

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова»

С. О. Никифоров

БЕЗРЕВЕРСНЫЕ МЕХАТРОННЫЕ МАНИПУЛЯТОРЫ

Монография

Ответственный редактор
доктор технических наук, профессор В. В. Бороноев

Улан-Удэ
Издательство Бурятского государственного университета имени Доржи Банзарова
2026

УДК 621.396.65.011.56.7.042
ББК 32.816.30.18
Н 627

Утверждено к печати
редакционно-издательским советом
Бурятского государственного университета
Протокол № 7 от 14 ноября 2025 г.

Рецензенты

А. Д. Мижидон, доктор технических наук, профессор
кафедры «Математика» им. Ц. Б. Шойнжунова,
Восточно-Сибирский государственный университет
технологий и управления

Н. К. Кузнецов, доктор технических наук, профессор,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет

Е. Р. Урмакшинова, кандидат технических наук, доцент,
Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова

Никифоров С. О.

Н 627 **Безреверсные мехатронные манипуляторы:** монография / ответственный редактор В. В. Бороноев. — Улан-Удэ: Издательство Бурятского государственного университета им. Д. Банзарова, 2026. — 118 с.
ISBN 978-5-9793-2106-6
DOI 10.18101/978-5-9793-2106-6-2026-1-118

В монографии рассмотрены актуальные вопросы создания и эксплуатации безреверсных мехатронных манипуляторов, а также проблемы их разработки и применения, реализации компоновочных структур, механики и управления, даны принципы и способы построения управляющих устройств.

В монографии отражена методология формирования безреверсных мехатронных манипуляторов повышенного быстродействия. Результаты исследований могут быть полезны специалистам в области робототехники, мехатроники, а также студентам и аспирантам соответствующего профиля.

Nikiforov S. O.

Non-Reversible Mechatronic Manipulators: a monograph / Editor-in-Chief V. V. Boronoev. Ulan-Ude: Dorzhi Banzarov Buryat State University Publishing Department, 2026. 118 p. ISBN 978-5-9793-2106-6

The monograph is devoted to current issues of creating and operating non-reversible mechatronic manipulators. It considers the development and application of these manipulators, their layout, mechanics, and control, the principles and methods for constructing control devices.

The book presents a methodology for developing non-reversible mechatronic manipulators with increased performance. The research findings may be useful to specialists in Robotics and Mechatronics, as well as to undergraduate and graduate students in the relevant fields.

УДК 621.396.65.011.56.7.042
ББК 32.816.30.18

ISBN 978-5-9793-2106-6

© Бурятский госуниверситет
им. Д. Банзарова, 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Глава 1 Общие сведения о манипуляционных системах и особенности безреверсных мехатронных манипуляторов	
1.1 Основные понятия и определения в робототехнике и мехатронике	7
1.2 Способы реализации устройств для перемещения объектов	14
1.3 Механизмы манипуляторов с двигателями, работающими без реверсирования	16
1.4 Особенности реализации быстродействующих мехатронных безреверсных манипуляторов	19
1.5 Безреверсные мехатронные манипуляторы. Топологический расчет	39
Глава 2 Управление безреверсными манипуляторами	
2.1 Классификация безреверсных манипуляторов	45
2.2 Особенности модульного формирования движений мехатронных манипуляторов. Алгоритм структурного проектирования	50
2.3 Задача управления с программной перенастройкой	58
2.4 Описание работы электроприводов	62
2.5 Алгоритм структурного проектирования безреверсных манипуляторов	65
2.6 Блочно-модульный способ построения системы управления	66
2.6.1 Блок синхронизации	66
2.6.2 Блок коррекции	67
2.7 Операционные системы реального времени безреверсных манипуляторов	69

Глава 3	Анализ и синтез импульсных режимов программных движений шарнирных манипуляторов	75
3.1	Импульсные режимы управления движением шарнирного многозвенника	79
3.2	Оптимизация разгонно-тормозных импульсов для плоского двухзвенника	84
3.3	Импульсные режимы двухшарнирного манипулятора	89
	Заключение	110
	Литература	115



ПРЕДИСЛОВИЕ

Общепризнано, что механизация и автоматизация производственных процессов являются наиболее эффективным средством повышения производительности, снижения себестоимости продукции и обеспечения стабильности качества. Механизация и автоматизация должны осуществляться комплексно, они должны применяться ко всем остальным операциям и технологическим переходам, только в этих случаях может быть достигнута высокая эффективность. При массовом и крупносерийном производстве высокий уровень автоматизации достигается в автоматических линиях, которые обычно строятся на основе узкоспециализированного оборудования, например, при механообработке применяются станки-автоматы со встроенными автооператорами, а передача заготовок от станка к станку осуществляется с помощью лотков и транспортеров. При мелкосерийном многономенклатурном производстве требуется быстрая переналадка оборудования, такое оборудование должно иметь более или менее широкую специализацию. Предпочтение отдается такому оборудованию, для которого переналадка сводится к перепрограммированию, именно на таком оборудовании строятся современные гибкие автоматизированные (или автоматические) системы.

В состав многих автоматизированных производственных систем входят промышленные роботы (ПР). По назначению ПР делятся на технологические и вспомогательные (обслуживающие). Технологические ПР выполняют основные технологические операции: сборка, сварка, резка, обработка поверхностей, нанесение покрытий и т. д. По существу технологические ПР представляют собой автоматические технологические установки, необязательно сходные с типовыми ПР схемными и конструктивными особенностями. Вспомогательные ПР обычно выполняют функции загрузки и разгрузки основного технологического оборудования (станков, прессов, нагревательных печей и т. п.), часто они имеют много общего с автооператорами, которые, однако, не являются переналаживаемыми.

Требования к технологическим и вспомогательным ПР часто существенно различаются. Для технических ПР типичным является требование точного выполнения запрограммированных движений,



причем эти рабочие движения являются достаточно медленными или, по крайней мере, не слишком быстрыми. Для вспомогательных ПР обычно требуется точный выход в две или несколько точек, к траекториям перехода из точки в точку требования не предъявляются. Однако при обслуживании быстродействующего технологического оборудования необходимо обеспечивать достаточно малые значения времени переноса объектов.

Чаще всего технологические и вспомогательные ПР строятся на основе одних и тех же принципов, манипуляторы представляют собой незамкнутые кинематические цепи, перемещение по каждой степени подвижности задается самостоятельным приводом. Однако при высоких требованиях к быстродействию выполнение возвратно-поступательных движений по степеням подвижности требует установки мощных двигателей, что в свою очередь приводит к утяжелению манипуляторов.

В таких условиях значительные преимущества имеют такие механизмы, которые позволяют получать возвратно-поступательные движения выходных звеньев при отсутствии реверсирования двигателей, в частности, при вращении их выходных валов с постоянными угловыми скоростями. К их числу относятся механизмы циклоидальных манипуляторов (безреверсные мехатронные манипуляторы (БММ)).

Значительные преимущества БММ определяют их перспективность при обслуживании технологического оборудования, при использовании других разного рода специфических разновидностей обслуживания.

Вопросы механики и управления БММ подробно систематически и достаточно полно впервые рассмотрены в этих монографиях и многочисленных статьях в центральных научных журналах, где впервые разработаны основы теории БММ, которые являются базовыми методами их проектирования. Сформулированы и решены задачи автоматического управления БММ, включая закрепленные патентными и программными документами.

Характер изложения материала приспособлен для специалистов по автоматизации производственных процессов, а также для студентов машиностроительного профиля.



Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАНИПУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМАХ И ОСОБЕННОСТИ БЕЗРЕВЕРСНЫХ МЕХАТРОННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

1.1 Основные понятия и определения в робототехнике и мехатронике

Известно, что слово «робот» родилось не в технике, а в художественной литературе. С шестидесятых годов прошлого века в технике роботами стали называть машины, устройства, системы, комплексы, способы работать автоматически. К роботам стали относить машины, имеющие механические руки или их более или менее близкие аналоги, предназначенные для перемещения захватывающих устройств или технологических рабочих органов. Появился термин «промышленный робот» (ПР).

Определение, приведенное в государственном стандарте (ГОСТ 25686-85), звучит следующим образом: промышленный робот — это «автоматическая машина, стационарная или передвижная, состоящая из исполнительного устройства в виде манипулятора, имеющего несколько степеней подвижности, и перепрограммируемого устройства программного управления для выполнения в производственном процессе двигательных и управляющих функций». При этом манипулятор определяется как «управляемое устройство или машина для выполнения двигательных функций, аналогичных функциям руки человека при перемещении объектов в пространстве, оснащенное рабочим органом».

В соответствии с приведенными определениями отметим основные отличительные черты промышленного робота (ПР).



Во-первых, ПР — это машина в традиционном понимании, основой которой является механизм, имеющий подвижные звенья. Из этого, в частности, следует, что вычислительная машина, какие бы функции она ни выполняла, не может считаться роботом.

Во-вторых, обязательной составной частью ПР является манипулятор, механическая рука. Этот признак выделяет ПР из ряда других автоматических машин (например, станков).

В-третьих, ПР должен функционировать автоматически, в соответствии с вводимой программой, без участия человека (человек осуществляет программирование и наладку). Следует иметь в виду, что существуют другие машины, основу которых также составляют манипуляторы. Например, распространены манипуляторы с ручным управлением; их, строго говоря, нельзя относить к ПР.

В-четвертых, механизм манипулятора ПР должен иметь не одну, а несколько степеней подвижности. В этом существенное отличие от многих других механизмов, используемых в автоматах и автоматических линиях, нередко воспроизводящих достаточно сложные движения, но имеющих одну степень свободы. Следует отметить, что иногда такие машины относят к числу ПР.

В-пятых, обязательным свойством ПР является переналаживаемость. Важно, чтобы манипулятор мог воспроизводить не одно определенное движение, а разные движения, причем для этого не должны требоваться переделки.

Переналадка может осуществляться устройствами на самом манипуляторе (например, специальными упорами). Однако в большинстве современных ПР основным средством переналадки является программирование, т. е. замена одной программы другой путем набора на клавиатуре пульта ручного управления или путем установки другого программоносителя. Автоматические машины с манипуляторами, в которых не предусматривается изменение программ, существуют и широко применяются в промышленности.



Строго говоря, они не могут считаться роботами; их обычно относят к числу автооператоров. Несмотря на то, что их манипуляторы схемно и конструктивно могут быть такими же, как у ПР.

В семидесятых годах XX в. возникла как наука мехатроника (специальность 071800). В перечне специальностей ВАК, по которым присваиваются ученые степени кандидата и доктора технических наук, мехатроника входит в специальность 05.02.05 Роботы, мехатроника и робототехнические системы.

В работе подробно обсуждена проблематика преподавания мехатроники в технических вузах. Термин «мехатроника» объединяет понятия «механизм» и «электроника», где подразумеваются механика и достижения микроэлектроники и информатики. Механика обычно относится к машинам, объектам управления, исполнительным устройствам машин.

Электроника в составе мехатроники понимается не только как схемотехника, но и как компьютерные технологии с акцентом на интерфейсные функции, функции связи входных и выходных устройств компьютеров с сенсорными системами, человеком-оператором, приводами и исполнительными устройствами [4].

Соотношение и взаимовлияние направлений «мехатроника» и «робототехника» рассмотрены в работе, где сформулирован критерий обоснования мехатроники как самостоятельного научно-технического направления.

Мехатронику часто сопоставляют с робототехникой. Последнюю с момента провозглашения мехатроники как нового научно-технического направления и до настоящего времени называют одной из показательных областей приложения мехатроники. Недавно были официально сформулированы новые научные и учебные направления и специальности, в которых объединены мехатроника и робототехника (научная специальность — 05.02.05 Роботы, мехатроника и робототехнические системы; учебное направление — 19 Мехатроника и робототехника).



Вместе с тем мехатронику и робототехнику нельзя сопоставить как самостоятельные научно-технические направления, поскольку они определены по разным квалификационным признакам.

Робототехника определена по функциональному назначению, а мехатроника по физическому составу. Действительно мехатроника и робототехника имеют много общего и довольно тесно взаимосвязаны. Многие компоненты средств робототехники — приводные и сенсорные — можно отнести к мехатронным. В свою очередь, мехатронные устройства в наиболее развитом виде реализуют, как и все робототехнические системы, замкнутую на внешнюю среду триаду «сенсорика — процессоры — активаторы». Из этого следует, что мехатроника должна иметь много общего с робототехникой в принципах построения и методах проектирования. Сюда прежде всего относятся лежащий в основе построения средств робототехники модульный принцип построения и системный подход к проектированию, основанный на общесистемных критериях без декомпозиции на автономно проектируемые компоненты.

Мехатроника как новое научно-техническое направление возникла в результате органического слияния электромеханики и микроэлектроники в виде прежде всего автоматических технических объектов и систем (рис. 1) [4].

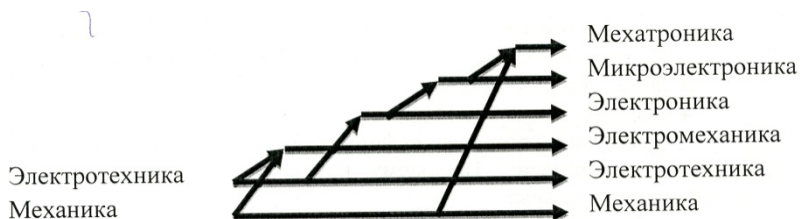


Рис. 1. Развитие междисциплинарных наук на основе механики и электротехники



Главным обоснованием мехатроники как самостоятельного научно-технического направления должно являться аналогичное наличие именно таких объектов нового типа, которые требуют системного подхода и критериев, охватывающих образующие ее науки — механику и выросшую из электротехники электронику [4].

По материалам Японской ассоциации промышленной робототехники из выделенных 23 основных направлений перспективных исследований по робототехнике в результате опроса фирм по степени важности отведены следующие места:

1. Повышение быстродействия промышленных роботов (ПР).
2. Повышение точности позиционирования.
3. Уменьшение габаритов роботов.
4. Методы управления от ЭВМ.
5. Снижение стоимости.
6. Повышение надежности и т. д.

Руководствуясь такими приоритетами и следует, очевидно, осуществлять научно-проектные изыскания новых конструктивных решений средств робототехники.

К современным ПР предъявляется комплекс жестких и во многом противоречивых требований. Например, требуется высокое быстродействие при заданной плавности движений (оптимальности инерционных нагрузок на руку ПР), высокая точность отработки программных движений, минимальные масса и габаритные размеры исполнительных механизмов. Для повышения точности при действии нагрузки приходится увеличивать жесткость звеньев и элементов соединений, что приводит к увеличению масс, однако для повышения быстродействия желательно уменьшать массы и моменты инерции подвижных частей.

Очевидно, такие же требования предъявляются к мехатронным манипуляционным системам. Проектирование и расчет манипуляционных систем (МС) всегда имеют свои особенности, обусловленные спецификой и условиями их применения. При их применении в



группе схожих технических процессов получение исходных данных и последующих расчет параметров МС упрощается, поскольку выбор траекторий и законов движения звеньев приобретают большую определенность. Процесс создания МС обычно представляет собой несколько взаимосвязанных этапов расчета, конструирования и испытаний.

Когда ставятся и решаются задачи их механики (статики, кинематики и динамики), объектом рассмотрения является манипулятор, иногда с устройством передвижения; оба они объединяются в одну механическую систему ПР, называемую исполнительным устройством. Поэтому будет правильным говорить о задачах механики механизмов манипуляторов ПР или исполнительных устройств ПР.

ПР и мехатронные МС классифицируются по ряду независимых классификационных признаков: по назначению (определяемому характером выполняемых операций), по уровню или степени специализации, по типу привода, по виду управления.

Их функциональные возможности в значительной мере зависят от устройства управления. Наиболее распространенным является простое программное управление (иногда неправильно называемое жестко программным). В специальной литературе программное управление определяется как автоматическое управление исполнительным устройством по заранее введенной управляющей программе. При этом сама программа представляется как последовательность команд, определяющих движение самого ПР и, возможно, взаимодействие с другим оборудованием (например, с обслуживаемыми станками). Более сложным и совершенным, чем программное, является адаптивное управление, при котором предусматривается автоматическое целенаправленное изменение управляющих программ в зависимости от измененных параметров состояния самого ПР, предметов производства, другого оборудования и внешней среды. Часто адаптация реализуется в коррекции запрограммированных движений в узких пределах.



Для ПР, как и для другого оборудования, различают три основных вида программного управления: цикловое, позиционное и контурное. При цикловом управлении программируется только последовательность выполнения движений по степеням свободы (движения отдельно по степеням подвижности иногда называют парциальными).

При цикловом управлении движения являются неуправляемыми, задаются только конечные положения, в которые должны придти подвижные звенья механизма манипулятора. Эти положения, в которых должна происходить остановка, задаются специальными перезакрепляемыми упорами или путевыми переключателями (концевыми выключателями), по сигналам которых отключаются двигатели приводов.

При позиционном управлении перемещения по каждой степени подвижности программируются от точки к точке, причем число точек по траектории может быть достаточно большим.

При контурном управлении программируются согласованные и координированные движения по всем или нескольким степеням подвижности; при этом рабочий орган может совершать любые сложные движения по задаваемым траекториям с требуемым распределением скоростей, а также с требуемыми изменениями ориентации. В настоящее время подавляющее большинство устройств управления строится на основе микропроцессорной техники.

При цикловом управлении вычислительное устройство выполняет функции программируемого контроллера, в нем реализуются только логические и некоторые вспомогательные функции, объем необходимой памяти невелик. При позиционном, а тем более контурном управлении помимо логических операций выполняются также и арифметические (например, это необходимо при интерполяции), при этом должен быть большой объем памяти.

Важным классификационным признаком является вид привода, определяемый типом энергоносителя и некоторыми другими об-



стоятельствами. Основными являются три вида приводов: пневматический, гидравлический и электрический (электромеханический). Встречаются также комбинированные приводы: пневмогидравлический, электрогидравлический и другие, в которых осуществляется преобразование энергии одного энергоносителя в энергию другого. Обычно в одном исполнительном устройстве ПР используются приводы одного вида для всех степеней подвижности, однако встречаются случаи, когда это признается нецелесообразным (например, приводы схватов электромеханических роботов часто делают пневматическими). Каждый из видов приводов имеет свои преимущества и недостатки.

1.2 Способы реализации устройств для перемещения объектов

При обслуживании высокопроизводительного оборудования актуальной является задача сокращения времени перемещения объекта, при перемещении от заданного начального положения до конечного. Потенциальные возможности повышения быстродействия определяются рядом факторов, из которых первым следует назвать вид движения выходного звена двигателя. Движение может быть линейным, поступательным или вращательным. В пределах цикла в первом случае оно обязательно является возвратно-поступательным, во втором может быть, как возвратно-поступательным, так и однонаправленным (с сохранением знака скорости, в частности, при постоянной скорости).

При возвратно-поступательном движении выходного звена двигателя чередуются этапы разгона и торможения (они могут быть разделены этапами установившегося движения с постоянными скоростями или этапами выстоя). В зависимости от типа двигателя и от его мощности разгон может осуществляться просто включением (при подаче номинального напряжения для электродвигателя или



номинального давления для пневмодвигателя), или по специальной программе с регулированием параметров энергоносителя в процессе разгона, причем в принципе возможно как формирование режима (с целью ускорения разгона), так и замедление (с целью ограничения энергозатрат и повышения надежности). Торможение вплоть до остановки может осуществляться за счет сил трения, за счет перевода двигателя в специальный тормозной режим или с помощью механических тормозных устройств.

Если задача сокращения времени цикла не является актуальной, то основным является требование простоты, ни режим разгона, ни режим торможения не форсируются. Если же требуется получать возможно меньшие значения времени цикла и, следовательно, возможно меньшие значения времени перемещения от начальной точки до конечной, то стараются максимально увеличить ускорения (линейные или угловые) при разгоне и торможении, т. е. увеличить силы и моменты на соответствующих интервалах.

При прямой передаче, когда звено механизма устройства повторяет перемещение выходного звена двигателя, установившаяся скорость не зависит от управления. Тогда увеличение ускорения при разгоне и торможении дает существенный эффект при достаточно малых перемещениях, когда установившаяся скорость или совсем не достигается, или интервал движения с установившейся скоростью относительно невелик. При наличии механической передачи, изменяющей перемещения и скорость движения, дело обстоит иначе. Имеется свободный параметр — передаточное отношение редуктора — который целесообразно выбирать исходя из условия минимального времени перемещения подвижной части механизма из заданного начального положения в конечное. Задача оптимизации механизма передачи по передаточному отношению сформулирована, решена и проанализирована в работе [7]. Существование оптимума по передаточному отношению обусловлено тем, что при увеличении передаточного отношения редуктора уменьшается приве-



денная динамическая нагрузка на выходном звене двигателя и поэтому снижается время разгона, но одновременно уменьшается установившаяся скорость, что приводит к увеличению времени движения в установившемся режиме. Выход заключается в применении схем, в которых двигатели не реверсируются, в частности, вращательные двигатели работают в режиме постоянной угловой скорости.

1.3 Механизмы манипуляторов с двигателями, работающими без реверсирования

Разнообразие механизмов, приводимых в движение вращательными двигателями, роторы которых вращаются в одну сторону без остановки (в частности, с примерно постоянными угловыми скоростями), а движения выходных звеньев совершают такие движения, которые типичны для манипуляторов, достаточно велико.

Интересен подход, который заключается во включении в передачи таких механизмов, которые при равномерном или близком к равномерному вращению вала двигателя обеспечивают получение желаемых траекторий и заключения. Именно этот прием рассматривается подробно далее.

Требования к траектории движения и закону движения (или к распределению скоростей по траектории, что то же самое) могут формулироваться или совместно, или раздельно. В соответствии с этим указанные требования могут или предъявляться к механизму в целом, или распределяться между его частями. При этом обычно требования к траектории не являются жесткими, поэтому не имеет смысла использовать хорошо разработанные, но сложные методы синтеза механизмов, предназначенных для воспроизведения определенных траекторий. Вполне определенными обычно являются требования прохождения через небольшое число точек (чаще всего две) и направления касательных к траектории в этих точках. Требо-



вания к закону движения преимущественно сводятся к выстой в заданных точках. Было бы желательно иметь регулируемое время выстоя, однако для рассматриваемого приема построения механизма манипулятора это невозможно. Представляются реализуемыми два варианта:

1. Механизм выбирается таким, чтобы получить точный выстой на время не менее заданного.
2. Точный выстой не имеет места, но в заданных точках обращается в нуль скорость. Часто (но необязательно), рассматриваемая точка является точкой возврата.

Проще реализуется второй вариант. Самой простой представляется схема шатунно-кривошипного механизма (рис. 2).

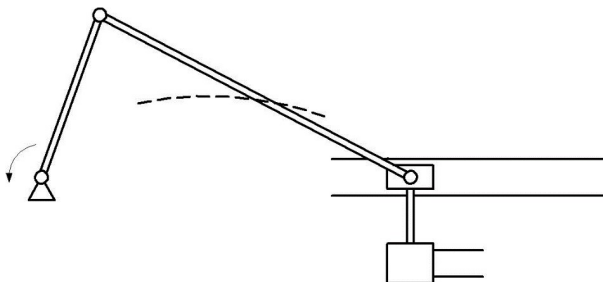


Рис. 2. Кривошипно-шатунный манипулятор

При вращении кривошипа с постоянной угловой скоростью или, по крайней мере, в одну сторону ползун совершает возвратно-поступательные движения с мгновенными остановками (но без выстоя) в крайних положениях. Если рабочий орган — захватное устройство — установить на ползун, то механизм способен переносить объекты по прямой из одного крайнего положения в другое.

При вращении в одном направлении захватное устройство нельзя связывать с какой-либо точкой шатуна, поэтому каждая из них движется по траектории, близкой к эллипсу (на рисунке 3 показано штриховыми линиями) без остановок.

