траекториям. В работе [74] программную скорость движения РИ предлагается рассчитывать таким образом, чтобы хотя бы одна из степеней подвижности МР двигалась на максимальной допустимой скорости, и при этом не превышалась бы предельная скорость, определенная характером выполняемой ТО. В работах [83, 85, 131] формирование программной скорости предлагается выполнять с учетом ограничений развиваемых двигателями моментов и связанных с ними ускорений и скоростей, используя решение обратной задачи динамики МР. Для применения этих методов до выполнения ТО требуется задавать ограничения на моменты двигателей, ускорения и скорости, которые принимаются постоянными и заранее известными. Однако при наличии силомоментных взаимовлияний между всеми степенями подвижности МР на различных участках траекторий движения РИ эти ограничения могут существенно изменяться, что в указанных работах не учитывается и затрудняет их практическую реализацию.

Таким образом, представленный обзор методов оптимального по быстродействию управления МР показал, что они одновременно не учитывают сложные динамические взаимовлияния между всеми степенями подвижности этих МР и существующие ограничения управляющих сигналов, что затрудняет их применения на практике.

1.1.3 Управление с использованием адаптивных систем формирования скорости

Если при отработке перемещений РИ МР по пространственным траекториям хотя бы один их электропривод войдет в режим насыщения, точность управления немедленно упадет, что приведет к нарушению выполнения ТО. Для решения этой проблемы могут быть использованы более мощные усилительные и исполнительные устройства, но это приведет к увеличению энергозатрат и масс звеньев МР, в которых устанавливаются указанные электроприводы. Другое решение состоит в использовании адаптивных систем [58–60, 72, 92], обеспечивающих непрерывную настройку режимов движения РИ в зависимости от параметров нагруженных электроприводов и вида траекторий,

что позволяет увеличить быстродействие МР и одновременно сохранить высокую точность управления.

В работах [58, 59] предложены методы синтеза адаптивных СУ динамическими объектами с переменными параметрами, а также рассмотрено их применение на примерах одно- и двухступенных МР. Синтезируемые с помощью этих методов СУ обеспечивают автоматическую настройку режимов движения выходных валов электроприводов МР на основе амплитудно-частотных характеристик (АЧХ). В результате формируется предельно высокая частота гармонических движений (программная скорость движения) звеньев манипуляторов в зависимости от изменяемых в процессе этих движений параметров приведенных моментов инерции и заданного уровня допустимой динамической ошибки управления. Хотя синтезируемые по этим методам СУ показали высокую эффективность, их область применения ограничена МР, отработывающими движения в режиме позиционного управления и только по гармоническим законам.

В работах [60, 72, 91, 98] представлены методы синтеза легкорезализуемых систем автоматического формирования программных скоростей движения РИ МР при их перемещениях по гладким пространственным траекториям. Синтезируемые с помощью этих методов системы позволяют непрерывно настраивать программные скорости движения РИ МР в зависимости от текущих значений входных напряжений и якорных токов всех их электроприводов [60, 91], а также – от текущих значений динамических ошибок управления [72, 98], обеспечивая увеличение указанных скоростей на участках траекторий с меньшей кривизной. Общим недостатком этих методов является то, что для их использования необходимо заранее проводить многократное моделирование движения РИ МР для каждой конкретной траектории, настраивая параметры синтезируемых СУ. Без осуществления этого предварительного этапа не гарантируется, что электроприводы МР не войдут в режим насыщения на каких-либо участках траекторий, что приведет к сходу РИ с программной траектории.

В работе [92] представлен метод расчета предельно высокой программной скорости движения РИ с учетом ограничений входных напряжений электроприводов МР. Расчет программной скорости осуществляется при решении нелинейного дифференциального уравнения, описывающего работу наиболее нагруженного электропривода МР. В результате обеспечивается непрерывная работа хотя бы одного электропривода МР вблизи зоны насыщения, что приводит к повышению производительности робота при сохранении его динамической точности. Недостатком этого метода является то, что он не позволяет уменьшать программную скорость движения заранее до приближения РИ к участкам траекторий с повышенной кривизной, из-за чего не гарантируется сохранение точности при выполнении всех перемещений.

Обобщая методы задания режимов движения РИ МР, можно сделать вывод, что большинство из рассмотренных методов может применяться для решения только частных задач, связанных с управлением МР, во-первых, на заведомо заниженных скоростях, во-вторых, с малым количеством степеней подвижности, и, в-третьих, при движении их РИ только по заранее известным программным траекториям. Анализ представленных методов формирования программных скоростей движения РИ МР показал, что максимальная производительность МР достигается тогда, когда хотя бы один из электроприводов МР непрерывно работает в преднасыщенном состоянии (на пределе своей мощности). При этом режимы его движения должны непрерывно корректироваться с учетом возможных изменений параметров нагрузки всех электроприводов.

Таким образом, задача разработки метода высокоскоростного автоматического управления движениями РИ многостепенных МР с учетом ограничений их сигналов управления, переменных параметров нагрузки и динамических взаимовлияний между всеми степенями подвижности приводов является актуальной, но ее эффективное решение пока не найдено.

1.2 Методы формирования программных сигналов управления для всех степеней подвижности кинематически избыточных манипуляторов

Как указано выше, даже при движении РИ МР по пространственным траекториям с заданными скоростями, сформированными с использованием методов непрерывной настройки режимов движения с учетом ограничений управляющих сигналов, возможен вход конфигураций МР в положения, в которых их электроприводы всё равно входят в насыщения. Для исключения этих нежелательных положений и сохранения высокой производительности МР могут быть задействованы избыточные степени подвижности, управление которыми позволяет менять текущую конфигурацию МР непосредственно в процессе выполнения ТО с целью обхода механических ограничений манипуляторов и их особых положений. Но одновременно усложняется решение ОЗК для таких кинематически избыточных МР.

В настоящее время уже известно множество методов решения ОЗК, обеспечивающих расчет обобщенных координат для каждой конкретной кинематической схемы, в том числе и для кинематически избыточных МР. Наибольшее распространение для решения ОЗК таких МР [12, 13, 37, 84, 132, 141]) получили аналитические и численные методы, а также методы машинного обучения, предполагающие применение нейронных сетей, нечеткой логики и генетических алгоритмов.

1.2.1 Аналитические методы решения обратной задачи кинематики

Аналитические методы позволяют получить решение ОЗК в виде аналитических выражений, содержащих обратные тригонометрические и трансцендентные функции, сформированные по геометрическим моделям кинематики МР и моделям в представлении Денавита–Хартенберга [73], описывающим кинематику МР с помощью однородных матриц преобразования.

Как указано в работе [13], аналитические методы решения ОЗК можно разделить на алгебраические и геометрические. Алгебраические методы [16, 20, 126] за счет выполнения обратных преобразований позволяют получить искомую

зависимость обобщенных координат МР от координат РИ. Геометрические методы [20, 103] предполагают разбиение кинематической схемы МР на несколько отдельных задач на плоскости, решая которые производится расчет искомым обобщенных координат.

Общим достоинством этих методов является малая вычислительная сложность, возможность анализа полученных аналитических выражений и простота расчета всех возможных конфигураций МР. Однако их применение для кинематически избыточных МР требует введения дополнительных уравнений, накладывающих условия на расчет избыточных обобщенных координат, без чего затруднен выбор одного единственного решения ОЗК из бесконечного количества возможных.

Применению аналитических методов решения ОЗК для таких избыточных МР посвящен ряд работ [86, 102, 107, 108, 119, 145].

В работе [107] рассмотрен метод аналитического решения ОЗК трехстепенным плоскими МР. Основной идеей метода является введение “виртуальных” звеньев, которые ограничивают и адаптируют подвижность МР в его рабочей области. Этот метод позволяет учесть ограничения всех обобщенных координат и не допустить столкновения звеньев робота с препятствиями в его рабочей области за счет рассмотрения различных возможных положений МР. Но полученные расчетные выражения не гарантируют непрерывности получаемых программных решений, что при управлении реальными МР может привести к возникновению нежелательных реверсов в его степенях подвижности.

В работах [86, 102, 108, 145] рассмотрены методы аналитического решения ОЗК семистепенными МР. Согласно этим методам обобщенные координаты всех степеней подвижности рассчитываются с использованием заранее полученных аналитических выражений, в которые дополнительно вводят неизвестный переменный параметр, расчет которого осуществляется так, чтобы обеспечить обход препятствий, расположенных в рабочей области МР. В работах [102, 108, 145] расчет этого неизвестного параметра выполняют с использованием методов численной оптимизации, а в работе [86] – с использованием нечеткой логики.

Недостатком этих методов является то, что их применение не исключает возможности появления реверсов в отдельных степенях подвижности. Применение метода [86] дополнительно затруднено неопределенностью в формировании используемых функций принадлежности, которые приходится задавать вручную.

В работе [119] рассмотрено управление гиперизбыточными МР на примере двадцатистепенного манипулятора. Для решения его ОЗК был использован подход, при котором отдельно рассчитываются обобщенные координаты первых и последних степеней подвижности, обеспечивающих общую ориентацию МР в пространстве и заданный угол подхода его РИ, и отдельно остальные средние координаты, значения которых принимаются одинаковыми и за счет которых промежуточные сочленения МР располагаются на одной дуге. Метод позволяет исключить столкновения звеньев МР с препятствиями и предотвратить вход всех его степеней подвижности в ограничения, но его применение для промышленных роботов затруднено.

Проведенный анализ не выявил известных аналитических методов решения ОЗК для кинематически избыточных МР, позволяющих исключить вход их конфигураций во все нежелательные положения. Кроме того, как указано в работе [73], для получения аналитического решения ОЗК требуется, чтобы конструкция МР удовлетворяла одному из следующих условий:

1. оси трех смежных сочленений пересекаются в одной точке;
2. оси трех смежных сочленений параллельны между собой.

Для МР, для которых эти условия не выполняются, нахождение аналитического решения ОЗК должно выполняться с помощью других подходов.

1.2.2 Численные методы решения обратной задачи кинематики

Из-за сложности получения аналитических решений ОЗК для конкретных кинематических схем МР широкое развитие получили более универсальные численные итерационные методы.

В большинстве опубликованных работ эти методы используют матрицы

Якоби \mathbf{J} (матрицы первых частных производных) для описания связи вектора $\dot{\mathbf{q}}$ скоростей изменения обобщенных координат МР и вектора $\dot{\mathbf{x}}$ линейных и угловых скоростей РИ:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{x}}. \quad (1.1)$$

С использованием этой зависимости (1.1) по методу Ньютона [84] выполняется итерационный расчет всех обобщенных координат МР в заданные дискретные моменты времени. Этот метод решения ОЗК применим только для МР, не имеющих избыточных степеней подвижности, поскольку только в этом случае матрица Якоби \mathbf{J} является квадратной.

Поэтому для кинематически избыточных МР в (1.1) вместо обратной матрицы Якоби \mathbf{J}^{-1} используют левую $\mathbf{J}^+ = (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T$ или правую $\mathbf{J}^+ = \mathbf{J}^T (\mathbf{J} \mathbf{J}^T)^{-1}$ псевдообратную квадратную матрицу Якоби [140]. Тогда расчет всех обобщенных координат может выполняться с использованием метода Гаусса–Ньютона, описанного в работах [114, 116].

Несмотря на простоту получаемых с использованием метода Гаусса–Ньютона выражений, недостатком этого метода является то, что в особых конфигурациях МР при плохой обусловленности или полной вырождаемости матрицы Якоби из-за понижения ее ранга его работоспособность теряется.

Для решения этой проблемы разработан метод Левенберга–Марквардта [21, 114, 122, 138], согласно которому для обеспечения сходимости итерационных процессов, когда матрицы $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$ и $\mathbf{J} \mathbf{J}^T$ могут оказываться плохо обусловленными или вырожденными, осуществляют факторизацию на основе матричного разложения или используют простую регуляризацию.

Известны также различные модификации [105, 109, 112, 113, 139] этих численных методов решения ОЗК.

В работе [112] описан алгоритм, минимизирующий ошибку позиционирования РИ за счет его итерационного приближения к программной

точке, который имеет простую практическую реализацию, но высокую вычислительную сложность.

В работе [113] описан метод Ньютона-Рафсона, заключающийся в численном приближенном решении системы нелинейных уравнений. Как и указанный метод Гаусса-Ньютона, он не позволяет найти решение ОЗК, когда матрица Якоби вырождается.

В работе [105] представлен метод управления кинематически избыточным МР с использованием специальной двухуровневой системы, верхний уровень которой обеспечивает решение ОЗК с помощью модифицированного метода Ньютона с учетом заданных ограничений по положению всех степеней подвижности, а нижний – корректирует рассчитываемые скорости изменения обобщенных координат с учетом динамической модели объекта управления.

В работах [109, 139] для решения ОЗК кинематически избыточного МР использован модифицированный метод Ньютона. При этом расчет оптимального вектора \dot{q} скоростей выполняется итерационно с целью минимизации квадратичного функционала. В работе [109] в этот функционал входят ошибки позиционирования и указанные скорости, за счет чего удается обеспечить высокую плавность движений МР, а применяя методы потенциальных полей, можно исключить и столкновения робота с препятствиями в его рабочей области. В работе [139] в функционал включают нормы отклонения всех обобщенных координат от своих средних положений, что позволяет в процессе отработки движений МР избежать входов в ограничения всех его степеней подвижности.

Также известны работы, посвященные численному решению ОЗК без вычисления псевдообратных матриц Якоби. В работах [80, 106] представлен эвристический метод, характеризующийся высокой скоростью сходимости, позволяющей выполнять решения ОЗК всего за несколько итераций, но наличие избыточных степеней подвижности существенно увеличивает его вычислительную сложность.

В работе [89] для решения ОЗК десятистепенного МР все обобщенные координаты предлагается рассчитывать итерационно, используя методы

численной оптимизации. При этом, несмотря на высокую маневренность робота, вычислительная сложность такого решения не позволяет реализовать его в РМВ.

С целью уменьшения объема вычислений можно выполнять расчет только части обобщенных координат численно, а остальных – аналитически с учетом рассчитанных. Такой подход описан в работе [23] на примере шестистепенного МР, работающего синхронно с двухосевым позиционером. Недостатком этого метода является заведомое ограничение свободы движений МР за счет фиксации двух ориентирующих степеней подвижности.

Проведенный анализ показал, что общим недостатком численных методов является высокая вычислительная сложность, связанная с итерационностью расчетов и необходимостью вычисления элементов псевдообратных матриц Якоби, что затрудняет их применение в РМВ, если ОЗК требуется решать непосредственно в процессе управления РИ МР и нет возможности производить все расчеты предварительно. Кроме того, если решения ОЗК для конкретной конфигурации МР не существует, то результаты работы численных методов не будут сходиться. Поэтому при их использовании требуется дополнительно проверять полученные решения.

1.2.3 Методы решения обратной задачи кинематики с использованием методов машинного обучения

Принципиально другим подходом к решению ОЗК для кинематически избыточных МР являются методы машинного обучения, включающие применение нейронных сетей, генетических алгоритмов и др.

При использовании нейронных сетей для решения ОЗК в большинстве работ [54, 77, 87, 123] применяется алгоритм обучения с учителем. При этом с использованием известного решения прямой задачи кинематики (ПЗК), которое для МР легко получается известным методом Денавита–Хартенберга [73], формируется обучающая выборка, состоящая из множества различных векторов обобщенных координат и соответствующих им векторов, задающих пространственные положения РИ. Указанная выборка используется для обучения

[130] нейронной сети, которая после его завершения применяется для решения ОЗК. Достоинствами этих методов являются их универсальность в отношении конструкций МР и сравнительно низкая вычислительная сложность.

Если же формирование программных сигналов для всех степеней подвижности МР выполняется заранее, а не в РМВ, структура нейронной сети, как показано в работах [110, 111], может быть существенно усложнена с целью улучшения точности получаемых решений. Для этого обеспечивается одновременная параллельная работа трех нейронных сетей с последующим выбором наилучшего получаемого с их помощью результата.

Общим недостатком этих методов [54, 77, 87, 110, 111] является то, что их применение не гарантирует обход МР всех нежелательных конфигураций во время его движения, а также то, что эффективность их работы существенно зависит от способа формирования исходной обучающей выборки.

Для формирования этой обучающей выборки или для непосредственного решения ОЗК могут применяться и генетические алгоритмы [88, 118, 136], которые в своей работе реализуют аналоги механизмов естественной эволюции: мутации, скрещивания и отбора. Достоинством генетических алгоритмов является способность быстро найти глобальный оптимум многоэкстремальной функции, что применимо при решении ОЗК для МР, конструкция которых позволяет обеспечить множество различных конфигураций для заданного положения его РИ в пространстве. Однако эти алгоритмы не имеют направления поиска, из-за чего даже при попадании в область экстремума генетическому алгоритму может потребоваться большое число шагов для его достижения. Для уменьшения этого недостатка могут применяться различные комбинированные методы, описанные в работе [6], которые путем непрерывного чередования шагов генетического алгоритма и процедур симплексного поиска обеспечивают поиск требуемого решения ОЗК. Несмотря на высокую точность, вычислительная сложность генетических алгоритмов также не позволяет использовать их в РМВ.

Другим способом обучения нейронных сетей, называемых также “агентами”, является обучение с подкреплением. При этом параметры агентов

настраиваются путем проб и ошибок в процессе их взаимодействия с некоторой средой, когда за каждое действие они получают вознаграждение или штраф, а само обучение производится с целью максимизации вознаграждения. Известен ряд работ [79, 82, 125, 127], посвященных решению ОЗК для различных избыточных МР с использованием такого способа обучения. В этих работах в качестве функции награды используется функция расстояния между РИ МР и его программным положением, а в качестве действий – итеративные приращения углов в сочленениях.

Методы обучения с подкреплением, как указано в [13], обладают достоинствами нейросетевых методов, в то же время не требуют детальной информации об исследуемой системе и упрощают задачу получения репрезентативной обучающей выборки.

Обобщая проведенный анализ приведенных методов, можно сделать вывод, что решение ОЗК для кинематически избыточных МР до сих пор сопряжено со значительными, в том числе вычислительными, проблемами, и не всегда гарантируется, что конфигурация МР не войдет в ряд нежелательных положений, в которых нарушается качественное выполнение ТО.

Таким образом, задача формирования программных сигналов управления для всех степеней подвижности кинематически избыточных МР с учетом возможности входа всех степеней в механические ограничения, МР – в особые положения, а также выхода их РИ на границы рабочих областей в настоящее время еще далека от своего эффективного решения, которое по-прежнему остается актуальным.

1.3 Постановка задачи

Целью диссертации является создание новых решений и методов синтеза СУ МР, способных обеспечить предельно высокую скорость перемещения их РИ в процессе выполнения ТО без снижения заданной динамической точности, а также без входа механизмов МР в ограничения и особые положения с одновременным увеличением их рабочих областей.

Для достижения указанной цели в диссертации решаются задачи, структура которых показана на рис. 1.2:

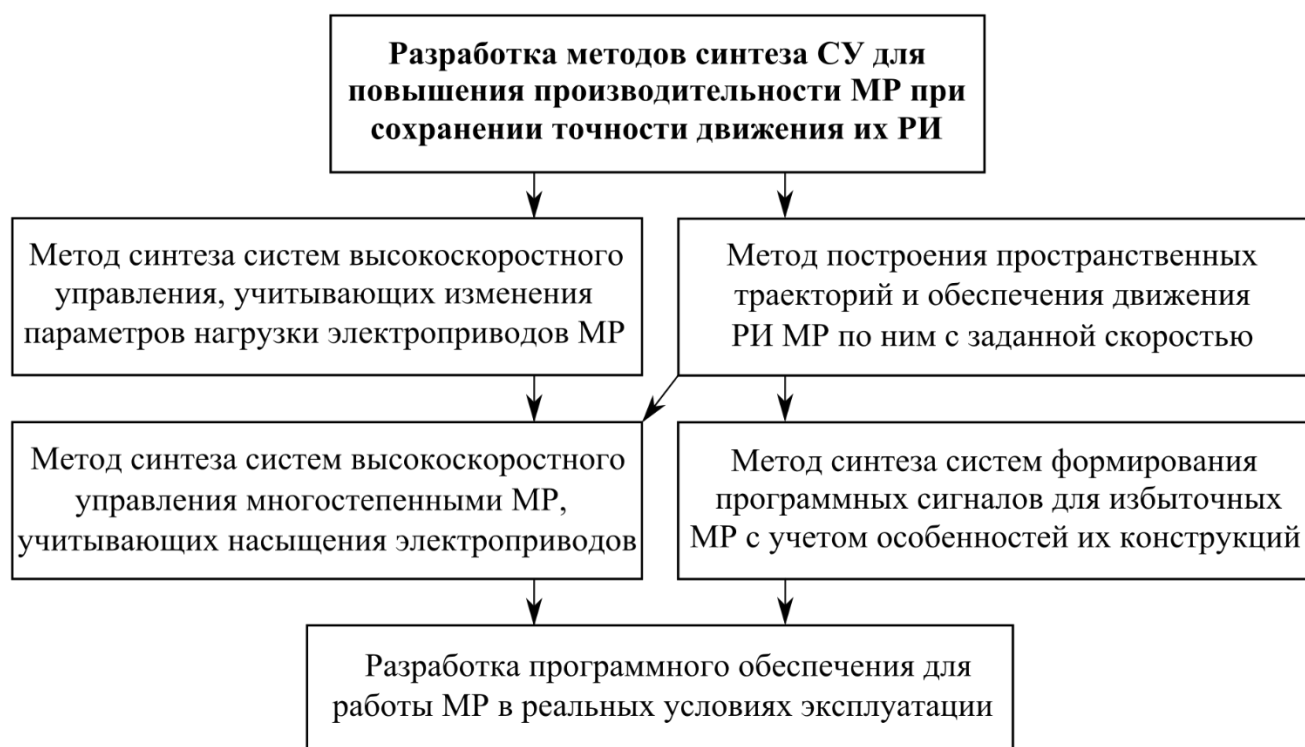


Рисунок 1.2 – Структура задач диссертации по созданию новых методов синтеза СУ МР

Поставленную в диссертации цель повышения скорости движения (производительности) МР при сохранении высокой точности управления планируется достичь с учетом особенностей работы его исполнительных устройств при изменении параметров их нагрузки.

Для этого вначале будет разработан метод синтеза систем высокоскоростного управления электроприводами МР, гарантирующий точное выполнение ТО с учетом возможных изменений параметров нагрузки их электроприводов и ограничений мощности их исполнительных элементов за счет обеспечения постоянной работы этих элементов в преднасыщенном состоянии. Применение этого метода позволит повысить производительность МР в режиме позиционного управления.

Затем будет разработан метод построения гладких пространственных

траекторий движения РИ МР с использованием математического аппарата параметрических сплайнов. Применение этого метода обеспечит возможность непрерывного формирования законов движения РИ МР по указанным траекториям точно с требуемой скоростью.

С использованием этих методов будет разработан метод синтеза систем автоматического формирования предельно высоких программных скоростей движения РИ МР по пространственным траекториям, обеспечивающих сохранение требуемой динамической точности управления за счет непрерывной работы хотя бы одного из электроприводов МР вблизи зоны насыщения, но без входа в нее. Применение этого метода позволит повысить производительность многостепенных МР в режиме контурного управления.

Далее для сохранения высокой точности управления при использовании указанного метода формирования программной скорости движения РИ МР будет разработан метод синтеза систем формирования программных сигналов для всех степеней подвижности кинематически избыточных МР. Этот новый метод за счет использования избыточных степеней подвижности позволит полностью исключить возможность появления, во-первых, нежелательных реверсов в приводах этих МР, связанных со входом манипуляторов в особые положения, во-вторых, резких увеличений динамических ошибок при входе некоторых степеней подвижности в ограничения, и, в-третьих, аварийных остановок в процессе выполнения ТО при выходе РИ на границы рабочих областей МР.

Все перечисленные методы будут использованы для создания программного обеспечения, с применением которого будут проведены натурные эксперименты, подтверждающие возможность обеспечения высококачественной работы СУ МР в реальных условиях эксплуатации.

Последовательное решение всех этих задач позволит создать общий подход к синтезу СУ МР, обеспечивающих движение их РИ с предельно высокой возможной скоростью без снижения качества выполняемых ТО.

2 Разработка метода синтеза систем управления высокоскоростными движениями манипуляционных роботов

Как было отмечено во введении и первой главе, для повышения производительности МР все ТО необходимо выполнять на предельно высокой скорости. Но при увеличении скорости движения МР снижается динамическая точность их управления [34], что иногда связано с возможностью входа исполнительных электроприводов в насыщение. Эта же точность снижается и при изменении параметров нагрузки электроприводов при использовании стационарных регуляторов [55].

Проведенный анализ существующих методов [1, 2, 58, 104, 137] показал, что задача разработки метода высокоскоростного автоматического управления движениями МР с учетом ограничений по сигналам управления и изменений параметров нагрузки их электроприводов пока не имеет эффективного решения.

Поэтому для решения указанной задачи в данной главе представлен метод синтеза СУ электроприводами МР, описанный в работах [57, 90], применение которого позволит повысить производительность и обеспечить неизменно точное выполнение ТО с учетом возможных изменений параметров нагрузки их электроприводов и ограничений мощности их исполнительных элементов за счет обеспечения постоянной работы этих элементов в преднасыщенном состоянии. Поставленная задача решается для технологического процесса, осуществление которого требует синхронно управлять одностепенным МР и конвейером, приводимыми в движение электроприводами постоянного тока с постоянными магнитами.

2.1 Описание объекта управления

Добиться повышения производительности (скорости) работы МР, как указывается многими авторами и изложено в принципе максимума Понтрягина [33], можно за счет использования релейного управления, при котором разгон и торможение будут осуществляться на пределе мощности используемых

усилительных и исполнительных элементов. При этом длительность интервалов, на которых подаются напряжения одного знака, должна выбираться таким образом, чтобы обеспечивалось точное перемещения рабочего органа (РО) из одного заданного положения в другое. Поэтому указанная задача сводится к расчету моментов времени, в которые должны выполняться изменения знаков напряжения (начало разгона и торможения).

В главе эта задача решается для технологического процесса, показанного на рис. 2.1, где цифрой 1 обозначен одностепенной манипулятор, обеспечивающий движение РО (накопителя деталей) 2 в горизонтальной плоскости по дуге 3 окружности над лентой конвейера 4, приводимого в движение ведущим колесом 5 и перемещающим n объектов 6 (O_i) через область 7 видимости видеокамеры 8 непосредственно под РО. Цифрой 9 на рис. 2.1 обозначена оптическая ось видеокамеры, перпендикулярная плоскости конвейерной ленты и пересекающая его продольную ось перед дугой 3 по направлению движения ленты конвейера; Oxy – декартова система координат (СК), начало которой лежит на продольной оси конвейера и на вертикальной оси 9, ось Ox совпадает с продольной осью ленты конвейера 4 и направлена в противоположном ее движению направлении, а ось Oy также расположена в плоскости той же ленты; q – текущее значение угла поворота манипулятора относительно оси Ox .

Координаты объектов 6 $O_i (x_i, y_i) (i = \overline{1, n})$ в СК Oxy определяются с помощью видеокамеры 8 в момент остановки конвейера 4. ТО с каждым i -ым объектом выполняется тогда, когда РО 2 находится над точкой A_i с координатами $(x_i^*, y_i) (i = \overline{1, 2})$ в СК Oxy (см. рис. 2.1). В этом случае угол отклонения звена манипулятора 1 от оси Ox определяется по формуле [99]

$$q_i = \arcsin(y_i/l), \quad (2.1)$$

где i – номер объекта; l – длина звена манипулятора. При этом скорость движения РО 2 относительно объектов 6 равна нулю.

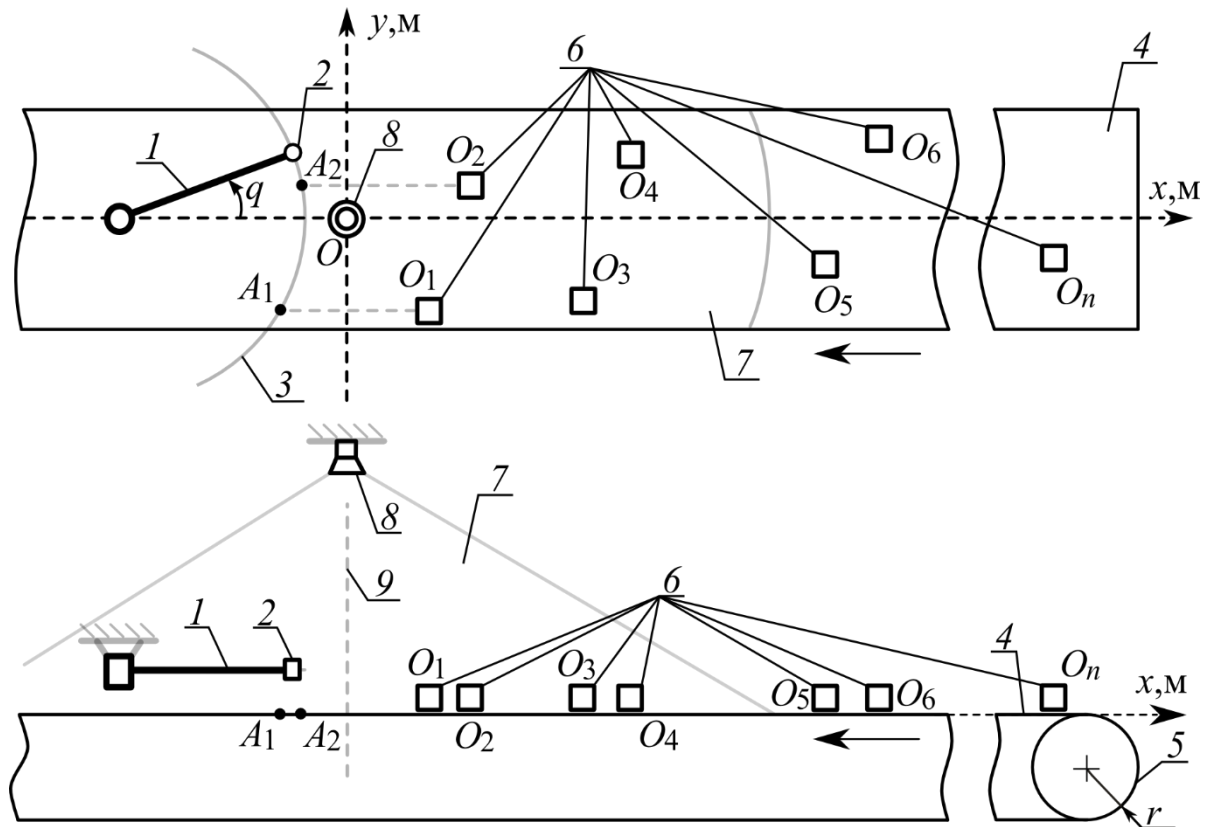


Рисунок 2.1 – Схема технологического процесса

После выполнения ТО с очередным объектом с номером $i - 1$ конвейер смещает следующий i -ый объект на расстояние $x_i - x_i^*$, останавливается и после завершения манипулятором перемещения РО по дуге 3 в положение над этим объектом выполняется новая ТО. Если РО манипулятора переходит в новое положение еще до того, как к нему будет перемещен следующий объект, то манипулятор ожидает, пока этот объект не будет доставлен конвейером. Если на дуге 3 окажется сразу несколько деталей, то манипулятор будет выполнять с ними операции поочередно, начиная с детали, расположенной ближе к краю конвейерной ленты, и продолжая остальными, совершая движение по дуге 3 только в одну сторону. Затем указанный цикл повторяется.

Перемещение i -го объекта на расстояние $x_i - x_i^*$ обеспечивается поворотом его ведущего колеса 5 на угол [99] $(x_i - x_i^*)/r$, где r – радиус этого колеса.

При выполнении каждой ТО из накопителя 2 на объект 6 (см. рис. 2.1) устанавливается одна деталь, при этом дискретно уменьшается момент инерции, приведенный к валу электродвигателя манипулятора, на фиксированную

величину. Момент инерции, приведенный к валу электродвигателя конвейера, во время его движения практически не меняется и принимается постоянным.

Исполнительными элементами манипулятора и конвейера являются электроприводы постоянного тока с постоянными магнитами, которые с учетом значений индуктивностей якорных обмоток электродвигателей и величин моментов всех сухих трений можно описать дифференциальными уравнениями третьего порядка [55]:

$$\ddot{\alpha}_j L_j J_{Ej} + \dot{\alpha}_j R_j J_{Ej} + \dot{\alpha}_j K_{Mj} K_{\omega j} + R_j M_{стр j} = U_j K_{Mj} K_{yj}, \quad (2.2)$$

где j (1 или 2) – номер электропривода манипулятора и конвейера, соответственно; L_j и R_j – соответственно, индуктивности и активные сопротивления якорных цепей электродвигателей; K_{Mj} и $K_{\omega j}$ – соответственно, их коэффициенты крутящего момента и противо-ЭДС; K_{yj} – коэффициенты усиления усилителей мощности; U_j – входные напряжения; J_{Ej} – суммарные моменты инерции роторов соответствующих двигателей и приведенных к ним моментов инерции вращающихся частей редукторов манипулятора и конвейера; $M_{стр j}$ – нелинейные характеристики моментов сухих трений, приведенных к валам соответствующих двигателей, равные

$$M_{стр j} = \begin{cases} M_{тр j} \text{sign } \dot{\alpha}_j, & \text{если } \dot{\alpha}_j \neq 0, \\ M_{дв j}, & \text{если } \dot{\alpha}_j = 0 \text{ и } |M_{дв j}| < M_{трп j}; \end{cases} \quad (2.3)$$

$M_{тр j}$ и $M_{трп j}$ – соответственно, величины моментов сухого трения движения и покоя (с залипанием); $M_{дв j}$ – моменты, развиваемые двигателями; α_j – угол поворота вала соответствующего электродвигателя; $\dot{\alpha}_j$, $\ddot{\alpha}_j$, $\dddot{\alpha}_j$ – соответственно, первая, вторая и третья производные переменной α_j .

С учетом передаточного числа редуктора i_{pj} угол поворота манипулятора $q = \alpha_1/i_{p1}$, а угол поворота ведущего колеса конвейера $\varphi = \alpha_2/i_{p2}$.

2.2 Описание метода высокоскоростного управления движением электроприводов манипулятора и конвейера

Для решения поставленной задачи сигналы управления электроприводами манипулятора и конвейера предлагается формировать в виде последовательности прямоугольных сигналов с различными знаками и с максимально возможным по модулю значением, обеспечивающим работу приводов в линейной зоне их усилителей мощности. Для перемещения манипулятора в новое положение q_i , рассчитываемое по формуле (2.1), вначале на его привод подается управляющий сигнал, обеспечивающий максимально быстрый разгон манипулятора, а затем знак этого сигнала в определяемый момент времени меняется на противоположный для его максимально быстрого торможения и остановки в положении q_i . Аналогично осуществляется управление электроприводом конвейера, максимально быстро перемещающим объекты под РО манипулятора. Время начала торможения манипулятора и конвейера определяется уже в процессе их движений с использованием непрерывного решения уравнения

$$\alpha_j = c_{1j} + c_{2j}e^{\lambda_{2j}t} + c_{3j}e^{\lambda_{3j}t} + C_j t, \quad (2.4)$$

которое является аналитическим решением уравнения (2.2) [15, 18] с учетом вида $M_{стрj}$ (2.3) и с измененным на противоположный разгону знаком прямоугольного сигнала U_j на входе привода, где t – время движения с одним прямоугольным сигналом управления; λ_{2j} и λ_{3j} – действительные отрицательные корни составленного для уравнения (2.2) характеристического уравнения третьего порядка, равные $-(R_j \pm \sqrt{R_j^2 - 4K_{Mj}K_{\omega j}L_j / J_{Ej}})/(2L_j)$, соответственно; c_{1j} , c_{2j} , c_{3j} – константы, рассчитываемые с учетом начальных условий конкретного движения (значений, определяемых начальными величинами угла поворота, скорости и ускорения вращения ротора каждого двигателя); C_j – константа, определяемая частным решением неоднородного уравнения (2.2).

В результате удается постоянно быстро рассчитывать промежуточные углы

q_s и φ_s поворота манипулятора и конвейера, соответственно, до начала их торможения сигналами с учетом текущих параметров вращения приводов. Если $|q_s - q_i| > \varepsilon_{don 1}$ и $|\varphi_s - \varphi^*| > \varepsilon_{don 2}$, где $\varepsilon_{don j}$ ($j = \overline{1, 2}$) – некоторые малые величины; φ^* – очередное желаемое значение угла поворота ведущего колеса конвейера, то разгон или движение манипулятора и конвейера с постоянной скоростью будут продолжены. Нарушение каждого из этих условий приведет к началу торможения соответствующего электропривода манипулятора (конвейера) из текущего положения до остановки или до изменения знака скорости вращения его привода вблизи q_s или φ_s .

После завершения торможения манипулятора (конвейера) минимизация разности $|q - q_i|$ или $|\varphi - \varphi^*|$ обеспечится типовой следящей СУ, о которой будет сказано ниже. Если конвейер уже доставил очередной объект к месту выполнения ТО, то эта операция выполняется и начинается новое движение манипулятора к следующему объекту. В противном случае манипулятор ожидает подхода очередного объекта к месту проведения ТО.

На рис. 2.2 представлена обобщенная схема устройства управления электроприводами манипулятора и конвейера. На этом рисунке введены следующие новые обозначения: ЭП₁ и ЭП₂ – электроприводы (двигатели постоянного тока) с усилителями мощности, обеспечивающие повороты звена манипулятора и ведущего колеса конвейера, соответственно; ПУ – программное устройство, формирующее очередные желаемые значения углов q^* поворота манипулятора и φ^* ведущего колеса конвейера, $U_{lim j}$ ($j = \overline{1, 2}$) – сигналы управления, равные соответствующим минимальным $U_{min j}$ или максимальным $U_{max j}$ значениям напряжений, e_1 и e_2 – сигналы управления ключами 10 и 11, e_3 – сигнал управления видеокамерой 8; ТР₁ и ТР₂ – типовые регуляторы, обеспечивающие требуемые показатели качества работы соответствующих замкнутых электроприводов; ε_1 и ε_2 – ошибки по углу поворота соответствующих электроприводов, поступающие на входы ТР₁ и ТР₂; q , \dot{q} , \ddot{q} и φ , $\dot{\varphi}$, $\ddot{\varphi}$ – соответственно, текущие значения углов поворота, скоростей и ускорений

вращения выходных валов электроприводов манипулятора и ведущего колеса конвейера, измеряемые датчиками, установленными в ЭП₁ и ЭП₂.

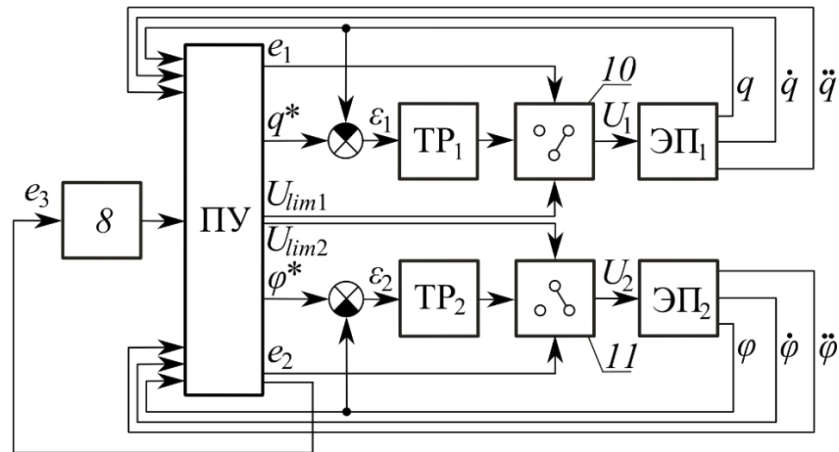


Рисунок 2.2 – Обобщенная схема устройства управления электроприводами манипулятора и конвейера

До запуска технологического процесса (см. рис. 2.1) конвейер 4 неподвижен, а объекты 6, с которыми будут выполняться ТО, располагаются на конвейерной ленте вне или внутри области 7 справа от дуги 3. После запуска этого процесса на выходе ПУ формируются сигналы q^* и φ^* , равные сигналам q и φ , соответственно, поступающим с выходов датчиков поворота, установленных на ЭП₁ и ЭП₂, на входы ключей 10 и 11 поступают сигналы $e_1 = 1$ и $e_2 = 1$, подключающие выходы ТР₁ и ТР₂ к ЭП₁ и ЭП₂, соответственно. Поэтому манипулятор 1 и конвейер 4 продолжают оставаться неподвижными. На видеокамеру 8 с выхода ПУ поступает сигнал $e_3 = 1$ (см. рис. 2.2), и она фотографирует объекты, расположенные на конвейере 4 в области видимости 7.

Сформированное видеокамерой 8 изображение по стандартному интерфейсу передается на вход ПУ, где оно сохраняется одновременно с текущим значением угла φ . После получения изображения сигнал e_3 обнуляется, отключая видеокамеру. С использованием сохраненного изображения в ПУ известным способом [76] для каждого обнаруженного объекта O_i определяются его текущие координаты x_i и y_i в СК Oxy . Эти координаты, а также номер i соответствующего

им объекта сохраняются в памяти ПУ до тех пор, пока с этими объектами не выполнят ТО.

Если же в памяти ПУ объекты b , с которыми требуется выполнить ТО, отсутствуют, то на выходе ПУ формируется сигнал $\varphi^* = \varphi + \Delta\varphi$, поступающий на вход следящего электропривода конвейера 4, где $\Delta\varphi$ – дополнительный угол поворота колеса 5, обеспечивающий перемещение этого конвейера на величину, равную кратчайшему расстоянию в плоскости Oxy от дуги 3 до кривой, ограничивающей область 7. После отработки угла φ^* и окончания переходных процессов конвейер 4 останавливается и из ПУ на видеокамеру 8 поступает сигнал очередной съемки области 7. Эта процедура повторяется до тех пор, пока в области 7 не появится хотя бы один из объектов b или пока выполнение технологического процесса не будет остановлено оператором. При обнаружении видеокамерой 8 в области 7 хотя бы одного объекта b выполняется сохранение полученного изображения в ПУ, отключение видеокамеры 8, получение и сохранение текущих координат обнаруженных объектов в СК Oxy , их номеров и значения текущего угла φ в ПУ. Если в ПУ на полученном изображении отображаются только части объектов b , то они не учитываются.

Поскольку конвейер 4 перемещает объекты b только в одну сторону, то для измерения угла поворота φ должен использоваться многооборотный датчик положения. Но поскольку он имеет ограничение, то после достижения максимального значения $\varphi = \varphi_{\max}$ этот угол автоматически уменьшается на величину φ_{\max} . Одновременно с этим на выходе ПУ на ту же величину уменьшается сигнал φ^* , позволяя использовать этот датчик при любой продолжительности работы конвейера.

Для тех объектов, которые были обнаружены на обработанных в ПУ изображениях, определяется очередность их перемещения на дугу 3, где с ними будут выполнены ТО. Для этого в ПУ для каждого сохраненного в его памяти объекта определяется ближайшая вдоль оси Ox точка A_i с координатами (x_i^*, y_i) ($i = \overline{1, n}$) (n – количество объектов, сохраненных в памяти ПУ), лежащая на дуге 3 в плоскости Oxy (см рис. 2.1), и определяется расстояние от i -го объекта до точки

A_i , равное $x_i - x_i^*$ ($i = \overline{1, n}$). Объект или несколько объектов, имеющие одинаковые величины $x_i - x_i^*$, перемещаются конвейером на дугу 3 первыми, но ТО с ними будут выполнены в очередности, позволяющей минимизировать общие перемещения РО 2, необходимые для выполнения ТО со всеми перемещенными на дугу 3 объектами. Именно в порядке указанной очередности всем сохраненным в памяти ПУ объектам присваиваются номера i .

Для поочередного перемещения объектов b на дугу 3 к текущему значению сигнала φ^* каждый раз будет добавляться величина $(x_i - x_i^*)/r$ с номером очередного объекта. При этом до окончания выполнения ТО с каждым ранее обнаруженным объектом его номер сохраняется в ПУ, а изменяется только значение его координаты по оси Ox по мере его перемещения конвейером 4.

После появления на выходе ПУ сигнала φ^* начинается перемещение РО 2 в положение над точкой A_i . Для этого на выходе ПУ формируются сигналы $e_1 = 0$ и $e_2 = 0$, подключающие сигналы $U_{lim 1}$ и $U_{lim 2}$ ко входам ЭП₁ и ЭП₂. При этом знак $U_{lim 1}$ обеспечивает разгон манипулятора 1 в сторону угла q_i , а знак $U_{lim 2}$ – разгон конвейера 4 в сторону угла φ^* .

После начала движения манипулятора 1 с учетом текущих значений q , \dot{q} и \ddot{q} , получаемых от соответствующих датчиков, в ПУ по уравнению (2.4) рассчитывается угол q_s , в котором предположительно произойдет остановка манипулятора 1, если торможение начнется в текущем положении q , и проверяется выполнение условия $|q_s - q_i| > \varepsilon_{дон 1}$, определяющее начало торможения. Когда это условие нарушается, знак сигнала $U_{lim 1}$ изменяется на противоположный и остается постоянным до тех пор, пока манипулятор 1 не остановится или знак \dot{q} не изменится. Когда это произойдет, на выходе ПУ формируются сигналы $q^* = q_i$ и $e_1 = 1$, ключ 10 отключает сигнал $U_{lim 1}$, замыкает выход ТР₁ на вход ЭП₁, который становится следящим и минимизирует $|q - q_i|$.

Аналогично в ПУ определяется момент начала торможения конвейера 4, для этого по уравнению (2.4) рассчитывается угол φ_s , проверяется выполнение условия $|\varphi_s - \varphi^*| > \varepsilon_{дон 2}$ и при его нарушении знак $U_{lim 2}$ изменяется на

противоположный до остановки конвейера 4 или изменения знака ϕ . После этого на выходе ПУ появляется сигнал $e_2 = 1$, замыкающий ключом 11 выход ТР₂ и вход ЭП₂ для отработки в следящем режиме возможной малой ошибки $|\phi - \phi^*|$.

После завершения переходных процессов в ЭП₁ и ЭП₂ и приведения ошибок $|\varepsilon_j|$ к допустимым значениям $\varepsilon_{донj}$ ($j = \overline{1, 2}$), РО окажется над объектом работ с требуемой точностью, что позволит выполнить с ним ТО и перейти к обработке следующего объекта б, выбираемого согласно описанному выше алгоритму, повторяя весь описанный выше цикл работы системы. Эта работа продолжается в описанной выше последовательности до остановки конвейера 4 оператором.

Если объекты располагаются на ленте транспортера плотно и быстродействие всей системы заведомо определяется только скоростью работы манипулятора 1, то релейный закон управления используется только для ЭП₁. В этом случае на ключ 11 из ПУ всегда подается сигнал $e_2 = 1$, ЭП₂ всегда работает только в следящем режиме и расчет условия начала торможения конвейера 4 не производится. Если же объекты б на конвейере 4 располагаются редко и скорость работы всей системы заведомо определяется быстродействием только конвейера 4, то описанный выше релейный закон управления используется только для ЭП₂, а ЭП₁ работает в обычном следящем режиме. Для этого на ключ 10 всегда подается сигнал $e_1 = 1$ и не производится проверка условия начала релейного торможения манипулятора 1.

2.3 Моделирование работы системы высокоскоростного управления электроприводами манипулятора и конвейера

При исследовании системы использованы следующие параметры ЭП₁ и ЭП₂: $L_j = 0.01$ Гн, $R_j = 0.5$ Ом, $K_{Mj} = 0.04$ Нм/А, $K_{\omega j} = 0.04$ Вc, $i_{pj} = 100$, $K_{y_j} = 1$ ($j = \overline{1, 2}$). Длина манипулятора $l = 0.4$ м, а ТР₁ и ТР₂ (см. рис. 2.2) описывались одинаковыми передаточными функциями $W(s) = K(T_1s+1)/(T_2s+1)$ где $T_1 = 0.1$ с и $T_2 = 0.005$ с – постоянные времени; $K = 6000$ – коэффициент усиления. Ограничения входных напряжений приводов: $U_{minj} = -20$ В и $U_{maxj} = 20$ В ($j = \overline{1, 2}$).

При моделировании РО 2 (см. рис. 2.1) манипулятора I выполнял установку деталей на четырнадцать объектов b , поочередно перемещаемых конвейером I , а $r = 0.15$ м. Объекты b на конвейере I располагались поочередно с разных сторон от продольной оси Ox ленты конвейера 4 . Три первых и три последних объекта располагались на расстояниях $y_i = \pm 0.385$ м ($q_i = \pm 1.3$ рад), а восемь остальных – на расстояниях $y_i = \pm 0.118$ м ($q_i = \pm 0.3$ рад) от оси Oy . Для нечетных объектов $y_i > 0$, а для четных – $y_i < 0$. Расстояние от дуги 3 до следующего обрабатываемого i -го объекта вдоль оси Ox в момент выполнения ТО с i -1-ым объектом равно $x_i - x_i^* = 0.03$ м ($i = \overline{1, 14}$). При таком близком расположении объектов друг к другу на конвейере 4 релейный закон управления введен только для ЭП₁, который и определяет быстродействие всей системы в целом.

Масса звена манипулятора I с установленным на нем пустым накопителем равна 5.3 кг, масса каждой детали, устанавливаемой на объект в крайних положениях манипулятора, – 0.1 кг. Поэтому суммарный момент инерции J_{E1} дискретно уменьшался на $0.156 \cdot 10^{-3}$ кгм², изменяясь от начального $5.29 \cdot 10^{-3}$ (при полном накопителе с 14 деталями) до конечного $3.11 \cdot 10^{-3}$ кгм² значения при пустом накопителе ($J_{E2} = 2 \cdot 10^{-3}$ кг·м²). $M_{стрj}$ для обоих электроприводов имели вид (2.3) и значения $M_{трj} = M_{трпj} = 0.3$ кгм².

Ниже на рис. 2.3–2.5 представлены результаты моделирования работы созданной системы. Цифрой 1 обозначены законы изменения угла поворота q манипулятора, перемещения $S = \varphi r$ конвейера вдоль оси Ox , суммарного момента инерции J_{E1} и входного напряжения U_1 при работе описанной системы (см. рис. 2.2). На рис. 2.4 использованы следующие масштабы: $S = \text{scale } 1$ м; $J_{E1} = \text{scale } 5 \cdot 10^{-3}$ кгм².

Из приведенных графиков видно, что при достижении манипулятором крайних положений (кривая 1 на рис. 2.3), в которых выполнялась установка детали на очередной объект b , происходило дискретное уменьшение величины J_{E1} (кривая 1 на рис. 2.4). При этом ведущее колесо 5 поворачивалось на очередной угол, соответствующий перемещению конвейера 4 на расстояние $S = x_i - x_i^*$ (кривая 1 на рис. 2.4), и останавливалось в ожидании, пока не будет выполнена

ТО, то есть очередное движение конвейера 4 завершалось значительно раньше, чем электропривод манипулятора достигал своих крайних положений. Это позволило использовать релейный закон управления U_1 только для электропривода манипулятора. Этот закон обеспечивал точность доставки РО с деталями к объектам в пределах 0.1 мм.

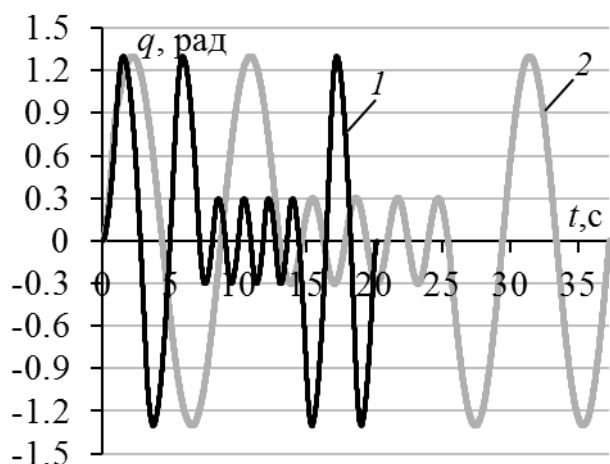


Рисунок 2.3 – Законы изменения угла поворота q

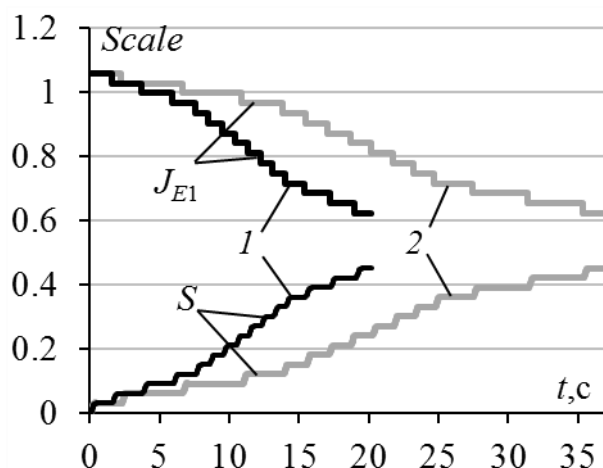


Рисунок 2.4 – Законы перемещения S конвейера и изменения суммарного момента инерции J_{E1}

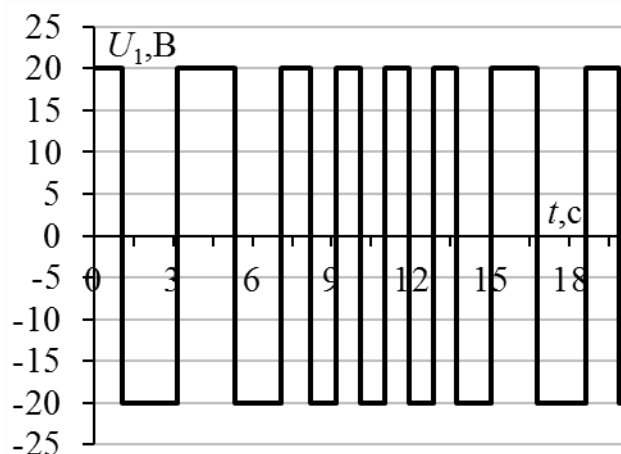


Рисунок 2.5 – Релейный закон изменения входного напряжения U_1

Цифрой 2 на рис. 2.3–2.5 обозначены соответствующие кривые, отображающие работу системы, использующей для повышения быстродействия подстройку частоты входного сигнала [99]. Из представленных рисунков видно, что новая система по сравнению с ранее известной повышает быстродействие

манипулятора на 46%. При этом точность работы последней за счет приближенности используемого подхода, созданного на основе АЧХ, находится в пределах 0.76 мм, что почти в 8 раз хуже точности работы новой системы в крайних положениях манипулятора.

2.4 Выводы

В данной главе предложен и исследован новый метод синтеза СУ, предназначенных для высокоскоростного автоматического управления электроприводами МР в режиме позиционного управления с учетом ограничений управляющих сигналов и изменяемых в процессе выполнения ТО приведенных к валам электроприводов моментов инерции.

1. Было подтверждено, что использование релейного закона управления при точном расчете моментов изменения знака управляющих сигналов с учетом математического описания нагруженных электроприводов позволяет существенно повысить точность и производительность используемого робототехнического оборудования.

2. С использованием предложенного метода синтезирована СУ конкретным технологическим процессом, в котором осуществляется одновременное синхронное управление электроприводами одностепенного манипулятора и конвейера.

3. Результаты выполненного математического моделирования полностью подтвердили работоспособность и высокую эффективность синтезированной с помощью предложенного метода СУ при отработке движений МР с изменяемыми в процессе работы параметрами нагрузки. Реализация этой СУ технологическим процессом не вызывает затруднений и защищена патентом РФ на изобретение [30] и свидетельством о регистрации программы для ЭВМ [52].

3 Разработка метода синтеза систем формирования предельно высоких программных скоростей движения рабочих инструментов многостепенных манипуляторов

Во второй главе была решена задача высокоскоростного управления системой, в состав которой входил одностепенный манипулятор с изменяемыми в процессе работы параметрами. Причем этот манипулятор работал в режиме позиционного управления, перемещаясь из одного конечного положения в другое. Но наибольшее распространение в промышленности получили многостепенные МР, работающие в режиме контурного управления при выполнении различных ТО. Применить представленный выше метод управления манипуляторами для многостепенных МР не представляется возможным, поскольку он не позволяет управлять сразу всеми их степенями подвижности.

Для многостепенных МР уже существует ряд методов [60, 72, 83, 92, 131] высокоскоростного управления, которые позволяют прямо или косвенно учесть возможность входа их электроприводов в режим насыщения в связи с необходимостью компенсации динамических взаимовлияний между всеми их степенями подвижности. Но, как было показано в первой главе, эффективное решение этой задачи всё еще не получено.

Целью третьей главы диссертации является создание метода синтеза систем автоматического формирования предельно высоких программных скоростей движения РИ МР по сложным пространственным траекториям, формируемым с использованием параметрических сплайнов. Причем при движении РИ с этими программными скоростями должна сохраняться требуемая динамическая точность управления за счет непрерывной работы хотя бы одного из электроприводов МР вблизи зоны насыщения, но без входа в нее.

3.1 Описание объекта управления

Рассматривается МР с кинематической схемой типа PUMA, но общность решаемой задачи сохраняется и для манипуляторов с иными кинематическими

схемами. Влиянием ориентирующих степеней подвижности, расположенных вблизи РИ, будем пренебрегать, так как их силовое и моментное воздействие на переносные степени МР пренебрежимо мало. Кроме того, полагаем, что все электроприводы МР работают в линейной зоне усиления усилителей мощности, где их СУ обеспечивают требуемую динамическую точность работы, при которой обобщенные координаты МР мало отличаются от их программных значений, о чем более подробно будет сказано далее. Это позволяет пренебречь детальным описанием регуляторов, не нарушая работоспособности предлагаемого метода.

Исполнительными элементами МР являются электродвигатели постоянного тока с постоянными магнитами. Уравнения электрической и механической цепей i -го электропривода при малых величинах индуктивности его якорной цепи, а также вязкого и сухого трения имеют вид [68]:

$$\begin{aligned} R_i I_i + K_{oi} \dot{q}_i &= K_{yi} U_i, \\ M_{\partial vi} = K_{Mi} I_i &= J_{Ei} \ddot{q}_i + P_i / i_{pi}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где $i = \overline{1,3}$ – номер i -ой переносной степени подвижности МР; q_i , \dot{q}_i , \ddot{q}_i – соответственно, значения обобщенных координат МР, а также их скоростей и ускорений; I_i – якорный ток электродвигателя; P_i – моменты, возникающие на выходном валу редуктора i -го сочленения при произвольном движении манипулятора.

Обобщенное моментное воздействие P_i имеет вид [68]:

$$P_i = H_i \ddot{q}_i + h_i \dot{q}_i + M_{vni}, \quad (3.2)$$

где H_i – компонента, характеризующая инерционные свойства соответствующей части манипулятора; h_i – составляющая момента, пропорциональная \dot{q}_i ; M_{vni} – моментное воздействие на i -ое сочленение манипулятора, учитывающее гравитационные силы и взаимовлияния его степеней подвижности в процессе

движения.

С учетом выражений (3.1) и (3.2) уравнение нагруженного электропривода в i -ой степени подвижности манипулятора может быть представлено в виде [68]:

$$R_i(H_i + J_{Ei}i_{pi}^2)\ddot{q}_i + (R_i h_i + K_{Mi}K_{\omega i}i_{pi}^2)\dot{q}_i + R_i M_{\text{вн}i} = K_{Mi}K_{yi}i_{pi}U_i. \quad (3.3)$$

Выражение (3.3) будет использовано при создании метода автоматического формирования предельно высокой скорости движения РИ МР.

3.2 Описание уравнения, определяющего предельно высокую скорость движения рабочего инструмента многостепенного манипулятора по гладким пространственным траекториям, заданным параметрическими сплайнами

Движение РИ МР на предельно высокой скорости будет обеспечиваться при условии, что хотя бы один из его электроприводов с учетом текущей нагрузки будет работать на пределе своей мощности, вращаясь с предельно высокими скоростью и ускорением вблизи зоны нелинейных искажений усилителя мощности, но не входя в нее. В результате при согласованном управлении всеми остальными электроприводами МР будет обеспечена предельно высокая переменная скорость v движения РИ по любым гладким пространственным траекториям в декартовой СК Ox_{yz} , связанной с основанием МР.

Уравнение (3.3) описывает зависимость обобщенной скорости \dot{q}_i и ускорения \ddot{q}_i электропривода от его входного напряжения U_i при текущих значениях H_i , h_i , $M_{\text{вн}i}$. Но с учетом кинематики МР и текущего положения РИ на траектории его желательно переписать так, чтобы оно описывало зависимость скорости v и ускорения \dot{v} движения РИ от U_i . Тогда, задавая величину U_i для одного из электроприводов МР предельно допустимой, с помощью нового уравнения можно было бы получить закон изменения предельных значений v и \dot{v} . Однако формировать зависимости v и \dot{v} от всех текущих значений U_i при произвольном пространственном движении РИ МР сложно, так как потребуется в

РМВ определять все необходимые переменные параметры нового уравнения, используя сигналы q_i , \dot{q}_i и \ddot{q}_i всех электроприводов МР, поступающие от датчиков всех его степеней подвижности. Поэтому в работе предлагается применять приближенный метод расчета программных значений v^* и \dot{v}^* при движении РИ вдоль траекторий, используя в уравнении (3.3) вместо сигналов q_i , \dot{q}_i и \ddot{q}_i , близкие к ним их программные значения q_i^* , \dot{q}_i^* и \ddot{q}_i^* , если все электроприводы МР работают в линейной зоне их усилителей мощности, их следящие системы обеспечивают им высокую динамическую точность управления, а программные траектории движения РИ МР задаются гладкими параметрическими сплайнами [36].

В результате для установления зависимости закона изменения v^* и \dot{v}^* от соответствующих предельных значений U_i с учетом кинематики и динамики конкретного МР, а также заранее заданной траектории движения его РИ программные значения обобщенных скоростей \dot{q}_i^* и ускорений \ddot{q}_i^* , как будет показано ниже, должны быть выражены, соответственно, через программные значения v^* и \dot{v}^* движения РИ.

Для указанного преобразования уравнения (3.3) вначале необходимо получить аналитические зависимости \dot{q}_i^* и \ddot{q}_i^* от v^* и \dot{v}^* . Для этого требуется установить закон изменения обобщенных координат q_i^* при перемещении программной точки по траекториям, задаваемым указанными сплайнами, проходящими через набор заданных точек, и дважды его продифференцировать по времени. Коэффициенты этих сплайнов (сплайнов Безье [10, 11, 96, 100] или В-сплайнов [7–9]), описываемых полиномами третьей степени, формируются так, чтобы обеспечить непрерывность первых и вторых производных координат x , y и z по их параметру τ на концах каждого сплайна, то есть гарантировать совпадение касательных в точках сопряжения всех сплайнов и равенство радиусов их кривизны в этих точках.

На рис. 3.1 показана траектория движения РИ МР, состоящая из множества

параметрических сплайнов Безье третьего порядка, построенная в абсолютной СК $Oxyz$. Движение по k -му сплайну начинается в точке $P_{k,0}$ при значении параметра $\tau = 0$ и заканчивается в точке $P_{k,3}$, когда $\tau = 1$, а точки $P_{k,1}$ и $P_{k,2}$ определяют вид кривой сплайна. Когда РИ переходит на $k+1$ -ый сплайн, параметр τ обнуляется, но векторы \vec{v}^* в конце k -го сплайна, где $\tau = 1$, и в начале следующего $k+1$ -го сплайна, где $\tau = 0$, остаются равными, хотя при переходе от k -го к $k+1$ -му сплайну происходит скачкообразное изменение параметра τ с 1 на 0. Это обеспечивается за счет отдельного расчета \vec{v}^* на конце k -го и в начале $k+1$ -го сплайнов по представленным ниже аналитическим выражениям, в которых точка сопряжения не является точкой разрыва.

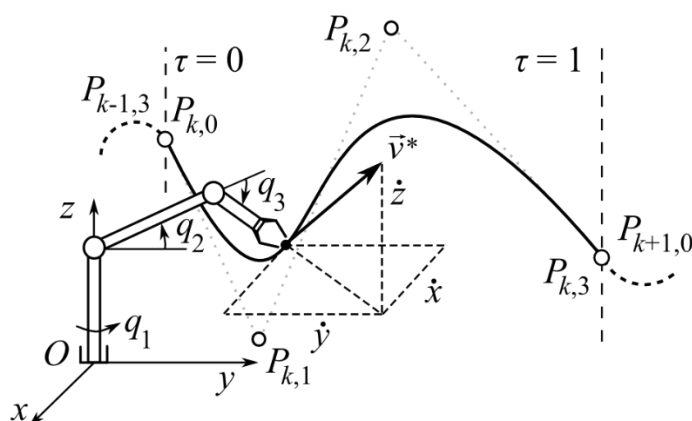


Рисунок 3.1 – Программная траектория движения РИ МР

Каждый k -ый сплайн, являясь частью программной траектории движения РИ, задается параметрическими полиномами третьей степени [36]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{x,k} & B_{x,k} & C_{x,k} & D_{x,k} \\ A_{y,k} & B_{y,k} & C_{y,k} & D_{y,k} \\ A_{z,k} & B_{z,k} & C_{z,k} & D_{z,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau^3 \\ \tau^2 \\ \tau \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

где $A_{x,k}, A_{y,k}, A_{z,k}, B_{x,k}, B_{y,k}, B_{z,k}, C_{x,k}, C_{y,k}, C_{z,k}, D_{x,k}, D_{y,k}, D_{z,k}$ – коэффициенты k -го сплайна при соответствующих степенях параметра $\tau \in [0,1]$, определяемые

координатами точек $P_{k,0}, P_{k,1}, P_{k,2}, P_{k,3}$.