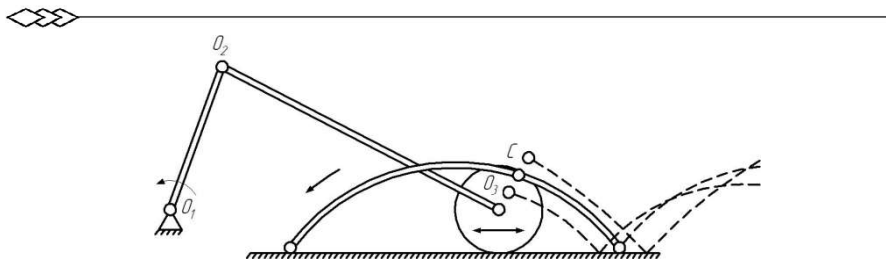


Рис. 3. Зубчато-рычажный циклоидальный манипулятор

Если вместо ползуна, перемещающегося по направляющей, использовать пару зубчатое колесо — зубчатая рейка, то можно получить траекторию в виде циклоиды. Начальная и конечная точки могут располагаться на циклоиде произвольно, но целесообразно сделать так, чтобы эти точки совпали с точками возврата. Тогда в начальной и конечной точках будет мгновенная остановка. Могут быть использованы не только соседние точки возврата, тогда будут получены последовательности точек позиционирования.

Заметим, что точки возврата будут на траекториях только точек, лежащих на определенном радиусе, для других точек будут получаться или гладкие траектории, или петлеобразные траектории (на рисунке 3 показано штриховыми линиями).

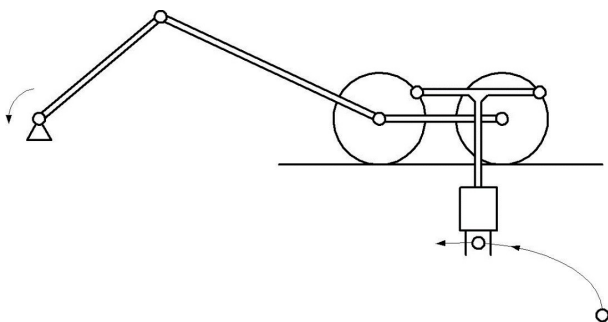


Рис. 4. Удвоенный зубчато-реечный механизм



Если удвоить реечный механизм, как показано на рисунке 4, то траектории с точками возврата будут получаться для всех точек вертикального рычага, рабочий орган, соединенный с этим рычагом, будет перемещаться поступательно, воспроизводя циклоиду, и, следовательно, тем самым решается задача сохранения ориентации рабочего органа при перемещениях.

Важным недостатком описанного механизма является то, что расстояние между точками возврата однозначно определяется радиусом зубчатого колеса (или числом его зубьев), и для изменения этого расстояния необходимо делать сменные зубчатые колеса с различным числом зубьев. Получение траекторий с точками возврата в начальной и конечной точках позиционирования может рассматриваться как общий прием, реализуемый с помощью различных механизмов. Использование циклоидальных механизмов в этом плане представляется наиболее перспективным; именно такие механизмы и их свойства являются основным объектом рассмотрения в данной монографии.

В этих примерах задачи формирования траектории и закона движения по траектории решались совместно, изменения траектории вынужденно приводили к соответствующим изменениям закона движения и распределения скорости по траектории. Существуют приемы, позволяющие разделить эти задачи, т. е. сначала задать одним механизмом траекторию, а затем другим механизмом — закон движения. При этом различными могут быть как механизмы, задающие траекторию, так и механизмы, задающие закон движения, а также механизмы, их соединяющие.

1.4 Особенности реализации быстродействующих мехатронных безреверсных манипуляторов

Особенностью безреверсных мехатронных манипуляторов является одним из способов решения фундаментальной проблемы



мехатроники (робототехники) — проблемы быстродействия промышленных роботов (ПР).

Для обычных ПР с независимыми приводами по степеням подвижности требуемые движения реализуются при последовательном включении приводов (на каждом этапе работает только один привод в ту или иную сторону). В начале каждого этапа привод должен разгонять подвижную часть, в конце — тормозить.

Формально вычисленная работа на каждом этапе мала. Для повышения быстродействия необходимо значительно увеличить мощности двигателей, что затруднено для роботов с электроприводом. Практика и прикидочные расчеты показывают, что трудно получить время полного цикла (с вращением рабочего органа в начальную точку) менее 3–4 секунд.

Другой проблемой является уменьшение установочной мощности приводных двигателей манипулятора. В частности, одним из решений является оснащение приводов звеньев аккумуляторами механической энергии, так как для движения манипуляторов роботов-перекладчиков характерно чередование этапов разгона и торможения, что позволяет осуществлять рекуперацию энергии, за счет чего уменьшается мощность приводных двигателей.

Таким образом, актуальной является задача реализации определенного типа движения рабочего органа и соответствующего выбора компоновочной структуры, а также способы управления ПР [1].

Быстродействие манипулятора можно получить за счет геометрии движений, обеспечивая при этом требуемую точность получаемых траекторий.

В основу быстродействующих циклоидальных мехатронных (БЦМ) устройств [1] заложена идея, заключающаяся в том, чтобы задавать требуемую траекторию и закон движения рабочего органа кинематическими средствами (выбором кинематической схемы), а привод осуществлять от постоянно вращающегося двигателя и получить повышенное быстродействие.



На рисунке 5 представлен БЦМ в виде планетарно-зубчатого и шарнирно-рычажного механизмов [31].

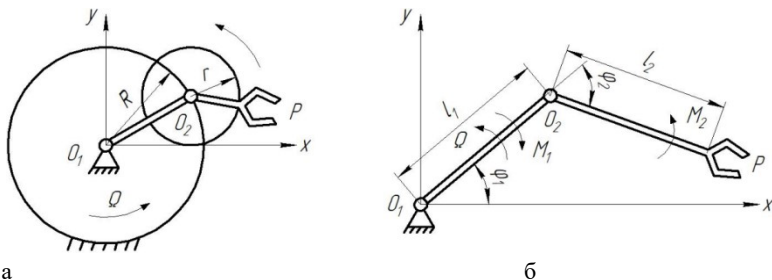


Рис. 5. Быстродействующий циклоидальный манипулятор с одним приводом (а) и приводом для каждого звена (б): Ω — угловая скорость вращения звена O_1O_2 ; M_1, M_2 — синхронизированные моменты приводов, расположенных в шарнирах; φ_1, φ_2 — углы поворота звеньев; l_1, l_2 — длины звеньев.

Конкретный вид траектории точки P на втором звене определяется передаточным отношением механизма и положением этой точки на звене. Если передаточное отношение N — целое число, то траектория является замкнутой и замыкается после первого оборота, совершенного первым звеном от стойки, если это отношение дробное и представляет собой отношение целых чисел (что всегда бывает при использовании зубчатой передачи), траектория также является замкнутой, но замыкание происходит после нескольких оборотов (первого звена). С другой стороны, эти траектории можно получить посредством шарнирно-рычажных манипуляторов, когда поддерживается приводами нужное отношение угловых скоростей и направление вращения звеньев (рис. 5б).

Эти компоновки легко могут быть пересчитаны из одного типа в другой, т. е. идентифицированы (рис. 6).

Планетарный зубчато-рычажный манипулятор (ПЗМ) в зависимости от вида зацепления (рис. 5а) позволяет получать циклоидаль-



ные траектории воспроизводящей точки P , а именно для внешнего зацепления будут эпициклоиды (ЭЦ):

$$\begin{aligned} x &= (R + r) \cos \varphi_1 + \lambda \cdot r \cdot \cos \left(\frac{R}{r} + 1 \right) \varphi_1, \\ y &= (R + r) \sin \varphi_1 + \lambda \cdot r \cdot \sin \left(\frac{R}{r} + 1 \right) \varphi_1. \end{aligned} \quad (1.1)$$

Из соотношения для координат точки P и, рассматривая этот случай, $\lambda > 1, \lambda = 1, \lambda < 1, R + r = l$ соответственно имеем:

- удлиненные ЭЦ при $N > \varepsilon^{-1}$;
- ЭЦ при $N > \varepsilon^{-1}$;
- укороченные ЭЦ при $N < \varepsilon^{-1}$.

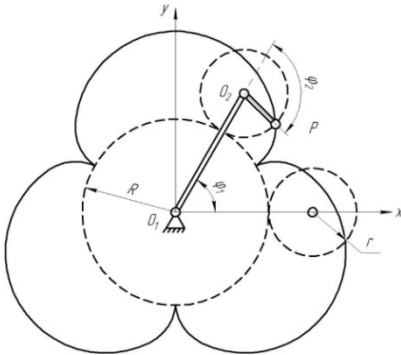


Рис. 6. Расчетная схема пересчета исполнительного механизма из одного типа компоновки в другой

Уравнения гипоциклоид (ГЦ) для планетарной схемы (внутреннее зацепление) имеют вид:

$$\begin{aligned} x &= (R - r) \cos \varphi_1 + \lambda \cdot r \cdot \cos \left(\frac{R}{r} - 1 \right) \varphi_1, \\ y &= (R - r) \sin \varphi_1 + \lambda \cdot r \cdot \sin \left(\frac{R}{r} - 1 \right) \varphi_1, \end{aligned} \quad (1.2)$$

где $l_1 = R - r_1, \varepsilon = \lambda \cdot r, N = -\frac{R}{r} = -\frac{\lambda}{\varepsilon - 1} < 1$.

Аналогично имеем удлиненные ГЦ и укороченные ГЦ при $\lambda > 1, \lambda = 1, \lambda < 1$ соответственно.

Реализация топологических возможностей циклоидальных кривых определяется конструктивно компоновочным решением МС.



В работе [8] показано, что для расчета параметров исполнительного механизма достаточно знать параметры одного из базовых типов компоновок, т. е. для этих компоновок возможен взаимный пересчет параметров. Его можно осуществить, исходя из осознания сущности характера воспроизведения этих кривых (рис. 6).

Топология циклоидальных кривых в параметрическом пространстве N, ε представлена на рисунке 7.

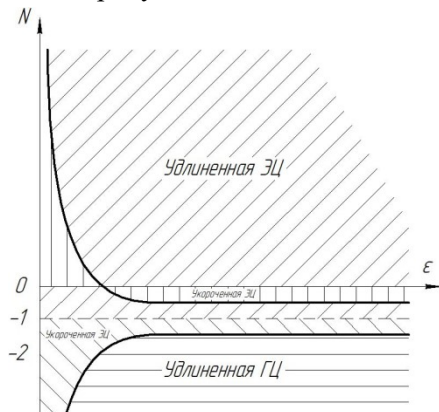


Рис. 7. Топология семейства циклоидальных кривых, где ЭЦ — эпициклоиды; ГЦ — гипоциклоиды

Введя обозначения $\varepsilon = \frac{l_2}{l_1}$, получаем $N = \pm \frac{\omega_2}{\omega_1}$ для шарнирно-рычажного механизма (ШРМ) (знак «+» означает то, что звенья l_1, l_2 вращаются в одном направлении, «-» — в противоположном).

В диапазоне $-1 < N < 0$ кривые с параметрами N, ε геометрически идентичны кривым с параметрами $\tilde{N}, \tilde{\varepsilon}$, определяемым соотношениями:

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= \cos \varphi_1 + \tilde{\varepsilon} \cdot \cos(\tilde{N} + 1) \cdot \varphi_1, \\ \tilde{y} &= \sin \varphi_1 + \tilde{\varepsilon} \cdot \sin(\tilde{N} + 1) \cdot \varphi_1, \end{aligned} \quad (1.3)$$



где $\tilde{x} = \frac{x}{\varepsilon}$, $\tilde{y} = \frac{y}{\varepsilon}$, $\beta = (N + 1) \cdot \varphi_1$. Для $\tilde{N} > 0$ имеется шарнирно-рычажная аналогия механизма.

В этом диапазоне $0 > N > -1$ зубчато-рычажная реализация циклоидальных манипуляторов должна удовлетворять условиям:

$$R + r = \varepsilon, \lambda \cdot r = 1, N = \frac{R}{r} = \frac{\lambda}{\varepsilon} = -1., \quad (1.4)$$

Таким образом, в данном диапазоне имеется возможность получить ЭЦ с другими параметрами манипуляторов за счет осуществления инверсии длин в случае двухшарнирного манипулятора или перестановки зубчатых колес (за счет изменений направлений вращения звеньев для зубчато-рычажного механизма).

В дополнение к иллюстрации характера проявления топологических свойств формируемых циклоидальных траекторий можно выявить, как влияет характер взаимосвязи параметров N , ε на вид траекторий.

Оказывается, все эти траектории можно разделить на три группы:

- кусочно-гладкие с заостренными участками;
- пересекающиеся;
- непересекающиеся.

Очевидно, для подобного сравнения необходимо проведение кинематического анализа траекторий.

Приняв обозначения:

$$N_1 = \varepsilon^{-1}|1 - \varepsilon|, N_2 = \varepsilon^{-1}|1 + \varepsilon|, \quad (1.5)$$

можно составить таблицу, характеризующую условия формирования перечисленных типов кривых (табл. 1).

Таблица 1

$N > 0$	$N < 0$	Тип кривых
$N > N_1$	$ N > N_2$	Пересекающиеся
$N < N_1$	$ N < N_2$	Непересекающиеся
$N = N_1$	$N = N_2$	С точками заострения
Эпициклоиды	Гипоциклоиды	



Циклоидальные траектории, охватывая широкий спектр разного рода кривых, иногда могут иметь точки самопересечения. Для их выявления взяты уравнения для положения полюса схвата в полярных координатах ρ, ψ (рис. 8):

$$x = \rho \cdot \cos \psi, y = \rho \cdot \sin \psi.$$

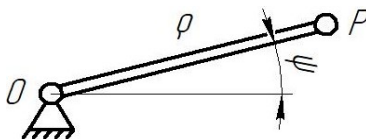


Рис. 8. Однозвенный манипулятор

Отсюда для угловой скорости ψ следует

$$\dot{\psi} = \frac{x \cdot \dot{y} - y \cdot \dot{x}}{x^2 + y^2} = \frac{x \cdot \dot{y} - y \cdot \dot{x}}{\rho^2}, \quad (1.6)$$

из чего имеем, что точки самопересечения будут тогда, когда числитель этого выражения может менять знак, а именно когда из выражения

$$\dot{x} \cdot y - y \cdot \dot{x} = \omega_1 \cdot |1 + \varepsilon^2 \cdot (N + 1) + \varepsilon \cdot (N + 2) \cdot \cos \varphi_2| \quad (1.7)$$

следует условие отсутствия точек возврата и самопересечения на циклоидальной траектории, а именно неравенство:

$$\left| \frac{\varepsilon \cdot (N + 2)}{1 + \varepsilon^2 \cdot (N + 1)} \right| < 1. \quad (1.8)$$

Характер изменения (эволюция) траекторий в зависимости от параметра N показан на рисунке 9.

Гипоциклоиды Перициклоиды Эпициклоиды

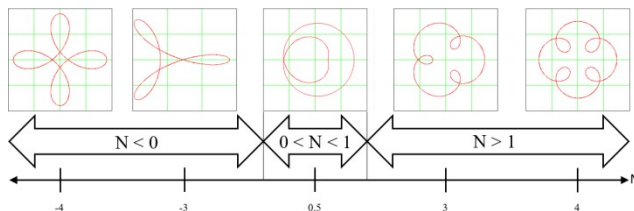


Рис. 9. Эволюция циклоидальных траекторий



Характер траекторий зависит также от взаимного расположения начального и конечного положений точки Р. Для наглядной иллюстрации такой зависимости рабочую зону в начальном положении — точке M_0 — подразделим на четыре сектора (рис. 10), где угловые скорости имеют различные знаки. Линии раздела следуют из соотношений текущего положения точки Р.

$$\begin{aligned} x &= \cos(\varphi_{10} + \omega_1 t) + \varepsilon \cdot \cos[\varphi_{10} + \varphi_{20} + (N + 1)\omega_1 t] \\ y &= \sin(\varphi_{10} + \omega_1 t) + \varepsilon \cdot \sin[\varphi_{10} + \varphi_{20} + (N + 1)\omega_1 t] \end{aligned} \quad (1.9)$$

при $\omega_1 = 0$ и $\omega_2 = 0$. Проведя дискриминантные кривые, отвечающие значениям $N = -I$ и $N = I$, где значению $N = -I$ отвечает окружность единичного радиуса с центром в точке $\varepsilon \sin(\varphi_{10} + \varphi_{20})$, $\varepsilon \cos(\varphi_{10} + \varphi_{20})$, а значению $N = I$ соответствует улиткообразная кривая вида

$$x^2 + y^2 = 1 + \varepsilon^2 + 2\varepsilon \cdot \cos \varphi_2 \quad (1.10)$$

разделяющая обслуживаемую МС область на зоны $N \geq I$, получаем возможность определения знака и примерной величины N для попадания схвата в требуемое положение.

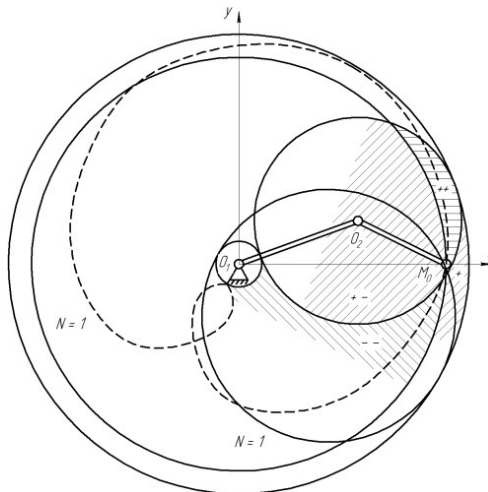


Рис. 10. Характерные области рабочей зоны манипулятора



Полагая здесь и далее для определенности, что точка Р схвата в начальном положении, определяемом точкой M_0 (рис. 11), располагается на оси абсцисс ($y_p = 0$), и введя безразмерное расстояние r до схвата, для которого имеет место геометрическое тождество:

$$r = 1 + \varepsilon^2 + 2\varepsilon \cdot \cos\varphi_2, \quad (1.11)$$

для начальной конфигурации имеем зависимости:

$$\begin{aligned} r &= \cos\varphi_{10} + \varepsilon \cdot \cos(\varphi_{10} + \varphi_{20}), \\ 0 &= \sin\varphi_{10} + \varepsilon \cdot \sin(\varphi_{10} + \varphi_{20}). \end{aligned} \quad (1.12)$$

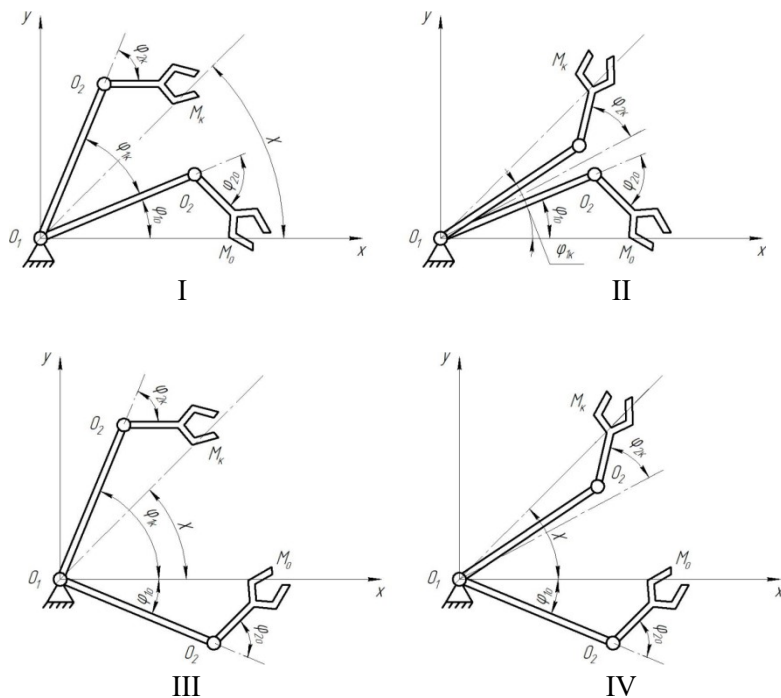


Рис. 11. Возможные совокупности начальной и конечной конфигураций манипулятора



Можно ввести из четырех совокупностей начальной и конечной конфигураций четыре значения N :

$$N_j = \frac{\omega_2^j}{\omega_1^j} = \frac{\dot{\varphi}_2^j}{\dot{\varphi}_1^j} = \frac{\Delta\varphi_2^j}{\Delta\varphi_1^j} = \frac{\varphi_{2k}^i - \varphi_{20}^j}{\varphi_{1k}^i - \varphi_{10}^j}; i, j = 1, 2, 3, 4. \quad (1.13)$$

Сравнивая эти варианты по какому-либо критерию, можно из них выбрать наилучшую траекторию перехода. Критерием оптимальности может служить, например, критерий минимума прироста кинетической энергии МС или минимума боковых инерционных перегрузок. Очевидно, для подобного сравнения необходимо проведение кинематического анализа рассматриваемых рабочих траекторий.

Кинематический анализ траекторий

Скорость схвата (точка P) будет

$$v = \sqrt{\mu^2 + 2\mu \cdot \cos \varphi_2 + 1} \omega_1 l_1, \mu = \varepsilon(N + 1), \quad (1.14)$$

где для $N > -1$ при $\varphi_2 = 2k\pi, (2k + 1)\pi, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, соответственно имеем

$$v_{max, min} = |\mu \pm 1| \omega_1 l_1 \quad (1.15)$$

и для $N < -1$, наоборот, инерционные свойства такой МС характеризуются ускорением схвата.

Полное ускорение, равное

$$a = \sqrt{\mu^4 \varepsilon^2 + 2\mu^2 \varepsilon \cdot \cos \varphi_2 + 1} \omega_1^2 l_1, \quad (1.16)$$

При $\varphi_2 = 2k\pi$ будет наибольшим, а при $\varphi_2 = (2k + 1)\pi$ — наименьшим

$$a_{max, min} = |1 \pm \mu^2 \varepsilon^{-1}| \omega_1^2 l_1. \quad (1.17)$$

Характер изменения модуля скорости схвата по траектории определяется поведением его тангенциального ускорения.

$$a_\tau = -\eta v^{-1} \sin \varphi_2, \eta = \mu N \omega^3 l^2. \quad (1.18)$$

Производная по φ_2

$$\dot{a}_\tau = -v^{-3} l_1^2 \omega^4 N^2 \mu (\cos \varphi_2 + \mu) (\mu \cos \varphi_2 + 1) \quad (1.19)$$



показывает, что экстремумы a_τ будут при $\cos\varphi_2 = -\mu$ для $|\mu| < 1$ и при $\cos\varphi_2 = -\mu^{-1}$ для $|\mu| > 1$.

При этом

$$\begin{aligned} a_\tau &= \pm l_1^2 \omega^2 N \mu \text{ для } |\mu| < 1, \\ a_\tau &= \pm l_1^2 \omega^2 N \mu \text{ для } |\mu| > 1. \end{aligned} \quad (1.20)$$

Далее при $\varphi_2 = k\pi$, $a_\tau = 0$ (для гипоциклоид при руке выпрямленной, для эпициклоид при руке сложенной).

Выражение для a_τ показывает, что $|\mu| = 1$ в особых положениях схвата — точках «выстоя» у гипоциклоид, точках возврата у эпициклоид, где тангенциальное ускорение терпит разрыв.

Для выяснения возможности уменьшения по траектории пиковых значений боковых (поперечных) сил инерции необходимо проведение анализа поведения нормального ускорения схвата.

$$a_n = \frac{v^2}{R} = v^{-1}(\dot{x}\ddot{y} - \dot{y}\ddot{x}) = v^{-1}l_1^2\omega^3[1 + \mu^3\varepsilon^{-1} + \mu(\mu\varepsilon^{-1} + 1)\cos\varphi_2]. \quad (1.21)$$

Выпишем производную по φ_2 от a_n

$$\dot{a}_n = -\mu^2 N \omega^3 \sin\varphi_2 [\varepsilon^{-1} + \mu + (\mu\varepsilon^{-1} + 1)\cos\varphi_2](\mu^2 + 2\mu\cos\varphi + 1)^{-\frac{3}{2}}. \quad (1.22)$$

Отсюда видно, что стационарные значения будут при:

- 1) $\sin\varphi_2 = 0$;
- 2) $\cos\varphi_2 = -(\mu + \varepsilon)^{-1}(\mu\varepsilon + 1)$, если $|(1 + \mu\varepsilon)(\mu + \varepsilon)^{-1}| \leq 1$,

что возможно при $|\mu| \leq 1$, $\varepsilon \geq 1$ и $|\mu| \geq 1$, $\varepsilon \leq 1$.

Таким образом, в зависимости от знака N ускорение a_n становится максимальным и минимальным в точках $\varphi_2 = k\pi$ (показано на рисунке 12) и $\varphi_2 = \pm \arccos[-(\mu\varepsilon + 1)(\mu + \varepsilon)^{-1}] + 2k\pi$.

При этом для случая 1 следует в зависимости от типа кривой

$$\begin{aligned} |a_n| &= (1 + \mu^2\varepsilon^{-1})l_1\omega^2 \text{ (эпициклоиды);} \\ |a_n| &= (1 - \mu^2\varepsilon^{-1})l_1\omega^2 \text{ (гипоциклоиды);} \end{aligned} \quad (1.23)$$

а для случая 2 имеем

$$a_n = l_1\omega^2 \sqrt{(\mu\varepsilon^{-1} + 1)(\mu^2 - 1)(\mu\varepsilon^{-1} - 1)}. \quad (1.24)$$

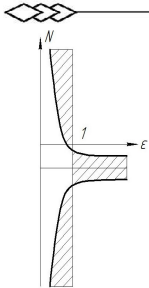


Рис. 12.
Область экстремумов в an

О чисто геометрических свойствах траектории схвата, очевидно, можно судить по характеру поведения радиуса кривизны, который для данных режимов можно представить в виде:

$$R = \frac{v^3}{\dot{x}\dot{y} - \dot{y}\dot{x}} = \frac{l_1 \sqrt{(1 + 2\mu \cos \varphi_2 + \mu^2)^3}}{1 + \mu^3 \varepsilon^{-1} + \mu(\mu \varepsilon^{-1} + 1) \cos \varphi_2}. \quad (1.25)$$

Определим его экстремальные значения из равенства нулю первой производной от R по φ_2

$$\dot{R} = \frac{l_1 N \omega \mu \sin \varphi_2 \sqrt{(1 + 2\mu \cos \varphi_2 + \mu^2)}}{1 + \mu^3 \varepsilon^{-1} + \mu(\mu \varepsilon^{-1} + 1) \cos \varphi_2}.$$

$$[\mu \varepsilon^{-1} - 2 - \mu^2(2\mu \varepsilon^{-1} - 1) - \mu(\mu \varepsilon^{-1} + 1) \cos \varphi_2] = 0, \quad (1.26)$$

где точками экстремума являются

- 1) $\sin \varphi_2 = 0$;
- 2) $|\cos \varphi_2| = |[\mu \varepsilon^{-1} - 2 - \mu^2(2\mu \varepsilon^{-1} - 1)] / [\mu(\mu \varepsilon^{-1} + 1)]| < 1$,

чему соответствует область параметров N, ε , дающих экстремум R (рис. 13).

- 3) $\mu^2 + 2\mu \cos \varphi_2 + 1 = 0, |\mu| = 1, \cos \varphi_2 = -\mu$.

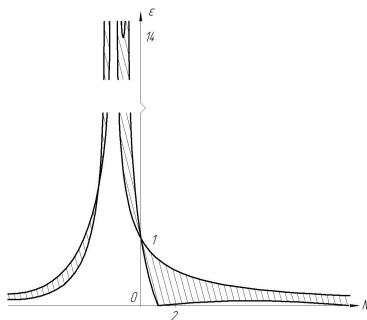


Рис. 13. Область допустимых параметров N, ε , определяющих экстремум радиуса кривизны для случая 2. $\varepsilon = l_2/l_1$ — соотношение длин звеньев; $N = \omega_2/\omega_1$ — соотношение угловых скоростей вращений звеньев

Из них следует:

- 1) $R = \frac{l_1(1 \pm \mu)^2}{1 \pm \mu^2 \varepsilon^{-1}}$;
- 2) $l_1 \sqrt{27(1 - \mu^2)(\mu \varepsilon - 1)}$;
- 3) $R \rightarrow 0$ при $\varphi_2 \rightarrow k\pi$.

Видно, что условие 1 означает $\varphi_2 = 0, \pi$, т. е. когда рука выпрямлена и сложена (на границах зоны). Приведем значения радиуса кривизны R на границах рабочей зоны:



$$R_{(0)} = -\frac{[1 + \varepsilon(N + 1)]^2}{\omega_1^3[1 + \varepsilon(N + 1)^2]}; \quad (1.27)$$

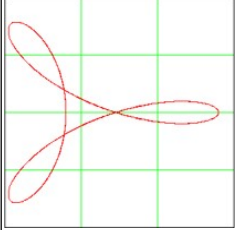
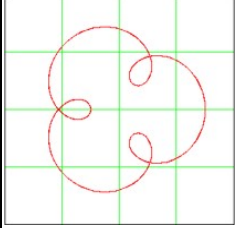
$$R_{(\pi)} = -\frac{[1 + \varepsilon(N + 1)]^2}{\omega_1^3[(N + 1)^2\varepsilon - 1]}. \quad (1.28)$$

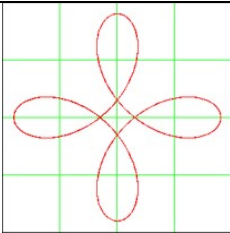
При выборе рабочей траектории надо сравнивать эти характерные значения R , и очевидно, что она не должна принимать слишком малые значения.

Приведенные результаты необходимы при синтезе рабочих траекторий шарнирных циклоидальных манипуляторов.

По результатам кинематического анализа циклоидальных МС разработан программный продукт, где кривые кодируются в двоичном коде (табл. 2).

Таблица 2

№ п/п	Код ω_1 (двоичн.)	Значение N	Код ω_2 (двоичн.)	Форма кривой	Знак N 0 — «-» 1 — «+»
1	0001	3	000001		0
2	0001	3	000001		1

3	0001	4	000010		0
4

Параметры N и ε заносятся в память системы управления (СУ) двухшарнирной МС. Характер эволюции циклоидальных траекторий точки Р можно более наглядно представить для некоторых значений ε ($\varepsilon = 0,5; 1; 1,5$) и N из рисунка 14.

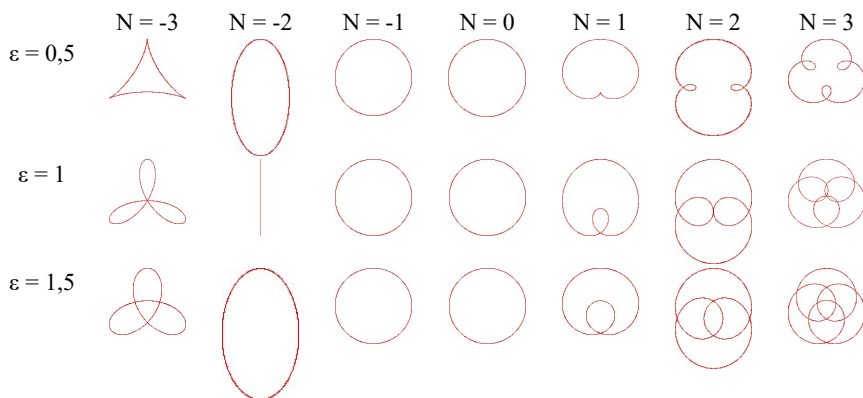


Рис. 14. Характер эволюции циклоидальных траекторий

Для циклоидальных траекторий с точками заострения (табл. 2) можно для двухшарнирной МС выявить точки контура там, где скорость схвата равна нулю, что возможно либо для сложенного ($N > 0$), либо для выпрямленного положения руки манипулятора ($N < 0$) (рис. 15).

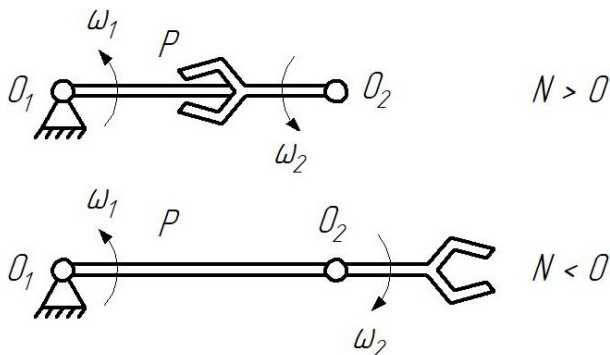


Рис. 15. Конфигурация руки для точек «сшивания»

Для $N < 0$ звенья руки вращаются в одном направлении, и в тот момент, когда рука сложена, для линейных скоростей схвата, получаемых отдельно от вращений с ω_1 вокруг O_1 и с ω_2 вокруг O_2 , имеем следующую зависимость:

$$V_{PO2} = \varepsilon N \omega_1 = V_{PO1} = |1 - \varepsilon| \omega_1, \quad (1.29)$$

откуда получаем условие:

$$N = \frac{|1 - \varepsilon|}{\varepsilon} = N_1. \quad (1.30)$$

Для $N < 0$ звенья вращаются в разные стороны и точки «сшивания» будут при руке выпрямленной, т. е.

$$V_{PO2} = \varepsilon |N| \omega_1 = V_{PO1} = |1 + \varepsilon| \omega_1. \quad (1.31)$$

Получаем условие:

$$N = \frac{|1 - \varepsilon|}{\varepsilon} = N_2. \quad (1.32)$$

Мгновенная остановка получается в точках, в которых скорости переносного и относительного движений равны друг другу по величине и противоположны по направлению. Практически указанный принцип сводится к тому, что на одном механизме устанавливается другой механизм, первый задает переносное движение, второй —



относительное. Обычно (но не обязательно) оба механизма являются плоскими, причем обе плоскости параллельны или совпадают.

Простейшим является сложение двух вращений с постоянными угловыми скоростями. Можно представить, что на одном роторе вращается второй ротор (рис. 5а) или с постоянными угловыми скоростями вращаются два шарнирно соединенных рычага (рис. 5б).

При реализации технического процесса, где необходима циклоидальная рабочая траектория конкретного типа, более предпочтительным вариантом с точки зрения надежности, простоты управления является первый вариант циклоидальной МС в реализации ПЗМ (рис. 16.). Также безреверсные МС могут быть реализованы посредством многократного зубчатого зацепления, например, их можно реализовать посредством многократного зубчатого зацепления (рис. 16) при четном числе промежуточных шестерен получается эпициклоида, при нечетном — гипоциклоида.

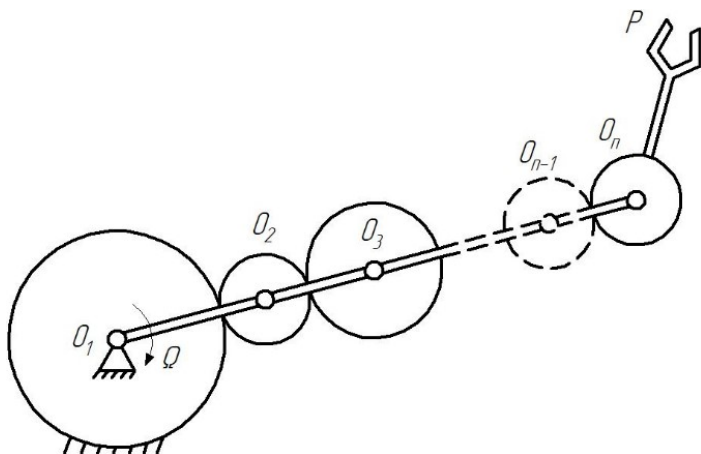


Рис. 16. Реализация безреверсного манипулятора через многократное зубчатое зацепление

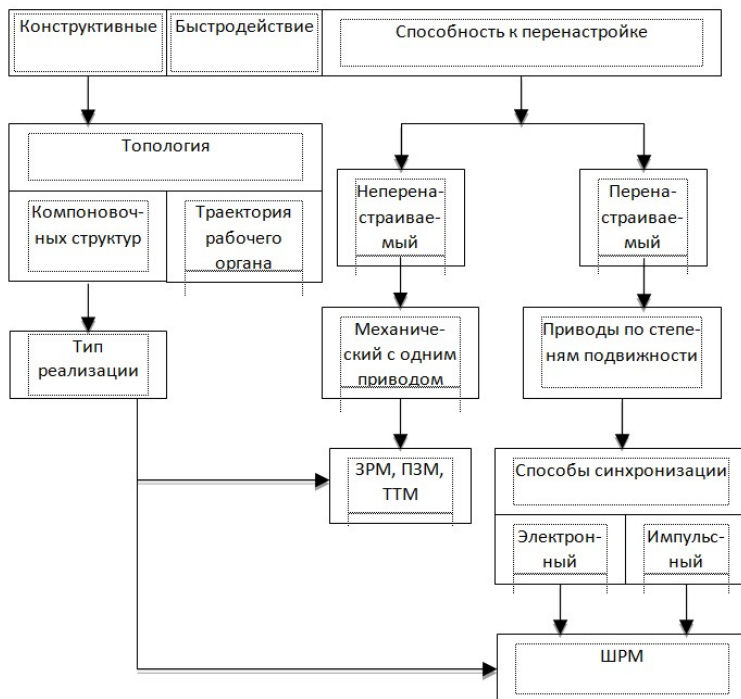


Рис. 18. Разновидности компоновочных структур циклоидальных манипуляторов: ЗРМ — зубчато-рычажный механизм; ПЗМ — планетарно-зубчатый механизм; ШРМ — шарнирно-рычажный манипулятор; ТТМ — манипулятор с тросовыми тягами или цепными передачами [30]

Шарнирный механизм в ТТМ с одной тросовой тягой представляет собой разомкнутую кинематическую цепь, где все звенья, кроме стойки, являются подвижными, двигаясь только по заданным траекториям (для вращательных пар — по кругу вокруг соответствующего шарнира (рис. 19).

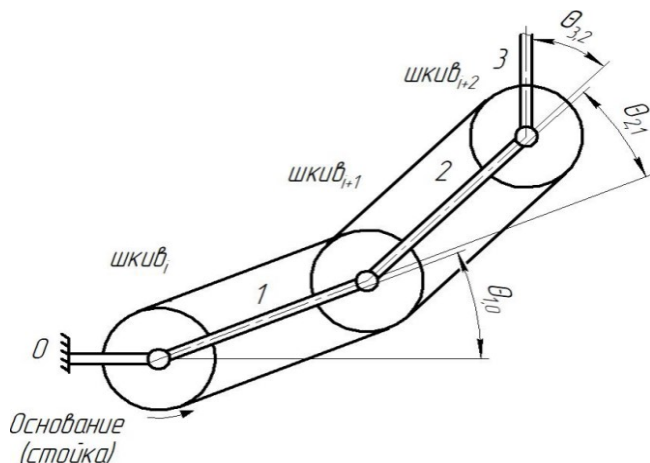


Рис. 19. Шарнирный механизм, приводимый в движение одной тросовой тягой. Звено К — держатель шкивов

Для механизмов с тросовым приводом существует два основных способа запаски тросов:

- с разомкнутыми концами (рис. 20);
- в виде бесконечной петли (рис. 21).

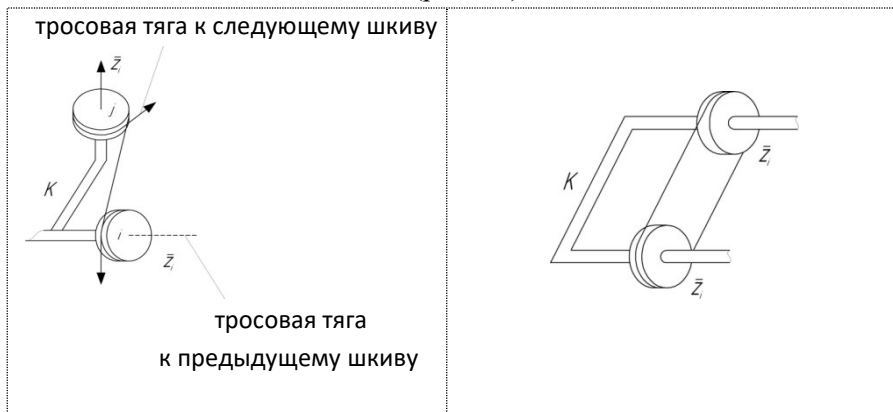


Рис. 20. Вариант запаски тросового привода с разомкнутыми концами

Рис. 21. Вариант запаски тросового привода в виде бесконечной петли



Далее на рисунках 22, 23 показаны плоскостные схемы элементарных механизмов запасовок:

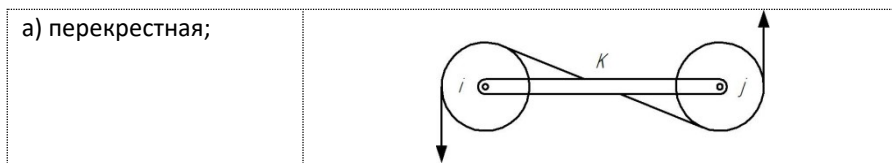


Рис. 22. Плоскостная схема элементарного механизма для механизма

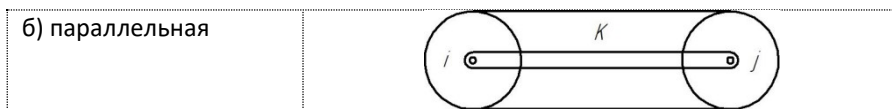


Рис. 23. Плоскостная схема элементарного механизма для механизма

На основе существующих процедур перечисления графов в общем случае можно получить связь между углом поворота шкива основания и шарнирными углами между звеньями $(m+1)$ — звеной разомкнутой кинематической цепи МС в ТТМ компоновке.

$$\Theta_{j,0} = \Theta_{1,0} \pm \frac{R_{j+1}}{R_j} \cdot \Theta_{2,1} \pm \frac{R_{j+2}}{R_j} \cdot \Theta_{3,2} \pm \dots \pm \frac{R_{j+m-1}}{R_j} \cdot \Theta_{m,m-1} \quad (1.33)$$

Знак при каждом члене необходимо находить согласно числу перекрестных запасовок, предшествующих k -й оси: при четном числе запасовок «+»; при нечетном «-».

Следует отметить, что ПЗМ, ЗРМ и ТТМ представляют МС без двигательной избыточности с одним приводом ведущего звена.



1.5 Безреверсные мехатронные манипуляторы. Топологический расчет

Топологические методы расчета при синтезе зубчатых механизмов на основе единого подхода, связанного с графовым представлением отдельных характеристик механизмов, даны в работе [14]. Здесь в качестве элементарного механизма (ЭМ), на которые разбиваются сложные зубчатые механизмы, принят трехзвенный планетарный механизм (дифференциал). Рассмотрим применение одного из графовых методов — матрично-кодového метода (МКМ) для циклоидальных манипуляторов в зубчато-рычажном исполнении (ЗРМ).

В нем предполагается, что сложный механизм может быть составлен из конечного числа ЭМ.

В качестве примера представлен на рисунке 24 двухрычажный манипулятор в ЗРМ компоновке [31].

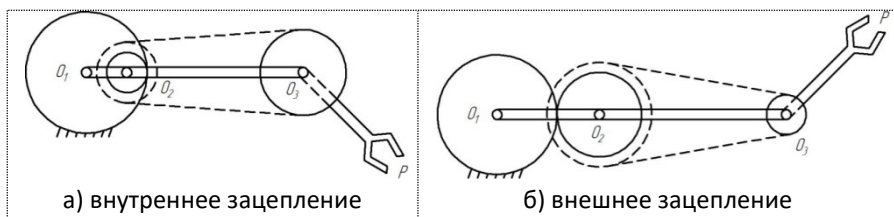


Рис. 24. Двухрычажный манипулятор в ЗРМ компоновке

Топологический расчет

Для синтеза требуемых значений параметров, характеризующих соотношение угловых скоростей вращения ведомых звеньев и ведущего звена, применяют топологические методы — матрично-кодový метод и метод графов.

Топологический расчет для общего случая цепного зубчато-рычажного механизма (рис. 25) производится матрично-кодovýм



методом. Для расчета необходимо разбить составной механизм на ЭМ и составить кинематические уравнения. Алгоритм расчета представлен на рисунке 25 [31].

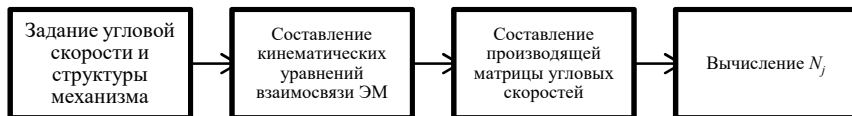


Рис. 25. Ход топологического расчета

В качестве примера рассмотрим двухрычажный механизм, представленный на рисунке 24.

Первый режим представлен на рисунке 24. а). Здесь каждый ЭМ представляет пару колес со следующими кинематическими взаимосвязями:

$$\Omega(r_1 - r_2) = -\omega_2 r_2, \quad (1.34)$$

где Ω — угловая скорость водила.

Из этих уравнений можно составить производящую матрицу угловых скоростей вида:

$$\begin{bmatrix} \Omega & \omega_2 & \omega_3 & \omega_4 \\ r_1 - r_2 & r_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & r_3 & r_4 \end{bmatrix}. \quad (1.35)$$

Отсюда с точностью до знака получаем значения параметра N:

$$N = \frac{\omega_4}{\Omega} = \frac{[\Omega \ \omega_2 \ \omega_3]}{[\omega_2 \ \omega_3 \ \omega_4]} = \frac{\begin{bmatrix} r_1 - r_2 & r_2 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} r_2 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & r_3 & r_4 \end{bmatrix}} = r_3 r_2^{-1} r_4^{-1} (r_1 - r_2). \quad (1.36)$$

Теперь можно аналогичные вычисления привести для другого режима ЗРМ.

Производящая матрица в данном случае имеет вид:



$$\begin{bmatrix} \Omega & \omega_2 & \omega_3 & \omega_4 \\ r_1 + r_2 & -r_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & r_3 & -r_4 \end{bmatrix}. \quad (1.37)$$

Отсюда с точностью до знака получаем:

$$N = \frac{\omega_4}{\Omega} = \frac{[\Omega \quad \omega_2 \quad \omega_3]}{[\omega_2 \quad \omega_3 \quad \omega_4]} = r_3 r_2^{-1} r_4^{-1} (r_1 + r_2). \quad (1.38)$$

Не трудно убедиться, что эти результаты совпадают с результатами непосредственного вычисления N из механизма ЗРМ.

Таким образом, в этом механизме ЗРМ циклоидального манипулятора используются три типа двухзвенных ЭМ:

– тип муфты (т. е. два колеса, насаженные жестко на одну ось)

$$\omega_1 = \omega_j;$$

– два колеса, охваченных цепной передачей

$$\omega_1 r_1 = \omega_j r_j;$$

– сателлиты на водиле:

$$\omega_n (r_b + r_c) = \omega_c r_c;$$

$$\omega_n (r_b - r_c) = \omega_c r_c.$$

в зависимости от типа зацепления.

Для этих схем «структурная цепь», т. е. отображение взаимосвязи, представляет собой «дерево» следующего вида (рис. 26):

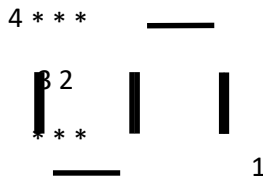


Рис. 26. Структурная цепь, отображающая кинематические взаимосвязи элементов ЗРМ



Рассмотренный механизм можно отобразить в виде графа (рис. 27).