В этом случае закон изменения значений обобщенных координат q_i^* при движении программной точки по k -му сплайну (3.4) можно описать системой, состоящей из трех нелинейных уравнений [14] и формируемой на основе аналитического решения ОЗК:

$$q_i^*(t) = f_i(x(\tau(t)), y(\tau(t)), z(\tau(t))), \quad (3.5)$$

где $x(\tau(t))$, $y(\tau(t))$ и $z(\tau(t))$ – изменяющиеся во времени координаты программной точки, задаваемые параметрическими сплайнами третьего порядка в СК $Oxyz$; t – время (для удобства записи t далее опускается).

С целью получения соотношений для \dot{q}_i^* и \ddot{q}_i^* в функции v^* и \dot{v}^* вначале продифференцируем выражение (3.5) по времени [92]. В результате будем иметь

$$\dot{q}_i^* = \left(\frac{\partial f_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \tau} + \frac{\partial f_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \tau} + \frac{\partial f_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \tau} \right) \frac{d\tau}{dt}. \quad (3.6)$$

Для получения производных $\partial x/\partial \tau$, $\partial y/\partial \tau$, $\partial z/\partial \tau$ продифференцируем выражение (3.4) по t . В результате будем иметь

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3A_{x,k} & 2B_{x,k} & C_{x,k} \\ 3A_{y,k} & 2B_{y,k} & C_{y,k} \\ 3A_{z,k} & 2B_{z,k} & C_{z,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau^2 \\ \tau \\ 1 \end{bmatrix} \frac{d\tau}{dt} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \frac{d\tau}{dt}, \quad (3.7)$$

где $3A_{x,k}\tau^2 + 2B_{x,k}\tau + C_{x,k} = \partial x/\partial \tau = F_x$, $3A_{y,k}\tau^2 + 2B_{y,k}\tau + C_{y,k} = \partial y/\partial \tau = F_y$,
 $3A_{z,k}\tau^2 + 2B_{z,k}\tau + C_{z,k} = \partial z/\partial \tau = F_z$.

Поскольку $v^* = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}$, то с учетом выражения (3.7) можно записать

$v^* = d\tau/dt \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$ и, соответственно, [95]

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{v^*}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}}. \quad (3.8)$$

Знак v^* определяет направление перемещения программной точки и, следовательно, РИ по траектории. Если $v^* > 0$, то программная точка движется от начала сплайна $P_{k,0}$ (см. рис. 3.1) к его концу $P_{k,3}$, а если $v^* < 0$, то движение происходит в обратную сторону. При достижении программной точкой конца k -го сплайна, где $\tau = 1$ для $v^* > 0$, происходит обнуление параметра τ и номер сплайна меняется на $k+1$. Если же программная точка находится в начале k -го сплайна, где $\tau = 0$ и $v^* < 0$, то τ становится равным 1 и номер сплайна меняется на $k-1$.

С учетом соотношений (3.7) и (3.8) выражение (3.6) можно переписать в виде

$$\dot{q}_i^* = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i}{\partial x} & \frac{\partial f_i}{\partial y} & \frac{\partial f_i}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \frac{v^*}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}} = \mathbf{g}_i \mathbf{n} v^*, \quad (3.9)$$

где $\mathbf{g}_i = [\partial f_i / \partial x \quad \partial f_i / \partial y \quad \partial f_i / \partial z]$ – вектор-строка первых производных;
 $\mathbf{n} = [F_x \quad F_y \quad F_z]^T / \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$ – единичный вектор, совпадающий с направлением вектора скорости $\vec{v}^* = \mathbf{n} v^* = [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z}]^T$ в СК $Oxyz$.

С учетом соотношения (3.9) можно записать

$$\ddot{q}_i^* = \dot{\mathbf{g}}_i \mathbf{n} v^* + \mathbf{g}_i \dot{\mathbf{n}} v^* + \mathbf{g}_i \mathbf{n} \dot{v}^* = \mathbf{g}_i \mathbf{n} \dot{v}^* + (\mathbf{n}^T \mathbf{G}_i \mathbf{n} v^* + \mathbf{g}_i \dot{\mathbf{n}}) v^*, \quad (3.10)$$

$$\text{где } \dot{\mathbf{g}}_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f_i}{\partial x^2} \dot{x} + \frac{\partial^2 f_i}{\partial x \partial y} \dot{y} + \frac{\partial^2 f_i}{\partial x \partial z} \dot{z} \\ \frac{\partial^2 f_i}{\partial x \partial y} \dot{x} + \frac{\partial^2 f_i}{\partial y^2} \dot{y} + \frac{\partial^2 f_i}{\partial y \partial z} \dot{z} \\ \frac{\partial^2 f_i}{\partial x \partial z} \dot{x} + \frac{\partial^2 f_i}{\partial y \partial z} \dot{y} + \frac{\partial^2 f_i}{\partial z^2} \dot{z} \end{bmatrix}^T = \left(\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f_i}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f_i}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f_i}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2 f_i}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f_i}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 f_i}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 f_i}{\partial x \partial z} & \frac{\partial^2 f_i}{\partial y \partial z} & \frac{\partial^2 f_i}{\partial z^2} \end{bmatrix} \mathbf{n} \right)^T v^* = \mathbf{n}^T \mathbf{G}_i v^*;$$

$$\dot{\mathbf{n}} = \frac{1}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}} \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial \tau} \\ \frac{\partial F_y}{\partial \tau} \\ \frac{\partial F_z}{\partial \tau} \end{bmatrix} \frac{d\tau}{dt} + \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}} \right); \quad (3.11)$$

\mathbf{G}_i – симметричная матрица вторых производных.

С учетом того, что

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}} \right) = - \frac{F_x W_x + F_y W_y + F_z W_z}{(F_x^2 + F_y^2 + F_z^2)^{3/2}} \frac{d\tau}{dt},$$

где $W_x = \partial^2 x / \partial \tau^2 = 2(3A_{x,k}\tau + B_{x,k})$, $W_y = \partial^2 y / \partial \tau^2 = 2(3A_{y,k}\tau + B_{y,k})$,
 $W_z = \partial^2 z / \partial \tau^2 = 2(3A_{z,k}\tau + B_{z,k})$, выражение (3.11) можно переписать сначала в виде

$$\dot{\mathbf{n}} = \frac{1}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}} \begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} \frac{d\tau}{dt} - \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \frac{F_x W_x + F_y W_y + F_z W_z}{(F_x^2 + F_y^2 + F_z^2)^{3/2}} \frac{d\tau}{dt},$$

а после подстановки в него $d\tau/dt$ (3.8) – в виде

$$\dot{\mathbf{n}} = \begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \frac{F_x W_x + F_y W_y + F_z W_z}{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \frac{v^*}{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} = \tilde{\mathbf{n}} v^*. \quad (3.12)$$

С учетом (3.12) выражение (3.10) можно переписать в виде

$$\ddot{q}_i^* = \mathbf{g}_i \dot{v}^* + (\mathbf{n}^T \mathbf{G}_i \mathbf{n} + \mathbf{g}_i \tilde{\mathbf{n}}) v^{*2}, \quad (3.13)$$

где слагаемые $\mathbf{g}_i \mathbf{n}$, $\mathbf{n}^T \mathbf{G}_i \mathbf{n}$ и $\mathbf{g}_i \tilde{\mathbf{n}}$ после выполнения соответствующих матричных операций становятся скалярами.

Полученные соотношения (3.9) и (3.13), описывающие связь программных значений \dot{q}_i^* , \ddot{q}_i^* и v^* , \dot{v}^* , с учетом подхода, предложенного выше, с целью установления искомой зависимости законов изменения \dot{v}^* и v^* от соответствующих предельных значений U_i можно подставить в уравнение (3.3) вместо \dot{q}_i и \ddot{q}_i их программные значения. Однако, как показано в работе [68], величины q_i , \dot{q}_i и \ddot{q}_i входят и в компоненты H_i , h_i и $M_{\text{вн}i}$ выражения (3.2). Поэтому их следует также заменить в H_i , h_i и $M_{\text{вн}i}$ выражения (3.2) на соответствующие программные значения q_i^* , \dot{q}_i^* , \ddot{q}_i^* . В итоге получим

$$H_i^*(q_j^*), i < j,$$

$$h_i^*(q_j^*, \dot{q}_j^*) = \sum_{j=1}^3 (s_{j,i}(q_j^*) \dot{q}_j^*), i < j, \quad (3.14)$$

$$M_{\text{вн}i}^*(q^*, \dot{q}_j^*, \ddot{q}_j^*) = s_{4,i}(q^*) + \sum_{j=1}^3 (s_{j+4,i}(q^*) \ddot{q}_j^* + s_{j+7,i}(q^*) \dot{q}_j^{*2}), \quad (3.15)$$

где $i = \overline{1,3}$, $j = \overline{1,3}$, $i \neq j$; $q^* = [q_1^* \ q_2^* \ q_3^*]^T$ – вектор обобщенных координат; $s_{j,i}$ – функции программных координат, некоторые из которых обнуляются. Индексы всех $s_{j,i}$ в (3.14) и (3.15) выбраны так, чтобы для каждой i -ой степени подвижности при $j = \overline{1,3}$ были обозначены все возможные функции: $s_{j,i}$ – первые три при различных обобщенных скоростях \dot{q}_j^* в (3.14), четвертая $s_{4,i}$ (составляющая гравитационных сил) в (3.15) и остальные шесть при различных \ddot{q}_j^* и \dot{q}_j^{*2} в (3.15).

С учетом известных выражений для расчета H_i , h_i и $M_{\text{вн}i}$ (см. работу [68]) все ненулевые функции $s_{j,i}$, $s_{4,i}$, $s_{j+4,i}$ и $s_{j+7,i}$ ($i = \overline{1,3}$, $j = \overline{1,3}$) могут быть записаны как

$$s_{2,1} = -(J_{n2} - J_{s2} + m_2 l_2^{*2} + l_2^2 (m_3 + m_g)) \sin(2q_2^*) -$$

$$\begin{aligned}
& - (J_{n3} - J_{s3} + m_3 l_3^{*2} + m_g l_3^2) \sin(2(q_2^* + q_3^*)) - 2l_2 (m_3 l_3^* + m_g l_3) \sin(2q_2^* + q_3^*), \\
s_{3,1} &= (J_{n3} - J_{s3} + m_3 l_3^{*2} + m_g l_3^2) \sin(2(q_2^* + q_3^*)) + \\
& + 2l_2 (m_3 l_3^* + m_g l_3) \cos q_2 \sin(q_2^* + q_3^*), \\
s_{3,2} &= -2l_2 (m_3 l_3^* + m_g l_3) \sin q_3^*, \\
s_{4,2} &= g[(m_2 l_2^* + (m_3 + m_g) l_2) \cos q_2^* + (m_3 l_3^* + m_g l_3) \cos(q_2^* + q_3^*)], \\
s_{7,2} &= J_{n3} + m_3 l_3^* (l_3^* + l_2 \cos q_3^*) + m_g l_3 (l_3 + l_2 \cos q_3^*), \\
s_{8,2} &= 0.5(J_{n2} - J_{s2} + m_2 l_2^{*2} + (m_3 + m_g) l_2^2) \sin(2q_2^*) + \\
& + 0.5(J_{n3} - J_{s3} + m_3 l_3^{*2} + m_g l_3^2) \sin(2(q_2^* + q_3^*)) + l_2 (m_3 l_3^{*2} + m_g l_3^2) \sin(2q_2^* + q_3^*), \\
s_{10,2} &= -l_2 (m_3 l_3^* + m_g l_3) \sin q_3^*, \\
s_{4,3} &= g(m_3 l_3^* + m_g l_3) \cos(q_2^* + q_3^*), \\
s_{6,3} &= J_{n3} + m_3 l_3^* (l_3^* + l_2 \cos q_3^*) + m_g l_3 (l_3 + l_2 \cos q_3^*), \\
s_{8,3} &= 0.5(J_{n3} - J_{s3} + m_3 l_3^{*2} + m_g l_3^2) \sin(2(q_2^* + q_3^*)) + \\
& + l_2 (m_3 l_3^* + m_g l_3) \cos q_2^* \sin(q_2^* + q_3^*), \\
s_{9,3} &= l_2 (m_3 l_3^* + m_g l_3) \sin q_3^*,
\end{aligned}$$

где l_i и m_i – длины звеньев МР и их массы; l_2^* и l_3^* – расстояния от шарниров второй и третьей степеней подвижности до центров масс второго и третьего звена, соответственно; J_{si} и J_{ni} – моменты инерции i -ых звеньев МР относительно их продольных осей и осей, проходящих через центры масс и перпендикулярных их продольным осям, соответственно; g – ускорение свободного падения.

После подстановки компонентов H_i^* , h_i^* (3.14) и $M_{\varepsilon ni}^*$ (3.15) в (3.3), получим

$$\begin{aligned}
& R_i (H_i^* + J_{Ei} i_{pi}^2) \ddot{q}_i^* + (R_i \sum_{j=1}^3 (s_{j,i} \dot{q}_j^*) + K_{Mi} K_{\omega i} i_{pi}^2) \dot{q}_i^* + \\
& + R_i (s_{4,i} + \sum_{j=1}^3 (s_{j+4,i} \ddot{q}_j^* + s_{j+7,i} \dot{q}_j^{*2})) = K_{Mi} K_{yi} i_{pi} U_i, \quad i \neq j.
\end{aligned} \tag{3.16}$$

Заменив \dot{q}_i^* и \ddot{q}_i^* в уравнении (3.16), используя (3.9) и (3.13), получим [61]

$$\begin{aligned}
& R_i(H_i^* + J_{Ei}i_{pi}^2)(\mathbf{g}_i\mathbf{n}\dot{v}^* + (\mathbf{n}^T\mathbf{G}_i\mathbf{n} + \mathbf{g}_i\tilde{\mathbf{n}})v^{*2}) + (R_i\sum_{j=1}^3(s_{j,i}\mathbf{g}_j)\mathbf{n}v^* + K_{Mi}K_{oi}i_{pi}^2)\mathbf{g}_i\mathbf{n}v^* + \\
& + R_i(s_{4,i} + \sum_{j=1}^3(s_{j+4,i}(\mathbf{g}_j\mathbf{n}\dot{v}^* + (\mathbf{n}^T\mathbf{G}_j\mathbf{n} + \mathbf{g}_j\tilde{\mathbf{n}})v^{*2}) + s_{j+7,i}(\mathbf{g}_j\mathbf{n})^2v^{*2})) - K_{Mi}K_{yi}i_{pi}U_i = \\
& = \dot{v}^*[R_i((H_i^* + J_{Ei}i_{pi}^2)\mathbf{g}_i\mathbf{n} + \sum_{j=1}^3(s_{j+4,i}\mathbf{g}_j)\mathbf{n})] + v^{*2}[R_i((H_i^* + J_{Ei}i_{pi}^2)(\mathbf{n}^T\mathbf{G}_i\mathbf{n} + \mathbf{g}_i\tilde{\mathbf{n}}) + \\
& + \sum_{j=1}^3((s_{j,i}\mathbf{g}_j)\mathbf{n}\mathbf{g}_i\mathbf{n} + s_{j+4,i}(\mathbf{n}^T\mathbf{G}_j\mathbf{n} + \mathbf{g}_j\tilde{\mathbf{n}}) + s_{j+7,i}(\mathbf{g}_j\mathbf{n})^2))] + v^*(K_{Mi}K_{oi}i_{pi}^2\mathbf{g}_i\mathbf{n}) + \\
& + (R_i s_{4,i} - K_{Mi}K_{yi}i_{pi}U_i) = \dot{v}^*\tilde{a}_i + v^{*2}\tilde{b}_i + v^*\tilde{c}_i + \tilde{d}_i = 0, \quad i \neq j,
\end{aligned} \tag{3.17}$$

где $\tilde{a}_i = [R_i((H_i^* + J_{Ei}i_{pi}^2)\mathbf{g}_i\mathbf{n} + \sum_{j=1}^3(s_{j+4,i}\mathbf{g}_j)\mathbf{n})]$, $\tilde{b}_i = [R_i((H_i^* + J_{Ei}i_{pi}^2)(\mathbf{n}^T\mathbf{G}_i\mathbf{n} + \mathbf{g}_i\tilde{\mathbf{n}}) + \sum_{j=1}^3((s_{j,i}\mathbf{g}_j)\mathbf{n}\mathbf{g}_i\mathbf{n} + s_{j+4,i}(\mathbf{n}^T\mathbf{G}_j\mathbf{n} + \mathbf{g}_j\tilde{\mathbf{n}}) + s_{j+7,i}(\mathbf{g}_j\mathbf{n})^2))]$, $\tilde{c}_i = K_{Mi}K_{oi}i_{pi}^2\mathbf{g}_i\mathbf{n}$,
 $\tilde{d}_i = R_i s_{4,i} - K_{Mi}K_{yi}i_{pi}U_i$, $i \neq j$.

Решая нелинейные дифференциальные уравнения первого порядка (3.17), в которых вместо U_i ($i = \overline{1,3}$) подставляются их предельно допустимые значения, при которых любой из электроприводов МР будет находиться в преднасыщенном состоянии, можно определить предельно допустимую величину v^* . Перемещая РИ по траектории с этой скоростью согласно (3.4), (3.5) и (3.8), будут автоматически формироваться программные сигналы q_i^* для следящих электроприводов всех степеней подвижности МР.

3.3 Описание работы системы формирования предельно высокой программной скорости движения рабочего инструмента многостепенного манипулятора

Ниже рассмотрен алгоритм формирования предельно высокого скоростного режима движения РИ по траектории, задаваемой параметрическими сплайнами (3.4), и описана работа системы, реализующей этот алгоритм.

Выполнение алгоритма начинается с построения в рабочей области МР с помощью выражения (3.4) программной траектории движения РИ в СК, связанной с

его основанием, и расчета программных сигналов q_i^* (3.5), соответствующих исходному положению программной точки ($k = 0$ и $\tau = 0$). Перемещение этой точки по построенной программной траектории начинается после расчета значения начальной скорости $v^*(\Delta t)$, где $\Delta t > 0$ – шаг дискретизации системы. Для расчета $v^*(\Delta t)$ с начальным условием $v^*(0) = 0$ для всех трех степеней подвижности МР формируются три пары уравнений (3.17), в которые в \tilde{d}_i вместо U_i ($i = \overline{1,3}$) подставляются их предельно допустимые значения с противоположными знаками. Все эти уравнения решаются на шаг Δt и определяются соответствующие им шесть значений скорости $v^*(\Delta t)$. Из них выбирается то, которое в своей паре (для i -го электропривода) является максимальным, но не превышающим наибольшего значения в других парах, при котором хотя бы один электропривод находится в преднасыщенном состоянии, а остальные – в отдалении от насыщения. Именно выбранное значение $v^*(\Delta t)$ используется для последующего расчета $d\tau/dt$ (3.8) при определении нового значения τ , соответствующего ему положения программной точки (3.4) и координат $q_i^*(\Delta t)$ (3.5). При этом величина v^* не должна превышать предельно допустимого значения для конкретного вида работы.

В последующем во время движения МР только на входе выбранного электропривода будет автоматически формироваться предельное значение U_i , а входные напряжения других электроприводов будут определяться их регуляторами, обеспечивая согласованное движение всех степеней подвижности МР и точное перемещение РИ по заданной траектории.

Расчет значений $v^*(N\Delta t)$ ($N = 2, 3, \dots, K$, где K определяет последнее положение программной точки, при котором $v^*(K\Delta t) = 0$) для следующего и последующих дискретных моментов времени осуществляется аналогично. Но шесть уравнений (3.17) будут формироваться уже с учетом текущего положения программной точки на траектории, значений координат $q_i^*((N-1)\Delta t)$ МР (3.5) и текущего значения $v^*((N-1)\Delta t)$, используемого в качестве очередного начального условия. Эта процедура повторяется до начала торможения РИ перед

выбранными участками траектории, к которым относятся, во-первых, участки с повышенной кривизной траектории (если есть возможность рассчитать их заранее), скорость движения по которым ограничена предельными значениями скорости v^*_{lim} [74, 83, 131, 144], и, во-вторых, конец траектории.

Для определения точного момента начала торможения РИ все шесть уравнений (3.17) с некоторого участка траектории начинают постоянно решаться и в обратном времени с точки на ближайшем участке траектории с повышенной кривизной с начальным условием в виде скорости, равной рассчитанному предельному значению v^*_{lim} , или с конца этой траектории с нулевыми начальными условиями и с учетом того, что для предельно быстрого торможения на каждом шаге должно выбираться то решение, значение v^* которого в своей паре является минимальным, но не меньше минимального значения v^* в других парах. В результате будет определена точка начала торможения РИ на траектории, в которой скорости v^* , рассчитываемые в прямом и обратном времени, совпадут или будут максимально близки. С этого момента для снижения v^* до рассчитанного предельного значения v^*_{lim} или до нуля начинают использоваться только шесть уравнений, решаемых в обратном времени. При этом если снижение скорости осуществлялось до рассчитанного предельного значения v^*_{lim} , то после завершения торможения снова осуществляется разгон по описанному выше алгоритму.

В результате для каждого реального дискретного момента времени t будут рассчитаны программные сигналы $q_i^*(t)$, которые в РМВ будут поступать на входы его следящих электроприводов, обеспечивая предельно быстрое движение РИ, при котором все электроприводы МР будут работать в линейной зоне усиления без входа в режим насыщения.

На рис. 3.2 показана обобщенная схема системы формирования программной скорости движения РИ МР. На этом рисунке введены следующие обозначения: БФС – блок формирования скорости $v^*(t)$; БФТ – блок формирования траектории движения РИ (программных значений x, y, z) в СК $Oxyz$; $\mathbf{C} = \{A_{x,k}, A_{y,k}, A_{z,k}, B_{x,k}, B_{y,k}, B_{z,k}, C_{x,k}, C_{y,k}, C_{z,k}, D_{x,k}, D_{y,k}, D_{z,k}\}$ – массив

коэффициентов, описывающих k -ый сплайн; ОЗК – блок решения обратной задачи кинематики (блок формирования программных значений q_i^* ($i = \overline{1,3}$)); ЭП _{i} ($i = \overline{1,3}$) – электроприводы постоянного тока с усилителями мощности, обеспечивающие повороты соответствующих степеней подвижности МР; СКУ _{i} ($i = \overline{1,3}$) – самонастраивающиеся корректирующие устройства, стабилизирующие параметры каждого электропривода при появлении взаимовлияний между степенями подвижности движущегося МР [68]; ε_i ($i = \overline{1,3}$) – ошибки соответствующих ЭП _{i} .

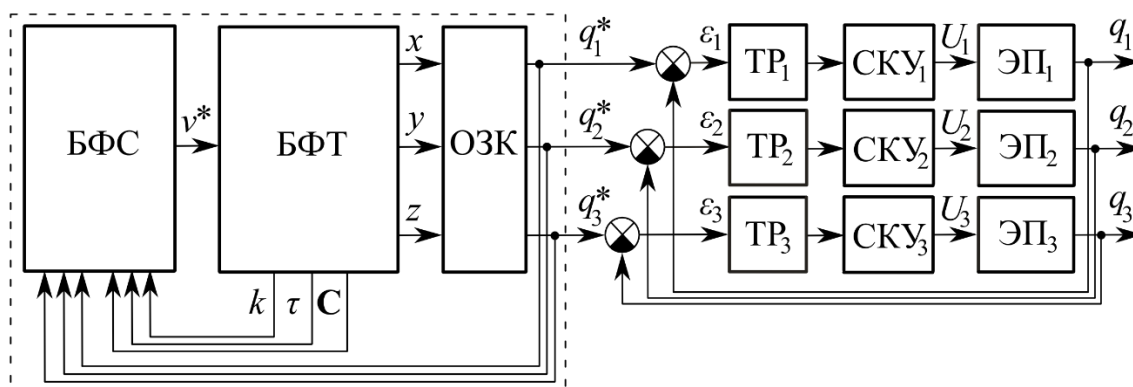


Рисунок 3.2 – Схема системы формирования программной скорости движения РИ МР

Вначале рассмотрим работу системы, когда траектория движения РИ, представляемая в виде сплайнов, полностью известна и неизменна. В этом случае все ее параметры заносятся БФТ. Перед началом движения РИ на выходе БФС (см. рис. 3.2) $v^* = 0$. Исходное положение РИ МР в начале первого сплайна (исходные программные координаты – x_0 , y_0 и z_0) рассчитывается с использованием выражения (3.4), определяясь массивом коэффициентов C , когда $\tau = 0$ и $k = 0$, и формируется на выходе БФТ. На выходе блока ОЗК с использованием координат x_0 , y_0 и z_0 формируются программные сигналы q_i^* ($i = \overline{1,3}$) (3.5), которые обрабатываются всеми следящими электроприводами МР и система приходит в исходное состояние.

Затем в БФС с учетом текущих значений τ , k и \mathbf{C} вычисляются элементы векторов \mathbf{n} (3.9) и $\tilde{\mathbf{n}}$ (3.12), а с учетом q_i^* ($i = \overline{1,3}$) – элементы векторов \mathbf{g}_i и матриц \mathbf{G}_i ($i = \overline{1,3}$), входящих в выражения (3.9) и (3.13), а также H_i^* и $s_{j,i}$, $s_{4,i}$, $s_{j+4,i}$, $s_{j+7,i}$ ($j = \overline{1,3}$, $i = \overline{1,3}$, $j \neq i$), входящие в h_i^* (3.14) и $M_{\text{вн}i}^*$ (3.15). Все эти элементы, векторы и матрицы используются в БФС при решении шести указанных выше уравнений (3.17) при различных предельных значениях U_i и начальном условии $v^*(0) = 0$. После выбора одного из шести решений $v^*(\Delta t)$ оно используется для расчета в БФТ очередных значений $d\tau/dt$ (3.8), τ , k , \mathbf{C} и новых координат РИ $x(\Delta t)$, $y(\Delta t)$, $z(\Delta t)$ (3.4), которые поступают в блок ОЗК для вычисления $q_i^*(\Delta t)$ (3.5). Эти значения сохраняются в памяти блока ОЗК, но на входы следящих электроприводов не поступают.

Описанная процедура расчета новых значений $v^*(N\Delta t)$ и $q_i^*(N\Delta t)$ ($N = 1, 2, 3, \dots$), а также сохранения $q_i^*(N\Delta t)$ в памяти блока ОЗК продолжается по указанному алгоритму до определения момента начала торможения перед ближайшим участком траектории с повышенной кривизной или в конце заданной траектории движения РИ. В этот момент, как отмечалось ранее, начинается решение указанных шести уравнений и выполнение процедуры выбора $v^*(N\Delta t)$ уже в обратном времени до точки на ближайшем участке траектории с повышенной кривизной, когда на выходе БФС формируется сигнал $v^* = v^*_{lim}$, а τ , k и \mathbf{C} соответствуют сплайну траектории, на котором расположена указанная точка, или до конца этой траектории, когда на выходе БФС формируется сигнал $v^* = 0$, $\tau = 1$, а k и \mathbf{C} соответствуют последнему сплайну траектории. Если выбор очередных значений $v^*(N\Delta t)$ осуществлялся в обратном времени до скорости v^*_{lim} , то затем расчет новых значений $v^*(N\Delta t)$ продолжается по описанному алгоритму до следующего торможения.

После завершения определения последовательностей $v^*(N\Delta t)$ и $q_i^*(N\Delta t)$ ($i = \overline{1,3}$, $N = 1, 2, 3, \dots, K$) на выходы блока ОЗК в дискретные моменты времени с интервалами Δt начинают поступать текущие значения $q_i^*(N\Delta t)$, которые

обрабатываются соответствующими следящими электроприводами МР.

Если движение РИ выполняется в заранее неизвестной обстановке, требующей постоянной коррекции заданной траектории, то метод предварительного формирования фиксированной последовательности $q_i^*(N\Delta t)$ ($i = \overline{1,3}, N = 1, 2, 3, \dots, K$) использовать уже нельзя и необходимо рассчитывать значения $q_i^*(N\Delta t)$ непосредственного в процессе движения РИ. В результате система (см. рис. 3.2) должна не только успевать рассчитывать скорость v^* и все значения $q_i^*(N\Delta t)$ на каждом дискретном шаге, но и успевать обрабатывать эти сигналы соответствующими следящими электроприводами. Для этого потребуется использовать достаточно мощные вычислительные средства.

Таким образом, при использовании системы (см. рис. 3.2) будет обеспечиваться предельно быстрое движение РИ МР по траекториям, задаваемым сплайнами. Представленный метод, описанный в работах [11, 61, 94], можно применять для формирования программных скоростей движения РИ МР с любыми кинематическими схемами и с различным числом степеней подвижности. При этом будут изменяться только выражения, описывающие решение ОЗК (3.5), и выражения для определения значений параметров $\tilde{a}_i, \tilde{b}_i, \tilde{c}_i, \tilde{d}_i$, входящих в уравнение (3.17).

3.4 Моделирование работы системы формирования предельно высокой программной скорости движения рабочего инструмента многостепенного манипулятора

При исследовании разработанной на основе предложенного метода системы формирования программной скорости рассматривалось движение РИ трехстепенного МР (см. рис. 3.1) по траектории, показанной на рис. 3.3, представленной синусоидой с амплитудой 0.38 м, расположенной под углом 45° к горизонтальной плоскости. Основание МР расположено в начале СК $Oxuz$.

Электроприводы рассматриваемого МР имеют следующие параметры: $R_i = 0.5$ Ом, $K_{Mi} = 0.04$ Нм/А, $K_{\omega i} = 0.04$ Вc/рад, $K_{yi} = 1$, $J_{Ei} = 10^{-3}$ кгм², $i_{pi} = 100$

($i = \overline{1,3}$). Номинальный момент инерции $J_{nom i}$ вала i -го электродвигателя и вращающихся частей редуктора, используемый в законе самонастройки (см. СКУ $_i$ на рис. 3.2) [68], равен 10^{-4} кгм². Длины звеньев МР $l_1 = l_2 = l_3 = 0.5$ м, расстояния до центров масс $l_2^* = l_3^* = 0.25$ м, массы этих звеньев $m_1 = 25$ кг, $m_2 = m_3 = 15$ кг, масса груза $m_g = 5$ кг. Моменты инерции J_{si} и J_{ni} i -ых звеньев МР равны $J_{s1} = 0.1$ кгм², $J_{s2} = 0.007$ кгм², $J_{s3} = 0.005$ кгм², $J_{n2} = 0.55$ кгм², $J_{n3} = 0.31$ кгм². В качестве ТР $_i$ (см. рис. 3.2) использованы одинаковые типовые ПИД-регуляторы, описываемые уравнениями: $U_i = k_{pi}\varepsilon_i + k_{Ii} \int \varepsilon_i dt + k_{di}\dot{\varepsilon}_i$, $k_{pi} = 1883$, $k_{Ii} = 130$, $k_{di} = 140$, где ε_i – ошибка управления соответствующего электропривода. Ограничения линейной зоны сигналов U_i всех электроприводов ± 22.5 В. Предельное значение сигнала U_i , вводимое в выражение (3.17), равно ± 20 В.

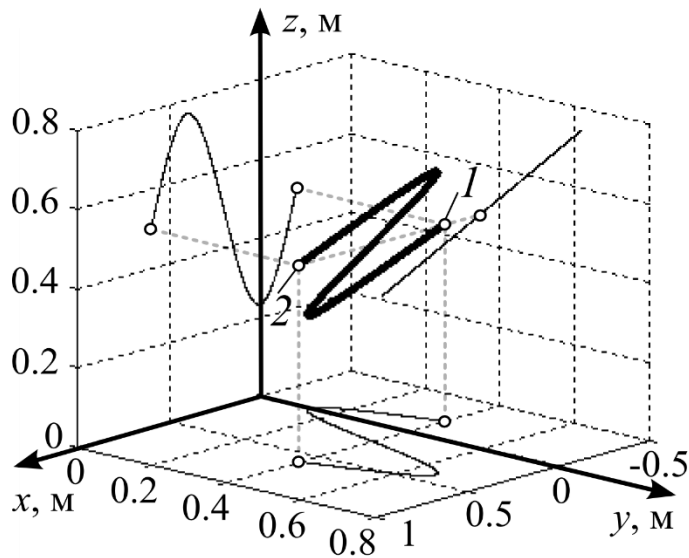


Рисунок 3.3 – Программная траектория

На рис. 3.4 и 3.5 показаны результаты исследования работы созданной системы. Из этих рисунков видно, что при перемещении РИ по гладкой траектории (см. рис. 3.3), составленной из 4 параметрических сплайнов (3.4), из точки 1 в точку 2 программные значения всех обобщенных координат q_i^* (см. рис. 3.4) изменялись плавно, а программная скорость движения v^* непрерывно настраивалась, неизменно обеспечивая поочередную работу одного из

электроприводов (см. рис. 3.5а) в преднасыщенном состоянии. При этом увеличение v^* происходило на участках траектории с малой кривизной, а уменьшение – при подходе к участкам с большой кривизной. Величина отклонения D характерной точки РИ МР (см. рис. 3.4) от заданной траектории не превышала установленного значения 0.6 мм.

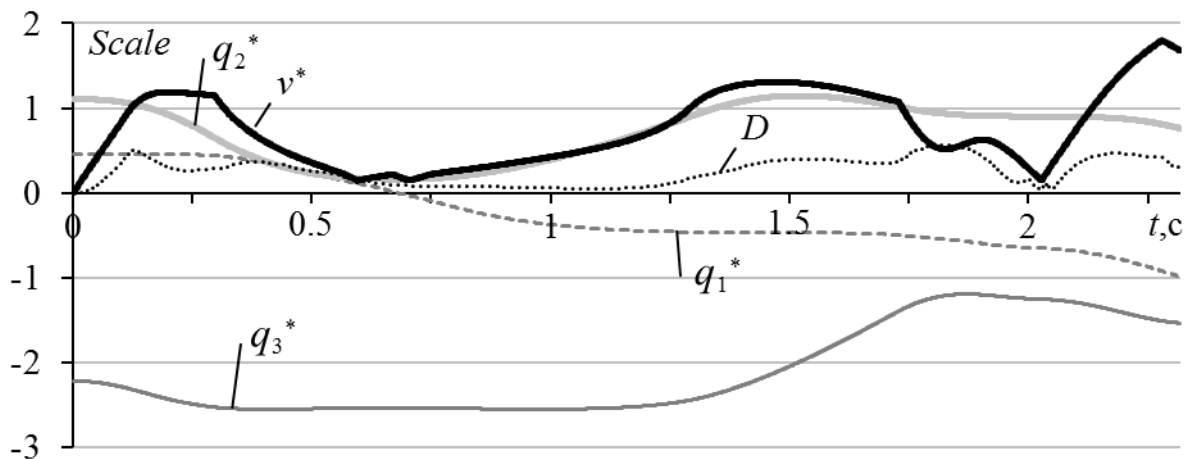


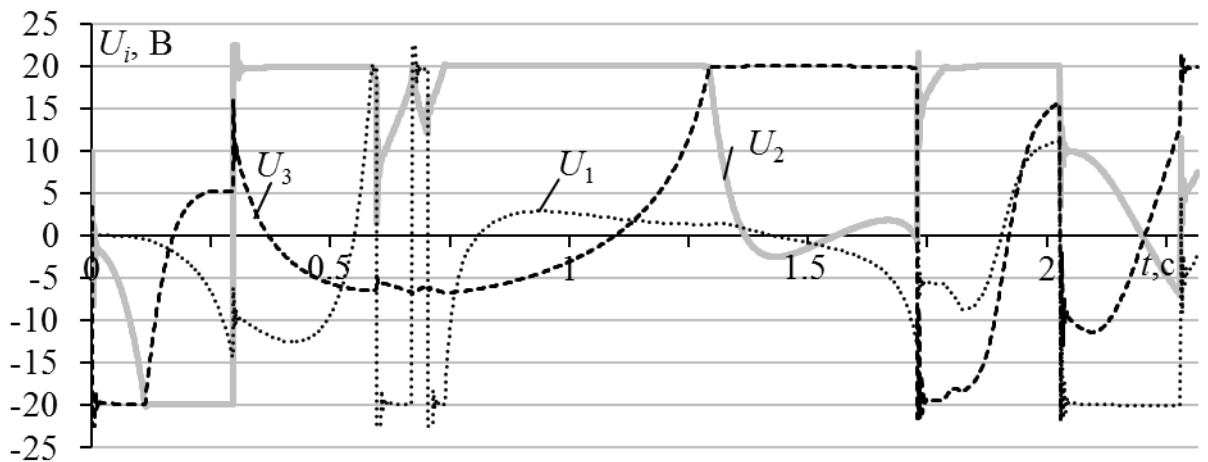
Рисунок 3.4 – Законы изменения q_i^* ($i = \overline{1,3}$), v^* и D (scale $q_i^* = 1$ рад; $v^* = 1$ м/с; $D = 1$ мм)

Если движение МР происходит без подстройки v^* с ее предельным, но постоянным значением 0.25 м/с, при котором все электроприводы во время перемещения РИ по траектории (см. рис. 3.3) только подходят к границе линейной зоны, не входя в насыщение, и в следящей системе используются те же самые типовые регуляторы $ТР_i$, то средняя скорость движения РИ по указанной траектории снижается более, чем в 3 раза. Законы изменения U_i всех электроприводов МР в этом случае при предельном, но постоянном значении v^* , показаны на рис. 3.5б.

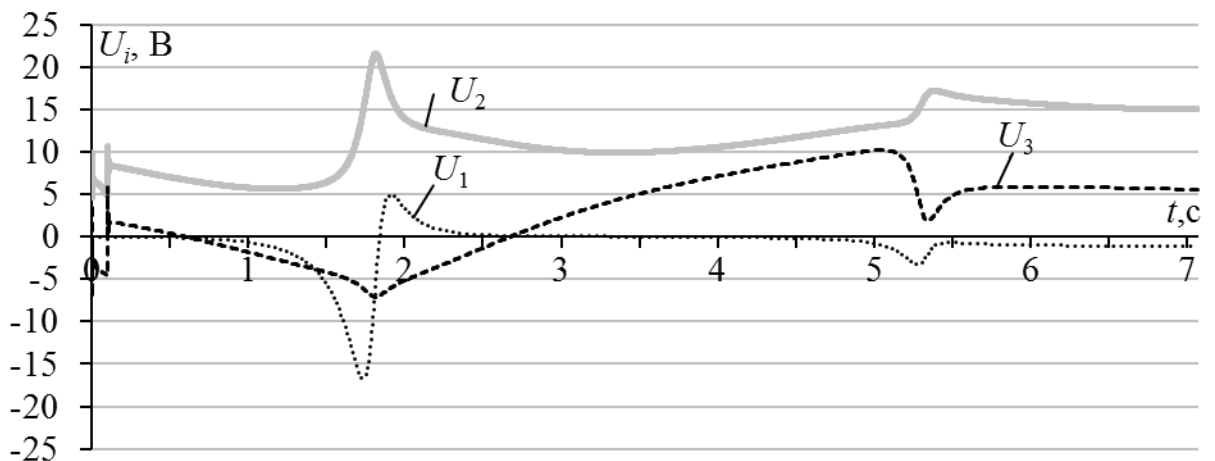
Снижение ошибки контурного управления РИ МР возможно, но вместо типовых $ТР_i$ необходимо использовать уже более качественные регуляторы [68].

Из рис. 3.4 видно, что при моделировании в системе (см. рис. 3.2) в некоторые моменты времени теряется плавность изменения v^* (например, момент времени 2.05с). Это связано с пренебрежением в якорных цепях электроприводов

МР (см. уравнения (3.3)) их индуктивностью и позволило в созданном методе резко снизить объем вычислений при настройке текущего значения v^* . Однако в реальных электроприводах индуктивность присутствует и, как показали проведенные исследования, при увеличении ее значения возможен выход некоторых электроприводов МР из линейной зоны их работы.



а)



б)

Рисунок 3.5 – Законы изменения U_i ($i = \overline{1,3}$)

Для исключения возникшей ситуации в выражении (3.17) следует просто уменьшить величину U_i . Это приведет к незначительному уменьшению v^* , но производительность работы синтезированной системы все равно останется более чем в 3 раза выше производительности системы с постоянным предельным значением v^* , при котором будет полностью исключен выход электроприводов за

пределы линейной зоны их работы и обеспечена заданная динамическая точность движения РИ по предписанной траектории.

Сравнение быстродействия работы предложенной системы с другими аналогичными системами [60, 72] при обеспечении схожей точности их работы показывает ее существенное преимущество за счет полного исключения входов всех электроприводов в режим насыщения и значительного уменьшения времени прохождения по заданным гладким траекториям.

3.5 Выводы

В третьей главе диссертации рассмотрен метод синтеза систем автоматического формирования предельно высоких программных скоростей движения РИ многостепенных МР по сложным пространственным траекториям.

1. Предложен метод построения программных траекторий движения РИ МР с помощью параметрических сплайнов третьего порядка. Этот метод позволяет гарантировать плавность изменения координат в трехмерном пространстве на всех участках построенных траекторий. В результате при движении РИ по указанным траекториям обеспечивается устранение нежелательных скачков ускорений и связанных с ними увеличений динамических взаимовлияний между степенями подвижности МР.

2. С использованием предложенного нового подхода разработан метод формирования предельно высоких программных скоростей движения РИ МР по указанным построенным траекториям. Увеличение этих скоростей обеспечивается за счет постоянного нахождения хотя бы одного электропривода МР в преднасыщенном состоянии при неизменном сохранении высокой динамической точности управления.

3. Результаты моделирования полностью подтвердили эффективность и высокое качество синтезированных систем при отработке движений РИ МР по гладким пространственным траекториям. Эти системы защищены патентами РФ на изобретения [28, 29, 32] и свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ [38–46, 49, 50]. Реализация предложенных СУ не вызывает затруднений.

4 Разработка метода синтеза систем формирования программных сигналов для всех степеней подвижности кинематически избыточных манипуляционных роботов, обеспечивающего расширение их рабочих зон и исключение появлений нештатных ситуаций

В третьей главе диссертации представлены результаты разработки метода синтеза систем для высокоскоростного управления движениями МР с учетом возможного входа их электроприводов в режимы насыщения. Однако эффективность этого метода зависит не только от количества участков программных траекторий с различной кривизной, описываемых параметрическими сплайнами, но и от сочетаний (взаимосвязей) программных значений обобщенных координат МР при движении их РИ по этим траекториям.

Во введении указывалось, что в процессе движения РИ по формируемым траекториям возможны ситуации, когда МР принимает такие конфигурации, в которых требуется или резко снижать программную скорость движения этих РИ, или вовсе останавливать выполнение ТО без возможности ее качественного завершения. Эта проблема, как указано в работах [62–64], может быть решена за счет использования избыточных степеней подвижности, исключающих возникновение таких ситуаций, но известные методы решения этой проблемы, описанные в первой главе [141], не позволяют ее решить в полной мере.

Целью четвертой главы является разработка метода синтеза систем формирования программных сигналов для всех степеней подвижности кинематически избыточных МР. Применение этого метода должно позволить сохранить требуемую точность контурного управления МР за счет использования избыточных степеней подвижности, полностью исключая возможность появления нежелательных реверсов в приводах этих МР, связанных со входом манипуляторов в особые положения, резких увеличений динамических ошибок при входе некоторых степеней подвижности в ограничения и аварийных остановок в процессе выполнения ТО при выходе РИ на границы рабочих областей МР.

Для достижения поставленной цели вначале был сформулирован общий подход к решению задачи управления МР, позволяющий сохранять требуемую точность контурного управления за счет использования избыточных степеней подвижности, затем было рассмотрено применение этого подхода для конкретной кинематической схемы избыточного МР и проведено исследование его работоспособности и эффективности в ходе численного моделирования и натурных экспериментов.

4.1 Описание общего подхода к решению задачи управления кинематически избыточными манипуляционными роботами

Поскольку в настоящее время в промышленности для выполнения ТО, связанных с осуществлением движений РИ по пространственным траекториям, широко применяются шестистепенные МР с кинематической схемой типа PUMA, то описание общего подхода к управлению кинематически избыточными манипуляторами будет рассмотрено именно для такого МР, имеющего первых шесть основных обобщенных координат и три избыточные – линейные. Этот манипулятор представлен на рис. 4.1.

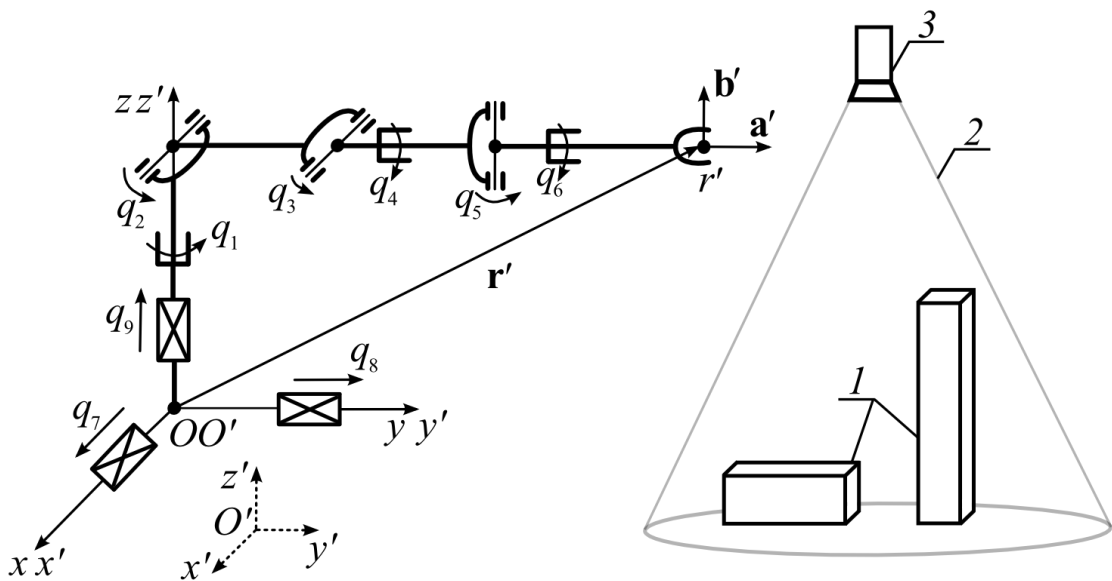


Рисунок 4.1 – Схема кинематически избыточного МР с системой технического зрения

На этом рисунке введены следующие обозначения: $Oxyz$ – абсолютная неподвижная СК; $O'x'y'z'$ – СК, связанная с подвижным основанием МР; q_i – обобщенная координата i -й степени подвижности МР ($i = \overline{1,9}$); $\mathbf{a}' = [a_x' a_y' a_z']^T$ и $\mathbf{b}' = [b_x' b_y' b_z']^T$ – единичные взаимно перпендикулярные векторы, определяющие ориентацию РИ в СК $O'x'y'z'$; $\mathbf{r}' = [r_x' r_y' r_z']^T$ – вектор положения рабочей точки инструмента (РТИ) МР в СК $O'x'y'z'$; r' – точка, совпадающая с концом вектора \mathbf{r}' .

СК $Oxyz$ и $O'x'y'z'$ на рис. 4.1 совпадают, если $q_7 = q_8 = q_9 = 0$, но их оси всегда остаются параллельными в остальных случаях. При этом ось Oz всегда направлена вертикально вверх, а оси Oy и Ox расположены в горизонтальной плоскости.

В начале выполнения технологического процесса объекты работ I (см. рис. 4.1) или их части располагаются в зоне 2 видимости системы технического зрения 3, с помощью которой выполняется их сканирование. Собранная в результате этого сканирования информация о пространственных координатах мест обработки РИ МР объектов I в абсолютной СК $Oxyz$ сохраняется в памяти управляющей ЭВМ. С использованием этой ЭВМ в РМВ задаются текущие желаемые значения трех векторов \mathbf{r} , \mathbf{a} и \mathbf{b} , являющихся функциями времени и определяющих текущие положения РИ МР и его ориентацию в СК $Oxyz$ в конкретный момент времени. Исходно координаты q_i ($i = \overline{7,9}$) равны 0, поэтому векторы \mathbf{r} , \mathbf{a} и \mathbf{b} в СК $Oxyz$ совпадают с векторами \mathbf{r}' , \mathbf{a}' и \mathbf{b}' в СК $O'x'y'z'$.

После решения ОЗК для конкретной конструкции МР на выходе ЭВМ формируются текущие программные значения его обобщенных координат q_i^* ($i = \overline{1,6}$), а обобщенные координаты его линейных степеней подвижности q_i^* ($i = \overline{7,9}$), обеспечивающих перемещение основания манипулятора в пространстве, сохраняют начальные нулевые значения. Все обобщенные координаты q_i^* ($i = \overline{1,9}$) формируются на выходах ЭВМ и подаются на входы соответствующих следящих приводов, обеспечивая перемещения РИ в рабочей области МР при выполнении заданных ТО в РМВ.

Одновременно с выполнением ТО в ЭВМ производится расчет значений специальных функций-индикаторов, каждая из которых позволяет численно оценить степень приближения текущей конфигурации МР к одному из нежелательных положений, в которых одна или несколько его степеней подвижности выходят на ограничения, сам МР входит в особые положения, в которых ОЗК решается неоднозначно, или его РИ выходит на границу рабочей области при текущих смещениях q_i ($i = \overline{7,9}$). Если после очередного вычисления значений функций-индикаторов оказывается, что конфигурация МР приблизилась к какому-либо из указанных нежелательных положений, то в ЭВМ с учетом информации о текущих программных значениях векторов \mathbf{r}' , \mathbf{a}' и \mathbf{b}' в СК $O'x'y'z'$ и о кинематических параметрах этого МР определяется направление и величина смещения его основания вместе с СК $O'x'y'z'$ параллельно осям СК $Oxyz$ с целью устранения появления указанных нежелательных положений. В результате соответствующие программные значения обобщенных координат избыточных степеней подвижности q_i^* ($i = \overline{7,9}$) становятся отличными от нуля и, отрабатываясь следящими приводами, реализуют требуемое дополнительное смещение МР в пространстве в СК $Oxyz$.

При смещениях по координатам q_i ($i = \overline{7,9}$) в ЭВМ в РМВ рассчитываются текущие программные значения элементов трех векторов \mathbf{r} , \mathbf{a} и \mathbf{b} в СК $Oxyz$ независимо от расположения основания МР в пространстве, и одновременно – соответствующие им элементы векторов \mathbf{r}' , \mathbf{a}' и \mathbf{b}' в СК $O'x'y'z'$, рассчитываемые с учетом текущих значений q_i ($i = \overline{7,9}$) и \mathbf{r} , \mathbf{a} и \mathbf{b} . В процессе выполнения дополнительных линейных смещений МР вместе с его рабочей областью в СК $Oxyz$ РИ может или двигаться в пространстве при одновременном изменении текущей конфигурации МР, используя результаты непрерывного решения ОЗК, или сохранять свое положение в СК $Oxyz$ до завершения указанных линейных смещений. При этом управление МР согласно описанному подходу выполняется в течение всего времени обработки объектов до завершения всех ТО.

Ниже детально рассмотрено использование предложенного подхода для

управления шестистепенным МР PUMA, установленным на подвижное основание, перемещающееся по одной избыточной степени подвижности. Применение этого же подхода для МР с иными кинематическими схемами и иным числом избыточных степеней подвижности сохраняется, но требует учета кинематических особенностей используемых МР.

4.2 Особенности решения обратной задачи кинематики для манипуляторов типа PUMA

На рис. 4.2 показана кинематическая схема МР типа PUMA, установленного на подвижном горизонтальном основании. На этом рисунке введены следующие обозначения: \mathbf{e}_i – единичные векторы, совпадающие с осями шарниров i -ых степеней подвижности МР ($i = \overline{1,6}$); $\mathbf{R}' = [R_x' R_y' R_z']^T$ – вектор положения характерной точки оси пятого шарнира в СК $O'x'y'z'$; R' – точка, совпадающая с концом вектора \mathbf{R}' ; W' – характерная точка оси третьего шарнира МР с координатами W_x', W_y', W_z' в СК $O'x'y'z'$; l_4 – расстояние между точками R' и r' .

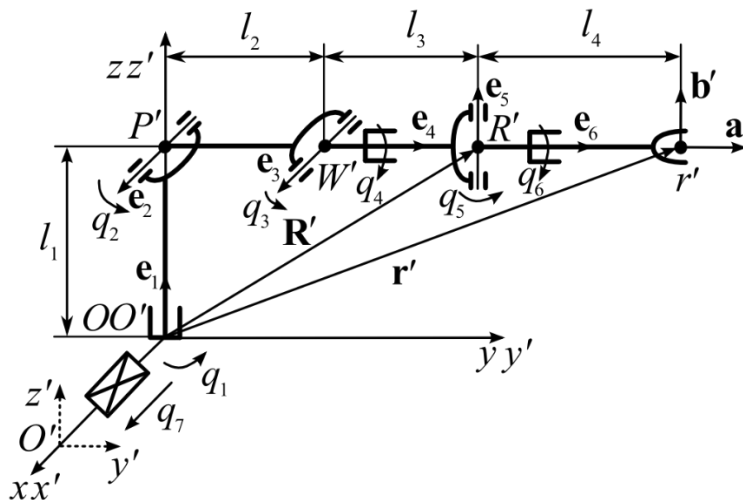


Рисунок 4.2 – Кинематическая схема шестистепенного МР типа PUMA, установленного на подвижном основании

На обобщенные координаты q_i накладываются ограничения:

$$q_{i\min} \leq q_i \leq q_{i\max} \quad (i = \overline{1,7}), \quad (4.1)$$

где $q_{i\min}$ и $q_{i\max}$ – соответственно, минимальное и максимальное значения координаты q_i . Для МР на рис. 4.2 принимается $q_{i\min} = -\pi$ и $q_{i\max} = \pi$ ($i = \overline{1,6}$). Отсчет координат q_i ($i = \overline{1,7}$) начинается из представленного на рис. 4.2 положения МР. Для поворотных степеней подвижности движение по часовой стрелке считается отрицательным, а против – положительным. Направление вращения определяется относительно соответствующих векторов \mathbf{e}_i , если взгляд направлен от стрелки вектора к его основанию.

Для представленного МР уже известны аналитические методы решения ОЗК [20, 73]. Однако они имеют большую вычислительную сложность, и их реализация в РМВ на маломощных вычислительных устройствах затруднена.

Для МР (см. рис. 4.2) решение ОЗК удобно разделить на две части [3, 56], отдельно для переносных q_1, q_2, q_3 и ориентирующих q_4, q_5, q_6 степеней подвижности. Для переносных степеней это решение выполняется по алгоритму, описанному в работе [3], но с некоторыми дополнительными изменениями, учитывающими различные возможные конфигурации МР.

Выражения для определения q_1 – q_3 с использованием координат точки R' МР в СК $O'x'y'z'$ можно получить с помощью построений, представленных на рис. 4.3а и 4.3б. Координаты точки R' определяются координатами точки r' , величиной l_4 и пространственной ориентацией вектора \mathbf{a}' (см. рис. 4.2). Из рис. 4.3а и 4.3б видно, что одно и то же расположение точки R' в СК $O'x'y'z'$ может быть обеспечено различными значениями обобщенных координат q_1 ($q_{1,1}$ или $q_{1,2}$), q_2 ($q_{2,1}$ или $q_{2,2}$) и q_3 ($q_{3,1}$ или $q_{3,2}$). Это неоднозначное решение ОЗК должно быть учтено при формировании соответствующих координат МР.

Из рис. 4.3а видно, что $q_{1,1} = -\arctg(R'_x/R'_y)$, где $R'_x = r'_x - a'_x l_4$, $R'_y = r'_y - a'_y l_4$ [56]. Но это выражение дает однозначное решение для формирования координаты q_1 только в диапазоне $(-\pi/2; \pi/2)$, поэтому для расширенного диапазона $[-\pi; \pi]$ корректно использовать функцию $\text{atan2}(R'_x, R'_y)$ [73].

Если учесть два возможных значения q_1 ($q_{1,1}$ или $q_{1,2}$), отличающихся на угол π (см. рис. 4.3а и 4.3б), при которых за счет изменения q_2 и q_3 точка R' будет иметь

одно и то же положение в СК $O'x'y'z'$, то окончательно без введения дополнительных логических условий можно записать

$$q_1 = -\text{atan2}(R'_x, R'_y) + \pi k_1, \quad (4.2)$$

где k_1 – параметр, определяющий выбор одной из двух возможных конфигураций МР (k_1 равен 0 или 1, если $\text{atan2}(R'_x, R'_y) \geq 0$, иначе -1). Выбор значения этого и других параметров, определяющих конфигурацию МР, производится автоматически и будет рассмотрен ниже.

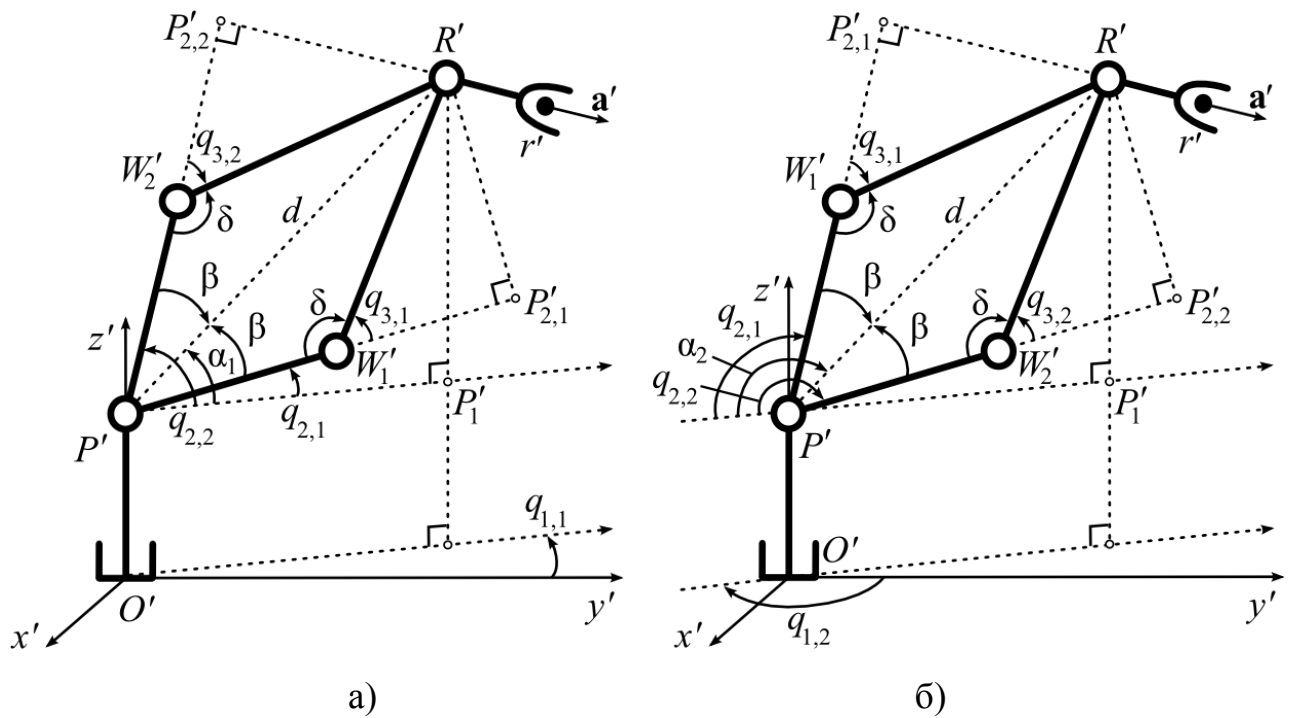


Рисунок 4.3 – Неоднозначное задание переносных степеней подвижности МР при
а) $k_1 = 0$; б) $k_1 = \pm 1$

С помощью выражения (4.2) можно рассчитать углы $q_{1,1}$ (для $k_1 = 0$) и $q_{1,2}$ (для $k_1 = \pm 1$). Причем разворот на угол π должен осуществляться в ту сторону, для которой q_1 не выходит из диапазона $[-\pi; \pi]$. Поэтому знак $q_{1,2}$ должен быть противоположен знаку рассчитанного выше $q_{1,1}$.

При определении обобщенных координат q_2 и q_3 рассматриваются все

возможные конфигурации МР, учитывающие различное расположение характерной точки W' (см. рис. 4.3) оси третьего шарнира МР (см. различное расположение точек W'_1 и W'_2 на рис. 4.3а и 4.3б, которым соответствуют различные пары углов $q_{2,1}, q_{3,1}$ и $q_{2,2}, q_{3,2}$).

Значение q_3 можно определить через $\arctg(s_3/c_3)$, где $s_i = \sin q_i$, $c_i = \cos q_i$, но лучше для этого также использовать функцию $\text{atan2}(\cdot)$ и записать [3]

$$q_3 = \text{atan2}(s_3, c_3). \quad (4.3)$$

Для определения c_3 можно использовать любой из равных треугольников (все их стороны равны) $P'W'_1R'$ или $P'W'_2R'$ (для $q_1 = q_{1,1}$ на рис. 4.3а), где $P'(0; 0; l_1)$ – координаты характерной точки оси второго шарнира в СК $O'x'y'z'$. Используя теорему косинусов для этих треугольников: $d^2 = l_2^2 + l_3^2 - 2l_2l_3 \cos \delta$ ($\cos \delta = \cos(\pi - q_{3,1}) = \cos(\pi + q_{3,2}) = -c_3$, δ – угол между вторым и третьим звеньями МР, смежный противоположным по знаку углам $q_{3,1}$ и $q_{3,2}$ ($q_{3,1} = -q_{3,2}$) при его различных (см. рис. 4.3а) конфигурациях), а также то, что длина стороны $P'R' = d = \sqrt{R_x'^2 + R_y'^2 + (R_z' - l_1)^2}$, а $R_z' = r_z' - a_z' l_4$ [56], можно записать

$$c_3 = (d^2 - l_2^2 - l_3^2) / (2l_2l_3). \quad (4.4)$$

Выражение для определения s_3 имеет вид:

$$s_3 = k_2 \sqrt{1 - c_3^2}, \quad (4.5)$$

где $k_2 = \pm 1$ – параметр, определяющий выбор знака s_3 для соответствующей ему одной (из двух) конфигураций МР (см. рис. 4.3а). Подставив (4.4) и (4.5) в (4.3), можно однозначно определить возможные значения $q_{3,1}$ (для $k_2 = -1$) и $q_{3,2}$ (для $k_2 = 1$).

Несложно показать, что, если $q_1 = q_{1,2}$ (см. рис. 4.3б), то выражения (4.3–4.5)

полностью сохраняются и при таком повороте МР вокруг вертикальной оси.

Возможные значения угла q_2 МР (см. $q_{2,1}$ и $q_{2,2}$ на рис. 4.3а и 4.3б) можно определить по выражению [3]

$$q_2 = \alpha - \beta, \quad (4.6)$$

где α – угол между горизонтальной плоскостью, проходящей через точку P' , и прямой $P'R'$, равный α_1 для $k_1 = 0$ или α_2 для $k_1 = \pm 1$; β – угол между вторым звеном МР и прямой $P'R'$ (его знак совпадает со знаком q_3).

Аналитические выражения для определения углов α и β в равенстве (4.6) можно получить с помощью построений, представленных на рис. 4.3а и 4.3б. Из треугольника $P'P_1'R'$, где $P_1'(R'_x; R'_y; l_1)$ – проекция точки R' на горизонтальную плоскость, проходящую через точку P' , в СК $O'x'y'z'$, видно, что $\operatorname{tg}\alpha_1 = P_1'R' / P'P_1' = (R'_z - l_1) / \sqrt{R_x'^2 + R_y'^2}$ при $q_1 = q_{1,1}$ (см. рис. 4.3а). Выразив из этого равенства α_1 и используя функцию $\operatorname{atan2}(\cdot)$, для обеих представленных на рис. 4.3а конфигураций МР можно записать

$$\alpha_1 = \operatorname{atan2}(R'_z - l_1, \sqrt{R_x'^2 + R_y'^2}), \quad (4.7)$$

а при $q_1 = q_{1,2}$ (см. рис. 4.3б) угол α равен

$$\alpha_2 = \pi - \alpha_1. \quad (4.8)$$

Угол β можно определить из равных треугольников $P'P_{2,1}'R'$ или $P'P_{2,2}'R'$ (см. рис. 4.3а), где $P_{2,1}'$ и $P_{2,2}'$ – точки пересечения перпендикуляров, опущенных из точки R' на прямые $P'W_1'$ и $P'W_2'$, соответственно. Для треугольника $P'P_{2,1}'R'$ справедливо равенство $\operatorname{tg}\beta = P_{2,1}'R' / (P'W_1' + W_1'P_{2,1}') = (l_3 \sin q_{3,1}) / (l_2 + l_3 \cos q_{3,1})$. Поскольку $q_{3,1} = -q_{3,2}$, можно определить значение и знак

$$\beta = \text{atan2}(l_3 s_3, l_2 + l_3 c_3). \quad (4.9)$$

С учетом величин и знаков α_1 (или α_2) (4.7–4.8) и β (4.9) можно однозначно определить обобщенную координату q_2 (4.6). Для уменьшения вычислительной сложности определения координат q_2 и q_3 при всех возможных конфигурациях МР можно учесть, что углы $q_{2,1}$, $q_{2,2}$, $q_{3,1}$, $q_{3,2}$ равны, соответственно, $\pi - q_{2,2}$, $\pi - q_{2,1}$, $q_{3,2}$, $q_{3,1}$ (см. рис. 4.3).