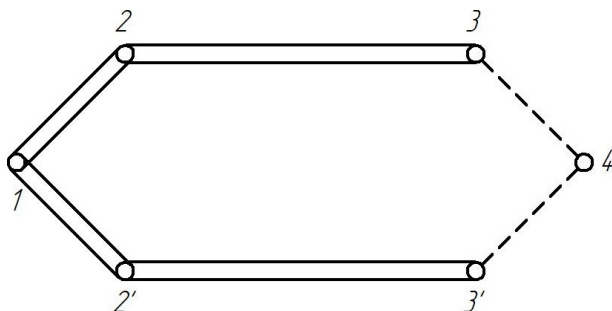


Рис. 27. Граф двухрежимного механизма

Вершины соответствуют колесам, например, 2 и 3 для внутреннего зацепления, а 2' и 3' — колеса для внешнего зацепления. Пунктиром обозначены цепи, соединяющие колесо 4 либо с 3, либо с 3'.

В механизме ЗРМ (рис. 26) также используется три типа двухзвенных ЭМ (каждый ЭМ представляет собой пару зубчатых колес) [31]:

Уравнения взаимосвязи для каждого ЭМ будут (Ω — угловая скорость водила):

– связь (1, 2): $\Omega \cdot (r_1 + r_2) = \omega_2 \cdot r_2$;

– связь (2, 3): $\omega_2 = \omega_3$;

– связь (3, 4): $\omega_3 \cdot r_3 = \omega_4 \cdot r_4$;

– связь (4, 5): $\omega_4 = \omega_5$;

– связь (5, 6): $\omega_5 \cdot r_5 = \omega_6 \cdot r_6$;

...

– связь (2n - 2, 2n - 1): $\omega_{2n-1} = \omega_{2n-2}$;

– связь (2n - 1, 2n): $\omega_{2n-1} \cdot r_{2n-1} = \omega_{2n-2} \cdot r_{2n-1}$.

Из этих уравнений формируется производящая матрица размерностью $2n \cdot 2n$: [31]

$$\|\Omega \ \omega_2 \ \dots \ \omega_{2n-1} \ \omega_{2n}\| =$$



$$= \begin{bmatrix} r_1 + r_2 & -r_2 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_3 & -r_4 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -r_{2n-2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & r_{2n-1} & -r_{2n} \end{bmatrix},$$

откуда вычисляются передаточные числа $N_i = \frac{\omega_{i+1}}{\Omega}$, $i = 1, 2, \dots, n$.

В частности, имеем:

$$\begin{aligned} N_{2n-1} &= \frac{\omega_{2n}}{\Omega} = \frac{\det[\Omega \quad \omega_1 \quad \omega_2 \quad \dots \quad \omega_{2n-1}]}{\det[\omega_1 \omega_2 \quad \dots \quad \omega_{2n-1} \quad \omega_{2n}]} = \\ &= (r_1 + r_2) \cdot r_2^{-1} \cdot r_3 \cdot r_4^{-1} \dots r_{2n-1} \cdot r_{2n}^{-1}, \end{aligned} \quad (1.39)$$

т. е. передаточные числа N_i определяются структурными вычислениями [31].

Вычисления можно осуществить и на основе преобразований графа механизма (рис. 28), где вершины соответствуют зубчатым колесам, а ребра — связям, штрихованной линией обозначены цепи, соединяющие колеса. На графе указаны веса, которые вычисляются:

- для ребра (1, 2) существует связь между водилом и сателлитом $\Omega \cdot (r_1 + r_2) = \omega_2 \cdot r_2$;
- для ребра (2,3) — между колесами 2 и 3: $\omega_2 = \omega_3$;
- для ребра (3,4) — через цепную передачу $\omega_3 \cdot r_3 = \omega_4 \cdot r_4$ и т. д.

После преобразования данного линейного графа нетрудно убедиться в том, что для любой вращательной пары и всего механизма формула (1.39) для чисел N_i совпадает [31].

Компоновочные структуры МС имеют отображение в виде линейного графа и передаточные числа N_i вычисляются перемножением весов ЭМ [14].

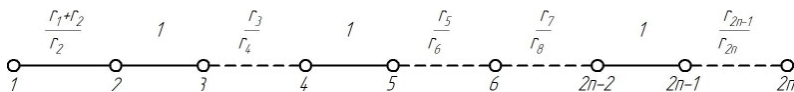


Рис. 28. Граф механизма с указанием весов ребер



На рисунке 29 показан механизм с указанием параметров колес и водила.

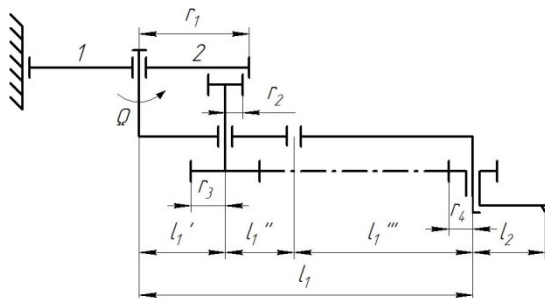


Рис. 29. Механизм ЗРМ с указанными значениями параметров ($\varepsilon = l_2/l_1$; $N = \omega_4/\Omega$)

На рисунке 30 показан граф с указанием весов его ребер.

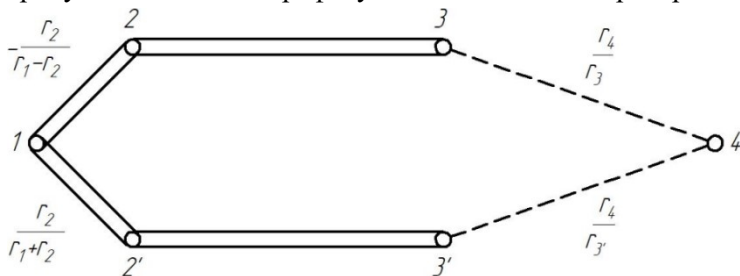


Рис. 30. Граф двухрежимного механизма с указанием весов ребер

Так как между матрицей, структурным графом и структурой механизма существует определенное соответствие, то возможны переходы как от порожденных уравнений — связей ЭМ к структуре механизма (задача синтеза), так и от заданного механизма к множеству связей, описывающих ЭМ и вычисленных выходных характеристик (задача анализа).



Глава 2

УПРАВЛЕНИЕ БЕЗРЕВЕРСНЫМИ МАНИПУЛЯТОРАМИ

2.1 Классификация безреверсных манипуляторов

Рассматриваемые безреверсные мехатронные манипуляторы (БММ) не являются классическими циклическими механизмами. Только в самых простых вариантах они представляют механизмы с одной степенью подвижности и одним нерегулируемым приводом. Они должны сохранять обязательные и типовые для ПР свойства переналаживаемости, программируемости и адаптивности, что требует иногда усложнения структур механизмов, использования нескольких приводов и самостоятельных систем автоматического управления [33].

Выбор способа описания топологии компоновочных структур, топологии траекторий рабочих органов, их кинематических свойств, законов изменения конфигурации «руки» основывается на особенностях их функциональных проявлений в зависимости от типа формируемого исполнительного механизма. Многообразие топологии траекторий, набора исходных функциональных элементов при стремлении проектировщиков для реализации однотипных задач позволяет получить хорошие динамические показатели и быстрое действие формируемых манипуляционных систем.

Реализация топологических возможностей БММ определяется их конструктивно-компоновочным решением, в частности, возможностями перенастройки режимов.

Разработана многоуровневая, иерархическая квалификационная схема БММ (рис. 31). Классификация сделана по нескольким независимым признакам, поэтому является фасетной [35].



Рис. 31 Классификационная схема безреверсных мехатронных манипуляторов



Для БММ характерны особые компоновочные структуры с соответствующей СУ в зависимости от требований к перенастройке траекторий рабочего органа, стационарные режимы работы приводов, а именно если требуется перенастройка, то достаточно одного привода ведущего звена и управление осуществляется чисто механическими средствами, в случае необходимости перенастройки управления синхронизация работы приводов идет за счет электронных средств.

БММ не являются классическими механизмами, лишь в самых простых вариантах они представляют механизмы с одной степенью подвижности и одним нерегулируемым приводом. При этом они должны сохранять обязательные и типовые для ПР свойства перенастраиваемости, использование нескольких приводов и самостоятельных систем автоматического управления в соответствии с их конкретным предназначением и представляют собой автоматические машины [36], а не программируемые вычислительные устройства и поэтому главным для них является формирование требуемых рабочих движений их органов чисто кинематическими средствами [36] или импульсно-динамическим способом. В случае требований к перенастройке траекторий рабочего органа возможно чисто механическое управление и достаточно иметь один приводной двигатель ведущего звена, а в случае наличия требований к перенастройке используются механизмы в шарнирно-рычажной компоновке и каждая степень подвижности оснащена приводным устройством и требует синхронизации их работы управляющим автоматом.



Рис. 32. Разновидности БММ

ЗРМ — зубчато-рычажный механизм; ПЗМ — планетарно-зубчатый механизм; ТТМ — манипулятор с тросовыми тягами; ШРМ — шарнирно-рычажный механизм [34]



Способы реализации управления реализуются в зависимости от требований к перенастройке: ЗРМ, ПЗМ и ТММ без перенастройки; ШРМ с перенастройкой.

На рисунке 33 показана ПЗМ-компоновка с одним приводом ведущего звена.

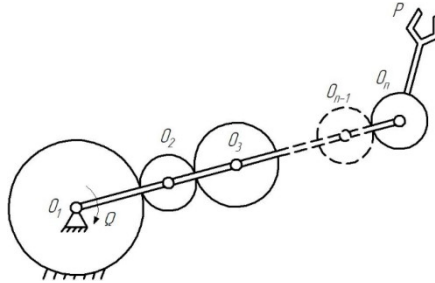


Рис. 33. Реализация безреверсного манипулятора через многократное зубчатое зацепление

Далее на рисунке 34 показана реализация БММ в цепном зубчато-рычажном (ЗРМ) исполнении.

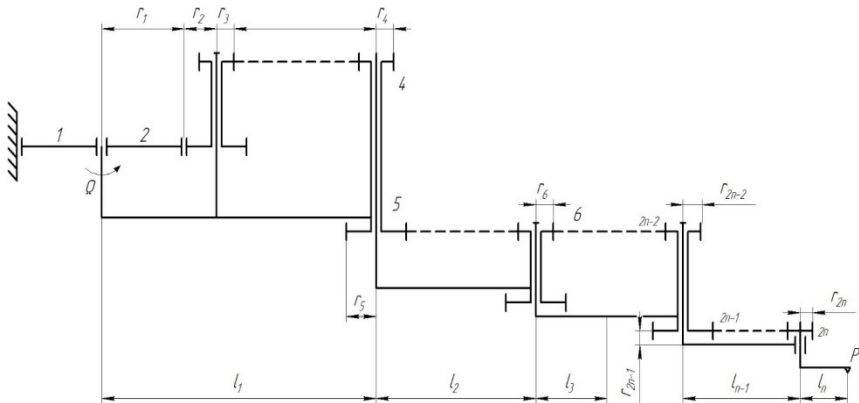


Рис. 34. Безреверсный манипулятор в n-цепном зубчато-рычажном исполнении



Структуру БММ удобно формировать в модульном исполнении. Для ШРМ реализации удобно кинематические пары оформить в виде унифицированных базовых модулей вращения и линейного перемещения, что ограничивает неоправданное многообразие конструкции БММ с одинаковыми эксплуатационными параметрами и назначением.

Модулем является унифицированный узел, характеризуемый структурной, функциональной и конструктивной самостоятельностью и который может стыковаться с другими модулями того же комплекта изделия [34].

2.2 Особенности модульного формирования движений мехатронных манипуляторов.

Алгоритм структурного проектирования

Одна из важнейших задач, которая решается при создании подобных простых манипуляторов, заключается в том, чтобы исключить необходимость размещения двигателей на подвижных звеньях механизма.

Один путь заключается в том, что для безреверсных манипуляторов без перенастройки (ПЗМ, ЗРМ, ТТМ компоновочных структур) единственный двигатель ведущего звена располагается на неподвижном основании, простые передачи к звеньям. Это классические циклоидальные манипуляторы. В них согласование вращений звеньев осуществляется кинематически, с помощью передач (цепных, тросовых или с жесткими звеньями, например, зубчатых).

В случае необходимости перенастройки траекторий рабочего органа безреверсных манипуляторов требуется для каждой степени подвижности (ШРМ — компоновка) отдельного двигателя с синхронизацией их работы посредством соответствующей СУ, в частности управляющего автомата, либо с применением операционной системы реального времени ОСРВ.



Другой путь — это когда движение по степеням подвижности задавалось посредством приложения импульсов импульсными двигателями, располагаемыми на неподвижном основании.

В качестве основных технических средств, на которых строятся подобные механизмы манипуляторов, используются импульсные двигатели и упоры (отражательные и фиксирующие). В этих случаях траектории формируются динамически, в силу уравнений свободного движения.

Во всех случаях принимается единый принцип формирования траекторий, при котором требуемые точки позиционирования совмещаются с точками мгновенной остановки, которые свойственны формируемым циклоидальным движениям.

При использовании безреверсных манипуляторов как с кинематическим, так и с динамическим принципом формирования траекторий без всяких изменений приходится приспособлять расстановку обслуживаемого оборудования к манипулятору. Это является существенным ограничением при планировании производственных участков.

Этап синтеза манипуляторов предусматривает проведение необходимых мероприятий в следующих направлениях:

- 1) определение конструктивных параметров компоновочных структур с соответствующими показателями качества;
- 2) синтез и анализ геометрии, кинематики, динамики и точности движений исполнительных механизмов;
- 3) синтез алгоритмов СУ, реализующих оптимальное управление;
- 4) выбор режима и технологии применения.

На этапе инженерного анализа проводится моделирование работы передачи в составе привода или в целом мехатронного манипулятора с учетом геометрии, кинематики, точности движений, динамических нагрузок, определения эксплуатационных показателей. Также здесь осуществляется имитационное моделирование движе-



ния исполнительных механизмов (создается визуально механизм с анимацией в течение рабочего цикла, с определением величины и длительности выстоя).

В отношении простоты реализации, надежности, стоимости предпочтительны зубчатая, зубчато-рычажная и тросовая передачи, но они имеют ограничения в перенастройке траекторий. Траектории в виде гипоциклоид являются плавными и гладкими, в точках возврата осуществляется не выстой, не конечное время, а только мгновенная остановка с мгновенным обращением скорости рабочего органа в нуль. Это создает определенные трудности: при движении вблизи точек возврата манипулятор должен надежно захватить переносимый объект или освободиться от него, установив на заданную позицию или сбросив в накопитель [30].

В последние годы все большее распространение получает модульное построение робототехнических и мехатронных манипуляционных средств автоматизации производства. Логика и конкретные пути их модульной реализации имеют определенные преимущества.

Принципы модульного построения оборудования представлены в «Применении методов дискретной математики при модульном синтезе мехатронных устройств» [31].

Принцип модульной реализации оборудования — это наиболее завершённый принцип унификации. Он эффективно применяется производителями промышленных роботов: Мицубиси, Фанук, Хитачи (Япония); Юнимэйшен (США); Бош (ФРГ); Электролюкс, ASEA (Швеция) и др.

Преимущества модульного принципа создания изделий:

- резко сокращаются сроки создания, освоения и эксплуатации;
- проектирование модульных изделий сводится к компоновке из стандартных частей, что может быть организовано на любом машиностроительном предприятии;



- возникает возможность практически неограниченного расширения номенклатуры ТС, включая оперативную компоновку различных их модификаций для конкретных разовых применений;
- в несколько раз сокращается себестоимость систем благодаря как удешевлению их частей при переходе к унифицированным серийным модулям, так и уменьшению структурной и параметрической избыточности;
- сокращаются расходы на разработку, эксплуатацию и ремонт технических систем;
- возрастает их технический уровень, включая прежде всего надежность, за счет применения хорошо отработанных стандартных модулей.

Недостатком модульного конструирования является необходимость использования в ряде случаев технических решений, менее выгодных с конструкторской точки зрения (увеличение числа соединений и снижение жесткости, утяжеление конструкции и т. п.). Однако этот недостаток в значительной мере компенсируется выгодами, присущими принципу агрегатно-модульного конструирования, особенно если учесть, что отмеченный недостаток не является универсальным и проявляется лишь при решении специальных технологических задач.

В основу функционально-модульного построения конструкции изделия заложены следующие принципы:

- инвариантность конструкций, обеспечивающая возможность их применения для различных видов технологии;
- переналаживаемость конструкций и взаимозаменяемость функциональных составных частей;
- конструктивная преемственность, возможность многократного применения функциональных составных частей;
- высокая технологичность, обеспечивающая интенсификацию производства.



Важнейшее преимущество данного подхода заключается в возможности построения конструкции изделия в виде многоуровневой иерархической модели и возможности декомпозиции конструкции на составные части, каждая из которых ориентирована на выполнение определенных функций.

Концепция модульного конструирования позволяет достигать необходимой компоновочной гибкости за счет комбинаций программируемых и непрограммируемых модулей и существенно упростить техническое обслуживание и ремонт благодаря их взаимозаменяемости.

Модулем является унифицированный узел, характеризуемый структурной, функциональной и конструктивной самостоятельностью и который может стыковаться с другими модулями того же компонента изделия. Структура определяет все возможные отношения между модулями [34].

Функциональная самостоятельность модуля означает решение им определенной задачи, например, задания движения по одной степени подвижности или служит опорой для других модулей.

Конструктивная самостоятельность модуля означает, что он может быть изготовлен или собран отдельно, а затем состыкован с другими модулями. Соединение модулей дает агрегат, в котором они представляют сборочные единицы (ГОСТ 23887-79), обладающие полной взаимозаменяемостью, возможностью сборки отдельно от других составных частей изделия и способностью выполнять определенную функцию самостоятельно или в составе изделия.

Агрегатно-модульная система может быть многоуровневой, на низшем уровне которой простые элементы [34].

Модуль должен:

- работать как самостоятельная система;
- быть гибким (адаптивным);
- обладать относительной автономностью;
- обеспечивать обмен информацией с другими модулями;
- быть заменяемым.



Принцип модульного проектирования позволяет рассматривать изделия как набор функциональных модулей: назначения, надежности, технологичности и т. д.

Использование в функциональных модулях принципов стандартизации — унификации и агрегатирования — позволяет максимально сокращать сроки проектирования и обеспечивать быструю сменяемость номенклатуры изделий. Изделие максимально комплектуется из унифицированных составных частей, включающих оптимальные для данного проекта решения. Сочетая их с элементами специального назначения, постепенно наращивая и комбинируя модули, проектировщик решает поставленную задачу.

Этот принцип позволяет сократить сроки подготовки производства новых изделий за счет максимального использования стандартных технологических решений.

Из базовых модулей с учетом их взаимосвязи можно получать элементарные механизмы (ЭМ), формируя тем самым модули соединения, совокупность которых можно представить в виде графа, а из графа получать структурную графовую модель всей компоновочной структуры.

Предлагаемая иерархическая система модульного синтеза состоит из следующих уровней:

- самый нижний уровень соответствует набору исходных базисных модулей;
- более высокий уровень — пара базисных модулей, охваченных связью (ЭМ);
- самый высокий уровень — структурная модель манипулятора (компоновочная структура), где объединены все ЭМ [30].


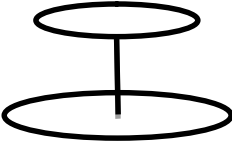
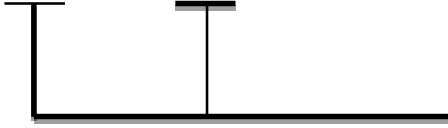


В случае реализации безреверсных манипуляторов с одним приводом ведущего звена в реализации компоновочных структур в планетарно-зубчатом механизме (ПЗМ), зубчато-роторном механизме (ЗРМ), тросовых тягах механизма (ТТМ) механизм является чисто передающим устройством, в котором входной и один из вы-



ходных валов составного ММ связаны передаточными отношениями $N_i = \omega_i/\pi$, где π — угловая скорость входного вала ведущего звена (для ШРМ — угловая скорость первого от стойки звена), ω_i — выходные угловые скорости ведомых звеньев.

Для ШРМ компоновки модуля [34] будут шарнирные соединения вместо зубчатых колес и соединительные звенья. Кроме этого, СУ исполнена по блочно-модульному принципу.

Базовые модули для таких компонентов представлены на рисунках 35.

Модуль	Условное обозначение	Наименование модуля
1		Неподвижное зубчатое колесо
2		Корончатое зубчатое колесо
3		Водило
4		Цепная передача, тросовые тяги
5		Соединительное звено

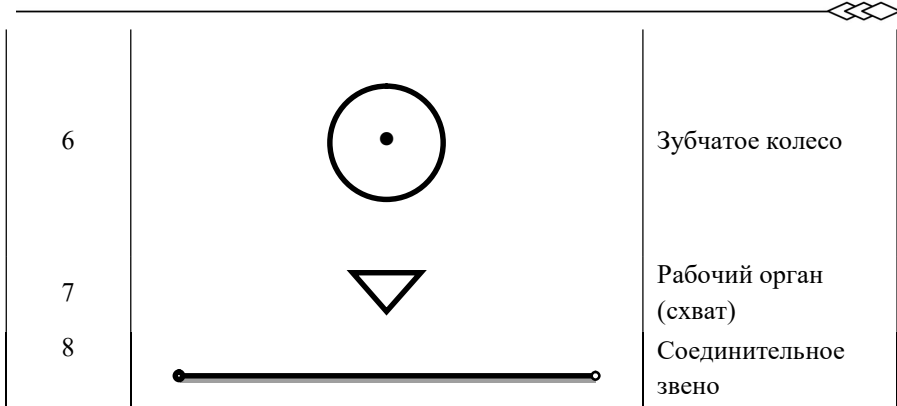


Рис. 35. Базовые модули

Базовые модули 1–7 необходимы для безреверсных мехатронных механизмов (БММ) с одним приводом, модули 8 и 9 для ШРМ реализации с перенастройкой путем синхронизации приводов, где соединительный модуль 8 служит для взаимного разворота звеньев.

БММ позволяют автоматизировать широкий спектр производственных операций и допускают гибкую перенастройку. Между перенастройками их СУ являются системами с жесткой логикой. Для компонок ПЗМ, ЗРМ и ТММ достаточно одного привода ведущего звена (перестройка отсутствует), для компоновки ШРМ необходимо обеспечить приводами каждую степень подвижности с синхронизацией их работы с помощью соответствующей СУ. Возможно также динамическое управление импульсными приводными двигателями [34].

Управляющий автомат для ШРМ позволяет поддерживать $N = \omega_2/\omega_1 = const$ при разгоне электродвигателем при нагрузке на рабочий орган; синхронизировать и регулировать время цикла работы БММ с технологическим оборудованием; корректировать траектории движения РО в рабочей зоне; синхронизировать движение звеньев по инерционным характеристикам в рабочих зонах.



Синхронизация работы БММ с оборудованием в рабочих зонах, особенно в положениях выстоя, обеспечивает максимальную эффективность: в этом случае работа начинается при срабатывании датчика положения при подходе РО к положению выстоя. Работа блока синхронизации аналогична работе в режиме разгона. Выбранная структура и схемотехника блока синхронизации позволяют обеспечить максимальное быстродействие БММ.

2.3 Задача управления с программной перенастройкой

Конструктивная реализация циклоидальных манипуляторов подразумевает исполнение устройств управления в двух вариантах:

- с программной перенастройкой;
- с жесткой логикой или с ограниченной перенастройкой.

В последнем варианте требуемые соотношения угловых скоростей задаются посредством зубчатых или цепных передач от одного центрального привода.

Привод циклоидальных манипуляторов выбирается в зависимости от требований, предъявляемых к их быстродействию, и от технологического оборудования, используемого с ним.

Основными параметрами регулирования приводом в этом случае является угловая скорость и установка начального положения руки. Угловая скорость выбирается исходя из быстродействия, в рабочем режиме стоит задача поддерживания, угловая скорость постоянна. Это реализуется с помощью простых стабилизаторов поддержания постоянства угловой скорости. Структурно это представлено на рисунке 36.