Для расчета остальных обобщенных координат q_4 – q_6 рассматриваемого МР с учетом расширенных диапазонов их изменений в качестве исходных были использованы выражения, ранее полученные в работе [56]

$$q_4 = \arccos((-a'_x c_1 - a'_y s_1) / s_5), \quad (4.10)$$

$$q_5 = \arccos(-a'_x s_1 c_{23} + a'_y c_1 c_{23} + a'_z s_{23}), \quad (4.11)$$

$$q_6 = \arccos(b'_x (s_1 s_{23} c_4 + c_1 s_4) + b'_y (-c_1 s_{23} c_4 + s_1 s_4) + b'_z (c_{23} c_4)), \quad (4.12)$$

где $s_{23} = \sin(q_2 + q_3)$, $c_{23} = \cos(q_2 + q_3)$.

Для рассматриваемого МР выражения (4.10–4.12) справедливы для однозначного решения ОЗК только тогда, когда изменения q_4 – q_6 происходят в диапазонах $[0; \pi]$. Поэтому эти выражения следует модифицировать так, чтобы они были справедливы и для новых диапазонов $[-\pi; \pi]$.

При определении координаты q_5 (4.11), зависящей только от углов q_1 – q_3 , следует учитывать две различные конфигурации МР, при которых q_5 принимает значения с противоположными знаками, а требуемая ориентация вектора \mathbf{a}' (см. рис. 4.2) обеспечивается за счет различных поворотов q_4 . Учитывая это, выражение (4.11) следует переписать в виде

$$q_5 = k_3 \arccos(-a'_x s_1 c_{23} + a'_y c_1 c_{23} + a'_z s_{23}), \quad (4.13)$$

где k_3 – параметр, равный ± 1 и определяющий текущую конфигурацию МР,

связанную с различными знаками q_5 .

Поскольку с учетом выражения (4.10) можно определить только модуль координаты q_4 , то для определения ее знака следует ввести логические условия, учитывающие постоянное совпадение векторов \mathbf{e}_6 и \mathbf{a}' . Для получения этих условий необходимо учесть, что при изменении q_4 в противоположных направлениях вращения и при фиксированных значениях q_1 – q_3 (4.2–4.9) и q_5 (4.13) наблюдается различный закон изменения (уменьшение или увеличение) проекции вектора \mathbf{e}_6 на ось $O'z'$. На рис. 4.4а и 4.4б показаны два варианта расположения звеньев МР, анализ которых позволяет определить знак q_4 . Для упрощения пояснений на этих рисунках принято, что $q_1 = 0$. Поэтому первые три звена МР располагаются в плоскости $O'y'z'$, а углы q_2 и q_3 различны, но такие, при которых оба рисунка симметричны относительно плоскости $O'x'z'$. На указанных рисунках векторы \mathbf{e}_4 и \mathbf{e}_6 не совпадают, поскольку углы $q_5 \neq 0$. Поэтому при изменении q_4 и $q_5 = \text{const}$ точка r' перемещается по окружности p .

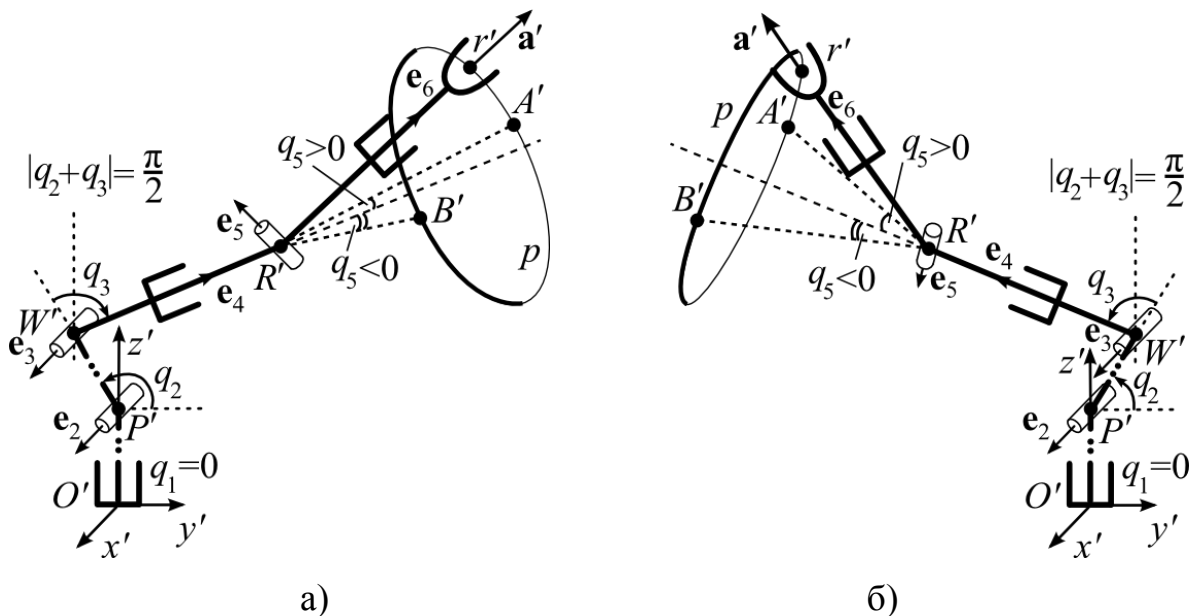


Рисунок 4.4 – Определение знака q_4 при а) $|q_2 + q_3| < \pi/2$; б) $|q_2 + q_3| > \pi/2$

Если вектор \mathbf{e}_5 лежит в плоскости $O'y'z'$, то принимается, что $q_4 = 0$, и тогда вектор \mathbf{e}_6 располагается в плоскости, в которой также лежит вектор \mathbf{e}_4 и которая перпендикулярна вектору \mathbf{e}_5 . В этом случае в зависимости от знака $q_5 \neq 0$ векторы

\mathbf{e}_6 на обоих рисунках займут положения $R'A'$ или $R'B'$, а их проекции на ось $O'z'$ будут равны $s_{23}c_5$ [56]. При этом положения $R'A'$ будут соответствовать $q_5 > 0$, а положения $R'B'$ – $q_5 < 0$. Расположение последнего звена МР, показанное на рис. 4.4а, может соответствовать двум различным парам значений углов q_4 и q_5 (в типовых диапазонах $[-\pi; \pi]$), например, соответственно: $\pi/4$ и $\pi/6$, $-3\pi/4$ и $-\pi/6$, а на рис. 4.4б – также двум различным парам этих углов: $-\pi/4$ и $\pi/6$, $3\pi/4$ и $-\pi/6$.

На рис. 4.4а и 4.4б для векторов \mathbf{a}' и \mathbf{e}_6 выполняется условие $a'_z > s_{23}c_5$. Из рис. 4.4а следует, что, если $|q_2 + q_3| < \pi/2$ и $q_5 > 0$, то при перемещении РТИ из положения $R'A'$ в положение r' по окружности p $q_4 > 0$, а если $q_5 < 0$, то $q_4 < 0$. Если $|q_2 + q_3| > \pi/2$ и $q_5 > 0$ (см. рис. 4.4б), то $q_4 < 0$, а если $q_5 < 0$, то $q_4 > 0$.

Несложно показать, что если $a_z < s_{23}c_5$ (эти конфигурации МР на рис. 4.4а и 4.4б не показаны), то в перечисленных ситуациях знак q_4 должен быть просто изменен на противоположный. То есть $q_4 > 0$, если

- 1) $q_5 > 0$, $a'_z > s_{23}c_5$, $|q_2 + q_3| < \pi/2$;
- 2) $q_5 < 0$, $a'_z < s_{23}c_5$, $|q_2 + q_3| < \pi/2$;
- 3) $q_5 > 0$, $a'_z < s_{23}c_5$, $|q_2 + q_3| > \pi/2$;
- 4) $q_5 < 0$, $a'_z > s_{23}c_5$, $|q_2 + q_3| > \pi/2$.

В представленных условиях не учитывается случай, когда третье звено МР может быть параллельно оси $O'z'$ ($|q_2 + q_3| = \pi/2$ и $a'_z = s_{23}c_5$). При появлении этого случая необходимо сохранять прежний знак q_4 до очередной смены знака. Поэтому для любых возможных конфигураций МР с учетом выражения (4.10) в общем виде можно записать

$$q_4 = \text{sign}(k_3 k_4 k_5) \arccos((a'_x c_1 - a'_y s_1) / s_5), \quad (4.14)$$

где $\text{sign}(x) = 1$, если $x \geq 0$, иначе -1 [73]; $k_4 = a'_z - s_{23}c_5$, $k_5 = \pi/2 - |q_2 + q_3|$.

Для выполнения условия $q_5 \neq 0$ в выражении (4.14) синтезируемая система управления МР исключает полное обнуление координаты q_5 . Знак координаты q_6 (4.12) определяется по взаимному расположению векторов $\boldsymbol{\gamma} = [\gamma_x \ \gamma_y \ \gamma_z]^T = \mathbf{e}_5 \times \mathbf{b}'$ и \mathbf{a}' [56]. Если эти векторы совпадают, то угол q_6 положителен или равен нулю,

иначе – отрицателен. При совпадении векторов γ и \mathbf{a}' их скалярное произведение удовлетворяет неравенству $k_6 = \gamma_x a'_x + \gamma_y a'_y + \gamma_z a'_z \geq 0$, иначе оно отрицательно,

где $\gamma_x = b'_z(s_1 s_4 - c_1 s_{23} c_4) - b'_y(c_{23} c_4)$, $\gamma_y = -b'_z(c_1 s_4 + s_1 s_{23} c_4) + b'_x(c_{23} c_4)$,
 $\gamma_z = b'_y(c_1 s_4 + s_1 s_{23} c_4) - b'_x(s_1 s_4 - c_1 s_{23} c_4)$ [56].

В результате выражение (4.12) с учетом знака можно переписать в виде

$$q_6 = \text{sign}(k_6) \arccos(b'_x(s_1 s_{23} c_4 + c_1 s_4) + b'_y(-c_1 s_{23} c_4 + s_1 s_4) + b'_z(c_{23} c_4)). \quad (4.15)$$

После получения выражений для расчета всех обобщенных координат q_1 – q_6 (см. (4.2–4.9) и (4.13–4.15)), учитывающих все возможные конфигурации МР, требуется выбрать одну из них, для которой при переходе МР из своего начального положения в конечное этот МР будет максимально удален от своих особых положений (о них будет сказано ниже), а его степени подвижности – от своих ограничений.

Общая вычислительная сложность предложенного метода решения ОЗК для МР составляет 27 операций сложения, 47 операций умножения (деления) и 21 операцию вычисления стандартных функций. Это меньше по сравнению с другими известными методами [20, 73], для которых эти значения составляют, соответственно, операций сложения – 34 и 35, умножения (деления) – 84 и 52, а также вычисления стандартных функций – 21 и 22, и при наличии современных процессоров позволяет реализовывать управление МР в РМВ.

При решении ОЗК указанного МР следует учитывать и его четыре особых положения (см. рис. 4.5) [35], в которых имеет место неоднозначное решение ОЗК и появляются непредсказуемые реверсы в некоторых степенях подвижности.

В первом особом положении (см. рис. 4.5а) проекция точки R' на плоскость $O'x'y'$ совпадает с началом координат. В этом положении возможно множество различных значений угла q_1 , которым будут соответствовать различные q_4 – q_6 . Во втором особом положении (см. рис. 4.5б) начало координат, а также точки R' и r' лежат на одной вертикальной прямой, и возможно существование множества пар

q_1 и q_6 . В третьем (см. рис. 4.5в) – на одной вертикальной прямой лежат начало координат и точки W' , R' , а координаты q_1 и q_4 однозначно не определены. В четвертом особом положении (см. рис. 4.5г) на одной прямой лежат последние звенья МР, $q_5 = 0$, а координаты q_4 и q_6 не определены. Кроме того, при работе с крупными объектами возможен выход РИ, сохраняющих заданные пространственные ориентации, на границу рабочей области МР, где продолжение ТО оказывается невозможным.

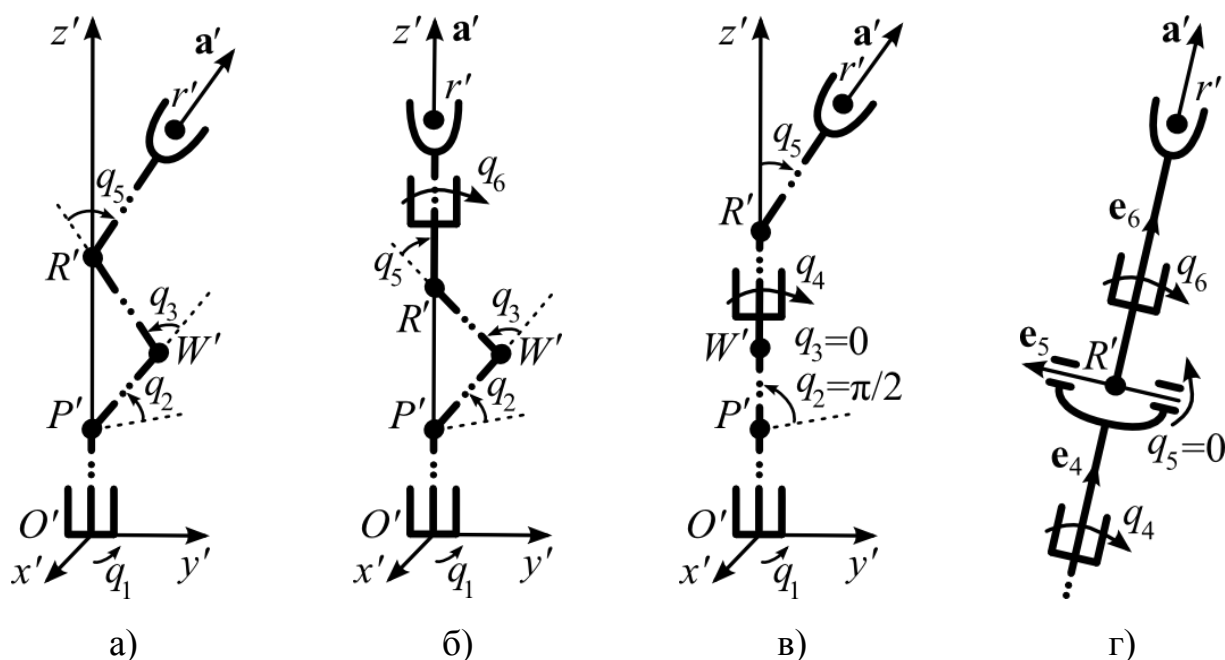


Рисунок 4.5 – Особые положения МР

Однако появление описанных выше особых положений и входов в ограничения МР можно исключить при введении дополнительной (избыточной) линейной степени подвижности q_7 (см. рис. 4.2) [67, 97]. Особенности работы МР с этой избыточной степенью подвижности подробно будут рассмотрены ниже.

4.3 Задание индикаторов, сигнализирующих о приближении манипуляционных роботов к их особым положениям

Ниже для формирования программных сигналов всех степеней подвижности кинематически избыточных МР будет синтезирована система, которая при подходе РИ к границам рабочей области МР, программных значений

всех его обобщенных координат – к их ограничениям, а звеньев МР – к особым положениям (см. рис. 4.5) будет автоматически перемещать основание МР по координате q_7 вдоль оси Ox (см. рис. 4.2) таким образом, чтобы полностью исключить появление описанных выше нежелательных ситуаций. При описании работы этой системы используются программные значения обобщенных координат $q_1^* - q_6^*$, рассчитываемые по выражениям (4.2–4.9) и (4.13–4.15) [65], в которые вместо координат точек r' и R' и проекций векторов \mathbf{a}' и \mathbf{b}' будут подставляться их программные значения. Ниже для упрощения записей символ $*$ будет указываться только у программных значений q_i^* .

При создании такой системы вначале вводятся специальные функции-индикаторы, текущие значения которых должны указывать на приближение МР к его особым (критическим) положениям. Для удобства анализа возникающих ситуаций диапазоны изменений этих индикаторов целесообразно установить едиными от 0 (наиболее благоприятное положение МР) до 1 (его критическое положение).

Значение первого индикатора J_1 стремится к 1, когда программное значение какой-либо из обобщенных координат q_i^* приближается к своим ограничениям (4.1), и равно 0, когда все степени подвижности находятся в своих средних положениях $q_{ci} = (q_{imin} + q_{imax})/2$ ($i = \overline{1,6}$). Этим индикатором может являться функция

$$J_1 = \max_{i=1,6} \{ 2 |q_i^* - q_{ci}| / |q_{imax} - q_{imin}| \}, \quad (4.16)$$

где $|q_{imax} - q_{imin}|$ – ширина диапазона изменения q_i^* , имеющая значение, вдвое превышающее наибольшее возможное значение $|q_i^* - q_{ci}|$. С учетом ранее принятых диапазонов изменения всех обобщенных координат МР – $[-\pi; \pi]$ можно использовать выражение

$$J_1 = \max_{i=1,6} \{ |q_i^*| / \pi \}. \quad (4.17)$$

Значение второго индикатора

$$J_2 = 1 - \sqrt{R_x'^2 + R_y'^2} / (l_2 + l_3) \quad (4.18)$$

стремится к 1, когда конфигурация МР приближается к первым трем особым положениям (см. рис. 4.5а–4.5в), в которых программная точка R' располагается на связанной с основанием МР оси $O'z'$, и равно 0, когда точка R' максимально удалена от этой оси и при этом выполняется равенство $\sqrt{R_x'^2 + R_y'^2} = (l_2 + l_3)$ (см. рис. 4.2).

Третий J_3 индикатор указывает на приближении МР к его четвертому особому положению (см. рис. 4.5г), в котором $q_5^* = 0$. В этом положении значение J_3 равно 1, а при достижении q_5^* границ изменения ($q_{5\min}$ или $q_{5\max}$) – 0. В результате можно записать

$$J_3 = \begin{cases} 1 - q_5^*/q_{5\min}, & \text{если } q_5^* < 0; \\ 1 - q_5^*/q_{5\max}, & \text{если } q_5^* > 0. \end{cases} \quad (4.19)$$

А с учетом принятых диапазонов $[-\pi; \pi]$ –

$$J_3 = 1 - |q_5^*| / \pi. \quad (4.20)$$

Значение четвертого индикатора J_4 равно 1, если РИ подходит к границе рабочей области, где $q_3^* = 0$ (см. рис. 4.2 и 4.5в), и равно 0, если $q_3^* = q_{3\min}$ или $q_3^* = q_{3\max}$. То есть можно записать, что

$$J_4 = \begin{cases} 1 - q_3^*/q_{3\min}, & \text{если } q_3^* < 0; \\ 1 - q_3^*/q_{3\max}, & \text{если } q_3^* > 0. \end{cases} \quad (4.21)$$

А с учетом принятых диапазонов $[-\pi; \pi]$ –

$$J_4 = 1 - |q_3^*| / \pi. \quad (4.22)$$

Каждый из четырех указанных индикаторов (4.17), (4.18), (4.20) и (4.22) [66] может изменяться в диапазоне $J_{ith} \in [0, 1]$ ($i = \overline{1,4}$) и сигнализирует о приближении МР к перечисленным критическим положениям. Если начинает выполняться условие $J_i \geq J_{ith}$, то основание МР должно смещаться по координате q_7 , что приводит к изменению проекции РТИ r' на ось $O'x'$ и, следовательно, согласно выражениям (4.2–4.9) и (4.13–4.15) – к формированию новых значений q_i^* ($i = \overline{1,6}$). Причем автоматическое смещение МР по координате q_7 вдоль оси Ox должно выполняться в сторону уменьшения величины J_i . Для упрощения работы синтезируемой ниже системы значения J_{ith} для всех четырех индикаторов J_i приняты одинаковыми, а смещение основания МР происходит, когда наибольшее значение непрерывно рассчитываемых J_i превышает заранее назначенную величину J_{th} . В общем случае величины J_{ith} могут быть различными с учетом кинематической схемы конкретного МР.

Введенные индикаторы также будут использованы для автоматического выбора исходной конфигурации МР перед началом его работы и для корректного последующего выполнения всех необходимых движений РИ.

4.4 Описание алгоритма автоматического выбора исходной конфигурации манипуляционного робота и системы управления его избыточной степенью подвижности

Полученные выражения (4.2–4.9) и (4.13–4.15) показывают, что при решении ОЗК для выбора конкретной конфигурации МР (см. рис. 4.2) должны быть заданы элементы вектора $\mathbf{K} = [k_1 \ k_2 \ k_3]^T$, которые для исключения одновременного скачкообразного изменения значений нескольких обобщенных координат в процессе его движения должны быть постоянными (параметры k_4 – k_6

рассчитываются автоматически при решении ОЗК). Значения элементов этого вектора желательно выбирать такими, при которых исходная конфигурация МР в начале траектории его движения была бы наиболее удалена от всех его особых положений. Для этого с учетом известных значений элементов программных векторов \mathbf{r} ($r_x = r_x' + q_7$, $r_y = r_y'$, $r_z = r_z'$), $\mathbf{a} = \mathbf{a}'$, $\mathbf{b} = \mathbf{b}'$, соответственно определяющих требуемое положение РТИ и пространственную ориентацию РИ в СК $Oxyz$, и q_7 в начале соответствующей траектории движения РИ перед началом перемещения МР согласно выражениям (4.2–4.9) и (4.13–4.15) выполняются решения ОЗК для всех возможных конфигураций МР, определяемых различными значениями элементов вектора \mathbf{K} . Так как каждый из элементов k_1, k_2, k_3 может принимать всего два возможных значения (см. пояснения к формулам (4.2), (4.5) и (4.13)) при заданных \mathbf{r} , \mathbf{a} , \mathbf{b} и q_7 , то существует всего восемь различных вариантов вектора \mathbf{K} . Для этих восьми векторов \mathbf{K} определяется восемь соответствующих им векторов $\mathbf{q}^* = [q_1^* \ q_2^* \ \dots \ q_6^*]^T$, для которых затем рассчитываются соответствующие значения индикаторов J_i ($i = \overline{1,4}$) согласно выражениям (4.17), (4.18), (4.20), (4.22). В итоге исходная конфигурация МР выбирается такой, при которой для конкретного вектора \mathbf{K} значение наибольшего из четырех введенных индикаторов J оказывается минимальным. Это может быть выполнено с помощью метода, описанного в работе [22]. В дальнейшем значение элементов этого вектора \mathbf{K} при обработке МР текущей траектории не меняется.

Работа системы по аналогии с алгоритмом, изложенным в работе [97], начинается с перемещения РТИ МР в начало программной траектории с ориентацией его РИ, задаваемой программными векторами \mathbf{a} , \mathbf{b} , которые формируются ПУ в СК $Oxyz$. При этом начальное положение основания МР на оси Ox (см. q_7 на рис. 4.2) выбирается таким, чтобы исходная точка траектории движения РИ МР находилась в его рабочей области. Для этого значения q_7 производится расчет координат РТИ (вектор \mathbf{r}') в СК $O'x'y'z'$, для которых согласно описанному выше алгоритму формируется исходная конфигурация МР, определяемая выбранным вектором \mathbf{K} . Затем с использованием выражений (4.2–

4.9) и (4.13–4.15) выполняется решение ОЗК и вычисляются начальные значения элементов вектора $\mathbf{q}^* = [q_1^* \ q_2^* \ \dots \ q_6^*]^T$, которые поступают на входы соответствующих следящих электроприводов МР.

После перемещения РИ в начало траектории, программные сигналы на выходе ПУ, определяющие векторы \mathbf{r} , \mathbf{a} , \mathbf{b} , и, следовательно, вектор \mathbf{q}^* , начинают изменяться. В результате обеспечиваются требуемые перемещения этого РИ во времени по задаваемым траекториям из их исходных точек с одновременным расчетом значений всех индикаторов J_i ($i = \overline{1,4}$).

Если при очередном изменении параметров траектории движения РИ значение J остается меньше или равно заранее заданному значению J_{th} , то основание МР остается неподвижно ($q_7 = \text{const}$), иначе оно смещается по оси Ox в сторону уменьшения J . Для определения направления смещения этого основания одновременно дополнительно рассчитывается значение наибольшего из индикаторов J_+ для МР, основание которого сдвинуто по оси Ox на расстояние $q_7 + \Delta q_7$, где Δq_7 – малая положительная величина. Если начинает выполняться неравенство $J < J_+$, то на текущем шаге формирования траектории основание МР начинает дополнительно смещаться со скоростью $\dot{q}_7 < 0$, иначе $\dot{q}_7 > 0$. Эта скорость может настраиваться в процессе выполнения ТО по методам, описанным в работе [68], или просто быть постоянной (эмпирически подобранной), как указано ниже.

Если при любом смещении основания МР по оси Ox величина J продолжает увеличиваться, то это информирует о приближении МР к его нежелательным положениям. Это возможно при малой величине \dot{q}_7 или при одновременном возрастании различных индикаторов, значения которых начинают превышать пороговое значение J_{th} при движении основания МР в различные стороны. Для исключения этих случаев требуется, соответственно, или увеличивать скорость \dot{q}_7 , или добавлять вторую избыточную степень подвижности МР, или обеспечивать его остановку для исключения опасных (аварийных) ситуаций. Эта остановка должна производиться при выполнении условия $J > J_{cr}$, где

$J_{cr} \in [J_{th}, 1]$ – критическое пороговое значение наибольшего из индикаторов.

На рис. 4.6 представлена обобщенная схема устройства, обеспечивающего формирование всех основных программных сигналов q_i^* ($i = \overline{1,6}$) и дополнительное смещение основания МР по его избыточной степени подвижности. На этом рисунке введены следующие обозначения: ПУ – программное устройство, задающее текущие программные значения координат РТИ (элементы вектора $\mathbf{r} = [r_x \ r_y \ r_z]^T$) в СК $Oxyz$, а также значения элементов векторов \mathbf{a} , \mathbf{b} и \mathbf{K} ; Д – датчик положения, измеряющий текущее значение q_7 ; И – источник постоянного сигнала $\Delta q_7 > 0$; $r'_{x+} = r_x - (q_7 + \Delta q_7)$; ОЗК – блоки решения ОЗК МР, которые с учетом выражений (4.2–4.9) и (4.13–4.15) формируют векторы обобщенных координат \mathbf{q}^* и \mathbf{q}^*_+ , соответственно, для двух различных положений основания МР – q_7 и $q_7 + \Delta q_7$; С – контроллеры, рассчитывающие текущие значения всех четырех индикаторов и выбирающие из них наибольшие J и J_+ , соответственно, для двух различных положений основания МР – q_7 и $q_7 + \Delta q_7$; 1 – релейный элемент, определяющий величину и знак постоянной программной скорости \dot{q}_7^* ; 2 – ключ, обеспечивающий подключение выхода релейного элемента 1 ко входу электропривода, управляющего координатой q_7 ; 3 – сумматор, формирующий сигнал $J - J_{th}$ (его вход со стороны блока И имеет коэффициент усиления $J_{th}/\Delta q_7$).

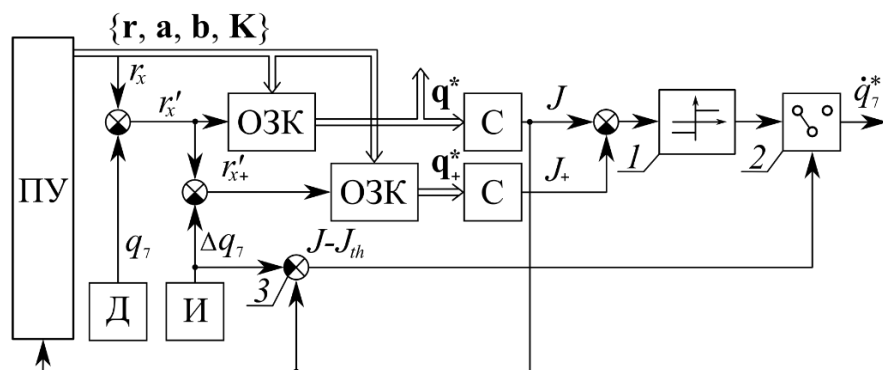


Рисунок 4.6 – Обобщенная схема устройства формирования программных сигналов для всех степеней подвижности МР

Перед началом движения МР на выходе ПУ (см. рис. 4.6) формируются программные значения элементов векторов \mathbf{r} , \mathbf{a} и \mathbf{b} , определяющие исходное положение и ориентацию РИ в СК $Oxyz$, а также – значения элементов вектора \mathbf{K} , задающего одну из восьми возможных конфигураций МР. С учетом выражений (4.2–4.9) и (4.13–4.15) на выходе ОЗК формируется вектор \mathbf{q}^* , а на выходе С – соответствующий ему сигнал J , поступающий на вход ПУ и сохраняемый в его памяти. Затем через равные фиксированные интервалы времени, необходимые для выполнения всех расчетов в блоках ОЗК и С, на выходе ПУ формируются новые векторы \mathbf{K} , соответствующие всем другим возможным конфигурациям МР, для которых также сохраняются значения J . После сохранения последнего восьмого значения J в ПУ определяется та исходная конфигурация МР, для которой величина J будет наименьшей. Вектор \mathbf{K} , соответствующий этой конфигурации, сохраняется на выходе ПУ. При выбранном значении \mathbf{K} запускается работа МР, и он принимает благоприятную для него возможную исходную конфигурацию после поступления на все входы соответствующих следящих электроприводов многозвенника рассчитанных (для текущих значений векторов \mathbf{r} , \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{K} с учетом значения выходного сигнала датчика $D - q_7$) исходных значений элементов вектора \mathbf{q}^* , перемещая РИ в начало его программной траектории.

После завершения переходных процессов во всех электроприводах начинается движение РИ МР по траектории. Для этого на выходе ПУ по программе в РМВ изменяются значения векторов \mathbf{r} , \mathbf{a} и \mathbf{b} (непрерывно или через дискретные промежутки времени в зависимости от способа реализации этой системы). Это приводит к изменению сигналов \mathbf{q}^* и J на выходах блоков ОЗК и С, соответственно. Если выполняется условие $J \leq J_{th}$, то основание МР остается неподвижным и величина q_7 не изменяется. Если это неравенство справедливо, то сигнал $J - J_{th} \leq 0$ на выходе сумматора 3 размыкает ключ 2, и сигнал \dot{q}_7^* остается нулевым. Если же начинает выполняться неравенство $J - J_{th} > 0$, то начинается перемещение основания МР по координате q_7 . Для определения направления указанного перемещения на выходах вторых блоков ОЗК и С формируются

сигналы \mathbf{q}_+^* и J_+ (см. рис. 4.6), соответствующие величине r'_{x_+} , равной значению проекции РТИ r' на ось $O'x'$ для МР, основание которого сдвинуто по оси Ox на расстояние $q_7 + \Delta q_7$. С учетом указанных значений J и J_+ на выходе релейного элемента I формируется сигнал постоянной скорости \dot{q}_7^* , знак которого совпадает со знаком разности $J - J_+$ (или равен 0, если $J = J_+$), а ключ 2 замыкается, подключая выход релейного элемента I к выходу системы. Сигналы $\mathbf{q}^* = [q_1^* \ q_2^* \ \dots \ q_6^*]^T$ и \dot{q}_7^* обрабатываются соответствующими следящими электроприводами, перемещая РИ по траектории. При этом система управления степенью подвижности q_7 не обязательно должна обеспечивать высокую точность движений, так как при пересчете координат РТИ из СК $Oxyz$ в СК $O'x'y'z'$ используется не программное, а непрерывно измеряемое датчиком D значение q_7 .

Если же в процессе работы системы начинает выполняться условие $J > J_{cr}$, проверяемое в ПУ, то РИ останавливается и работа МР прекращается. При этом сигналы \mathbf{r} , \mathbf{a} и \mathbf{b} на выходе ПУ фиксируются во избежание аварийных ситуаций.