Исходное положение для звеньев руки конструктивно однозначно либо звенья сложены, либо распрямлены. Поэтому задача выхода механизма в начальное положение упрощается. Это осуществляется посредством датчиков положения звеньев и схемы управления электроприводом от клавиш «начальная установка». При замыка-



нии цепи начальной установки электродвигатель по датчику отрабатывает рассогласование и выводит звенья руки в начальное положение. В рабочем режиме данные цепи не используются, а лишь служат для отладки перед началом работы манипулятора. Выбор параметров электропривода осуществляется по известным методам для механизмов аналогичного класса.

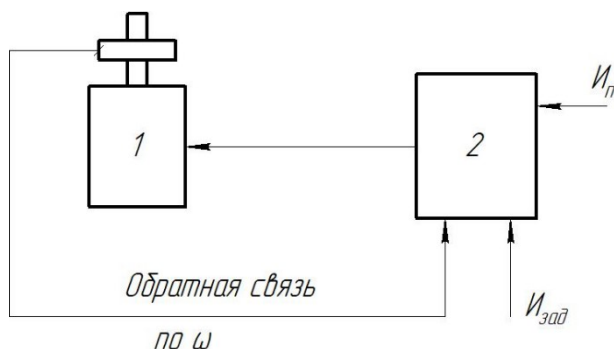


Рис. 36. Структурная схема электропривода циклоидального манипулятора с перенастройкой

Программно-перенастраиваемые циклоидальные манипуляторы содержат два звена с электроприводами на каждом. Закон управления звеньями задается в следующем виде:

$$\begin{aligned} x &= \cos \varphi_1 + \varepsilon \cos(N + 1)\varphi_1, \\ y &= \cos \varphi_1 + \varepsilon \cos(N + 1)\varphi_1, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где $N = \omega_2/\omega_1$, $\varepsilon = l_2/l_1$.

В этом случае траектория движения схвата осуществляется по циклоидальным кривым, характер и описание которых даны в главе 1.

Переход с одной циклоидальной кривой на другую осуществляется изменением параметров N и ε .

Реализация циклоидальных кривых возможна на основе управления частотой вращения приводных двигателей звеньев руки при



условии стабилизации поддержания требуемых номинальных значений $\omega_1 = const$ и $\omega_2 = const$.

Качество воспроизведения реализуемых траекторий схвата будет определяться характеристиками регуляторов частоты вращения исполнительных двигателей, которые должны с высокой точностью поддерживать заданные скорости вращения выходного вала, обеспечивая при этом установку различного значения этой скорости. Основным назначением подобных регуляторов является снижение погрешности поддержания скорости электрического двигателя при заданном значении выходного сигнала, тогда как момент нагрузки на выходном валу двигателя, например, из-за изменения конфигурации руки (изменения инерционных свойств), может значительно изменяться. Высокая статистическая и динамическая точность регулирования скорости обеспечивается охватом двигателя обратной связью по скорости в системе следящего электропривода.

На первом этапе проектирования СУ циклоидальных манипуляторов с перенастройкой определяется место использования данной СУ в составе робототехнологических линий (РТЛ), робототехнологических комплексов (РТК), транспортных операций либо в привязке к технологиям сварки, разметки, сверления и т. д. Так структурно СУ можно разделить по типу позиционного управления — транспортные операции, сверление, разметка, точечная сварка простых деталей (типа крышки, заглушки); по типу контурного управления — резка, сварка, нанесение рисунков орнамента.

При использовании в составе РТК, РТЛ возникают вопросы синхронизации их с оборудованием по временным характеристикам, т. е. $T_{ц} = T_{цм} + T_{обор}$. Но за счет высокого быстродействия ПР возможен вариант $T_{ц} = T_{обор}$, время $T_{цм}$ входит в $T_{обор}$ — режим параллеливания с оборудованием. Способы синхронизации вытекают из закона управления манипулятором. Синхронизация достигается за счет дискретного или непрерывного регулирования скоростями



звеньев, причем одновременно, и выбора участка регулирования на траектории вблизи рабочих зон или рабочих позиций.

Особенностью управления является то, что в рабочих зонах (точках) электроприводы не отключаются, а эти зоны совмещаются с точками «выстоя» (ТВ). ТВ характеризуются тем, что схват в них имеет мгновенное значение скорости, равное нулю, то есть схват останавливается, но вращение звеньев руки продолжается. Поэтому отпадает необходимость в применении специальных методов, известных из курса электропривода, при подходе робота к заданной точке. Это характеристики (законы) разгона и торможения. Электроприводы работают только в установившемся режиме $\omega_1 = const$, $\omega_2 = const$ на протяжении всего T_u .

На рисунке 37 изображены скоростные характеристики циклоидального манипулятора и промышленного робота с электроприводом. Линии *a* и *б* являются заданными точками позиционирования.

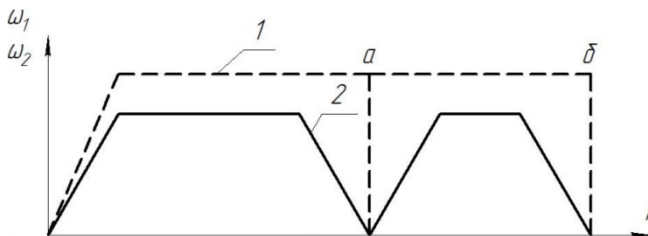


Рис. 37. Скоростные характеристики при выходе в заданное местоположение схвата: 1 — циклоидального манипулятора; 2 — промышленного робота

В силу этих обстоятельств повышается быстродействие руки (отсутствует торможение привода) и упрощается по сравнению с серийными подобными ПР система управления, упрощается структура электропривода, снижаются требования к датчикам, становится возможным применение простых схем электроприводов типа дискретных или непрерывных стабилизаторов скорости вращения.



2.4 Описание работы электроприводов

Электроприводы звеньев руки представляют собой импульсные стабилизаторы скоростей (ИСС) ω_1, ω_2 . Функциональная схема ИСС изображена на рисунке 38.

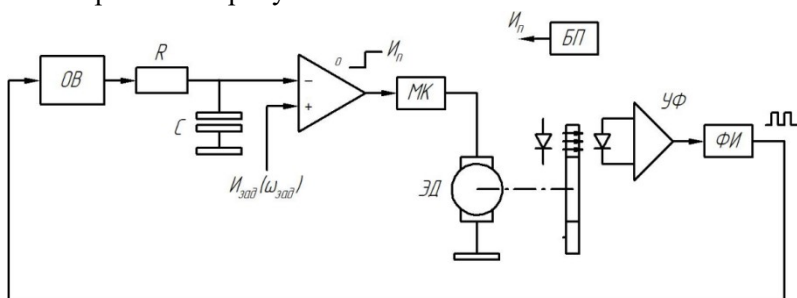


Рис. 38. Функциональная схема ИСС

ИСС состоит из блока питания (БП), одновибратора (ОВ), интегратора RC, компаратора (К), мощного ключа (МК), электродвигателя постоянного тока (ЭД), на валу которого находится фотодатчик в виде диска с отверстиями по окружности и свето- и фотодиодов: усилителя фотодатчика (УФ) и формирователя импульсов (ФИ). Скорость вращения задается подачей напряжения на прямой вход К, так как в этот момент напряжение на инвертирующем входе К равно нулю, а на его выходе устанавливается напряжение, равное источнику питания. Мощный ключ открывается, на ЭД подается полное напряжение питания и двигатель начинает разгоняться. С фотодатчика начинают поступать импульсы на ОВ с временем задержки. С выхода ОВ импульсы накапливаются в виде напряжения на интеграторе RC и конвертирующем входе К. В тот момент, когда напряжение на инвертирующем входе К превысит заданное $I_{зад}$, на его выходе появится нулевой потенциал. ЭД отключается от источника питания. Его скорость вращения уменьшается и уменьшается



напряжение на инвертирующем входе К. Когда оно становится меньше $I_{зад}$, на ЭД вновь попадает полное напряжение питания.

Так как постоянное напряжение на инвертирующем входе К содержит и переменную составляющую треугольной формы с частотой переключения фотодатчика и амплитудой, определяемой интегрирующим звеном RC, то и К переключается с этой частотой. В силу того, что К выполнен на базе операционного усилителя с коэффициентом усиления 10, то он способен выдавать сигналы управления при разнице напряжений на его входах до долей милливольт.

Последнее дает возможность поддерживать скорость вращения ЭД с нестабильностью $\sim 0.1\%$.

При изменении нагрузки на валу и изменении напряжения питания меняется скважность импульсов питания при неизменной частоте или скорости вращения ЭД.

Схема электропривода позволяет с заданной точностью поддерживать угловую скорость звена. Точность или нестабильность электропривода определяется коэффициентом усиления компаратора К, то есть выбором порога срабатывания или его чувствительности по входу. Изменяя значение $I_{зад}$, можно в широких пределах изменять скорость вращения электропривода в пределах диапазона регулирования ЭД. Схема электропривода предусматривает стыковку с микроЭВМ через ее стандартный интерфейс.

Автономный электропривод на каждое звено с обратной связью по угловой скорости позволяет на его базе создавать простые транспортные безреверсные мехатронные манипуляторы с повышенным быстродействием.

Алгоритмы и способы реализации защищены авторскими свидетельствами, информлистом ЦНТИ. СУ реализована в блочно-модульном положении.

Для общего случая алгоритм проектирования безреверсных манипуляторов представлен на рисунке 39.

Безреверсные мехатронные манипуляторы

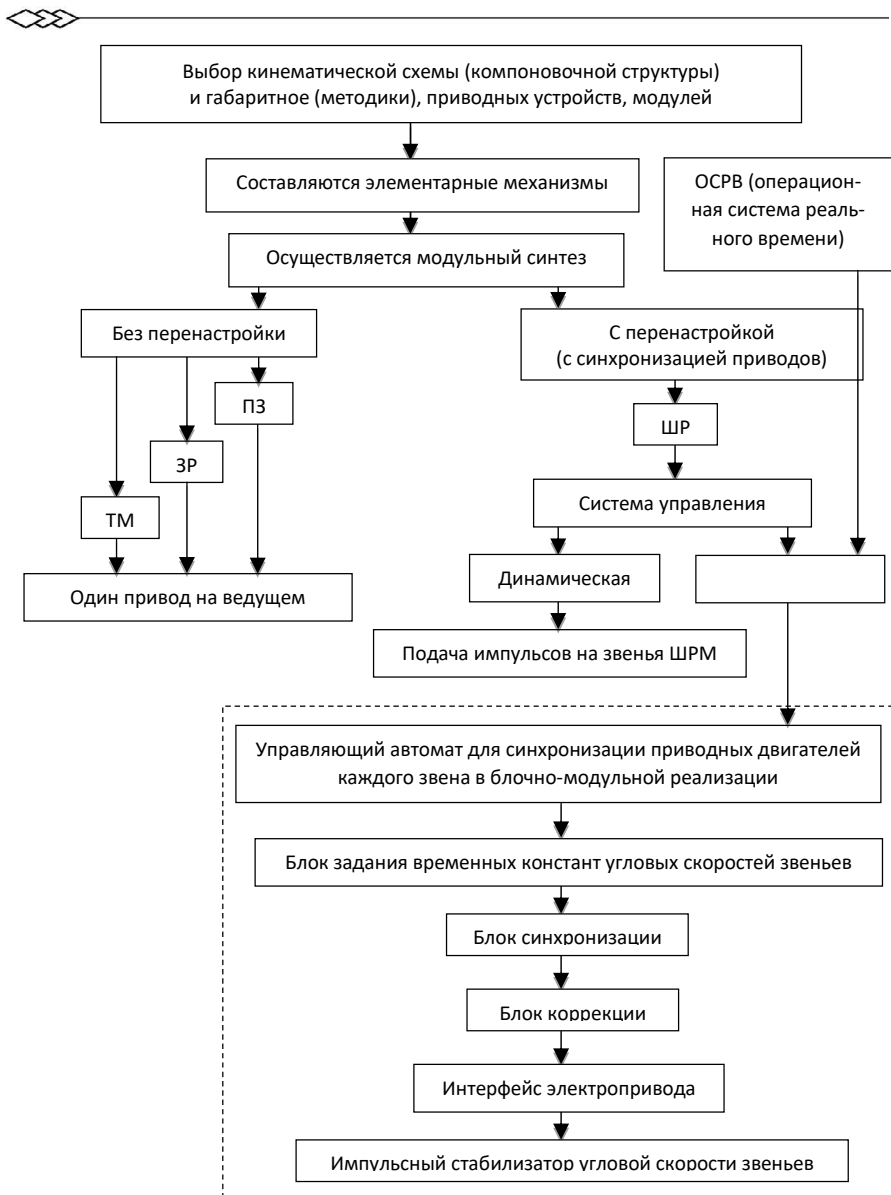


Рис. 39. Алгоритм структурного проектирования безреверсных мехатронных манипуляторов



2.5 Алгоритм структурного проектирования безреверсных манипуляторов

Безреверсные манипуляторы позволяют автоматизировать широкий спектр производственных операций и допускают гибкую перенастройку (переналадку). Между перенастройками их системами управления (СУ) являются системами с жесткой логикой. Для компоновок ПЗМ, ЗРМ и ТТМ достаточно одного привода ведущего звена (перенастройка отсутствует), для компоновки ШРМ необходимо обеспечить приводами каждую степень подвижности с синхронизацией их работы с помощью соответствующей СУ. Возможно также динамическое управление импульсными приводными двигателями. Алгоритм структурного проектирования безреверсных ММ приведен на рисунке 38.

Например, блок синхронизации позволяет поддерживать $N = \omega_2/\omega_1 = const$ при разгоне электродвигателей, при нагрузке на РО; синхронизировать и регулировать время цикла работы ММ с технологическим оборудованием; корректировать траектории движений в рабочей зоне; синхронизировать движение звеньев по инерционным характеристикам в рабочих зонах.

Синхронизация работы ММ с оборудованием в рабочих зонах, особенно в положениях выстоя, обеспечивает максимальную эффективность; в этом случае работа начинается при срабатывании датчика положения при подходе РО к положению выстоя. Работа блока синхронизации аналогична работе в режиме разгона. Выбранные структура и схемотехника блока синхронизации позволяют обеспечить максимальное быстродействие ММ.



2.6 Блочный-модульный способ построения системы управления

Из возможных вариантов построения СУ выбрана блочно-модульная структура построения СУ. На низшем уровне это использование ИСС с ручным вводом и отладкой манипулятора (в транспортных роботах). Этот модуль обладает невысокой точностью, имеется ограниченность использования оборудования. Он принят в качестве базового модуля СУ. Для повышения точности позиционирования вводится блок синхронизации (БС) электроприводов звеньев, который расширяет функциональные возможности СУ. Дополнительно разработаны блок коррекции траектории в точках выстоя и блок задания временных констант и угловых скоростей. Основную нагрузку в управлении и синхронизации берет на себя блок синхронизации (БС).

2.6.1 Блок синхронизации

БС позволяет выдерживать $N = const$ при разгоне ЭД1, ЭД2, под нагрузкой; синхронизировать и регулировать время цикла ЦР с технологическим оборудованием (рис. 40);

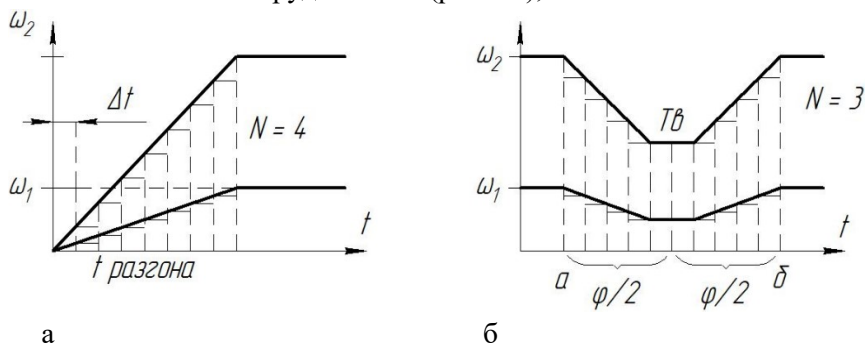


Рис. 40. Синхронизация электроприводов при разгоне



синхронизировать по инерционным характеристикам в рабочих зонах (рис. 41); производить корректировку траектории схвата в рабочей зоне (рис. 42).

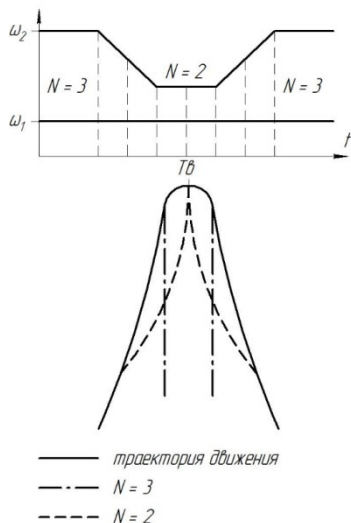


Рис. 41. Синхронизация по инерционным характеристикам

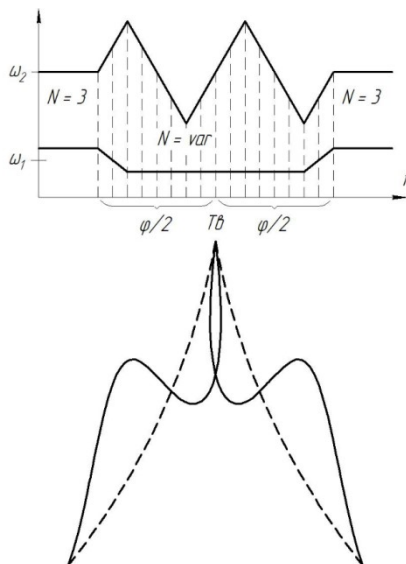


Рис. 42. Корректировка траектории схвата

2.6.2 Блок коррекции

При использовании циклоидальных манипуляторов с предельными значениями угловых скоростей звеньев в транспортных операциях происходит смещение точек выстоя (ТВ) в сторону движения. Поэтому для устранения этого эффекта был разработан блок коррекции (БК).

Блок коррекции осуществляет контроль и корректировку траектории движения в рабочих зонах, БК работает совместно с датчиками ТВ.



Рассмотренные выше блоки ИСС, БС и БК позволяют управлять циклоидальным манипулятором в составе РТЛ и РТК, осуществлять переналадку под оборудование, но не дают возможности синхронизировать робот в каждой точке выстоя индивидуально. Приходится подстраиваться под техпроцесс в целом.

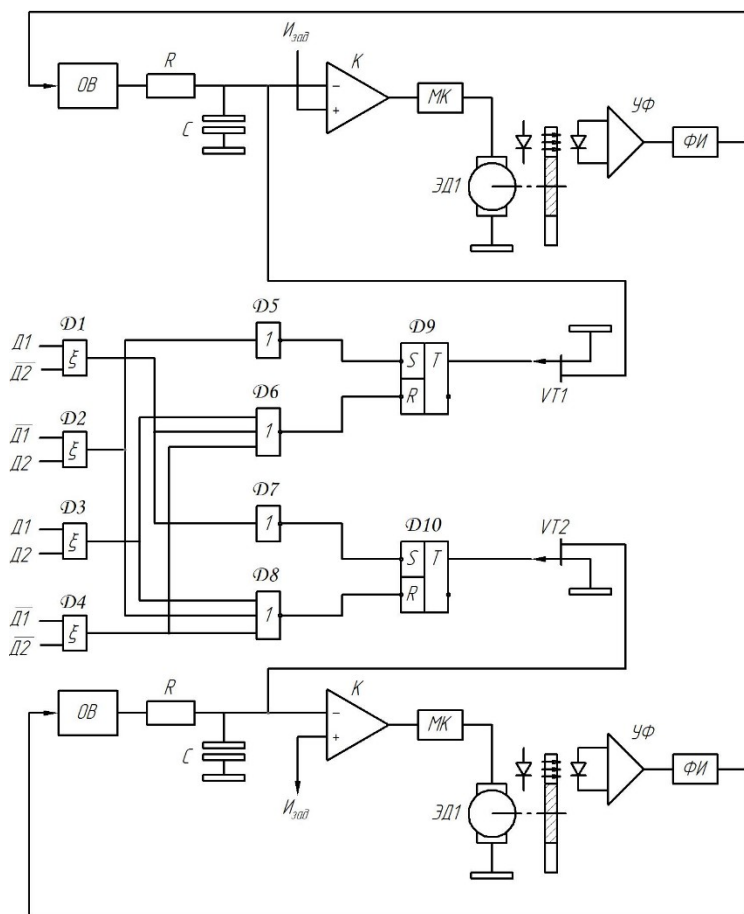


Рис. 43. Блок коррекции



Для расширения функциональных возможностей и более полного использования по быстрдействию циклоидальных манипуляторов был разработан блок задания временных констант и угловых скоростей блок задания временных констант (БВК) и угловых скоростей (УС).

БВК и УС выполняют следующие функции:

1. Хранение значений времен, значение угловых скоростей.
2. Задание режимов синхронизации и переход к слежению с восстановлением начального состояния.
3. Обеспечение режимов синхронизации и переход к слежению с восстановлением начального состояния.
4. Переход к режиму коррекции по ТВ.

Более подробно реализация управления на основе ОСПВ (операционной системы реального времени), а также особенности построения СУ для ШРМ и особенности импульсного управления рассмотрены далее.

2.7 Операционные системы реального времени безреверсных манипуляторов

Разработка операционных систем реального времени (ОСПВ) для управления безреверсных мехатронных манипуляторов должна соответствовать следующим требованиям:

– открытость — имеется необходимость редактирования исходного кода с целью настройки операционной системы под кинематическую схему манипулятора и электронные компоненты системы управления;

– обладать архитектурой клиент-сервер, так как такая архитектура обеспечивает повышенную надежность, масштабируемость и высокую отказоустойчивость.

– обладать возможностью симуляции траектории в целях избежания столкновений;



– иметь простой код программирования сложных траекторий движений рабочего органа манипулятора.

В настоящее время спектр операционных систем реального времени очень широк, в таблице 3 рассмотрены краткие характеристики наиболее распространенных.

Таблица 3

Краткие характеристики ОСРВ

ОСРВ	Архитектура	Уровни приоритетов	Пределы	Стоимость (USD)	Объем
VxWorks (Unix)	Монолитная	256	Жесткие	-20000	22 К
QNX (Unix)	Клиент-сервер	32	Мягкие	300-6000	60 К
LynxOS (Unix)	Клиент-сервер	255	Жесткие	10000	256 К
Linux CNC (Unix)	Клиент-сервер	20	Мягкие	0	58 М
Windows NT	Клиент-сервер	32	Мягкие	314	124 М

Большинство ОСРВ в представленной таблице является с закрытым исходным кодом, таким образом, возникает проблема доступа к любому компоненту операционной системы, исключение составляет LINUX CNC, которая распространяется свободно и с открытым кодом и обладает архитектурой клиент-сервер.

Основные компоненты для программного управления LINUX CNC: контролер движения, контролер ввода/вывода дискретных модулей и графический интерфейс. На рисунке 43 показана реализация управления приводами манипулятора с помощью системы Linux CNC.

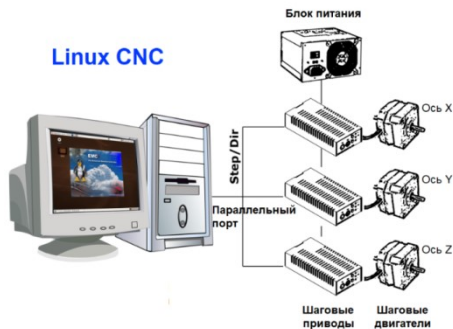


Рис. 44. Основные компоненты программного управления

Настройка манипулятора производится с помощью следующих конфигурационных файлов:

1. *.ini файл переопределяет установки по умолчанию, которые компилируются, также предоставляет настройки, которые читаются Hardware Abstraction Layer.