Из описания работы системы (см. рис. 4.6) следует, что сигнал J_+ необходим только для определения знака скорости \dot{q}_7^* (направления движения МР по координате q_7), когда $J > J_{th}$. При выполнении условия $J \leq J_{th}$ (при покоящемся основании МР) вычисление сигнала J_+ можно не производить, экономя вычислительный ресурс системы.

За счет дополнительного перемещения основания МР по координате q_7 вблизи объекта работ предложенная система обеспечивает исключение всех описанных выше нежелательных положений МР. Причем, как показано в работе [67], эта система может быть использована для управления не только промышленными роботами, но и МР, установленными на подводных аппаратах и выполняющими ТО в режиме зависания [19, 69–71, 129] с периодическими перемещениями всего аппарата (основания манипулятора) вблизи объектов работ.

4.5 Моделирование работы системы формирования программных сигналов для всех степеней подвижности избыточных манипуляторов

Исследование разработанной системы формирования программных сигналов было проведено для МР (см. рис. 4.2), обобщенные координаты которого изменялись в диапазонах $[-\pi; \pi]$ (4.1). Длины l_i , а также моменты инерции J_{si} и J_{ni} его i -ых звеньев ($i = \overline{1,3}$) совпадают с теми, которые указаны в третьей главе. Масса груза $m_g = 5$ кг, длина $l_4 = 0.15$ м. Электроприводы МР имеют параметры: $K_{yi} = 1$, $i_{pi} = 100$ ($i = \overline{1,7}$); $R_i = 0.5$ Ом, $L_i = 0.01$ Гн, $K_{Mi} = 0.04$ Нм/А, $K_{\omega i} = 0.04$ Вc/рад, $J_{Ei} = 10^{-3}$ кгм² ($i = \overline{1,3}$ и 7); $R_i = 1.4$ Ом, $L_i = 0.02$ Гн, $K_{Mi} = 0.06$ Нм/А, $K_{\omega i} = 0.06$ Вc/рад, $J_{Ei} = 0.3 \cdot 10^{-3}$ кгм² ($i = \overline{4,6}$). Номинальный момент инерции $J_{nom i} = 10^{-4}$ кгм² вала i -го ($i = \overline{1,3}$ и 7) электродвигателя и вращающихся частей редуктора, используемый в законе самонастройки [24–27, 68] для компенсации взаимовлияний между степенями подвижности МР. В электроприводах использованы типовые ПИД-регуляторы, описываемые уравнениями: $U_i = k_{pi} \varepsilon_i + k_{li} \int \varepsilon_i dt + k_{di} \dot{\varepsilon}_i$, где ε_i – ошибка управления соответствующего электропривода ($i = \overline{1,7}$); $k_{pi} = 1883$, $k_{li} = 130$, $k_{di} = 140$ ($i = \overline{1,3}$ и 7); $k_{pi} = 2800$, $k_{li} = 100$, $k_{di} = 100$ ($i = \overline{4,6}$). Ограничения линейных зон сигналов управления всех электроприводов $U_i = \pm 22.5$ В. Скорость v^* движения РТИ по задаваемой траектории для упрощения анализа результатов моделирования задается постоянной и равной 0.5 м/с.

На рис. 4.7–4.11 представлены результаты моделирования работы шестистепенного МР, установленного на подвижном основании (см. рис. 4.2), в среде MATLAB. РТИ МР перемещалась по сложной пространственной траектории (см. рис. 4.7), сформированной с помощью параметрических сплайнов третьего порядка [95]. Эта траектория начиналась в исходной точке 1, для которой с использованием системы, изображенной на рис. 4.6, и описанного в разделе 4.4 алгоритма элементы матрицы \mathbf{K} автоматически принимали значения $\mathbf{K} = [0 \ -1 \ 1]^T$, и затем последовательно проходила точки 2–7. Ее вид и ориентация РИ

выбирались такими, чтобы при $q_7 = 0$, когда СК $Oxyz$ и $O'x'y'z'$ совпадают, МР (см. рис. 4.2) последовательно входил в описанные выше нежелательные положения.

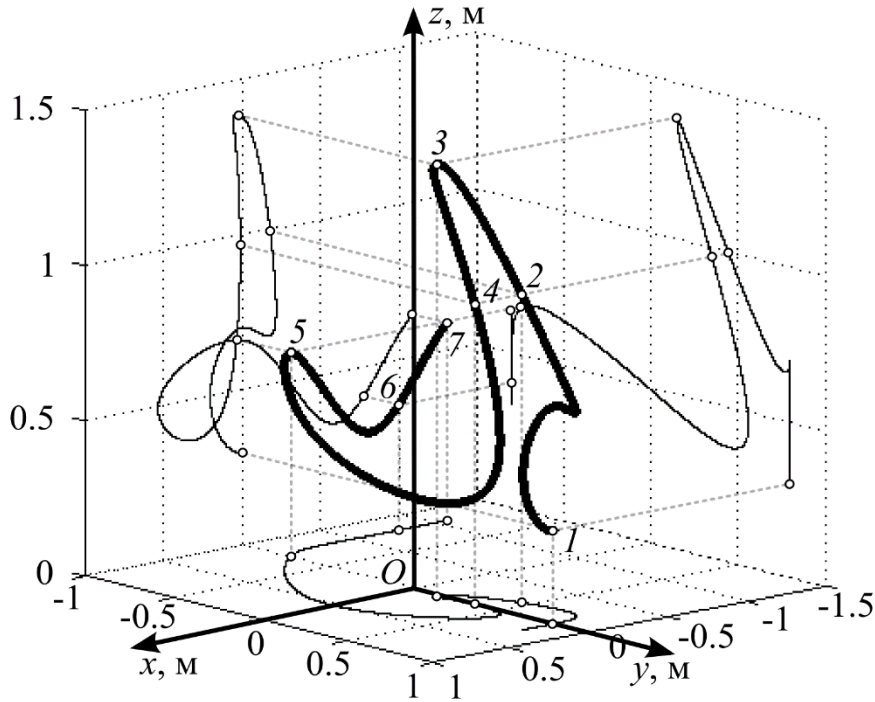


Рисунок 4.7 – Программная траектория движения РТИ

Законы изменения программных значений обобщенных координат q_i^* ($i = \overline{1,6}$) при движении РИ по указанной траектории показаны на рис. 4.8. Во время этого движения выполнялся вход МР в два различных особых положения, трижды – выход трех его степеней подвижности на ограничения и один раз в конце движения – выход РИ на границу рабочей области МР. Эта траектория позволяет проверить и учесть работу всех описанных выше индикаторов.

Когда РТИ проходила точку 2, знак параметра k_4 в выражении (4.14) менялся на противоположный. Это приводило к тому, что программные значения обобщенных координат q_4^* и q_6^* , вошедших в ограничения (см. момент времени 2.6с на рис. 4.8), скачком меняли свои значения. При прохождении точки 3 МР подходил к первому особому положению (см. рис. 4.5а), в котором точка R' располагалась строго вертикально над точкой O' и значения q_1^* , q_4^* , q_6^* резко изменялись (см. 3.7с на рис. 4.8). При проходе точки 4 МР входил в четвертое

особое положение (см. рис. 4.5г), в котором $q_5^* = 0$ (см. 4.9с на рис. 4.8) и происходили быстрые реверсы в его четвертой и шестой степенях подвижности. При проходе точки 5 в ограничение входила первая степень подвижности (см. 9.2с на рис. 4.8), и затем скачком меняла свое значение с $-\pi$ на π ; а в точке 6 РИ выходил на границу рабочей области, когда $q_3^* = 0$ (см. 11.2с на рис. 4.8) и МР экстренно останавливался, не выйдя к требуемой точке 7.

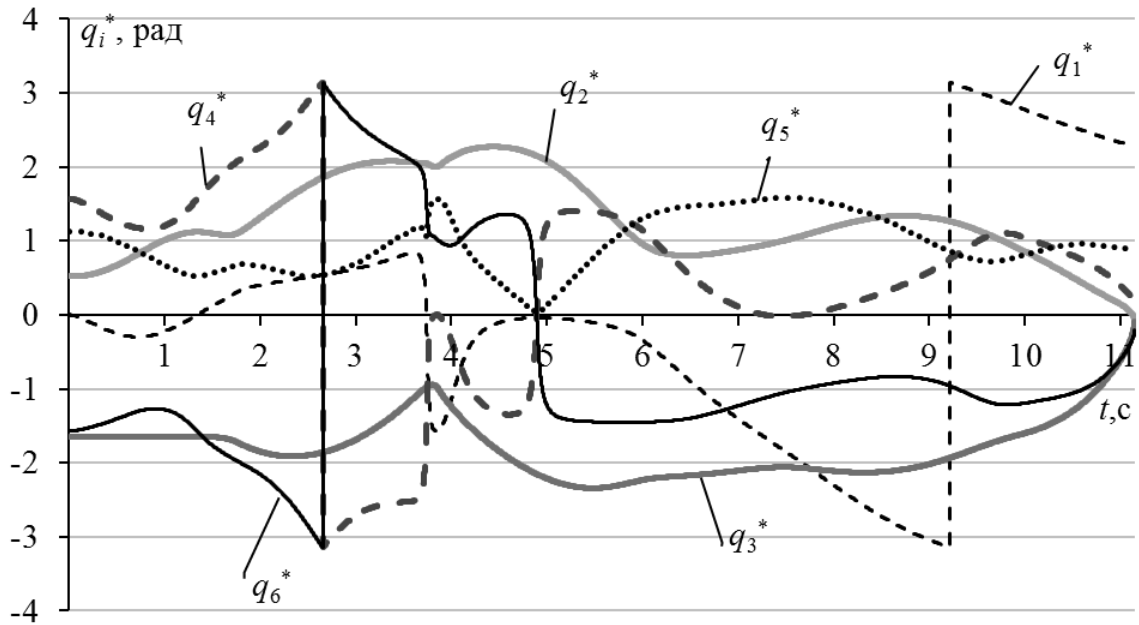


Рисунок 4.8 – Законы изменения программных значений q_i^* ($i = \overline{1,6}$) при $q_7 = 0$

Очевидно, что появляющиеся скачки программных значений q_i^* ($i = \overline{1,6}$) (см. рис. 4.8) не могут обрабатываться мгновенно следящими электроприводами МР. Поэтому, как только МР входил в одно из указанных положений, реальные изменения обобщенных координат q_i ($i = \overline{1,6}$) (см. рис. 4.9) начинали сильно отставать и отличаться от своих программных значений q_i^* ($i = \overline{1,6}$) (см. рис. 4.8). Это отставание происходило до завершения всех переходных процессов в электроприводах и занимало 0.3–1с. При этом отклонение D_1 РТИ от программной траектории на особых участках траекторий возрастало до недопустимых величин – от 1.7 мм до 1.5 м (см. рис. 4.10).

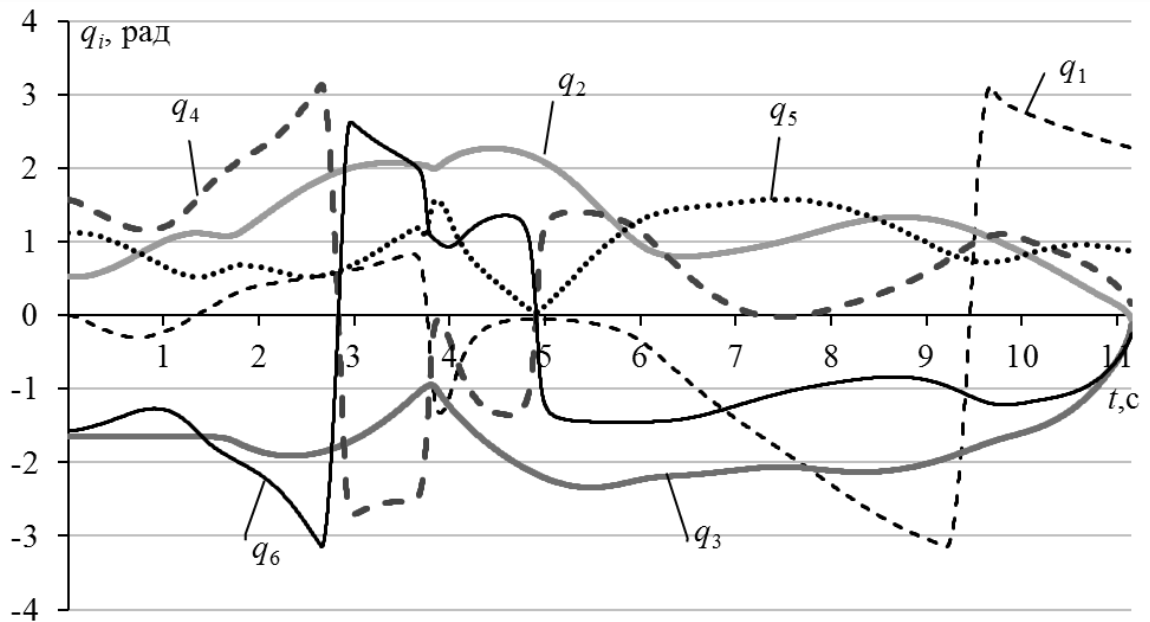


Рисунок 4.9 – Законы изменения реальных значений q_i ($i = \overline{1,6}$) при неподвижном основании МР с учетом динамических свойств используемых электроприводов

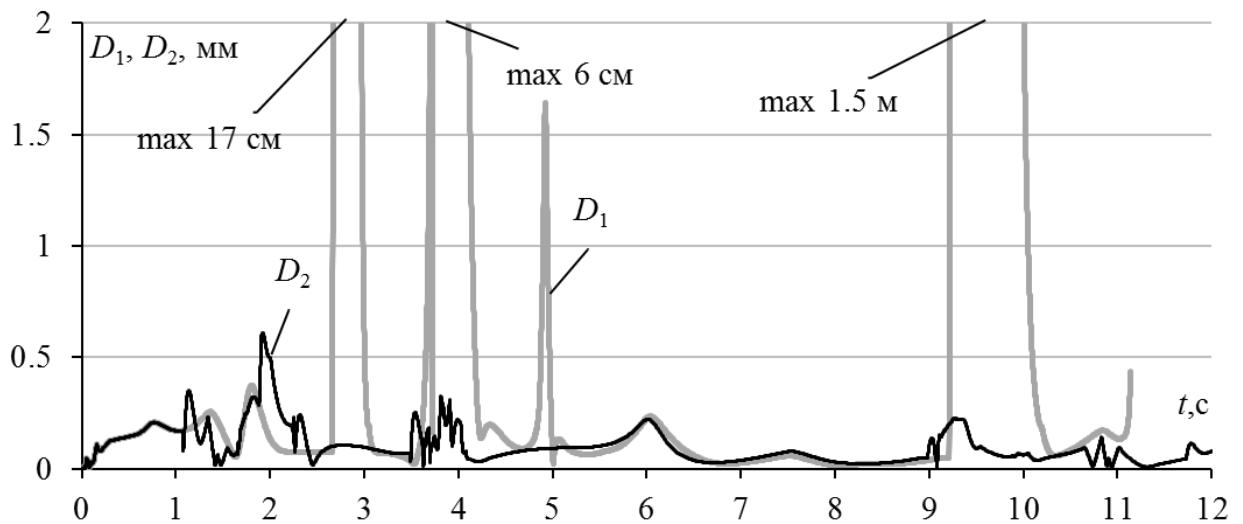


Рисунок 4.10 – Законы изменения отклонений РТИ от программной траектории D_1 (при $q_7 = 0$) и D_2 (при $q_7 = \text{var}$)

Для устранения этих негативных явлений использована система (см. рис. 4.6), обеспечивающая смещение основания МР по координате q_7 во время приближения его конфигурации к проблемным зонам. При этом удалось сформировать закон коррекции программных значений МР, который обеспечил точное перемещение РИ по траекториям без появления негативных ситуаций, приводящих к реверсам в некоторых степенях подвижности МР и неожиданным

остановкам его работы при выходе РИ на границу рабочей области.

Результаты исследований показали, что для качественной и корректной работы системы (см. рис. 4.6) можно принять $\dot{q}_7^* = 0.5 \text{ м/с} = \text{const}$ и $J_{th} = J_{ith} = 0.8$. То есть все четыре значения J_{ith} вполне можно выбирать одинаковыми. В этом случае координата q_7 при уже заданной скорости движения РИ в пространстве успевает исключить все нежелательные особенности сочетаний значений всех обобщенных координат МР, приводящих к появлению четырех указанных выше негативных особых положений многозвенника (см. рис. 4.5) и к выходу некоторых его степеней подвижности на ограничения или всего МР – на границы рабочей области.

Законы формирования системой (см. рис. 4.6) программных значений q_i^* ($i = \overline{1,6}$) МР с учетом реальной величины q_7 , также изменяющейся во времени в процессе отработки заданной траектории (см. рис. 4.7), показаны на рис. 4.11. Из этого рисунка видно, что резкие изменения программных значений во всех обобщенных координатах МР полностью исключены. При этом первое смещение основания МР по координате q_7 происходит в интервале времени 1.2–2.2с, когда начинает выполняться неравенство $|q_5^*| < (1 - J_{th})\pi$, полученное из равенства (4.20). Из рис. 4.11 видно, что за счет изменения q_7 к моменту времени 2.6с выход координат q_4^* и q_6^* на ограничения (как это имело место (см. рис. 4.8) при $q_7 = 0 = \text{const}$), был также автоматически исключен. По этой же причине в момент времени 3.7с МР не вошел в первое особое положение (см. рис. 4.5а), а его основание также немного сместилось (см. рис. 4.11) по координате q_7 , поскольку начало выполняться неравенство $|q_3^*| < (1 - J_{th})\pi$, полученное из равенства (4.22). Уже произошедшее к моменту времени 4.9с смещение МР по координате q_7 исключило и четвертое особое положение МР (см. рис. 4.5а), как это происходило ранее при $q_7 = 0$ (см. рис. 4.8). Последнее смещение основания МР по координате q_7 произошло после 9с (см. рис. 4.11), когда сначала кратковременно вновь выполнялось неравенство $|q_5^*| < (1 - J_{th})\pi$, а затем начало удовлетворяться неравенство $|q_1^*| > J_{th}\pi$, полученное из равенства (4.17), поскольку к своему

ограничению начала приближаться первая степень подвижности МР, которая в итоге к этому ограничению так и не подошла за счет выполненного дополнительного смещения МР по координате q_7 .

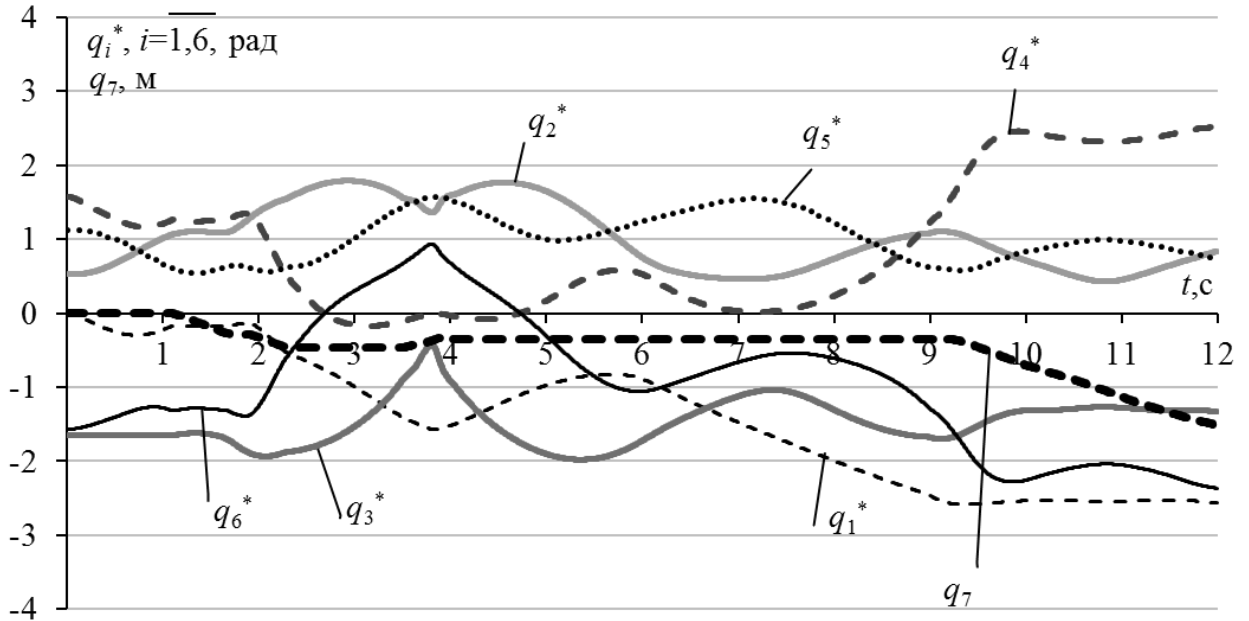


Рисунок 4.11 – Законы изменения программных значений q_i^* ($i = \overline{1,6}$) и реального значения q_7 при подвижном основании МР

Таким образом, в результате работы синтезированной системы (см. рис 4.6) отклонение D_2 РТИ МР от предписанной траектории не превысило 0.65 мм (см. рис. 4.10) на всех ее участках и движение РТИ было завершено полностью (строго в конце заданной траектории) – в точке 7 (см. рис. 4.7).

Аналогичный результат с отсутствием неожиданных перебросов во всех степенях подвижности МР и без выходов этих степеней на ограничения был получен и при исследовании работы МР с синтезированной системой (см. рис. 4.6) [65, 66, 93] при обработке многих различных сложных пространственных траекторий [67, 97, 101].

Таким образом, использование предложенного метода позволило расширить рабочую область МР и автоматически полностью исключать возникновения нештатных ситуаций при приближении очередной конфигурации этого МР к его

указанным выше нежелательным положениям при отработке различных задаваемых пространственных траекторий, сохраняя тем самым неизменно высокую точность перемещения РТИ по этим траекториям и полностью исключая возникновение аварийных ситуаций или поломку оборудования.

4.6 Экспериментальные исследования работы системы формирования программных сигналов для всех степеней подвижности кинематически избыточных манипуляторов

Для проверки работоспособности и эффективности описанного выше метода формирования программных сигналов для всех степеней подвижности кинематически избыточных МР помимо математического моделирования был проведен анализ работы созданной системы (см. рис. 4.6) в реальных режимах ее эксплуатации. Для этого были проведены натурные эксперименты с шестистепенным МР, в рабочей области которого с помощью конвейера перемещалась обрабатываемая деталь. Это перемещение аналогично обратному смещению основания МР по избыточной линейной степени подвижности q_7 (см. рис. 4.2). Общий вид робототехнического стенда представлен на рис. 4.12.

4.6.1 Описание робототехнического стенда и проведенного эксперимента

Экспериментальные исследования разработанной системы формирования программных сигналов для всех степеней подвижности избыточных МР проводились с использованием робототехнического стенда, представленного на рис. 4.12. Этот стенд содержит шестистепенной МР 1 Mitsubishi RV-2FB-D (см. рис. 4.12 и 4.13), управляемый контроллером (ЭВМ МР) CR750, конвейер FESTO, для управления которым используются контроллер 2 Arduino Nano, построенный на базе ATmega328, усилитель 3 мощности Cytron MD30B, источник питания CHUX S-1500-36 и ЭП 4 Nidec 404.603, выходной вал которого через редуктор посредством ременной передачи соединен с валом Д 5 (инкрементного поворотного энкодера) E38S6-C-(600)B5-26G2. Формирование программных сигналов управления для всех степеней подвижности МР 1 и конвейера

осуществляется с помощью программы, написанной на языке C++, запущенной на персональном компьютере (ПК) и обрабатывающей сигналы, поступающие от датчиков МР 1 и конвейера. Основные характеристики этого стенда представлены в таблице 4.1 (параметры \tilde{a}_{23} и \tilde{l}_3 будут описаны в дальнейшем).

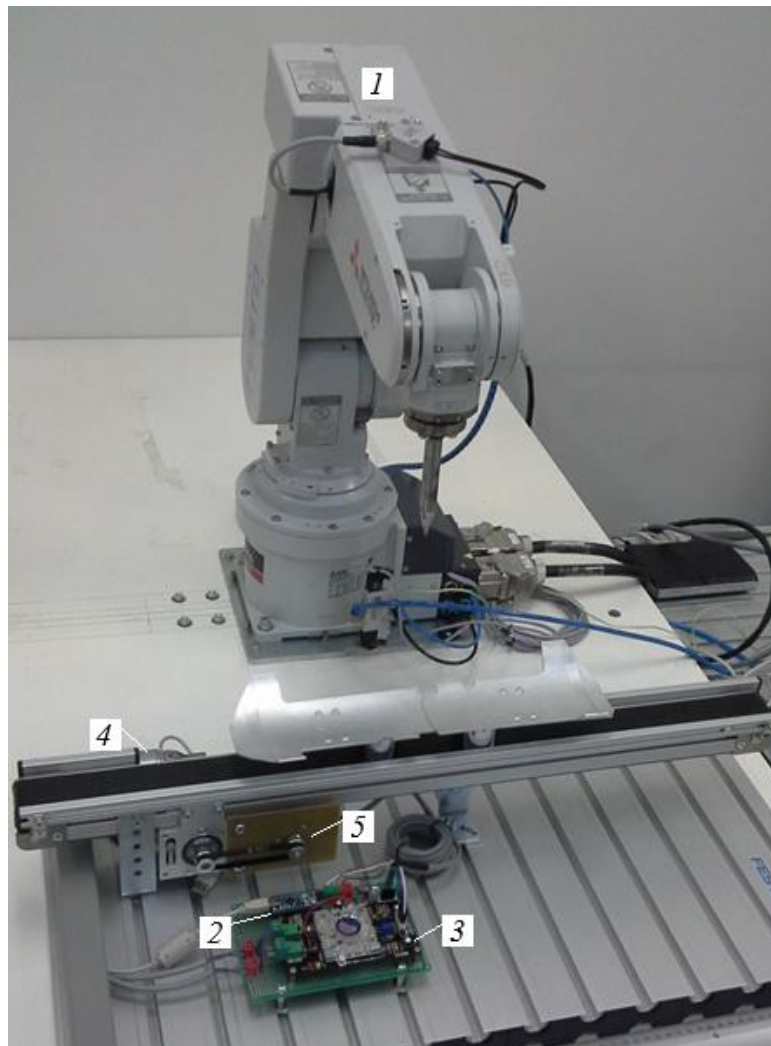


Рисунок 4.12 – Общий вид робототехнического стенда

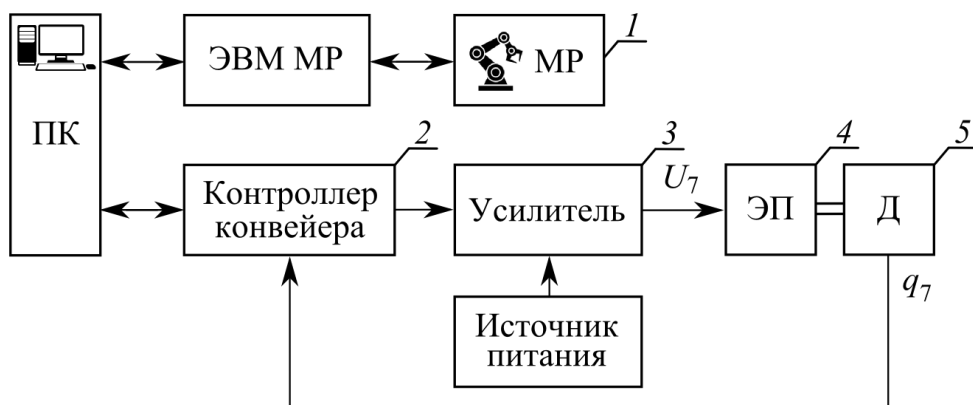


Рисунок 4.13 – Функциональная схема работы робототехнического стенда

Указанные в табл. 4.1 минимальные и максимальные значения обобщенных координат q_i^* ($i = \overline{1,6}$) определяются механическими ограничениями МР RV-2FB-D, не выходящими за указанный в разделе 4.2 диапазон $[-\pi; \pi]$, что при формировании программных сигналов МР (при решении ОЗК) позволяет использовать выражения (4.2–4.9) и (4.13–4.15), некоторые из которых, как будет показано ниже, должны быть модифицированы. Цель эксперимента состояла в том, чтобы с помощью описанной системы (см. рис. 4.6) обеспечить бесперебойное и точное движение РИ МР по пространственной траектории вдоль контура детали, перемещаемой конвейером внутри рабочей области МР. Программные сигналы для всех степеней подвижности МР формировались автоматически непосредственно в процессе работы робототехнического стенда.

Таблица 4.1 – Основные характеристики робототехнического стенда

Наименование параметра	Единица измерения	Числовое значение
Манипуляционный робот RV-2FB-D		
Размеры звеньев ($l_1, l_2, \tilde{d}_{23}, \tilde{l}_3, l_4$) МР	м	0.295, 0.23, 0.05, 0.27, 0.07
Мин. значения q_i^* ($i = \overline{1,6}$)	град.	-180, -30, -160, -110, -120, -180
Макс. значения q_i^* ($i = \overline{1,6}$)	град.	150, 180, 0, 180, 120, 180
Масса МР	кг	20
Номинальная грузоподъемность	кг	2
Номинальная мощность ЭП ($i = \overline{1,3}$)	Вт	100
Номинальная мощность ЭП ($i = \overline{4,6}$)	Вт	50
Стабильность позиционирования	мм	± 0.02
Контроллер (Arduino Nano) конвейера		
Напряжение питания	В	5
Выходное напряжение	В	5
Макс. выходной ток	А	0.04

Продолжение таблицы 4.1

Усилитель мощности (Cytron MD30B) электропривода конвейера		
Напряжение питания	В	10–30
Выходное напряжение	В	10–30
Номинальный выходной ток	А	20
Источник питания (CHUX S-1500-36)		
Макс. выходное напряжение	В	36
Макс. выходной ток	А	41
Электропривод (Nidex 404.603) конвейера		
Номинальное напряжение	В	24
Номинальный ток	А	2
Номинальный крутящий момент	Н·м	1
Номинальная мощность	Вт	7.4
Датчик положения (инкрементный поворотный энкодер)		
Разрешение энкодера	имп./об	2400
Напряжение питания	В	5–24

4.6.2 Описание кинематической схемы манипулятора RV-2FB-D

В кинематической схеме МР RV-2FB-D, показанной на рис. 4.14а, в отличие от той, которая использовалась ранее (см. рис. 4.2), третье звено манипулятора состоит из двух ортогональных отрезков, соединенных в точке \tilde{P}' . Длины этих отрезков равны $\tilde{d}_{23} = W'\tilde{P}'$ и $\tilde{l}_3 = \tilde{P}'R'$, а расстояние между точками W' и R' равно

$$l_3 = \sqrt{\tilde{d}_{23}^2 + \tilde{l}_3^2}. \quad (4.23)$$

Отсчет всех обобщенных координат q_i этого МР выполняется из его исходного положения (см. рис. 4.14а).

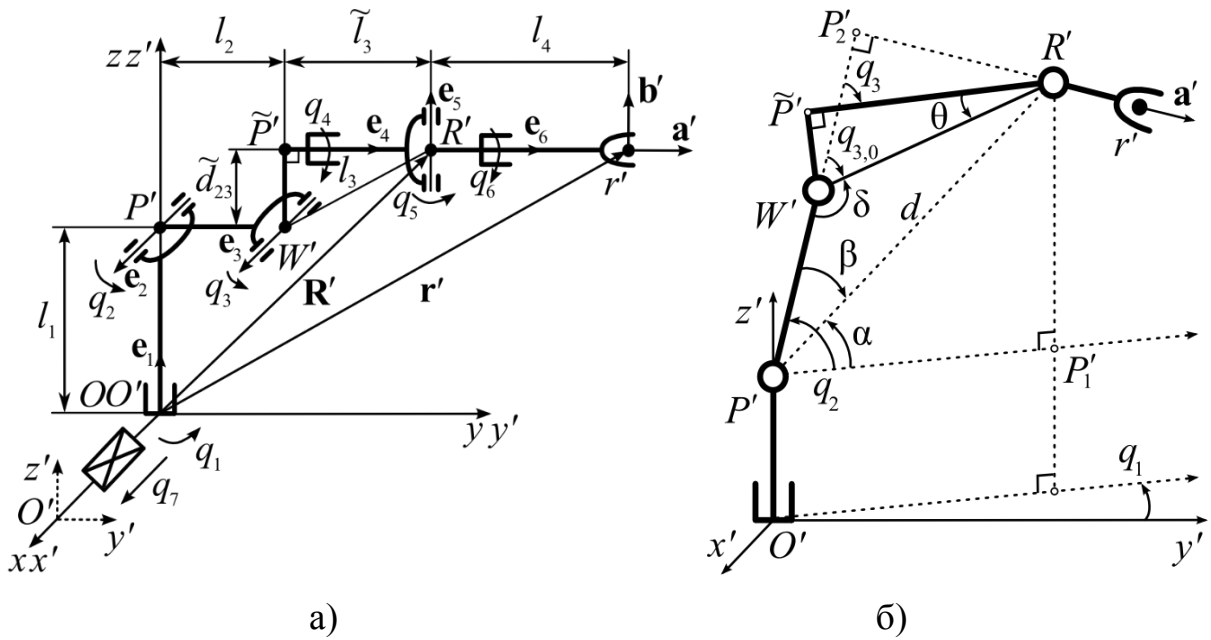


Рисунок 4.14 – Кинематическая схема MP RV-2FB-D

Поскольку конструкция третьего звена MP не влияет на проекцию точки R' на горизонтальную плоскость O'x'y', то используя построения (см. рис. 4.14б), аналогичные рис. 4.3, для расчета значения q1 можно использовать выражение (4.2). Из рис. 4.14б видно, что угол q3 для MP RV-2FB-D, равен углу между отрезками W'P2' и P~'R'. Поэтому, так как q3 ≤ 0 (см. табл. 4.1), то

$$q_3 = q_{3,0} - \theta, \tag{4.24}$$

где $\theta = \arctg(\tilde{d}_{23}/\tilde{l}_3)$; q3,0 – угол, совпадающий с q3 (4.3) на рис. 4.3. Причем так как q3 ≤ 0, то синус этого угла, рассчитываемый согласно (4.5), тоже отрицателен или равен нулю, следовательно, параметр k2 = -1.

Выражения для расчета значений q2 (4.6–4.9) и ориентирующих степеней подвижности qi (i = 4,6) (4.13–4.15) остаются неизменными, поскольку новое значение q3 (4.24) входит в них в качестве переменной, что позволяет автоматически учесть изменение конструкции MP при решении ОЗК.

Для проверки правильности решения ОЗК и для дальнейшего расчета динамической ошибки (расстояния от РТИ до программной точки на траектории)

необходимо решить также ПЗК для указанного МР. Решение ПЗК для МР, представленного на рис. 4.2, известно в литературе [56], но для МР RV-2FB-D требуется дополнительно учесть изменение конструкции его третьего звена.

При решении этой задачи удобно использовать матрицы $\mathbf{A}_i^{i-1} \in R^{4 \times 4}$ и СК, связанные с каждым звеном МР. Для построения этих СК можно использовать подход Денавита-Хартенберга [73]. На рис. 4.15 показана схема расположения этих СК, связанных с соответствующими звеньями МР, и использованы правила:

1. ось z_{i-1} направлена вдоль оси i -го сочленения;
2. ось x_i перпендикулярна оси z_{i-1} и направлена от нее.
3. ось y_i дополняет построенные оси x_i и z_i до правой декартовой СК.

При соблюдении этих правил возможен выбор расположения осей 0-й и 6-й СК. 0-ю СК расположим так, чтобы она совпадала с СК $O'x'y'z'$, а 6-ю СК – с РТИ, причем векторы \mathbf{a}' и \mathbf{b}' совместим с осями z'_6 и y'_6 , соответственно.

Для МР RV-2FB-D матрица однородных преобразований $\mathbf{T} \in R^{4 \times 4}$, определяющая положение 6-й СК (см. рис. 4.15), связанной с РИ, относительно 0-й СК, может быть представлена в виде последовательного произведения однородных матриц \mathbf{A}_i^{i-1} ($i = \overline{1,6}$), которые обеспечивают преобразование векторов из $i-1$ -й в i -ю СК. Окончательно матрица \mathbf{T} имеет вид

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} x'_{6x} & y'_{6x} & z'_{6x} & r'_{6x} \\ x'_{6y} & y'_{6y} & z'_{6y} & r'_{6y} \\ x'_{6z} & y'_{6z} & z'_{6z} & r'_{6z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_x & y'_x & z'_x & r'_x \\ b'_x & b'_y & b'_z & r'_y \\ a'_x & a'_y & a'_z & r'_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_1^0 \mathbf{A}_2^1 \mathbf{A}_3^2 \mathbf{A}_4^3 \mathbf{A}_5^4 \mathbf{A}_6^5, \quad (4.25)$$

где $[x'_{6x} \ y'_{6x} \ z'_{6x}]^T$, $[x'_{6y} \ y'_{6y} \ z'_{6y}]^T$, $[x'_{6z} \ y'_{6z} \ z'_{6z}]^T$ – единичные векторы, лежащие, соответственно, на осях x'_6 , y'_6 , z'_6 , начала которых лежат в точке r' ;

$$\begin{aligned}
\mathbf{A}_1^0 &= \begin{bmatrix} -s_1 & 0 & c_1 & 0 \\ c_1 & 0 & s_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & \mathbf{A}_2^1 &= \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & l_2 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & l_2 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & \mathbf{A}_3^2 &= \begin{bmatrix} -s_3 & 0 & c_3 & -\tilde{d}_{23} s_3 \\ c_3 & 0 & s_3 & \tilde{d}_{23} c_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
\mathbf{A}_4^3 &= \begin{bmatrix} -s_4 & 0 & c_4 & 0 \\ c_4 & 0 & s_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \tilde{l}_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & \mathbf{A}_5^4 &= \begin{bmatrix} -c_5 & 0 & -s_5 & 0 \\ -s_5 & 0 & c_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & \mathbf{A}_6^5 &= \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & 0 \\ s_6 & c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.
\end{aligned}$$

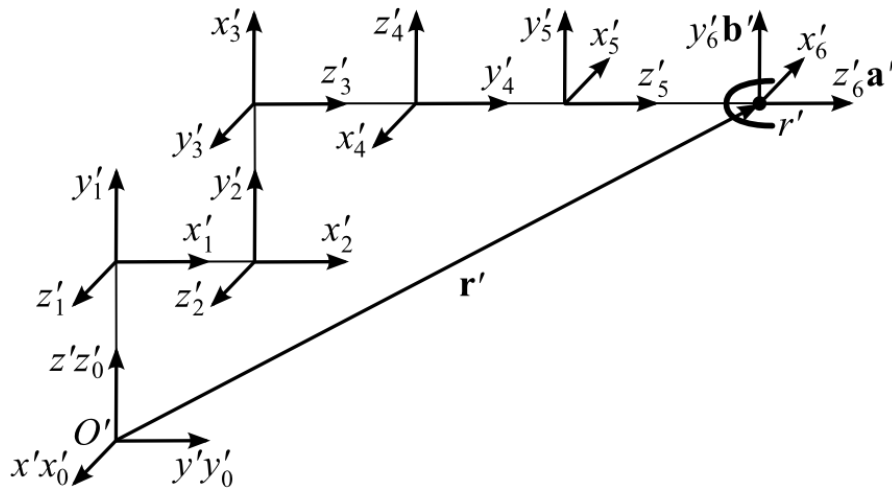


Рисунок 4.15 – Схема расположения систем координат МР

Выражения (4.25), представленные в матричном виде, позволяют без затруднений и быстро решать ПЗК для МР RV-2FB-D. Анализируя элементы матриц \mathbf{A}_i^{i-1} ($i = \overline{1,6}$), можно сделать вывод, что если $\tilde{d}_{23} = 0$ и $\tilde{l}_3 = l_3$, то будет получено известное решение ПЗК [56] для МР, показанного на рис. 4.2.

4.6.3 Описание индикаторов, указывающих на приближение МР к его особым положениям и механическим ограничениям

Изменение конструкции третьего звена МР (см. рис. 4.14а) приводит к необходимости коррекции выражений (4.16–4.22), с помощью которых выявляется приближение МР к его особым положениям, степеней подвижности – к ограничениям, а РИ – к границе рабочей области. Следует учитывать, что МР

RV-2FB-D может входить только в три особые положения. В первом (см. рис. 4.16а) – проекция точки R' на плоскость $O'x'y'$ совпадает с началом координат, приводя к неоднозначности в определении q_1 . Во втором особом положении (см. рис. 4.16б) начало координат, а также точки R' и r' лежат на оси $O'z'$. Это неоднозначно определяет пары углов q_1 и q_6 . В третьем особом положении (см. рис. 4.5г) при $q_5 = 0$ не определены координаты q_4 и q_6 .

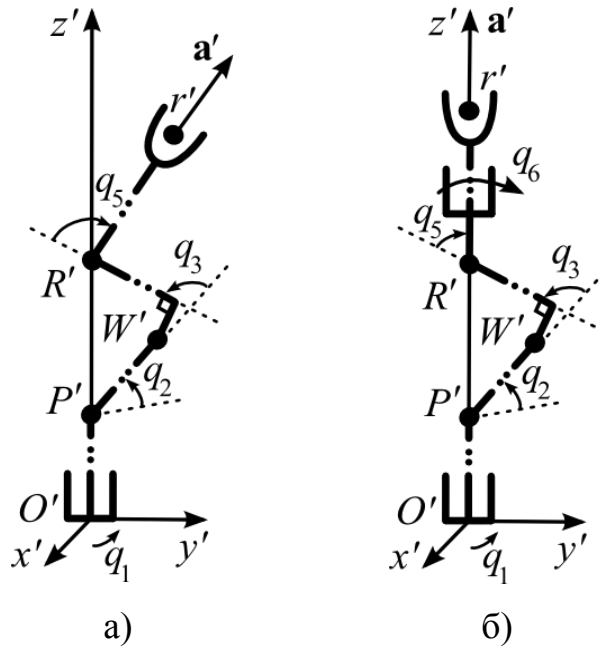


Рисунок 4.16 – Особые положения МР RV-2FB-D а) первое; б) второе

При расчете значения первого индикатора J_1 , позволяющего оценить приближение всех степеней подвижности МР к их ограничениям, следует учесть, что $q_{i\min}$ и $q_{i\max}$ ($i = \overline{1,6}$) для МР RV-2FB-D (см. табл. 4.1) различны, а диапазон изменения координаты q_7 ограничен. Поэтому вместо выражения (4.17) необходимо использовать более общее выражение (4.16) для $i = \overline{1,7}$.

Значения второго J_2 и третьего J_3 индикаторов, выявляющих приближение МР к его особым положениям (см. рис. 4.5г, 4.16), рассчитываются с использованием формул (4.18) и (4.19), учитывая, что величина l_3 , входящая в формулу (4.18), для МР RV-2FB-D равна расстоянию между точками W' и R' (см. рис. 4.14а) и вычисляется согласно (4.23).

Значение четвертого индикатора J_4 стремится к 1, когда при заданных \mathbf{r}' , \mathbf{a}' и \mathbf{b}' РИ подходит к границе рабочей области МР, и расстояние $P'R'$ становится максимальным, то есть отрезки $P'W'$ и $W'R'$ располагаются на одной прямой линии (см. рис. 4.17), а $q_3 = -\theta$ (знак минус указывает на поворот координаты q_3 по часовой стрелке). Учитывая, что для наиболее эффективной эксплуатации МР RV-2FB-D его исходную конфигурацию целесообразно выбирать такой, при которой выполняется неравенство $q_3^* < -\theta$, то для расчета индикатора J_4 следует использовать первое равенство (4.21), в котором в числителе и знаменателе следует добавить смещение на угол θ . В результате можно записать

$$J_4 = 1 - \frac{q_3^* + \theta}{q_{3\min} + \theta}. \quad (4.26)$$

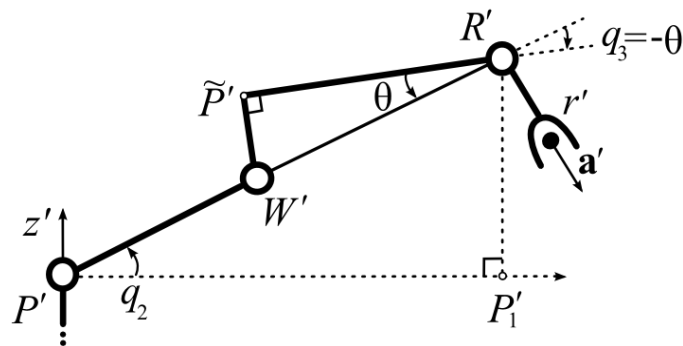


Рисунок 4.17 – Условие выхода РИ МР RV-2FB-D на границу рабочей области

С использованием уточненных выражений для решения ОЗК (4.2–4.9), (4.13–4.15), (4.24), ПЗК (4.25) и расчета индикаторов J_i ($i = \overline{1,4}$) (4.16), (4.18), (4.19) и (4.26) система (см. рис. 4.6) формирования программных сигналов для всех степеней подвижности МР была использована при проведении экспериментальных исследований, результаты которых представлены ниже.

4.6.4 Результаты экспериментальных исследований работы созданной системы формирования программных сигналов

Во время эксперимента исследовалось пространственное движение РИ МР

RV-2FB-D по траектории, составленной из 39 параметрических сплайнов (3.4). Это движение начиналось в исходной точке 1 (см. рис. 4.18), проходило через промежуточные точки 2 и 3 к точке 4, расположенной в начальном месте обработки детали, и продолжалось вдоль ее контура (см. рис. 4.19) через точки 5, 6, 7 до точки 8 на детали с возвращением в исходное положение 1. Программные сигналы для всех степеней МР формировались с помощью системы (см. рис. 4.6). В процессе движения по этой траектории при $q_7 = 0$ МР последовательно входил в некоторые из нежелательных положений. Элементы матрицы \mathbf{K} , как описано в разделе 4.4, автоматически выбраны равными $\mathbf{K} = [0 \ -1 \ 1]^T$. Низкая постоянная скорость движения v^* РТИ по программной траектории, равная 2.5 мм/с, обусловлена особенностью использования контроллера CR750 МР (см. рис. 4.13) в режиме внешнего управления, когда программные значения обобщенных координат q_i^* ($i = \overline{1,6}$) поступают на его вход от внешнего ПК.

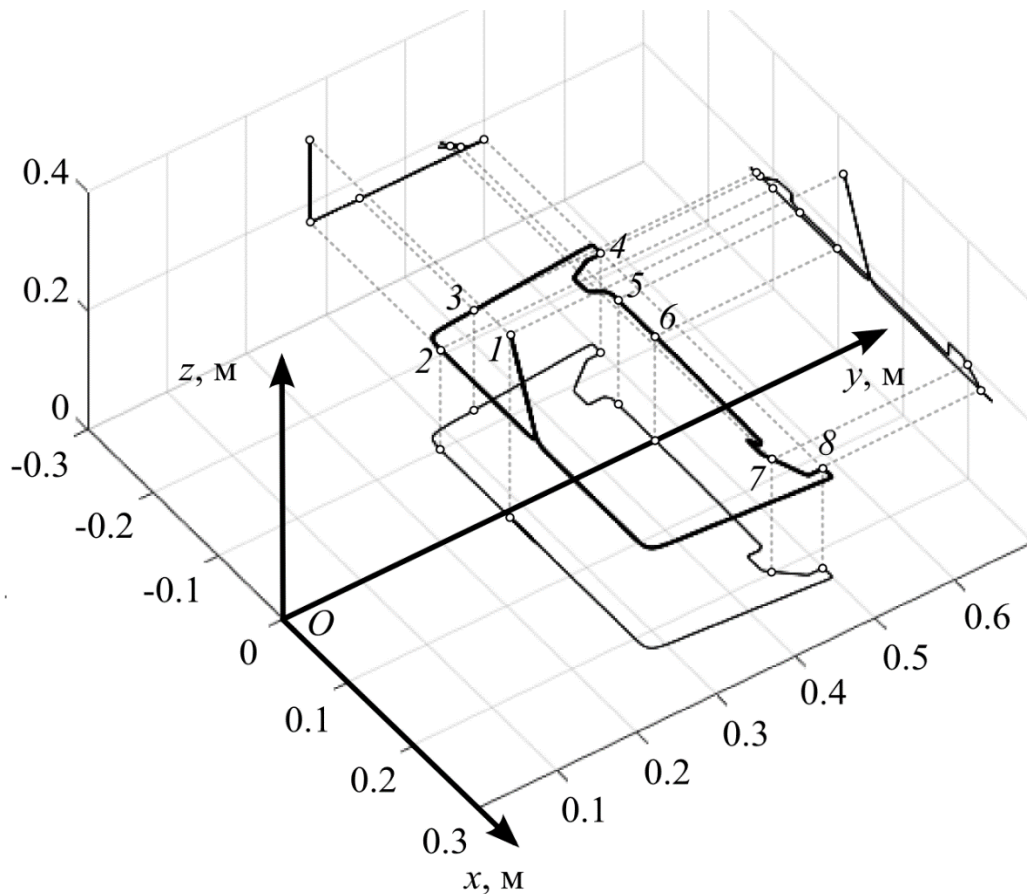


Рисунок 4.18 – Программная траектория движения РТИ промышленного робота

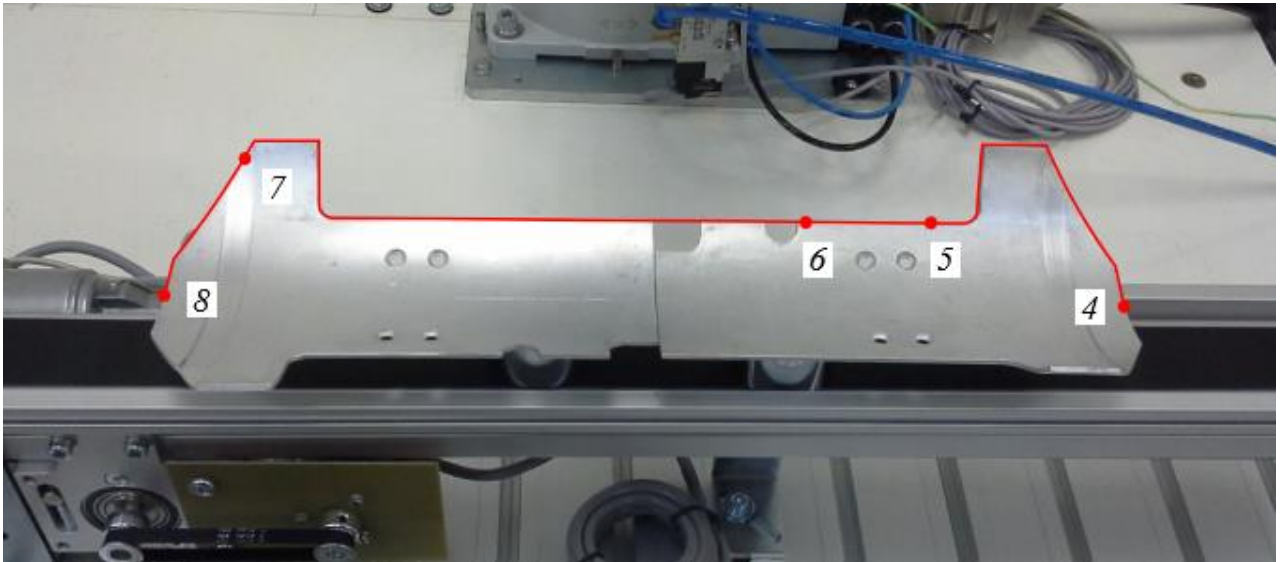


Рисунок 4.19 – Программная траектория движения РТИ вдоль контура детали

В этом режиме управления время, затрачиваемое контроллером МР на формирование нового набора программных сигналов, не может быть меньше 7.1 мс. Реально длительность одного цикла отправки/приема новых пакетов при обмене данными между ПК и ЭВМ МР увеличивалась до 10 мс.

Законы изменения реальных значений q_i ($i = \overline{1,6}$), измеряемых датчиками МР, при движении РИ по программной траектории (см. рис. 4.18) при неподвижном конвейере ($q_7 = 0$) показаны на рис. 4.20. Во время этого движения дважды выполнялся выход одной степени подвижности МР на ограничения, один раз наблюдался его вход в особое положение, а в конце движения – выход РИ на границу рабочей области.

При движении РТИ между точками 2 и 3 (см. рис. 4.18) четвертая степень подвижности МР входила в ограничение (см. q_4 в промежутке 110–140с на рис. 4.20). Это приводило к резкому увеличению динамической ошибки E_1 (см. рис. 4.21) при отработке программной траектории (до 5.5 мм). Так как эта ошибка появлялась на участке подхода РИ к обрабатываемой детали, то к возникновению аварийной ситуации это не приводило, но в условиях реальной эксплуатации МР при перемещении РИ вблизи каких-либо объектов аварийная ситуация может возникнуть. При движении между точками 5 и 6, когда РИ двигался уже вдоль

контура детали, четвертая степень подвижности МР снова входила в ограничение (см. q_4 в промежутке 265–290с на рис. 4.20) с увеличением динамической ошибки E_1 до 2.5 мм (см. рис. 4.21). А в конце этого интервала в точке 6 МР входит в четвертое особое положение (см. рис. 4.5г), в котором $q_5 = 0$ и появляются реверсы в четвертой и в шестой степенях подвижности. В точке 7 происходит выход РИ на границу рабочей области, когда $q_3 = -\theta$ (см. 385с на рис. 4.20), и движение МР прекращается, не достигнув конца контура детали в точке 8.

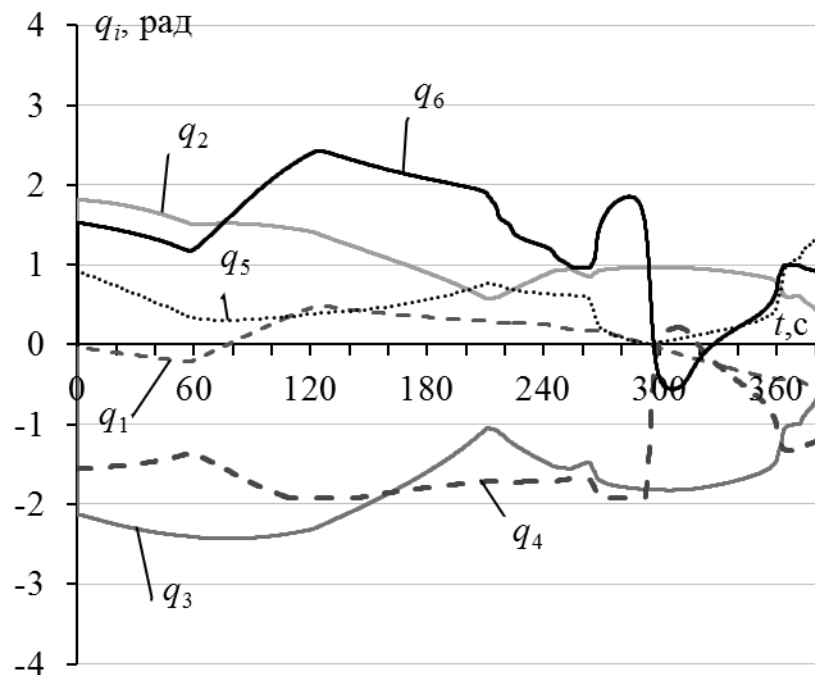


Рисунок 4.20 – Законы изменения реальных значений q_i ($i = \overline{1,6}$) при $q_7 = 0$

Исключить вход МР в указанные нежелательные положения, в которых происходит резкое падение точности управления или аварийная остановка МР, позволяет система (см. рис. 4.6), обеспечивающая перемещение обрабатываемой детали в рабочей области МР во время приближения его конфигурации к проблемным зонам. При работе этой системы учитываются параметры: $\dot{q}_7^* = 12.5$ мм/с, $J_{ith} = 0.8$ ($i = \overline{1,3}$), $J_{4th} = 0.7$ и ограничения $q_{7min} = -0.3$ м и $q_{7max} = 0.4$ м. Для управления электроприводом конвейера использован типовой ПИ-регулятор, описываемый уравнением $U_7 = k_{p7}\varepsilon_7 + k_{I7}\int\varepsilon_7 dt$, где U_7 (см. рис. 4.13)

и ε_7 – соответственно, входное напряжение и ошибка управления электропривода конвейера; $k_{p7} = 10000$, $k_{T7} = 300$.

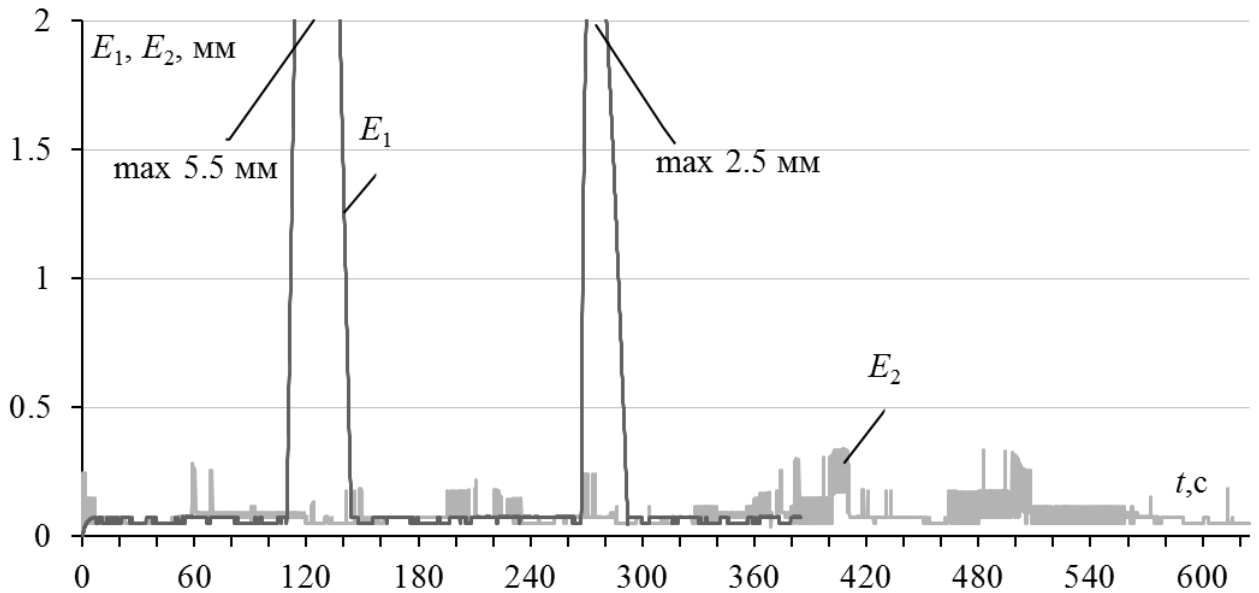


Рисунок 4.21 – Законы изменения динамических ошибок РТИ от программной траектории E_1 (при $q_7 = 0$) и E_2 (при $q_7 = \text{var}$)

На рис. 4.22 представлены законы изменения реальных значений q_i ($i = \overline{1,6}$) и q_7 при использовании конвейера для обхода нежелательных конфигураций МР. Первое перемещение конвейером детали по координате q_7 происходило сразу же после начала движения РИ по траектории, когда q_4^* приближалась к ограничению и выполнялось условие $q_4^* \leq -(J_{1th} |q_{4\max} - q_{4\min}|)/2 + q_{c4}$, полученное из равенства (4.16). Следующее перемещение по координате q_7 выполнялось в интервале 60–110с, когда МР приближался к третьему особому положению и выполнялось условие $q_5^* \leq (1 - J_{3th})q_{5\max}$, полученное из (4.19). Это перемещение завершалось, когда деталь приближалась к концу конвейерной ленты и выполнялось условие $q_7^* \leq -(J_{1th} |q_{7\max} - q_{7\min}|)/2 + q_{c7}$, также полученное из равенства (4.16) при $i = 7$, о чем сказано выше. Затем перемещение конвейера обрабатывалось в интервале 330–410с, когда РИ приближался к границе рабочей области и выполнялось условие $q_5^* \leq (1 - J_{4th})(q_{5\min} + \theta) - \theta$, полученное из (4.26). Четвертое движение по координате q_7 , выполняемое в интервале 465–560с, также связано с

приближением МР к своему третьему особому положению.

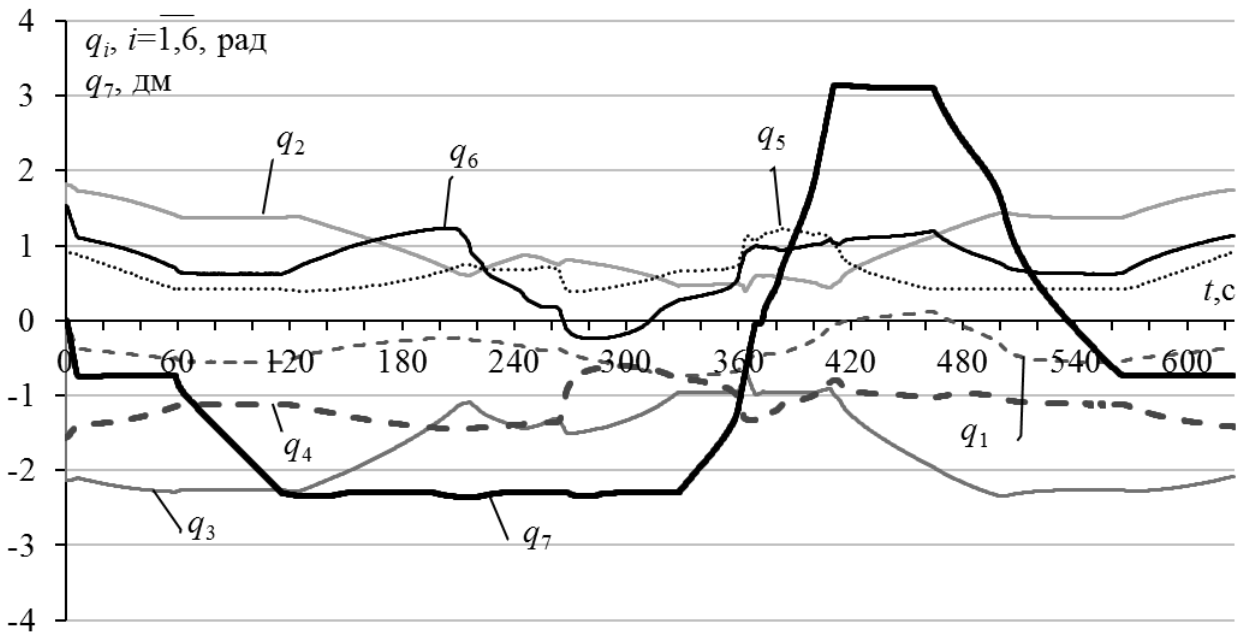


Рисунок 4.22 – Законы изменения реальных значений q_i ($i = \overline{1,6}$) при $q_7 = \text{var}$

Таким образом, при перемещениях детали конвейером было обеспечено точное и непрерывное движение РИ на всех участках программной траектории, причем всё движение завершалось точно в конце траектории в точке I (см. рис. 4.18). При этом динамическая ошибка E_2 (см. рис. 4.21) хотя и несколько увеличилась на отдельных участках траектории, когда конвейер перемещался, но не превышала 0.32 мм.

4.7 Выводы

В четвертой главе представлен метод синтеза системы формирования программных сигналов для всех степеней подвижности кинематически избыточных МР, основания которых могут линейно перемещаться по одной или нескольким дополнительным линейным степеням подвижности.

1. Этот метод, используя аналитическое решение ОЗК, позволяет формировать программные сигналы для всех степеней подвижности типовых МР. Этот же метод позволяет осуществлять выбор начальной (одной из многих

возможных) наиболее приемлемой исходной конфигурации МР, начиная движение из которой, гарантируется исключение входа МР в нежелательные положения, в которых возникают проблемы с точным выполнением заданных ТО.

2. Разработан метод синтеза систем, которые за счет формирования программных сигналов для избыточных степеней подвижности МР, перемещающих основания МР вблизи объектов работ (или объекты работ внутри рабочих областей МР), позволяют исключать входы конфигураций МР во все их нежелательные положения. В результате обеспечивается сохранение динамической точности контурного управления РИ на всех участках программных траекторий, исключается возникновение аварийных ситуаций, а также расширяется фактическая рабочая область МР.

3. Синтезированные системы особенно эффективны в случаях, когда работа МР осуществляется в условиях неопределенности окружающей среды. То есть построение программных траекторий движения РИ МР осуществляется автоматически в РМВ после начала выполнения ТО с использованием системы технического зрения с учетом непрерывно изменяющейся рабочей обстановки.

4. Для практической реализации синтезированных систем разработано новое программное обеспечение, с использованием которого могут быть созданы СУ промышленными роботами, имеющими различные кинематические схемы и произвольные интерфейсы управления.

5. Результаты проведенного численного моделирования и экспериментальных исследований полностью подтвердили работоспособность и высокую эффективность синтезированных СУ. Реализация этих систем не представляет затруднений, защищена патентом РФ на изобретение [31], а также свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ [47, 48, 51, 53].