Ниже представлен фрагмент файла *.ini:

```
[TRAJ]
axes = 3
coordinates = x y z
linear_units = mm
angular_units = degree
cycle_time = 0.010
default_velocity = 560.0
max_velocity = 5600.00
[AXIS_0]
type = angular
home = 0.0
max_velocity = 1000
max_acceleration = 30000.0
stepgen_maxaccel = 36000.0
```



```
scale = 8.88
ferror = 1
min_ferror = .25
```

В разделе [TRAJ] указаны количество осей и их настройки, в разделе [AXIS_0] настройки первой оси.

В *.hal файл загружают процессные модули и обеспечивают связи между сигналами ЕМС и определенными пинами аппаратного обеспечения. Далее указан фрагмент файла:

```
loadrt rotatekins
...
net xenable => parport.0.pin-03-out
net ystep => parport.0.pin-04-out
setp parport.0.pin-04-out-reset 1
...
net xdir=> parport.0.pin-07-out
...
loadusr-W scaragui
net j0 axis.0.joint-pos-fb scaragui.joint0
```

Как и любая другая система ЧПУ, Linux CNC задает траектории движения циклоидального манипулятора в G-кодах, где под осью X задается угол поворота первого звена в градусах, под осью Y — угол поворота второго звена и под осью Z — подъем и опускание схвата манипулятора в миллиметрах. Пределы вращения звеньев вокруг своей оси не ограничены. Значения вращений звеньев задаются функцией G91 приращением, что дает более значительную гибкость при программировании траектории и позволяет их комбинировать [34].



Генерация управляющей программы в цилиндрической системе координат реализована в среде Mathcad и представлена на рисунке 45 [34].

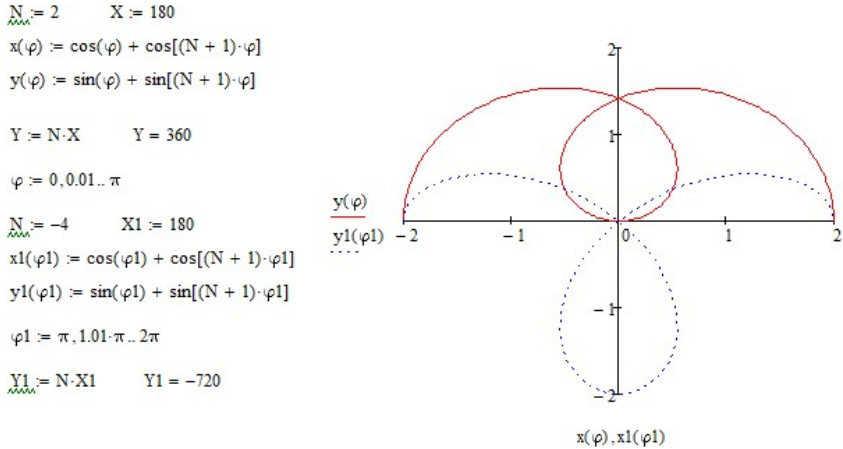


Рис. 45. Генерация управляющей программы в среде Mathcad

Сгенерированная управляющая программа перенесена в файл с расширением *.gnc.

Симуляция траектории в системе LINUX CNC идентична сгенерированной в среде Mathcad. Данная операционная система позволяет создавать сложные траектории и комбинировать их в пределах рабочей зоны манипулятора с минимальным количеством кадров управляющей программы.

Безреверсные мехатронные манипуляторы

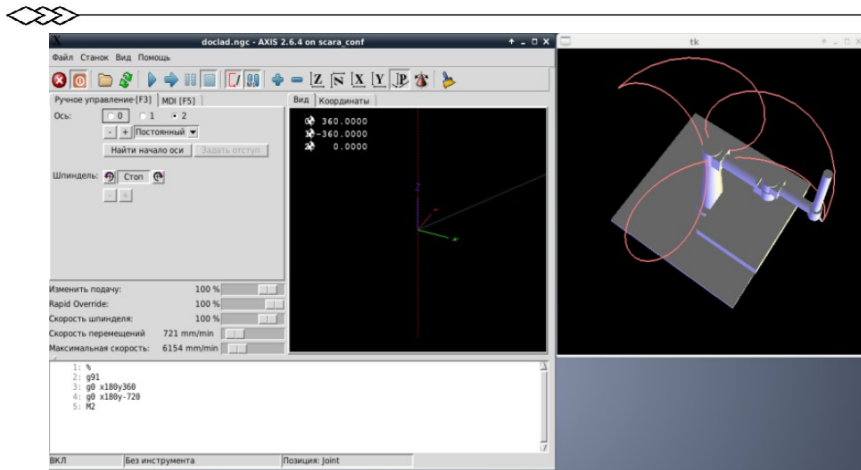


Рис. 46. Симуляция рабочего органа в системе LINUXCNC



Глава 3

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМОВ ПРОГРАММНЫХ ДВИЖЕНИЙ ШАРНИРНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

Применяя программные манипуляторы, необходимо решить ряд сложных задач по обеспечению требуемых программных движений звеньев и их координации. При этом требуется обработка большого объема информации, а поскольку такие системы функционируют в условиях изменяющейся производственной обстановки, то они должны иметь управляющую систему на основе ЭВМ с достаточно большой емкостью памяти и хорошим быстродействием.

Обычно при организации управления подобных систем приходится решать две задачи:

1. Определять целенаправленные программные движения звеньев с учетом конструктивных ограничений.
2. Производить синтез закона управления для реализации требуемых программных движений при наличии разного рода помех и возмущений, решая при этом задачу стабилизации программных движений.

Под программными движениями понимается допустимое движение исполнительного механизма, переводящее его из некоторого начального состояния в требуемое целевое состояние.

В большинстве случаев исполнительный механизм шарнирных манипуляторов представляет собой разомкнутую кинематическую цепь и при его движении каждое последующее звено динамически нагружает предыдущее, т. е. происходит динамическое воздействие звеньев и их приводов [34]. Степень этого взаимодействия зависит



от массоинерционных характеристик звеньев, которые существенно влияют на величину пиковых инерционных нагрузок в системе. Рабочая скорость и точность позиционирования также определяются инерционными и жесткостными характеристиками звеньев манипулятора.

Для повышения точности позиционирования обычно увеличивают жесткость звеньев, что ведет к возрастанию их массы. В результате у большинства исполнительных механизмов отношение массы подвижных элементов к грузоподъемности составляет не менее 10:1, что приводит к ухудшению инерционных характеристик манипуляционных систем.

Чтобы улучшить динамические свойства манипулятора, представляющего собой по существу механическую колебательную систему, необходимо получение возможно большей информации о его собственных частотах и формах колебаний. При этом представляется целесообразным принимать расчетную модель манипулятора в виде кинематической цепи с абсолютно жесткими звеньями, соединенными друг с другом посредством упругих шарнирных сочленений. Такая модель позволяет исследовать жесткие и колебательные свойства манипулятора при изменении его конфигурации.

В ряде случаев необходимо описывать динамические процессы, происходящие как в механической системе (в исполнительном механизме), так и в приводных устройствах и системе управления манипуляционной системы. Примером достаточно общих и эффективных методов исследования подобных сложных систем могут служить методы спектрального анализа и структурных преобразований, дающие возможность исследовать такие устройства на основе построения частотных характеристик и определения передаточных функций.

При анализе вынужденных колебаний механической цепи манипулятора необходим учет сил сопротивления, поскольку они оказываются на величине амплитуд резонансных колебаний. Специфика



работы заключается в том, что процесс перехода схвата из одного положения в другое включает в себя три фазы движения исполнительного механизма: разгон, установившееся движение и торможение. Наиболее важной из них является фаза торможения (фаза позиционирования) исполнительных органов, поскольку ею в конечном итоге определяется точность позиционирования — схвата с грузом.

Увеличение быстродействия требует ускорения процессов разгона и торможения исполнительного механизма, что неминуемо ведет к росту инерционных перегрузок и возникновению колебательных движений звеньев. Упругие колебания, возникающие при разгоне, не оказывают существенного влияния на точность позиционирования и быстродействие, поскольку они успевают затухнуть на этапе установившегося движения.

Колебания, возникающие при торможении, крайне неблагоприятны для выполняемой технологической операции, так как увеличивают полное время движения схвата и снижают точность его позиционирования.

Наиболее эффективно и плавно можно гасить кинетическую энергию исполнительного механизма при торможении с помощью активного тормозного устройства. Силы торможения при этом зависят от модуля ускорения, конструкции тормозного устройства и выбранного закона торможения, реализуемого системой управления.

Так как коэффициенты инерции в выражении кинетической энергии механической цепи зависят от углов взаимного разворота звеньев (конфигурации исполнительного механизма), динамика манипулятора описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений, которую в общем случае аналитически проинтегрировать не удастся.

Во всех этих уравнениях существенную роль играют управляющие моменты, действующие на исполнительный механизм и еще



более затрудняющие проведение теоретического анализа. Эти дополнительные трудности можно обойти, если допустить использование импульсивных управлений, действующих в первой (разгонной) и третьей (тормозной) фазах движения. Тогда основной процесс движения механической цепи манипулятора будет происходить в режиме свободных движений по инерции. Эти естественные движения механизма по инерционным взаимовлияниям являются самоуравновешенными и знание свойств позволяет правильно формировать управляющие воздействия для реализации требуемых программных движений. Таким путем можно отыскивать собственные траектории свободного движения манипулятора, удовлетворяющие заданным граничным условиям для схвата.

В результате приходим к значительно более простой и наглядной задаче управления угловыми скоростями звеньев и анализу их последующих свободных движений. Значительно упрощается при этом и вопрос о построении оптимальных режимов движения, минимизирующих тот иной критерий оптимальности. Именно на этом пути можно рационально использовать кинематическую избыточность многозвенного манипулятора, которая всегда имеет место для высокоманевренных манипуляционных систем.

Таким образом, анализ импульсных реакций механической цепи позволяет не только оценить локальную чувствительность различных степеней свободы к управляющим воздействиям (которая во многом аналогична известным коэффициентам влияния в статистике пространственных конструкций), но и дает возможность строить рациональную структуру режима управления путем перехода от мгновенных импульсов к протяженным во времени воздействиям.



3.1 Импульсные режимы управления движением шарнирного многозвенника

В рассматриваемой задаче о движении механической цепи шарнирного многозвенника под действием импульсных шарнирных моментов первая и последняя фазы движения по существу однотипны и сводятся к мгновенному (ударному) изменению угловых скоростей звеньев. Сам процесс такого изменения угловых скоростей удобно описывать посредством уравнений импульсных движений по Лагранжу, приведенных в работе.

Эти уравнения легко получаются из обычных уравнений Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial T}{\partial q} = Q, \quad (3.1)$$

если $Q(t) = M\delta(t)$, где $\delta(t)$ — функция Дирака, а M — величина импульсного силового момента в шарнире манипулятора.

Интегрируя это уравнение на малом промежутке времени действия импульса, получим уравнение для импульсных движений манипулятора:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} - \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right)_0 = M, \quad (3.2)$$

где $\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right)_0$ — кинетический момент механической цепи манипулятора до приложения импульса, а $\frac{\partial T}{\partial \dot{q}}$ — после приложения импульса.

Эта же запись справедлива для системы с произвольным числом n степеней свободы, если под q подразумевать столбец обобщенных координат системы, а под $\frac{\partial T}{\partial \dot{q}}$ — столбец соответствующих производных, а именно:



$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix}; q = \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix}; \frac{\partial T}{\partial i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial i_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial T}{\partial i_n} \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Выражение кинетической энергии системы T при этом следует брать в виде:

$$T = \frac{1}{2} \dot{q}^T A(q) \dot{q}, \quad (3.4)$$

где $A(q)$ — квадратная матрица коэффициентов инерции системы, элементы которой зависят от текущей конфигурации кинематической цепи манипулятора, т. е. от столбца координат q . Используя в дальнейшем в качестве обобщенных координат межзвенные углы φ , характеризующие относительные повороты звеньев, запишем уравнение импульсных движений согласно формулам (3.2) и (3.4) в виде:

$$A(\varphi_0)(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_0) = M, \quad (3.5)$$

где под M также подразумевается матрица — столбец импульсных шарнирных моментов, приложенных в один и тот же момент времени во всех шарнирах.

Приращения угловых скоростей звеньев выражаются отсюда следующим образом:

$$\Delta \dot{\varphi} = A^{-1}(\varphi_0) M = \frac{adj(A)}{|A|} M, \quad (3.6)$$

где $adj(A)$ — матрица, присоединенная к A , т. е. транспонированная матрица алгебраических дополнений матрицы A . Матрицу $A^{-1} = B$ можно интерпретировать как матрицу динамических коэффициентов влияния (ДКВ), так как ее элемент b_{ik} характеризует приращение угловой скорости i -го звена под действием импульсного момента, приложенного в k -м шарнире.

Вместе с тем из соотношения (3.5) легко могут быть найдены значения импульсных моментов, обеспечивающих требуемое приращение $\Delta \dot{\varphi}$ угловых скоростей звеньев манипулятора. Тем самым



можно вывести на тот режим свободного движения по инерции, в котором он достигнет заданного конечного импульса и будет остановлен в нем посредством тормозного импульса.

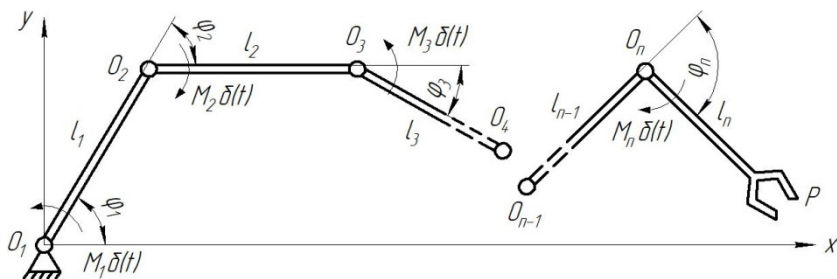


Рис. 47. Схема механической цепи многозвенника под действием импульсных моментов

Процесс свободного движения механической цепи манипулятора требует специального рассмотрения и решается в общем случае путем численного расчета с помощью ЭВМ. В отдельных случаях возможно построение и аналитических решений. К числу таких случаев можно отнести, например, режим свободного движения двухзвенного шарнирного манипулятора в горизонтальной плоскости. Рассмотрим подробнее свойства и возможности импульсных режимов, так как именно они формируют необходимые начальные и конечные условия для траекторий свободного движения и непосредственно характеризуют управляющие воздействия на систему. В частности, при наличии кинематической избыточности в схеме манипулятора можно ставить вопрос о выборе оптимального импульсного воздействия, минимизирующего какой-либо критерий качества.

Одним из наиболее естественных критериев для данной задачи является величина кинетической энергии механической цепи манипулятора, так как, с одной стороны, при разгоне эта величина опре-



деляет значения скоростей звеньев в режиме последующего свободного движения манипулятора, а с другой, при торможении она характеризует то рассогласование, которое следует ликвидировать оптимальным образом.

Ввиду того, что задачи оптимального импульсного разгона и оптимального импульсного торможения по существу идентичны друг другу, они могут рассматриваться как одна задача при условии, что управляющие импульсы силового момента прикладываются во всех шарнирных узлах манипулятора одновременно.

Переходя к математической постановке этой задачи, обратимся к уравнению импульсных движений (3.2) и, полагая в нем $q = \varphi$, домножим его на $\dot{\varphi}^T = (\dot{\varphi}_0 + \Delta\dot{\varphi})^T$. В результате получим:

$$\dot{\varphi}^T \left[\frac{\partial T}{\partial \varphi} - \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right)_0 \right] = \dot{\varphi}^T M. \quad (3.7)$$

С учетом соотношений

$$\dot{\varphi}^T \frac{\partial T}{\partial \varphi} = 2T; \quad \dot{\varphi}_0^T \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right)_0 = 2T_0 \quad (3.8)$$

и используя формулу (3.6), имеем:

$$2(T - T_0) = \dot{\varphi}^T M - M^T B \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right)_0, \quad (3.9)$$

откуда получаем:

$$2\Delta T = M^T \left[\dot{\varphi}_0 + B \left(M - \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right)_0 \right) \right]. \quad (3.10)$$

Импульсное приращение кинетической энергии манипулятора выражается как сумма линейной и квадратичной форм от M . Так как квадратичная форма неотрицательна, внутренний экстремум ΔT по M может быть минимумом, не представляющим практического интереса. Наибольшее же значение ΔT достигается на границе, определяемой допустимыми значениями компонент столбца M .

Если в качестве нормы столбца принять квадратичную форму:

$$M^T R M = \text{const} = \rho, \quad (3.11)$$



где R — положительно определенная весовая матрица, то задача максимизации ΔT по M при ограничении (3.11) сводится к классической задаче на условный экстремум. Образуя функционал:

$$F = M^T B M + M^T \left[\dot{\varphi}_0 - B \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right)_0 \right] - \lambda M^T R M, \quad (3.12)$$

где λ — лагранжев множитель, приходим к следующим условиям экстремальности:

$$\frac{dF}{dM} = 2(B - \lambda R)M + \dot{\varphi} - B \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) = 0, \quad (3.13)$$

$$M^T R M = const = \rho. \quad (3.14)$$

Эта система состоит из n неоднородных линейных алгебраических уравнений относительно компонент столбца M и одного квадратичного и в принципе позволяет определить искомые оптимальные значения M и λ . В том частном случае, когда первоначально звенья манипулятора неподвижны, т. е. когда:

$$\dot{\varphi}_0 = \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right)_0 = 0; \Delta \dot{\varphi} = \dot{\varphi}. \quad (3.15)$$

Поставленная задача существенно упрощается и сводится к стандартной проблеме собственных значений. А именно требуется найти собственные числа λ и отвечающие им собственные столбцы M , удовлетворяющие матричному уравнению:

$$[B - \lambda R]M = 0. \quad (3.16)$$

Значение параметра нормы ρ из формулы (3.11) не входит в решение данной задачи.

В некоторых случаях вместо ограничения нормы типа (3.11) могут использоваться другие ограничения. В частности, если зафиксировать величину углового кинетического момента манипулятора относительно его первого шарнира:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} = \dot{\varphi}^T Col_1 A = M, \quad (3.17)$$

где $Col_1 A$ — первый столбец матрицы A , то условие связи на компоненты столбца M примет вид (с учетом того, что $\dot{\varphi} = A^{-1}M$):



$$M^T B Col_1 A = M, \quad (3.18)$$

и функционал F тогда будет:

$$F = \frac{1}{2} M^T B M - \lambda M^T B Col_1 A. \quad (3.19)$$

Искомые значения M и λ найдутся из условия $\frac{\partial F}{\partial M} = 0$, имеющего вид:

$$M - \lambda Col_1 A = 0 \quad (3.20)$$

и рассматриваемого совместно с условием (3.18). Искомый столбец M оказывается в этом случае пропорциональным первому столбцу матрицы A , причем коэффициент пропорциональности λ согласно (3.18) есть:

$$\lambda = \frac{M}{Col_1^T A B Col_1 A}. \quad (3.21)$$

Тем самым получаем формальное решение поставленной задачи об определении оптимального импульсного воздействия, максимизируя его величину кинетической энергии механической цепи шарнирного многозвенного манипулятора.

Для выяснения конкретных особенностей построенных режимов импульсного управления рассмотрим примеры двух- и трехзвенных манипуляторов, имеющих широкое распространение в практике манипуляторостроения.

3.2 Оптимизация разгонно-тормозных импульсов для плоского двухзвенника

Рассмотрим шарнирный двухзвенник, схема которого приведена на рисунке 48. Обозначим декартовы координаты полюса схвата как x , y .

Запишем их выражение через шарнирные углы:

$$\begin{aligned} x &= l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2), \\ y &= l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2). \end{aligned} \quad (3.22)$$

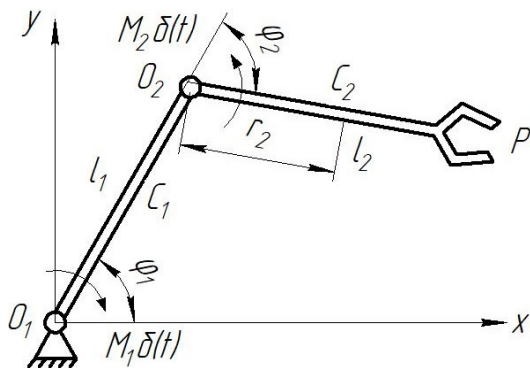


Рис. 48. Схема механической цепи двухзвенника под действием импульсных моментов $M_1\delta(t)$ и $M_2\delta(t)$

Полагая, что момент инерции первого звена относительно оси его вращения есть J_1 , а второе звено характеризуется массой m_2 и центральным моментом инерции J_2 , запишем кинетическую энергию двухзвенника в виде следующей квадратичной формы:

$$T = \frac{1}{2} [\varphi_1 \varphi_2] [A(\varphi_2)] \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix}, \quad (3.23)$$

причем матрица инерции $A(\varphi_2)$ имеет следующее выражение:

$$A(\varphi_2) = \begin{bmatrix} J_1 + m_2 l_1^2 + J_2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos \varphi_2 & J_2 + m_2 l_1 l_2 \cos \varphi_2 \\ J_2 + m_2 l_1 l_2 \cos \varphi_2 & J_2 \end{bmatrix}, \quad (3.24)$$

где введены безразмерные параметры α и β , характеризующие инерционные свойства звеньев:

$$\alpha = \frac{J_1 + m_2 l_1^2}{m_2 l_1 l_2}; \quad \beta = \frac{J_2}{m_2 l_1 l_2}. \quad (3.25)$$

Используя эту матрицу, обратимся к рассмотренной выше задаче оптимизации ΔT при ограничении нормы столбца M , т. е. при условии (3.11) и выполнении отношения (3.15). При этом размерный множитель $m_2 l_1 l_2$ будем брать в безразмерной форме. Тогда обратная ей матрица выразится следующим образом:



$$B = \frac{\text{adj}A}{\det A} = \frac{1}{(\alpha\beta - \cos^2 \varphi_2)} \begin{bmatrix} \beta & -\beta - \cos \varphi_2 \\ -\beta - \cos \varphi_2 & \alpha + \beta + 2 \cos \varphi_2 \end{bmatrix}, \quad (3.26)$$

где $\text{adj}A$ — матрица, присоединенная к A . Находим ее собственные числа, являющиеся корнями характеристического уравнения:

$$|B - \lambda E| = \lambda^2 - \lambda \frac{\alpha + 2\beta + 2\cos \varphi_2}{\alpha\beta - \cos^2 \varphi_2} + \frac{1}{\alpha\beta - \cos^2 \varphi_2} = 0 \quad (3.27)$$

и равные

$$\lambda_{1,2} = \frac{\frac{\alpha}{2} + \beta + \cos \varphi_2 \pm \sqrt{\left(\frac{\alpha}{2} + \cos \varphi_2\right)^2 + (\beta + \cos \varphi_2)^2}}{\alpha\beta - \cos^2 \varphi_2}. \quad (3.28)$$

Эти собственные числа характеризуют наибольшую и наименьшую инерционности двухзвенника, которые должны преодолеть управляющие моменты M_1, M_2 для разгона и торможения механической цепи манипулятора.

Соответствующие этим числам компоненты столбца моментов M есть собственные векторы системы (2.16) и они даются следующим выражением:

$$M = \begin{bmatrix} \beta + \cos \varphi_2 \\ \beta - \lambda(\alpha\beta - \cos^2 \varphi_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta + \cos \varphi_2 \\ -\frac{\alpha}{2} - \cos \varphi_2 \mp \sqrt{\frac{\alpha^2}{4} + \beta^2 + \alpha \cos \varphi_2 + 2 \cos \varphi_2 (\beta + \cos \varphi_2)} \end{bmatrix}. \quad (3.29)$$

При этом столбец, отвечающий наименьшему $\lambda = \lambda_1$, имеет обе компоненты одного звена и отвечает минимальному приращению кинетической энергии двухзвенника при фиксированной норме столбца M .

Оба звена в этом случае совершают синфазное движение, т. е. ускоряются (или замедляются) в одном и том же направлении. Для наибольшего же $\lambda = \lambda_2$ компоненты столбца M имеют противоположные знаки и звенья манипулятора в этом случае ускоряются



(или замедляются) противофазно, причем изменение кинетической энергии достигает при этом наибольшей величины.

Таким образом, построенные выражения (3.28) синтезируют оптимальный закон импульсного разгона для любой исходной конфигурации двухзвенника, определяемой углом φ_2 . Эти же значения моментов могут быть использованы и для оптимального импульсного торможения при том условии, что начальные значения угловых скоростей звеньев удовлетворяют выражению (3.5), т. е. находятся в определенном соотношении друг с другом. Если же они в текущей конфигурации двухзвенника не удовлетворяют этому соотношению, то оно может оказаться выполненным в другой конфигурации, проходимой в процессе свободного движения звеньев манипулятора.

Основное достоинство построенного оптимального решения заключается в простоте полученного результата, позволяющего синтезировать импульсный разгон в любой исходной конфигурации двухзвенника. Эта простота в немалой степени обусловлена принятой нормировкой управляющего момента в виде квадратичной формы (3.11). На практике нормировка управляющих моментов обычно имеет другой характер, будучи, например, заданной соотношениями:

$$|M_i| \leq M_i; M_i > 0; i = 1, 2. \quad (3.30)$$

Область допустимых значений M_i в этом случае представляет собой прямоугольник, причем значения управлений в оптимальных режимах располагаются, как правило, в его вершинах. Если в качестве критерия оптимальности по-прежнему рассматривать кинетическую энергию двухзвенника, то в данной постановке приходим к стандартной задаче определения экстремума квадратичной формы:

$$T = \frac{1}{2} M^T B M, \quad (3.31)$$

при наличии линейных ограничений (3.9).

Задачам такого рода посвящена обширная литература [24–26] и их решение обычно ищут численными методами. Однако в рас-



смаатриваемом случае ввиду малой размерности задачи и достаточно простой формы области допустимых значений для M_i нетрудно построить ее аналитическое решение. Действительно из самой структуры выражения (3.10), которое записывается согласно (3.5) в виде:

$$T = \frac{1}{2(\dot{\alpha}\beta - \cos^2 \varphi_2)} \cdot$$

$$\cdot [M_1^2 \beta + M_2^2 (\alpha + \beta + 2\cos \varphi_2) - 2M_1 M_2 (\beta + \cos \varphi_2)], \quad (3.32)$$

следует, что из четырех вершин прямоугольника допустимых значений M_i величина T принимает различные значения только в смежных вершинах, отвечающих одновременной смене знаков M_1 и M_2 , величина T одинакова. При этом, как видно из выражения (3.11), для любой заданной исходной конфигурации двухзвенника, определяемой углом φ_2 , максимум T достигается в той паре вершин, где последнее слагаемое в квадратной скобке (3.11) положительно, т. е. где знаки моментов M_1 и M_2 удовлетворяют соотношению:

$$\operatorname{sgn} M_1 M_2 = -\operatorname{sgn}(\beta + \cos \varphi_2). \quad (3.33)$$

Если $\beta > 1$, то независимо от конфигурации двухзвенника знаки моментов M_1 и M_2 должны быть противоположными. Этот вывод качественно согласуется с ранее полученным результатом при использовании квадратичной нормы для M . Если же $\beta < 1$, то на конфигурации

$$\cos \varphi_2 = -\beta \quad (3.34)$$

происходит переход изображающей точки из одной вершины в смежную.

Конфигурация (3.34) является в динамическом смысле критической конфигурацией и обладает рядом особенностей, проявляющихся в различных задачах динамики и колебаний двухзвенных манипуляторов. В частности, на этой конфигурации имеет место полная динамическая развязка движений звеньев, так как при этом условии матрица коэффициентов инерции A , а вместе с ней и обратная ей матрица ДКВ, равная $B = A^{-1}$, приобретают диагональный вид. В результате динамическое взаимовлияние звеньев здесь будет



отсутствовать и импульсные управляющие моменты будут воздействовать независимо каждый на свое звено. Вблизи указанной конфигурации взаимовлияние звеньев будет сравнительно слабым, что существенно упрощает работу системы управления. Поэтому даже частичная динамическая развязка звеньев манипулятора представляет практический интерес, а поиск соответствующих критических конфигураций в связи с этим заслуживает определенного внимания.

3.3 Импульсные режимы двухшарнирного манипулятора

Схема шарнирного двухзвенника в настоящее время получила наибольшее распространение в робототехнике. Роботы, манипуляторы которых выполнены по такой схеме, обычно называют антропоморфными [35].

Схема шарнирного двухзвенника, принимаемая за исходную, базовую, в работах подробно исследовалась применительно к режиму циклоидального манипулятора, когда задавалось условие кратности угловых скоростей звеньев. Это обеспечивалось или кинематически, если манипулятор имел один двигатель, или системой управления с фазовой синхронизацией двух двигателей. Также были исследованы некоторые свойства свободных движений (МС), в частности, законы изменения угловой скорости в зависимости от угла поворота первого звена. Были предложены различные приемы улучшения характеристик подобных манипуляторов. Возможность и целесообразность использования этих приемов имеет смысл опробовать на примере плоского двухзвенника, оси шарниров которого вертикальны, так что вращение происходит в горизонтальной плоскости.

Здесь и далее предполагается, что формирование траекторий идет не за счет наложения геометрических или кинематических связей, а динамически, в соответствии с решениями уравнений дина-



мики механизма. Имеет смысл рассматривать схемы с различным сочетанием таких приемов:

- установка только импульсных двигателей или пассивных отражательных и фиксирующих упоров отдельно по степеням подвижности либо для рабочего органа; импульсные двигатели устанавливаются неподвижно, упоры устанавливаются или на неподвижном основании, или на первом звене;
- установка постоянно кинематически связанного с первым звеном вращательного привода и совокупности средств формирования импульсов, воздействующих на второе звено;
- использование упругого, пружинного соединения (пружин, работающих на скручивание-раскручивание) в одной или двух вращательных кинематических парах.

Основа динамических моделей для всех вариантов одна и та же, она представлена на рисунке 49 [35].

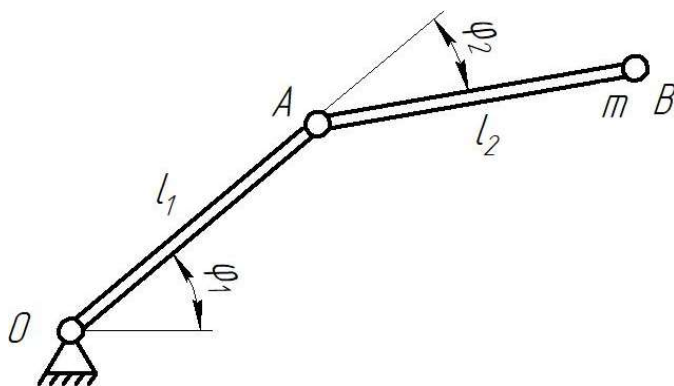


Рис. 49. Манипулятор, работающий в ангулярной системе координат

Первое звено OA длины l_1 имеет момент инерции J_1 относительно оси вращения (точки O), второе звено AB длины l_2 имеет момент инерции J_2 относительно шарнира A . Задана сосредоточенная масса m в концевой точке B механизма, представляющая собой суммар-



ную массу захватного устройства и переносимого объекта. Углы поворота первого звена $\varphi_1(t)$ и второго звена $\varphi_2(t)$ — абсолютные, оба отсчитываются от оси X . Абсолютные угловые скорости звеньев обозначаются соответственно через ω_1 и ω_2 , моменты сил, приложенных соответственно к первому звену относительно точки O и ко второму звену относительно точки A , обозначены через M_1 и M_2 . Моменты сил трения пренебрегаются.

Механизм плоский, движение происходит в горизонтальной плоскости.

Рассмотрим сначала случай двух степеней свободы. Уравнения динамики записываются общим методом в виде уравнений Лагранжа второго рода. Для принятой математической модели система дифференциальных уравнений четвертого порядка имеет вид:

$$\begin{cases} (J_1 + ml_1^2 + J_2 + 2ml_1l_2 \cos \varphi_2)\ddot{\varphi}_1 + (J_2 + ml_1l_2 \cos \varphi_2)\ddot{\varphi}_2 - \\ \quad - ml_1l_2 \sin \varphi_2 (2\dot{\varphi}_1\dot{\varphi}_2 + \ddot{\varphi}_2) = M_1 \\ J_2\ddot{\varphi}_2 + (J_2 + ml_1l_2 \cos \varphi_2)\ddot{\varphi}_1 - ml_1l_2 \sin \varphi_2 \dot{\varphi}_1\dot{\varphi}_2 = M_2. \end{cases} \quad (3.35)$$

Далее рассматривается свободное движение, для которого $M_1=M_2=0$. Как и в случае манипулятора, работающего в цилиндрической системе координат, при отсутствии трения формально решение может быть получено аналитически, при использовании двух интегралов: интеграла энергии и интеграла момента количества движения [35].

Основой для исследования решения являются интеграл энергии и интеграл момента количества движений (обобщенного импульса по первой обобщенной координате) относительно главной оси O . Вводятся безразмерные параметры

$$\alpha = \frac{l}{ml_1l_2} (J_1 + ml_1^2); \quad \beta = \frac{1}{ml_1l_2} J_2; \quad \chi = \frac{1}{2Tml_1l_2} K^2 \quad (3.36)$$

и безразмерное время

$$\tau = t \sqrt{2 \frac{T}{ml_1l_2}}. \quad (3.37)$$

Тогда эти интегралы записываются в виде [35]:



$$(\alpha + \beta + 2\cos\varphi_2)\frac{d^2\varphi_2}{d\tau^2} + 2(\beta + \cos\varphi_2)\frac{d\varphi_1}{d\tau}\frac{d\varphi_2}{d\tau} + \beta\left(\frac{d\varphi_1}{d\tau}\right)^2 = 1, \quad (3.38)$$

$$(\alpha + \beta + 2\cos\varphi_2)\frac{d\varphi_1}{d\tau} + (\beta + \cos\varphi_2)\frac{d\varphi_2}{d\tau} = \sqrt{\chi}. \quad (3.39)$$

Условия физической реализуемости (знакоопределенной положительности кинетической энергии) имеют вид:

$$\alpha + \beta - 2 > 0; \beta > 1. \quad (3.40)$$

Первым основным результатом проведенного исследования является определение условий осуществления колебательного («либрационного») и однонаправленного круговращательного (ротационного) движений. В первом случае угловые колебания совершает второе звено относительно первого, а движение первого звена является сложным: на вращение с постоянной средней угловой скоростью накладываются угловые колебания. Во втором случае второе звено вращается в одну и ту же сторону относительно также вращающегося первого звена.

После введения безразмерных параметров, два из которых α и β определяются соотношением геометрических и кинематических величин, а третий параметр χ преимущественно определяется начальными условиями [35] получено условие постоянства знака угловых скоростей, т. е. существование ротационного движения в виде [35]:

$$0 < \chi < \alpha + \beta - 2. \quad (3.41)$$

При выполнении условий [35]:

$$\alpha + \beta - 2 < \chi < \alpha + \beta + 2 \quad (3.42)$$

угловое движение второго звена является колебательным.

Через интеграл от функции, зависящей от указанных параметров, определяется период движения по безразмерному времени.

На плоскости параметров α и β построены области, для которых движения двухзвенника качественно различаются. В общем случае угол поворота первого звена имеет линейно нарастающую и колебательную составляющую, при этом вращение может происходить монотонно или с изменением знака скорости. Возможные движения



второго звена таковы: монотонное или немонотонное вращение в одну сторону или колебания относительно оси продолжения первого звена.

Дополнительное самостоятельное исследование проведено для механизма двухзвенника, в шарнирах которого имеются пружины, создающие моменты, которые пропорциональны углам поворота звеньев относительно исходной конфигурации.

При этом сами звенья считаются жесткими. В этом случае число степеней подвижности механизма не изменяется, но степени подвижности становятся упругими. Из уравнений Лагранжа при малых углах поворота получены частотные уравнения, а из них две собственные частоты. Проведенное исследование позволило определить зависимости собственных частот и форм от параметров исходной конфигурации. Постановлены и частично решены задачи оптимизации движений исходя из условий минимума нормы моментов в шарнирах двухзвенника.

Несмотря на большой объем исследований, специфику постановки задач переноса объектов с помощью манипуляторов требуется проведение исследований по следующим соображениям [35]:

- из волнообразных или петлеобразных траекторий концевой точки при полностью свободном движении, заполняющих кольцо рабочей зоны волнами или петлями, используются только небольшие участки;

- эти небольшие участки сопрягаются, причем точки сопряжения или стыковки являются точками приложения импульсов от двигателя или упоров;

- необходимо рациональным образом обоснованно выбирать точки приложения импульсов;

- при правильной расстановке фиксирующих упоров качественные особенности длинных участков траекторий часто несущественны, а тем более несущественны погрешности задания импульсов,



поскольку положения точек позиционирования задаются этими фиксирующими упорами, а не траекториями;

– при последовательном включении в действие упоров нужно проверять правильность направления вращения звеньев, сохранивших подвижность.

Типичным для выполнения операции переноса объекта является трехэтапный закон.

На последовательности изображений показаны только разгоняющие или тормозящие импульсы, а сами двигатели и упоры не изображены. Исходной является такая конфигурация механизма, при которой концевая точка механизма (схват с объектом) находится вблизи внешней границы рабочей зоны. На первом этапе после воздействия импульса I_1 от двигателя относительное вращение второго звена происходит в сторону, противоположную вращению первого звена, рука складывается с тем, чтобы уменьшить вылет. Переход от первого этапа ко второму происходит, когда второе звено при повороте вступает во взаимодействие с фиксирующим упором, закрепленным на первом звене, при этом фиксирующий упор прикладывает останавливающий силовой импульс I_2 ; после этого оба звена вращаются как единое целое.

При необходимости получения больших углов поворота концевой точки вокруг главной оси именно регулировкой угла поворота первого звена на этом втором этапе обеспечивается получение требуемого положения точки позиционирования. На третьем этапе второе звено отсоединяется от первого и поворачивается (при подаче третьего, внешнего, импульса I_3 или без него, только под воздействием инерции), при этом схват выходит ближе к внешней границе рабочей зоны [35].

Третий этап заканчивается выходом на фиксирующие упоры обоих звеньев. Предполагается, что оба упора установлены на неподвижном основании, тормозные импульсы I_4 и I_5 от них, останавливающие вращения обоих звеньев, обеспечивают точное позицио-



нирование концевой точки механизма в заданном положении. Получающаяся траектория переноса показана на рисунке 50 жирной пунктирной линией. На первом и третьем этапах отрезки траекторий получаются из законов свободного движения двухзвенника, на втором этапе отрезок траектории представляет собой дугу окружности [35].

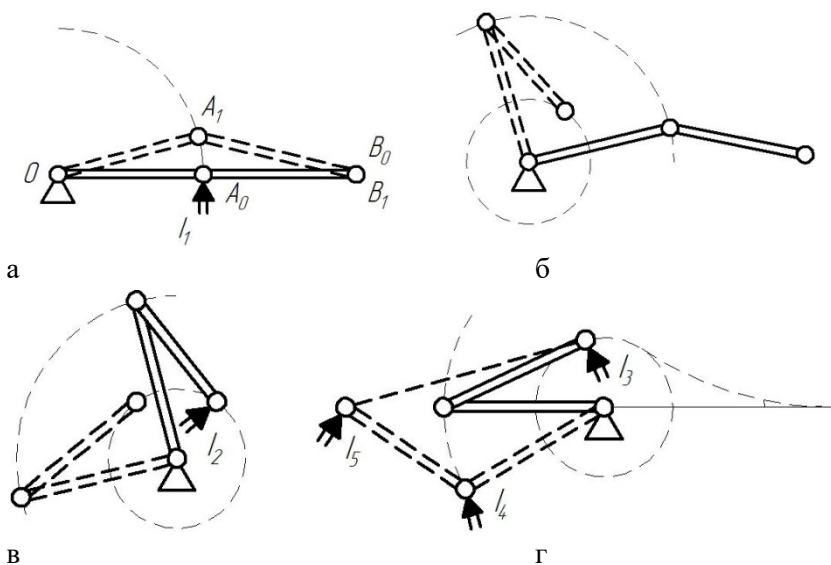


Рис. 50. Фазы выполнения трехэтапного закона

Таким образом, в данном конкретном случае для выполнения операции переноса необходимо иметь, по крайней мере, три фиксирующих упора, один или два импульсных двигателя. Для выполнения перемещений в обратном направлении в местах установки фиксирующих упоров должны быть двигатели (они могут быть конструктивно совмещенными с упорами). Отметим, что здесь предполагалось, что разгоняющий импульс в начальной точке создается одним двигателем, но при возвращении захватного устройства для его



позиционирования в начальной точке цикла фиксирующих упоров должно быть два.

При программировании движений по этапам необходимо ставить следующие требования:

- намеченные точки (конечные и промежуточные) должны достигаться с достаточным запасом скорости;
- при достижении любого фиксирующего упора движение звена, оставшегося свободным, продолжалось в нужную сторону;
- желательно, чтобы тормозные импульсы и погашаемая энергия была возможно меньше;
- желательно, чтобы при заданном времени перемещения из начальной точки в конечную энергия, затрачиваемая двигателями, была минимальной.

На основе приведенных соображений могут быть сформулированы и решены задачи синтеза движений и выработки рекомендаций по расстановке импульсных двигателей и фиксирующих упоров.

Управление двигателями и фиксирующими упорами должно осуществляться по-разному. В начальной и конечной точках позиционирования время выстоя задается устройством управления, включение импульсных двигателей осуществляется по внешним командам или по определенной выдержке времени, или по получении разрешающих сигналов от внешнего оборудования. Фиксирование приходящих подвижных частей осуществляется при механическом контакте, а рефинансирование в точке A_3 — по команде при достижении определенного угла поворота первого звена [35].

Если в цикле необходимо осуществлять позиционирование и выстой в нескольких точках, то на каждую новую точку позиционирования требуется по два однокомпонентных фиксирующих упора и по крайней мере один импульсный двигатель.

Особый интерес представляют такие режимы свободного движения, при которых траектории имеют естественные точки мгновен-



ной остановки, точки возврата траекторий, получаемые при непрерывном вращении звеньев, без их принудительного торможения. Отметим, что из простых механизмов только шарнирные двухзвенники позволяют получать на траектории такие точки. Сами траектории при этом представляют собой или эпициклоиды или гипоциклоиды.

Именно существование точек мгновенной остановки в работах рассматривалось как важное преимущество циклоидальных манипуляторов, у которых имела место жесткая кинематическая связь теми или иными средствами между углами поворота первого и второго звеньев. Одно из главных преимуществ, достигаемых при наличии точек мгновенной остановки, заключается в том, что процессы захватывания и освобождения объекта в этих точках происходят безударно, при обращении в нуль относительной скорости объекта и схвата, что значительно повышает надежность выполнения этих операций.

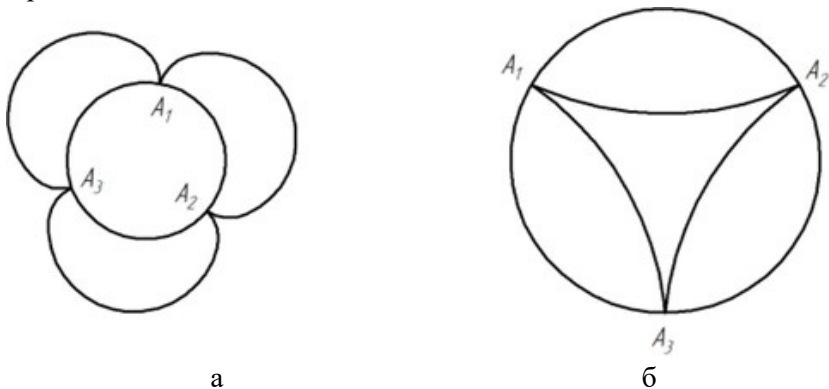


Рис. 51. Траектории шарнирных двухзвенников [35]

Выясним, как можно получать точки мгновенной остановки в рассматриваемой системе при задании движения без наложения таких связей, только с помощью импульсов.



В первую очередь отметим, что пренебрежение силами трения движения является периодическим по скоростям (линейным и угловым). Это означает, что если на траектории имеется точка мгновенной остановки (точка возврата), в которой скорость обращается в нуль, то при дальнейшем движении точки мгновенной остановки будут повторяться с одним и тем же периодом по времени и через один и тот же угол поворота первого звена.

Точки мгновенной остановки могут быть или по внешней, или по внутренним границам рабочей зоны, там, где оба звена направлены по одной прямой (в одну и ту же или в противоположные стороны), траектории соответственно представляют собой или гипоциклоиды, или эпициклоиды.

В отличие от циклоидального механизма с жесткой кинематической связью углов поворота звеньев, когда число точек мгновенной остановки определялось передаточным отношением между углами поворота звеньев, в рассматриваемой здесь задаче угловое расстояние между точками мгновенной остановки определяется геометрическими массовоинерционными характеристиками.

«Естественные» точки мгновенной остановки можно выбирать и использовать по-разному:

- точка мгновенной остановки представляет собой начало движения;
- точка мгновенной остановки представляет собой конец движения, тогда тормозной импульс должен не менять состояния мгновенной остановки [35];
- начальная и конечная точки, точки начала и конца движения произвольны.

Применительно к шарнирному двухзвеннику рассмотрим задачу о движении из неподвижного начального положения при любой конфигурации механизма манипулятора под действием одного импульса. Для произвольной конфигурации механизма возможно приложение импульса или к первому, или ко второму звену. Общие



выражения для перерасчета импульсов в начальные скорости звеньев получаются из интегралов импульсов уравнений Лагранжа второго рода.

Особый интерес представляют движения при таких начальных конфигурациях, при которых звенья механизма направлены по одной прямой, продольной оси. Требуется, чтобы начальное направление скорости концевой точки было по той же оси ($\varphi_{20} = \varphi_{10}$ или $\varphi_{20} = \varphi_{10} + \pi$). Очевидно, что при таких конфигурациях приложение импульса по той же продольной оси не вызовет движения, единственным результатом будет возникновение в шарнирах импульсных реакций.

Если импульс приложен под углом, то повороты звеньев будут происходить только под действием нормальной составляющей, поскольку продольная составляющая импульса, если она есть, будет уравниваться импульсами реакций в шарнирах.

Следовательно, имеет смысл прикладывать импульс только перпендикулярно продольной оси (к первому или второму звену).

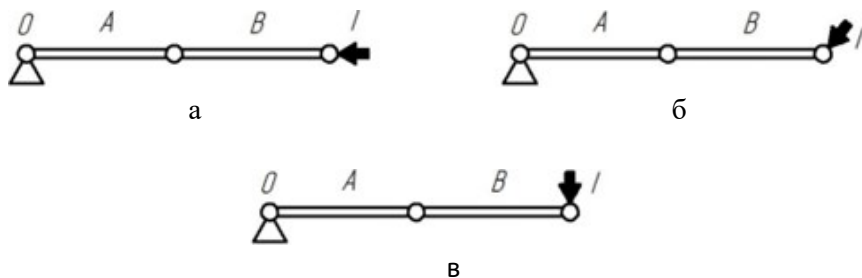


Рис. 52. Приложение импульса к звену

В предположении, что импульс приложен ко второму звену, расчетная схема показана на рисунке 53.