Заключение

В диссертации представлены результаты разработки методов синтеза СУ МР, способных обеспечить выполнение ТО, связанных с перемещениями РИ по пространственным траекториям на предельно высоких скоростях без снижения заданной динамической точности, без входа механизмов МР в ограничения и особые положения с одновременным увеличением их фактических рабочих областей.

При этом были получены следующие новые результаты:

1. Разработан метод синтеза систем автоматического управления электроприводами МР, которые обеспечивают их движение на предельно высоких скоростях без ухудшения заданной динамической точности с учетом ограничений входных сигналов их исполнительных элементов и возможных изменений параметров нагрузки этих электроприводов.

2. Разработан метод построения гладких пространственных траекторий движения РИ МР с использованием математического аппарата параметрических сплайнов. Этот метод обеспечивает формирование законов движения РИ МР по указанным траекториям точно с требуемой скоростью.

3. На основе созданного метода построения пространственных траекторий разработан метод автоматического задания режимов движения РИ МР по этим траекториям на предельно высоких скоростях с сохранением заданной динамической точности с учетом взаимовлияний между всеми их степенями подвижности, а также ограничений на входные напряжения электроприводов.

4. Разработан метод синтеза систем формирования программных сигналов для всех степеней подвижности МР, которые позволяют сохранить требуемую динамическую точность управления с учетом конструктивных ограничений во всех степенях подвижности МР и возможных появлений особых расположений их звеньев в пространстве.

5. Предложены и запатентованы конкретные технические решения, а также зарегистрированы программы для ЭВМ, используемые при реализации реальных

технологических процессов с использованием синтезированных СУ. Практическая реализация, настройка и эксплуатация всех предложенных решений не вызывает принципиальных затруднений.

6. Результаты проведенного математического моделирования и экспериментальных исследований подтвердили высокую эффективность и качество работы синтезированных СУ МР, созданных на основе предложенных в диссертации методов.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. С использованием полученных в диссертационной работе результатов возможно создание современных высокопроизводительных робототехнических комплексов, которые обеспечат точное движение РИ МР по сложным пространственным траекториям в процессе выполнения ТО. При этом можно определить основные направления развития и улучшения представленных методов синтеза СУ МР.

Первое направление связано с расширением области применения метода синтеза СУ, обеспечивающих автоматическое формирование предельно высоких скоростей движения РИ МР. Это позволит использовать предлагаемый подход для управления МР, которые приводятся в движение не только двигателями постоянного тока, что рассмотрено во второй и третьей главах, но и широко применяемыми сейчас синхронными двигателями.

Второе направление связано с дальнейшей разработкой подхода к синтезу систем формирования программных сигналов для всех степеней подвижности кинематически избыточных МР. Это позволит создавать СУ для МР, установленных на подвижные основания или работающих в составе робототехнических комплексов со специальными устройствами-позиционерами, обеспечивающими движение по более чем одной избыточной степени подвижности.

Список литературы

1. Абуфанас А.С., Лобатый А.А., Яцына Ю.Ф. Аналитический синтез форсированного импульсного управления электроприводом системы слежения // Системный анализ и прикладная информатика. – 2017. – №4. – С. 16-20.
2. Барандыч В.Ю. Разработка оптимальной по быстродействию диаграммы для средних перемещений исполнительного органа электропривода с инерционным преобразователем и упругим валопроводом // Научный журнал КубГАУ. – 2012. – Т. 7. – № 81. – С. 1-18.
3. Борисов О.И., Громов В.С., Пыркин А.А. Методы управления робототехническими приложениями: учебное пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 108 с.
4. Воротников С.А. Информационные устройства робототехнических систем. – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2005. – 384 с.
5. Вукобратович М., Стокич Д. Управление манипуляционными роботами. Теория и приложения. – М.: Наука, 1985. – 384 с.
6. Галемов Р.Т., Масальский Г.Б. Комбинированный поисковой метод решения обратной задачи кинематики многозвенного манипулятора // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – Т. 19. – № 7. – С. 464-473.
7. Горностаев И.В. Синтез системы формирования скорости движения подводных аппаратов по пространственным траекториям // Материалы всероссийской конференции «Технические проблемы освоения мирового океана». Владивосток, Россия. – 2017. – С. 336-340.
8. Горностаев И.В. Формирование законов перемещения мехатронных объектов с желаемой скоростью по траекториям, заданным параметрическими B-сплайнами // Международная научно-техническая Интернет-конференция молодых ученых «Автоматизация, мехатроника, информационные технологии». Омск, Россия. – 2017. – С. 79-83.
9. Горностаев И.В., Губанков А.С. Разработка метода формирования законов перемещения мехатронных объектов с желаемой скоростью по гладким

пространственным траекториям // Материалы III всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Интеллектуальные системы, управление и мехатроника». Севастополь, Россия. – 2017. – С. 83-86.

10. Губанков А.С., Горностаев И.В. Разработка метода синтеза систем формирования скорости динамических объектов // Материалы VII всероссийской научно-технической конференции «Робототехника и искусственный интеллект». Железногорск, Россия. – 2015. – С. 13-18.

11. Губанков А.С., Горностаев И.В. Разработка метода формирования программной скорости движения рабочего инструмента многостепенного манипулятора // Материалы IX Международной научно-технической интернет-конференции молодых ученых «Автоматизация, мехатроника, информационные технологии». Омск, Россия. – 2019. – С. 73-77.

12. Дема Н.Ю., Колюбин С.А., Овчаров А.О. Исследование методов решения обратной задачи кинематики для манипуляторов избыточной кинематики // Альманах научных работ молодых ученых XLVII научной и учебно-методической конференции Университета ИТМО. – 2018. – Т. 1. – С. 211-213.

13. Ерашов А.А., Блинов Д.В., Савельев А.И. Анализ методов решения обратной задачи кинематики модульных реконфигурируемых систем // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2021. – Т. 9. – № 4. – С. 1-20.

14. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами: Учеб. для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 400 с.

15. Киясов С.Н., Шурыгин В.В. Дифференциальные уравнения. Основы теории, методы решения задач: Учебное пособие. – Казань: Казанский федеральный университет, 2011. – С. 52-57.

16. Колтыгин Д.С., Седельников И.А., Петухов Н.В. Аналитический и численные методы решения обратной задачи кинематики для робота Delta //

Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 5. – С. 87-95.

17. Коренченков А. А. Синтез алгоритма оптимального по быстродействию траекторного управления манипуляционными роботами // Известия КБНЦ РАН. – 2011. – Т. 39. – № 1. – С. 142-147.

18. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – Изд. “Наука”, 1973. – 832 с.

19. Костенко В.В., Павин А.М. Автоматическое позиционирование необитаемого подводного аппарата над объектами морского дна с использованием фотоизображений // Подводные исследования и робототехника. – 2014. – Т. 17. – № 1. – С. 39-47.

20. Крейг Д.Дж. Введение в робототехнику: механика и управление. – М.: Ижевск.: Институт компьютерных исследований, 2013. – 564 с.

21. Нанягеев И.Р., Шардыко И.В. Алгоритмы задания движения платформы и манипуляторов напланетного мобильного робота // Сборник трудов XXXI международной инновационной конференции молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения. – 2020. – С. 497-501.

22. Нильсон Н. Искусственный интеллект. Методы поиска решений. – М.: Мир, 1973. – С. 132-134.

23. Олейник М.А., Хаймович А.И., Балякин А.В., Щедрин Е.Ю. Математическая модель кинематики промышленного робота, оснащенного двухосевым позиционером // Вестник УГАТУ. – 2021. – Т. 25. – № 1. – С. 77-84.

24. Патент РФ № 2348509. Электропривод робота / Филаретов В. Ф., Бюл. № 7, 2009.

25. Патент РФ № 2372185. Самонастраивающийся электропривод манипуляционного робота / Филаретов В. Ф., Бюл. № 31, 2009.

26. Патент РФ № 2372186. Самонастраивающийся электропривод манипуляционного робота / Филаретов В. Ф., Бюл. № 31, 2009.

27. Патент РФ № 2372638. Самонастраивающийся электропривод манипуляционного робота / Филаретов В. Ф., Бюл. № 31, 2009.

28. Патент РФ № 2577204. Самонастраивающийся электропривод манипулятора / Филаретов В.Ф., Горностаев И.В. Бюл. № 7, 2016.

29. Патент РФ № 2626437. Устройство формирования программных сигналов управления / Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В. Бюл. № 21, 2017.

30. Патент РФ № 2722556. Способ перемещения конвейером объектов / Филаретов В.Ф., Горностаев И.В. Бюл. № 16, 2020.

31. Патент РФ № 2731741. Устройство формирования программных сигналов управления / Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В. Бюл. № 25, 2020.

32. Патент РФ № 2771456. Способ управления рабочим органом многостепенного манипулятора / Филаретов В.Ф., Горностаев И.В. Бюл. № 13, 2022.

33. Понтрягин Л.С. Принцип максимума в оптимальном управлении. – Изд. 2-е, стереотипное. М.: Едиториал УРСС, 2004. – 64 с.

34. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. – М.: Наука, 1978. – 250 с.

35. Попов Е.П., Верещагин А.Ф., Зенкевич С.Л. Манипуляционные роботы: динамика и алгоритмы. – М.: Наука, 1978. – 400 с.

36. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. – М.: Мир, 2001. – 604 с.

37. Ростов Н.В. Анализ алгоритмов решения обратных задач кинематики в системах управления движением роботов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2014. – Т. 205. – № 5. – С. 93-99.

38. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2016661915 от 25.10.2016. Программа для адаптивного управления электроприводом многозвенного манипулятора / Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Губанков А.С., Горностаев И.В.

39. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2016661919 от 26.10.2016. Программа для адаптивного управления электроприводом манипулятора / Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Губанков А.С., Горностаев И.В.

40. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2016661920 от 26.10.2016. Программа для адаптивного управления электроприводом многостепенного манипулятора / Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Губанков А.С., Горностаев И.В.

41. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2016663179 от 29.10.2016. Программа для адаптивного управления электроприводом многостепенного манипулятора / Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Губанков А.С., Горностаев И.В.

42. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2016663383 от 06.12.2016. Программа формирования максимальной скорости перемещения рабочего инструмента многостепенного манипулятора / Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В.

43. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2017611291 от 01.02.2017. Программа «FOREZH» для формирования режимов движения рабочих инструментов промышленных роботов / Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В.

44. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2017613664 от 24.03.2017. Программа «SADUP» для обеспечения заданной динамической точности движения рабочего инструмента промышленного робота / Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В.

45. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2018615856 от 17.05.2018. Программный модуль для формирования законов перемещения мехатронных объектов с желаемой скоростью по гладким пространственным траекториям / Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В.

46. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019619439 от 17.07.2019. Модуль формирования программных значений обобщенных координат для манипулятора / Губанков А.С., Горностаев И.В.

47. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020666739 от 16.12.2020. Программный модуль для формирования желаемых перемещений мехатронных объектов с требуемыми скоростью и пространственной ориентацией по траекториям, заданным В-сплайнами / Губанков А.С., Горностаев И.В.

48. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020667068 от 21.12.2020. Программный модуль для формирования желаемых перемещений мехатронных объектов с требуемыми скоростью и пространственной ориентацией по траекториям, заданным сплайнами Безье / Губанков А.С., Горностаев И.В.

49. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020667323 от 22.12.2020. Программный модуль для формирования желаемых перемещений мехатронных объектов с требуемой скоростью по траекториям, заданным В-сплайнами / Губанков А.С., Горностаев И.В.

50. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021619276 от 08.06.2021. Программа для формирования требуемой скорости движения рабочего инструмента многостепенного манипулятора / Филаретов В.Ф., Горностаев И.В., Губанков А.С.

51. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021619536 от 10.06.2021. Программа для формирования обобщенных координат для шестистепенного манипулятора / Филаретов В.Ф., Горностаев И.В., Губанков А.С.

52. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021619543 от 11.06.2021. Программа для управления робототехническим комплексом / Филаретов В.Ф., Горностаев И.В.

53. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021619739 от 16.06.2021. Программа для формирования обобщенных координат для избыточного семистепенного манипулятора / Филаретов В.Ф., Горностаев И.В., Губанков А.С.

54. Смирнов П.А., Яковлев Р.Н. Решение прямой и обратной задач кинематики в системе позиционирования звеньев манипулятора // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20. – № 12. – 732-739.

55. Филаретов В.Ф. Самонастраиваемые системы управления приводами манипуляторов. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2000. – 304 с.

56. Филаретов В.Ф., Алексеев Ю.К., Лебедев А.В. Системы управления подводными роботами // Под ред. В.Ф. Филаретова. – М.: Круглый год, 2001. – 288 с.

57. Филаретов В.Ф., Горностаев И.В. Метод высокоскоростного управления движением одностепенного манипулятора // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2019. – №4. – С. 62–68.

58. Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Синтез адаптивных систем управления, настраиваемых по амплитудным частотным характеристикам объектов с переменными параметрами // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 1. – С. 15-21.

59. Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Синтез системы формирования программных сигналов для электроприводов многозвенных манипуляторов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 5. – С. 30-34.

60. Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Система формирования предельно высокой скорости движения рабочего органа многостепенного манипулятора по произвольной траектории // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2013. – Т. 11. – № 4. – С. 19–25.

61. Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В. Метод формирования программной скорости движения рабочего инструмента многостепенного манипулятора // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – Т. 21. – № 12. – С. 696–705.

62. Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В. Особенности управления многозвенными манипуляторами при обработке крупногабаритных изделий // Материалы международной конференции «Современные технологии и развитие политехнического образования». Владивосток, Россия. – 2016. – С. 689-693.

63. Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В. Особенности формирования программных сигналов для исполнительных электроприводов

промышленных роботов с избыточными степенями подвижности // Материалы VIII международной научно-технической интернет-конференции молодых ученых «Автоматизация, мехатроника, информационные технологии». Омск, Россия. – 2018. – С. 114-118.

64. Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В. Разработка метода формирования программных сигналов для всех степеней подвижности многозвенных подводных манипуляторов // Материалы всероссийской конференции «Робототехника и искусственный интеллект». Железногорск, Россия. – 2017. – С. 26-31.

65. Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В. Разработка метода формирования программных сигналов для исполнительных электроприводов манипуляторов с избыточными степенями подвижности. Часть I // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022. – Т. 23. – № 1. – С. 23-30.

66. Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В. Разработка метода формирования программных сигналов для исполнительных электроприводов манипуляторов с избыточными степенями подвижности. Часть II. // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022. – Т. 23. – № 2. – С. 88–96.

67. Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В., Коноплин А.Ю. Разработка метода формирования программных сигналов управления манипуляторами, установленными на подводных аппаратах // Подводные исследования и робототехника. – 2018. – Т. 25. – №1. – С. 30-37.

68. Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Губанков А.С. Управление манипуляторами при выполнении различных технологических операций. – М.: Наука, 2018. – 232 с.

69. Филаретов В.Ф., Коноплин А. Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 6. – С. 53-56.

70. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном

манипуляторе. Часть 2 // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – №7. – С. 29-34.

71. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. Система для автоматического выполнения манипуляционных операций с помощью подводного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – № 8. – С. 543-549.

72. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Коноплин А.Ю. Метод синтеза системы автоматического управления режимом движения схвата манипулятора по сложным пространственным траекториям // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 6. – С. 47-54.

73. Фу. К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. – М.: Мир, 1989. – 624 с.

74. Шомло Я., Подураев Ю.В., Луканин В.С., Соколов А.Г. Автоматическое планирование и управление контурными движениями манипуляционных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2001. – № 3. – С. 28-33.

75. Юревич Е.И. Основы робототехники. – Пб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.

76. Ярославский Л.П. Введение в цифровую обработку изображений. – М.: Сов. радио, 1979. – 312 с.

77. Almusawi A.R.J., Dulger L.C., Kapucu S. A new artificial neural network approach in solving inverse kinematics of robotic arm (denso vp6242) // Computational intelligence and neuroscience. – 2016. – Vol. 2016. – P. 1-10.

78. Angeles J. Fundamentals of robotic mechanical systems: theory, methods, and algorithms. – Springer, 2007. – 544 p.

79. Ansari Y., Falotico E., Mollard Y., Busch B., Cianchetti M., Laschi C. A multiagent reinforcement learning approach for inverse kinematics of high dimensional manipulators with precision positioning // 6th IEEE Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechatronics. – 2016. – P. 457-463.

80. Aristidou A., Lasenby J. FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem // Graphical Models. – 2011. – Vol. 73. – № 5. – P. 243-260.

81. Besset P., Bearee R. FIR filter-based online jerk-constrained trajectory generation // Control Engineering Practice, Elsevier. – 2017. – Vol. 66. – P.169-180.

82. Blinov D., Saveliev A., Shabanova A. Deep Q-Learning Algorithm for Solving Inverse Kinematics of Four-Link Manipulator // Proc. of 15th Int. Conf. on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". Springer, Singapore. – 2021. – P. 279-291.

83. Bobrow J.E., Dubowsky S., Gibson J.S. Time-optimal control of robotic manipulators along specified paths // The Int. Journal of Robotics Research. – 1985. – Vol. 4. – № 3. – P. 3-17.

84. Buss S.R. Introduction to Inverse Kinematics with Jacobian Transpose, Pseudoinverse and Damped Least Squares methods // IEEE Journal of Robotics and Automation. – 2004. – Vol. 17. – № 1. – P. 1-19.

85. Consolini L., Locatelli M., Minari A., Nagy A., Vajk I. Optimal Time-Complexity Speed Planning for Robot Manipulators // IEEE Transactions on robotics. – 2019. – Vol. 35. – № 3. – P. 790-797.

86. Crenganis M., Bologa O. Efficient method for redundancy resolution of a 7 DoF manipulator // Supliment 1 Buletinul AGIR. – 2015. – P. 222-229.

87. Duka A.V. Neural network based inverse kinematics solution for trajectory tracking of a robotic arm // Procedia Technology. – 2014. – Vol. 12. – P. 20-27.

88. El-Sherbiny A., Elhosseini M.A., Haikal A.Y. A comparative study of soft computing methods to solve inverse kinematics problem // Ain Shams Engineering Journal. – 2018. – Vol. 9. – № 4. – P. 2535-2548.

89. Espinoza M.S., Goncalves J., Leitao P., Sanchez J.L.G., Herreros A. Inverse Kinematics of a 10 DOF modular hyper-redundant robot resorting to exhaustive and error-optimization methods: A comparative study // Brazilian Robotics Symp. and Latin American Robotics Symp. – 2012. – P. 125-130.

90. Filaretov V., Gornostaev I. Method of High Speed Control of Movement of the 1 DoF Manipulator // Proc. of the Int. multi-conference on industrial engineering and modern technologies. – 2019. – P. 1-5.

91. Filaretov V.F., Gubankov A.S. Adaptive system forming extremely high speed of multilink manipulator gripper // Proc. of 23rd DAAAM Int. Symp. on

Intelligent Manufacturing and Automation. Zadar, Croatia. – 2012. – Vol. 1. – P. 473-476.

92. Filaretov V., Gubankov A. Synthesis of adaptive control system for formation of program speed of multilink manipulator // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 132. – P. 347-350.

93. Filaretov V., Gubankov A., Gornostaev I. Method of Formation of Reference Control Signals for Redundant Manipulators // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2096. – № 012110. – P. 1-6.

94. Filaretov V., Gubankov A., Gornostaev I. Method of Formation of Reference Movement Speed of Working Tool of Multilink Manipulator // Proc. of the 5th Int. Conf. on Interactive Collaborative Robotics, St. Petersburg, Russia. – 2020. – P. 89-98.

95. Filaretov V.F., Gubankov A.S., Gornostaev I.V. The formation of motion laws for mechatronics objects along the paths with the desired speed // Proc. of Int. Conf. on Computer, Control, Informatics and Its Applications. Jakarta, Indonesia. – 2016. – P. 93-96.

96. Filaretov V.F., Gubankov A.S., Gornostaev I.V. The formation of motion laws for underwater vehicles along the trajectories with the desired speed // Proc. of the 29th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. Vladivostok, Russia. – 2015. – P. 431-434.

97. Filaretov V., Gubankov A., Gornostaev I., Konoplin Yu. Synthesis Method of Reference Control Signals for Manipulators Installed on Autonomous Underwater Vehicles // Proc. of the Int. Russian Automation Conf. – 2019. – P. 1-6.

98. Filaretov V.F., Yukhimets D.A., Konoplin A.Yu. Synthesis of system for automatic formation of multilink manipulator velocity // Proc. of the 2nd RSI/ISM Int. Conf. on Robotics and Mechatronics. Tehran, Iran. – 2014. – P. 785-790.

99. Gornostaev I.V., Filaretov V.F., Gubankov A.S. Development and experimental research of adaptive control system for robotic complex. // Proc. of 15th Int. Conf. on Control, Automation and Systems. Busan, Korea. – 2015. – P. 126-131.

100. Gubankov A.S., Gornostaev I.V. Developing of speed control laws for mechatronic objects // Int. scientific conf. «Modern technologies and the development of polytechnic education». Vladivostok, Russia. – 2015. – P. 330-334.

101. Gubankov A., Gornostaev I. Development of method of forming signals for the actuators of manipulators with redundant degrees of mobility // Proc. of Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, St. Petersburg, Russia. – 2017. – P. 1-4.

102. Guo J., Xu Y., Huang C., Zhu X., Shao Ch. An Analytical Solution to Inverse Kinematics of Seven Degree-of-freedom Redundant Manipulator // 9th Joint Int. Information Technology and Artificial Intelligence Conf. – 2020. – P. 2040-2050.

103. Gupta A., Bhargava P., Agrawal S., Deshmukh A., Kadam B. Comparative Study of Different Approaches to Inverse Kinematics // Int. Conf. on Advances in Computing and Data Sciences. Springer, Singapore. – 2018. – P. 556-563.

104. Haschke R., Weitnauer E., Ritter H. On-Line planning of time-optimal, jerk-limited trajectories // IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. – 2008. – P. 3248-3253.

105. Hung D.M., Linh D.T., Ba D.X. An Intelligent Control Method for Redundant Robotic Manipulators with Output Constraints // Int. Conf. on System Science and Engineering. – 2021. – P. 116-121.

106. Iakovlev R., Denisov A., Prakupovich R. Iterative method for solving the inverse kinematics problem of multi-link robotic systems with rotational joints // Proc. of 14th Int. Conf. on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings”. Springer, Singapore. – 2020. – P. 237-251.

107. Ivlev O., Greser A. An Analytical Method for the Inverse Kinematics of Redundant Robots // Proc. of 3rd ECPD Int. Conf. on Advanced Robots, Intelligent Automation and Active Systems. – 1997. – P. 416-421.

108. Jin M., Liu Q., Wang B., Liu H. An Efficient and Accurate Inverse Kinematics for 7-DOF Redundant Manipulators Based on a Hybrid of Analytical and Numerical Method // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 16316-16330.

109. Kim J., Jie W., Kim H., Lee M.C. Modified Configuration Control With Potential Field for Inverse Kinematic Solution of Redundant Manipulator // IEEE/ASME Transactions on mechatronics. – 2021. – Vol. 26. – №. 4. – P. 1782-1790.

110. Koker R. A genetic algorithm approach to a neural-network-based inverse kinematics solution of robotic manipulators based on error minimization // Information Sciences. – 2012. – Vol. 222. P. 528-543.

111. Koker R. A neuro-simulated annealing approach to the inverse kinematics solution of redundant robotic manipulators // Engineering with Computers. – 2013. – P. 507-515.

112. Kucuk S., Bingul Z. Inverse kinematics solutions for industrial robot manipulators with offset wrists // Applied Mathematical Modelling. – 2014. – Vol. 38. – № 7-8. – P. 1983-1999.

113. Kumar V., Sen S., Roy S.S., Das S.K., Shome S.N. Inverse kinematics of redundant manipulator using interval newton method // Int. Journal of Engineering and Manufacturing. – 2015. – Vol. 5. – № 2. – P. 19-29.

114. Li P., Qiu Q. The kinematics algorithm of a Ship Gun large-load redundant magazine robot // Int. Conf. on Information Science, Computer Technology and Transportation. – 2020. – P. 331-335.

115. Luo F.-Y., Zhou Y.-F., Yin J.A universal velocity profile generation approach for high-speed machining of small line segments with look-ahead // The Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2007. – Vol. 35. – № 5-6. – P. 505-518.

116. Mansard N. Numerical Methods for Robotics. – LAAS-CNRS Geppetto Team, 2015. – 103 p.

117. Mikhel S. State-based velocity profile for manipulator // Proc. of 3rd School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics. – 2019. – P. 125-126.

118. Momani S., Abo-Hammour Z.S., Alsmadi O.M.K. Solution of inverse kinematics problem using genetic algorithms // Applied Mathematics & Information Sciences. – 2016. – Vol. 10. – № 1. – P. 225-233.

119. Mu Z., Yuan H., Xu W., Liu T., Liang B. A Segmented Geometry Method for Kinematics and Configuration Planning of Spatial Hyper-Redundant Manipulators // IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics: systems. – 2020. – Vol. 50. – № 5. – P. 1746-1756.
120. Munro N., Lewis F. Robot manipulator control: theory and practice. – Marcel Dekker, Inc: New York, 2005. – 614 p.
121. Nagy A., Vajk I. LP-based Velocity Profile Generation for Robotic Manipulators // Int. Journal of Control. – 2018. – Vol. 91. – № 3. – P. 582-592.
122. Nakamura Y., Hanafusa H. Inverse kinematics solutions with singularity robustness for robot manipulator control // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 1986. – Vol. 108. – P. 163-171.
123. Oyama E., Chong N.Y., Agah A., Maeda T. Inverse Kinematics Learning by Modular Architecture Neural Networks with Performance Prediction Networks // Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation. – 2001. – Vol. 1. – P. 1006-1012.
124. Park J. Motion profile planning of repetitive point-to-point control for maximum energy conversion efficiency under acceleration conditions // Mechatronics. – 1996. – Vol. 6. – № 6. – P. 649-663.
125. Phaniteja S., Dewangan P., Guhan P., Sarkar A., Krishna K.M. A deep reinforcement learning approach for dynamically stable inverse kinematics of humanoid robots // IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics. – 2017. – P. 1818-1823.
126. Pieper D.L. The kinematics of manipulators under computer control. – University Microfilms, 1980. – 314 p.
127. Ren H., Ben-Tzvi P. Learning inverse kinematics and dynamics of a robotic manipulator using generative adversarial networks // Robotics and Autonomous Systems. – 2020. – Vol. 124. – P. 1-23.
128. Rew K.-H., Ha C.-W., Kim K.-S. A practically efficient method for motion control based on asymmetric velocity profile // Int. Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2009. – Vol. 49. – № 7-8. – P. 678-682.

129. Rizzini D.L., Kallasi F., Aleotti J., Oleari F., Caselli S. Integration of a stereo vision system into an autonomous underwater vehicle for pipe manipulation tasks // *Computers & Electrical Engineering*. – 2017. – Vol. 58. – P. 560-571.
130. Rojas R. *Neural networks: a systematic introduction*. – Springer-Verlag, 1996. – 502 p.
131. Shen P., Zhang X., Fang Y. Real-time acceleration-continuous path-constrained trajectory planning with built-in tradability between cruise and time-optimal motions // *ArXiv*. – 2018. – P. 1-12.
132. Siciliano B. Kinematic Control of Redundant Robot Manipulators: A Tutorial // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. – 1990. – Vol. 3. – № 3. – P. 201-212.
133. Siciliano B., Khatib O. *Handbooks of robotics*. – Springer, 2008. – 1628 p.
134. Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. *Robotics: modelling, planning and control*. – Springer Science & Business Media, 2010. – 632 p.
135. Soon Y.J., Yun J.Ch., PooGyeon P., Seung G.Ch. Jerk limited velocity profile generation for high speed industrial robot trajectories // *IFAC Proc. Volumes*. – 2005. – Vol. 38. – № 1. – P. 595-600.
136. Starke S.A. *Hybrid Genetic Swarm Algorithm for Interactive Inverse Kinematics*. – Diss. Universität Hamburg, Fachbereich Informatik, 2016. – 114 p.
137. Valente A., Baraldo S., Carpanzano E. Smooth trajectory generation for industrial robots performing high precision assembly processes // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 66. – P. 17-20.
138. Wampler C.W. Manipulator inverse kinematic solutions based on vector formulations and damped least squares methods // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. – 1986. – Vol. 16. – P. 93-101.
139. Wang J., Li Y., Zhao X. Inverse Kinematics and Control of a 7-DOF Redundant Manipulator Based on the Closed-Loop Algorithm // *Int. Journal of Advanced Robotic Systems*. – 2010. – Vol. 7. – № 4. – P. 1-10.
140. Whitney D.E. Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses // *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*. – 1969. – P. 47-53.

141. Yahya S., Moghavvemi M., Mohamed H.A.F. Redundant manipulators kinematics inversion // Scientific Research and Essays. – 2011. – Vol. 6. – № 26. – P. 5462-5470.

142. Yoshikawa T. Foundations of robotics. – MIT Press, Cambridge, Mass, 1990. – 285 p.

143. Yu Z., Han C., Haihua M. A novel approach of tuning trapezoidal velocity profile for energy saving in servomotor systems // IEEE 34th Chinese Control Conf. – 2015. – P. 4412-4417.

144. Zefran M. Review of the Literature on Time-Optimal Control of Robotic Manipulators. – Technical Reports (CIS). University of Pennsylvania, Philadelphia. – 1994. – 28 p.

145. Zhou S., Liu H., Jiang C., Du H., Gan Y., Chu Zh. Research on Kinematics Solution of 7-axis Redundant Robot Based on Self-motion // Chinese Automation Congress. – 2020. – P. 2622-2627.

Приложение А**Акт внедрения ПАО «Дальприбор»**

«Утверждаю»
Генеральный директор
ПАО «Дальприбор»

Р.В. Титков
2022 г.


использования результатов
диссертационной работы И.В. Горностаева
«Разработка методов синтеза систем высокоскоростного управления
манипуляционными роботами с учетом особенностей их конструкций»

Настоящий акт составлен о том, что научные результаты, полученные в диссертационной работе И.В. Горностаева, планируется использовать в ПАО «Дальприбор» при управлении промышленным роботом «Kuka» при выполнении некоторых механических операций по обработке деталей. В частности, в ходе будущего расширения и модернизации производства появится возможность использовать созданную систему формирования программных сигналов для всех степеней подвижности кинематически избыточных манипуляционных роботов.

Результаты предварительных экспериментов показали, что использование этой системы позволяет значительно увеличить качество выполняемых операций за счет исключения аварийных остановок промышленного робота при его входе в ряд нежелательных положений, одновременно расширяя его рабочую область.

Заместитель главного инженера
по ТПП ПАО «Дальприбор»


Д.В. Жуков

Приложение Б

Акт внедрения ФГАОУ ВО ДВФУ

УТВЕРЖДАЮ
 Проректор по научной работе
 Дальневосточного федерального
 университета


 А.С. Самарзак
 « 8 » августа 2022 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы «Разработка методов синтеза систем высокоскоростного управления манипуляционными роботами с учетом особенностей их конструкций» ассистента департамента автоматике и робототехники института Мирового океана Горностаева Игоря Вячеславовича в научную работу и учебный процесс департамента автоматике и робототехники Дальневосточного федерального университета (направление подготовки бакалавров 15.03.06 – Мехатроника и робототехника)



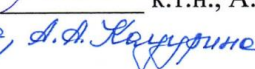
Комиссия в составе председателя, профессора департамента автоматике и робототехники, д.т.н., профессора А.Н. Жирабок и членов: доцента департамента автоматике и робототехники, д.т.н. Д.А. Юхимца и доцента департамента автоматике и робототехники, к.т.н. А.А. Кацурина составила настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы ассистента департамента автоматике и робототехники И.В. Горностаева на тему «Разработка методов синтеза систем высокоскоростного управления манипуляционными роботами с учетом особенностей их конструкций» внедрены в научную работу и учебный процесс департамента автоматике и робототехники Дальневосточного федерального университета, а именно:

1. Система высокоскоростного управления электроприводами манипуляционных роботов в режиме позиционного управления.
2. Система формирования гладких пространственных траекторий движения рабочих инструментов манипуляционных роботов с использованием математического аппарата параметрических сплайнов.
3. Система формирования предельно высоких программных скоростей движения рабочих инструментов манипуляционных роботов по пространственным траекториям с учетом ограничений сигналов управления.
4. Система формирования программных сигналов для всех степеней подвижности кинематически избыточных манипуляционных роботов.

Председатель комиссии:  д.т.н., профессор А.Н. Жирабок

Члены комиссии:  д.т.н., Д.А. Юхимец

 к.т.н., А.А. Кацурина

Подпись   
 удостоверяю. Начальник отдела
 кадрового производства
 ДВФУ 
 « 8 » августа 2022 г. 