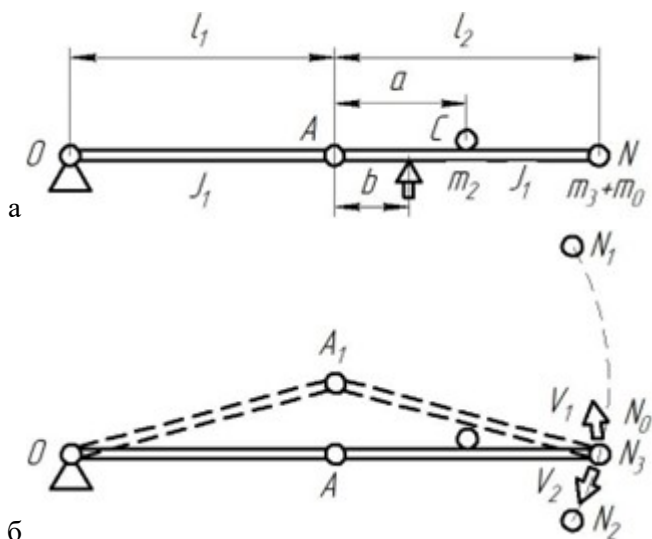


Рис. 53. Расчетная схема приложения импульса

В зависимости от расстояния, определяющего точку приложения импульса, на малом интервале времени после его приложения может получаться перемещение концевой точки как в положении N_1 один выше оси X , так и в положении N_2 ниже оси. Соответствующим образом будут направлены векторы начальной скорости. Пограничным является случай, когда начальная линейная скорость должна была быть направлена по оси X . Но в силу кинематики она обращается в нуль, т. е. даже после приложения импульса движение начинается от точки мгновенного выстоя. Это является несомненным преимуществом, потому что в этом случае, несмотря на приложение импульса, разгон объекта осуществляется плавно, безударно, без импульса ускорения и без скачка скорости. Поэтому значительно повышается надежность удержания переносимого объекта в схвате. Условия равенства нулю начальной скорости концевой точки проще всего записать исходя из уравнений кинетостатики. После исключения лишних переменных получается следующее



выражение для такого значения b_0 координаты точки приложения импульса относительно оси шарнира A , при котором начальная точка является точкой мгновенной остановки [35]:

$$b_0 = a - \left(J_2 + \frac{2l_2}{J_1 l_1} \right). \quad (3.43)$$

В это выражение входят как геометрические параметры, так и массо-инерционные характеристики. Однако важно, что b_0 не зависит от масс m_3 и m_0 , поэтому условие безударного начала движения сохраняется при захватывании объектов различных масс. Расчеты показывают, что всегда получается $b_0 < a$, т. е. точка приложения импульса должна лежать между центром масс второго звена и шарниром A .

Отметим, что импульс должен быть приложен обязательно ко второму звену, при приложении импульса к первому звену получить в начальном положении точку мгновенной остановки невозможно. Рассмотренная задача является обобщением давно известной и значительно более простой задачи о центре удара, когда требуется, чтобы при импульсном воздействии силы на тело, вращающееся вокруг неподвижной оси, в реакции оси не возникало импульсов сил реакций. Решенная выше задача имеет существенную специфику, которая заключается в том, что рассматривается двухступенный механизм, причем при приложении импульса обращается в нуль импульс на подвижном конце кинематической цепи (в концевой точке), но возникают импульсы сил реакции в точках O и A .

В действительности упругость элементов конструкции приводит к тому, что импульсные воздействия сглаживаются, растягиваются во времени.

Обращение задачи во времени позволяет получить однозначные рекомендации относительно точки приложения импульса, останавливающего механизм в точке мгновенной остановки в положении, при котором звенья вытянуты по одной прямой, т. е. когда исходная



конфигурация повторяется (схват с объектом выходит на внешнюю границу рабочей зоны), но в положении, повернутом относительно главной оси. Поскольку в конечном положении состояние механической системы зеркально повторяется для полной остановки (по обеим степеням подвижности), достаточно приложить тот же самый тормозной импульс в той же точке, что и разгонный, но зеркально отраженный относительно оси вытянутых звеньев [35].

Как и для других кинематических схем, действие тормозного импульса, даже приложенного в специально выбранной точке, реально не может обеспечивать точность позиционирования (т. е. получение точки мгновенной остановки в точно заданном положении), поэтому необходима установка фиксирующих упоров по обеим степеням подвижности. В размещении двух упоров, обеспечивающих остановку концевой точки механизма в заданном положении, имеются три возможности. Позиционирующие упоры U_1 , U_2 могут быть установлены следующим образом:

- оба на неподвижном основании;
- для первого звена на неподвижном основании, а для второго — на первом звене;
- для второго звена на неподвижном основании, а для первого — на втором звене.

Во всех случаях схематично показано, что один из упоров взаимодействует с концевой точкой механизма. Реально взаимодействие может осуществляться или с концом руки, или с элементом захватного устройства, или с самим переносимым объектом. В последнем случае имеется в виду, что роль одного из упоров играет неподвижное зажимное устройство, принимающее объект, при этом окончательная остановка механизма происходит одновременно с фиксированием объекта в этом зажимном устройстве [35].

Упоры могут быть установлены или с одной, или с другой стороны, в зависимости от того, с какой стороны к нему подходит ответная часть. Это зависит от того, какая траектория воспроизводит-



ся. Так, при первом контакте упора вращения второго звена будет происходить или по часовой стрелке, если программная траектория гипоциклоидальная, или против часовой стрелки, если траектория эпициклоидальная. Для вращения против часовой стрелки упор устанавливается для вращения по часовой стрелке, установка должна быть зеркальной относительно оси звена [35].

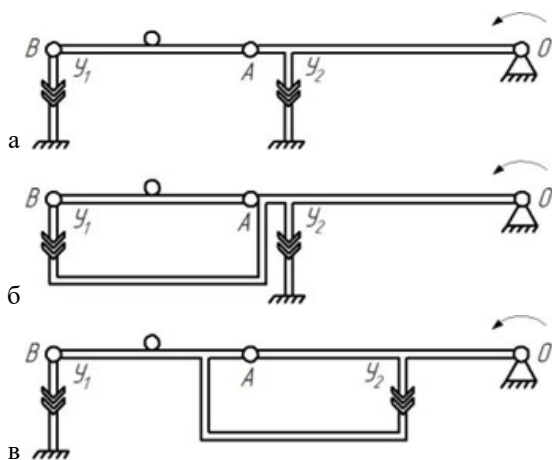


Рис. 54. Схема установки позиционирующих упоров

В идеальном случае в предположении очень высокой точности воспроизведения программной траектории срабатывание обоих упоров должно происходить одновременно. Реально траектория отличается от расчетной и выход подвижной части на один из упоров происходит раньше, чем на другой. Тогда происходит изменение структуры механизма, число степеней подвижности уменьшается до одной, и необходимо, чтобы при выходе на один упор движение происходило в сторону включения второго упора. Очевидно, что в общем случае для каждого варианта схемы установки упоров необходимо рассматривать по две возможности, когда первым вступает в действие или первый, или второй упор. Автором для трех вариан-



тов схем рассмотрены все возможности и полученные условия на установку упоров [35].

В некоторых случаях возникают противоречия: в зависимости от того, какой упор вступает в действие первым, последующее вращение другого звена происходит в ту или другую сторону. В этих случаях при программировании движений необходимо задавать такое смещение расчетной точки, при котором имела бы место полная однозначность, получалось бы гарантированное введение в действие при позиционировании вполне определенного упора.

Рассмотрим теперь задачу динамики двухзвенного механизма, когда вращение первого звена задается приводом, сохраняющим с ним постоянную кинематическую связь. Его схема приведена на рисунке 55.

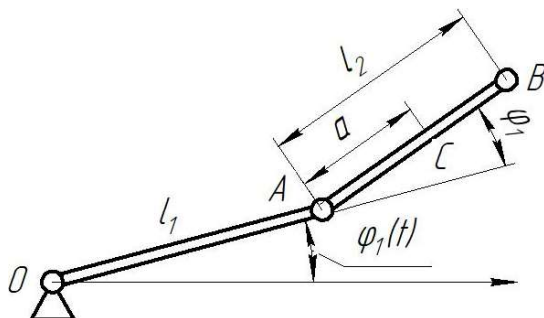


Рис. 55. Манипулятор, работающий в угловой системе координат

Предполагается, что первое звено приводится в движение приводом, механическая характеристика которого является достаточно жесткой, так что закон вращения первого звена можно считать заданной функцией времени $\varphi_1(t)$, определяемым программой, а ко второму звену не прикладываются никакие моменты (в шарнире A нет ни привода, ни пружины). Приблизительно постоянство угловой скорости первого звена может обеспечиваться его большим моментом или за счет маховика на валу двигателя. При этом динамиче-



ские характеристики первого звена исключаются из рассмотрения. Массо-инерционные характеристики второго звена (центр масс в точке C) следующие: масса — m_1 , центральный момент инерции — J . Масса [35], сосредоточенная в концевой точке B , равна m_0 . При заданном законе изменения угла $\varphi_1(t)$ или угловой скорости $\omega_1 = \dot{\varphi}_1$ первого звена механическая система имеет одну степень свободы.

Проводя операции, необходимые для получения уравнения Лагранжа, получаем единственное дифференциальное уравнение динамики для угла $\varphi_2(t)$:

$$\begin{aligned} (J + m_1 a^2 + m_0 l_2^2) \ddot{\varphi}_2 + l_1 \omega_1^2 (m_1 a + m_0 l_2) \sin \varphi_2 = \\ = (m_1 a + m_0 l_2) (l_1 \cos \varphi_2 + l_2) \dot{\omega}_1 \end{aligned} \quad (3.44)$$

Это дифференциальное уравнение нелинейное, с переменными коэффициентами. Рассмотрим частный случай постоянства программной угловой скорости $\omega_1 = \omega_0$. Тогда уравнение приобретает простой вид:

$$(J + m_1 a^2 + m_0 l_2^2) \ddot{\varphi}_2 + l_1 \omega_0^2 (m_1 a + m_0 l_2) \sin \varphi_2 = 0. \quad (3.45)$$

Это уравнение физического маятника, собственная частота малых свободных колебаний которого определяется выражением:

$$k_2 = l_1 \omega_0^2 \frac{m_1 a + m_0 l_2}{J + m_1 a^2 + m_0 l_2^2}. \quad (3.46)$$

Частота k пропорциональна угловой скорости ω_0 . Очевидно, что механизм имеет два положения равновесия, когда звенья вытянуты по одной линии и вращаются вместе, как одно жесткое тело с постоянной угловой скоростью: положение при $\varphi_2 = 0$ является устойчивым, а при $\varphi_2 = \pi$ — неустойчивым. При проведении аналогии с маятником в поле сил тяжести имеется в виду, что угловые движения происходят в радиальном поле центробежных сил, и роль силы тяжести в данном случае выполняет центробежная сила.

Рассмотрим сначала установившийся режим длительного, неограниченного вращения первого звена с постоянной угловой скоростью относительно главной оси O . Тогда в зависимости от началь-



ных условий для второго звена траектории движения концевой точки механизма в пределах кольцевой рабочей зоны могут быть [35]:

- волнообразными, и тогда второе звено совершает колебательные движения относительно вращающегося первого;
- петлеобразными, и тогда второе звено вращается с переменной по величине, но постоянной по знаку относительно первого;
- сходными с «чисто циклоидальными», а именно иметь острия, которые соответствуют точкам мгновенной остановки концевой точки механизма.

В целом общий вид траекторий такой же, как и у циклоидальных механизмов при различных соотношениях угловых скоростей звеньев. Для рассматриваемой здесь задачи общий характер траектории определяется соотношением угловой скорости ω_0 и частоты k и зависит от начальной угловой скорости.

Вращение и первого, и второго звена является периодическим. Отметим, что для циклоидальных механизмов число волн на обороте первого звена определялось только фиксированным передаточным отношением передачи между углами поворота первого и второго звеньев, причем для замкнутости траектории требовалось, чтобы передаточное отношение передачи было целочисленным. При использовании зубчатых передач, когда оба звена приводятся во вращение от одного двигателя, и при фазовой синхронизации, если оба звена приводятся во вращение от разных, но синхронизируемых двигателей, выполнение этого условия возможно с высокой точностью.

Принципиальное отличие рассматриваемой здесь задачи заключается в том, что как тип траектории, так и число волн или петель траектории концевой точки механизма на обороте первого звена зависят как от начальных условий, так и массо-инерционных и геометрических начальных условий. При начале движения колебания возникают при остановке первого звена, устойчивое положение



равновесия второго звена пропадает и второе звено будет по инерции вращаться с постоянной угловой скоростью [35].

Если желательно использовать режим колебательного движения, то имеется такая возможность: частота k может быть увеличена за счет установки возвратной пружины, создающей возвращающий момент при повороте второго звена относительно первого. Возможны разные варианты установки таких пружин.

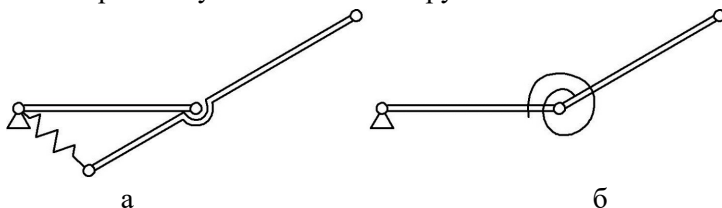


Рис. 56. Схемы колебательного движения

При установке пружины дифференциальное уравнение свободного движения приобретает вид:

$$(J + m_1 a^2 + m_0 l_2^2) \ddot{\varphi}_2 + l_1 \omega_1^2(t) (m_1 a + m_0 l_2) \sin \varphi_2 + c \varphi_2 = 0. \quad (3.47)$$

Здесь c — жесткость пружины, характеристика которой считается линейной.

В дополнение к эффекту повышения частоты пружина является средством рекуперации энергии, позволяет увеличить скорости переноса объекта при фиксированной угловой скорости ω_0 .

При $k > \omega_0$ (это типично для случая, когда $l_2 < l_1$) независимо от начальных условий на одном обороте первого звена укладывается несколько волн, это число зависит как от соотношения между параметрами, так и от начальных условий. Тогда в общем случае отношение периодов не представляется в виде отношения двух целых чисел, а при неограниченном продолжении траектория плотно заполняет кольцо, так что траектория не замыкается. При $k < \omega_0$ (это типично для случая, когда $l_2 > l_1$) общий вид траектории концевой точки существенно зависит от начальных условий. При большой начальной угловой скорости второе звено вращается в одну сторону



[35] примерно с такой же большой постоянной угловой скоростью. Воспроизводимая при этом траектория имеет такой вид, что может использоваться, например, при таких операциях, как окраска поверхностей и полирование. При $k \ll \omega_0$ и при малой абсолютной начальной угловой скорости второе звено в неподвижной системе координат вращается медленно; в предельном случае средняя абсолютная угловая скорость равна нулю, второе звено совершает движение, близкое к поступательному. Точное поступательное движение второго звена имеет место при определенных начальных условиях, возможно, только тогда, когда оно является точно уравновешенным, т. е. когда его центр масс совпадает с осью шарнира A .

Как и для циклоидальных манипуляторов, особый интерес представляют траектории с точками мгновенной остановки, поскольку именно в этих точках удобнее всего осуществлять захватывание и установку на заданные позиции переносимых объектов. Для циклоидальных манипуляторов это вершины (острия) циклоидальных (гипоциклоидальных или эпициклоидальных) кривых. Для рассматриваемого двухзвенного механизма с равномерно вращающимся первым звеном точки мгновенной остановки могут быть только в тех конфигурациях, в которых оба звена направлены по одной прямой. При этом должно выполняться условие обращения линейной скорости концевой точки в нуль, в противном случае траектории являются волнообразными или петлеобразными.

Движения в промежутке между двумя этими положениями могут быть различными, наиболее подходящим представляется вариант, когда первое звено поворачивается на большой угол порядка 360° , а второе звено — на малый угол. Вращение второго звена имеет две составляющие: медленное (по сравнению с первым звеном) вращение в одну сторону и покачивание. Точки мгновенной остановки следуют по окружности с постоянным шагом.

Основываясь на приведенных выше результатах, покажем, как их можно использовать для построения и программирования траек-



торий манипулятора, перекладывающего объекты с одних позиций на другие [35]. Отметим сначала, что использование траекторий с точками возврата желательно, поскольку в этих точках захватывание и установка объектов осуществляется безударно, что выгодно энергетически (снижаются потери при торможении и потребная мощность двигателей) и содействует лучшей сохранности объектов. Преимущества использования точек мгновенной остановки в циклоидальных манипуляторах подробно обсуждены в [10]. Однако позиционирование все равно будет осуществляться по упорам и именно упорами будет обеспечиваться точность позиционирования.

Рассмотрим на качественном уровне задачи организации процесса манипулирования. Возможны следующие основные варианты:

1. Весь цикл работы манипулятора строится по кольцу, захватное устройство последовательно выходит в точки, равномерно расположенные по окружности, цикл заканчивается приходом в начальную точку. Аналогично строился цикл для циклоидальных манипуляторов. Очевидно, что для этого требуется соответствующая радиально-кольцевая расстановка оборудования. В подобных случаях задается безостановочное вращение первого звена в одну сторону от постоянно включенного двигателя.

2. Весь цикл строится также по последовательности точек, но без прохождения всей окружности, с периодическим изменением направления перехода от точки к точке. Простейшими являются случаи перехода из первой точки во вторую и обратно. При этом реверсирование превращения первого звена может быть достигнуто разными способами: реверсированием двигателя, переключением ступеней механической передачи, использованием механизма, преобразующего вращение в одну сторону в переменное по направлению вращения [35].



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Бурятском научном центре СО РАН в течение многих лет прорабатывался оригинальный путь принципиального и технического решения проблемы значительного повышения быстродействия манипуляторов с цикловым программным управлением, основанный на построении механизмов, в которых ведущие звенья, приводимые в движение неуправляемыми электродвигателями, вращаются в одну и ту же сторону, а выходные звенья механизмов передачи задают рабочему органу движения по траекториям, удовлетворяющим поставленным ограничениям с мгновенными остановками в заданных точках позиционирования, где осуществляется захватывание и освобождение переносимого объекта.

Проще всего этот безреверсный принцип реализуется в плоских механизмах, в которых производится сложение двух равномерных вращений вокруг параллельных осей, при этом траектории, воспроизводимые рабочими органами, относятся к классу циклоид, поэтому такие роторные мехатронные манипуляторы называются циклоидальными.

Возможности значительного повышения быстродействия подобных манипуляторов обусловлены тем, что их двигатели не разгоняются, не останавливаются и не реверсируются, а сокращение времени цикла достигается просто увеличением постоянных угловых скоростей [38].

Была поставлена, формализована и для частных случаев решена задача захватывания объектов подвижного основания (ленты транспортера) [37].

Во всех случаях использовались возможности получения таких траекторий, на которых имеются точки мгновенной остановки; при этом создавались условия для нормального протекания процессов захватывания и отпускания [37].



В связи с вышесказанным особо выделяются задачи разработки и реализации мехатронных устройств, позволяющих решать новые задачи по созданию специализированных комплексов автоматизации производственных процессов с существенно улучшенными функциональными показателями по стоимости, энергоэффективности, простоте конструктивного исполнения, быстродействия, широты спектра их практического применения.

Перечисленные выше соображения показывают, что разработка специализированных робототехнических комплексов (РТК) с особой формой организации движений исполнительных механизмов с целью достижения повышенного быстродействия, снижения энергозатрат в РТК, с более простой системой управления (СУ) и в результате существенно низкой стоимостью создаваемых мехатронных манипуляционных устройств по сравнению с серийными ПР целесообразна.

При традиционном принципе построения ПР с цикловым программным управлением модули всех степеней подвижности имеют собственные приводы с самостоятельными двигателями и передачами. При выполнении программных движений ПР на каждом этапе двигатели включаются и разгоняют подвижные части механизмов, затем тормозятся перед заданными точками позиционирования, а для выхода в последующие точки те же движения выполняются повторно.

В таких условиях представляет серьезные трудности уменьшение времени выполнения циклов обслуживания технологического оборудования до значений меньше 3; 4 секунд или повышение средних скоростей схватов свыше 1,5 м/с.

Решение проблемы повышения быстродействия манипуляторов с цикловым программным управлением предлагается путем построения механизмов, в которых ведущие звенья, приводимые в движение роторами электродвигателей, вращаются равномерно (без реверса), а выходные звенья механизмов передачи задают схвату дви-



жения по циклоидальным траекториям, удовлетворяющим поставленным ограничениям с мгновенными остановками в заданных точках позиционирования [33].

Циклоидальные манипуляторы, как правило, должны сохранять обязательные и типовые для роботов свойства переналаживаемости, [37] и программируемости, что требует усложнения, а иногда и изменения во время движения структур и кинематических схем механизмов, использования нескольких приводов и систем автоматического управления [37].

Первоначально теория циклоидальных манипуляторов строилась на предположении, что приводы обеспечивают постоянство угловых вращений звеньев. Тогда для осуществления требуемых периодических движений вращающие моменты также должны были быть периодическими. Однако в дополнение указанным исследованиям для ряда схем исследовалась динамика периодических движений и при равенстве нулю вращающих моментов двигателей во время движения, т. е. свободных движений.

Также была предложена и предварительно теоретически проработана идея использования режимов кусочно-свободных движений, происходящих под действием импульсов, которые или задаются специальными импульсными двигателями, или возникают при ударном взаимодействии со специально установленными упорами. При этом, как и в цикловых манипуляторах, исключается необходимость установки двигателей у кинематических пар. По отношению к классическим циклоидальным манипуляторам расширяются возможности рациональной расстановки упоров и подбора направлений прикладываемых импульсов, оказывается возможным устанавливать в определенных положениях точки мгновенной остановки, обходить препятствия и т. п. В определенных случаях использование упоров определенного вида (фиксирующих) приводит к изменению структуры механизма. Однако приложение коротких импульсов связано с появлением пиковых нагрузок, которые вызыва-



ют нежелательные упругие колебания механизма манипулятора и требуют повышения несущей способности захватных устройств для обеспечения условий надежного удерживания переносимого объекта [37].

В данной монографии поставлены и решены задачи безреверсных мехатронных манипуляторов в зависимости от требований перенастройки траекторий их рабочего органа. Разработана классификация компоновочных структур и способов реализации их управления.

Предлагаемые автором принципы безреверсной реализации мехатронных манипуляторов позволяют в высокой степени удовлетворять основным требованиям к автоматизации машиностроительного производства, таким как надежность, энергосбережение, высокая производительность, наличие манипуляционных устройств (модулей), обладающим простотой управления, повышенным быстродействием, приемлемой точностью управления, низкой себестоимостью, широким спектром их применения в составе гибких автоматизированных производств.

Автором разработаны методы параметрического синтеза быстродействующих мехатронных манипуляционных устройств с простой безреверсной системой управления их приводных двигателей, способы их разгрузки и уменьшения установочной мощности. Обладание вышеуказанными характеристиками и реализуемые оптимальные режимы движения с существенно меньшими по сравнению с серийными промышленными роботами энергозатратами позволяют на их основе реализовать гибкие энергосберегающие высокопроизводительные производства.

Предлагаемая реализация таких мехатронных манипуляторов имеет своей особенностью то, что они являются устройствами модульного типа. Такой принцип сконструированная применен как для системы управления, так и для механической системы самого манипулятора.



Под конструктивным модулем понимается функционально и конструктивно независимая единица, которую можно использовать индивидуально и в различных комбинациях с другими модулями.

Таким образом, представленные в монографии результаты позволяют сделать вывод о том, что предлагаемые безреверсные манипуляторы являют собой новый эффективный особый класс средств автоматизации машиностроительного производства.



ЛИТЕРАТУРА

1. Никифоров С. О. Быстродействующие циклоидальные манипуляторы / С. О. Никифоров, И. Б. Челпанов, В. В. Слепнев. Улан-Удэ : Изд-во БИЕН СО РАН, 1996. 110 с.
2. Мархадаев Б. Е. Мехатронные системы: полициклоидальные, циклоидальные, импульсные / Б. Е. Мархадаев, С. О. Никифоров. Улан-Удэ : Изд-во БГУ СО РАН, 2004. 140 с.
3. Проблематика преподавания мехатроники в технических вузах / В. А. Дьяченко, С. Н. Колпашиников, С. О. Никифоров, И. Б. Челпанов // Мехатроника. 2003. № 9. С. 52–54.
4. Юревич Е. И. Мехатроника и робототехника / Е. И. Юревич // Мехатроника. 2000. № 5. С. 2–6.
5. Промышленные роботы. Внедрение и эффективность / перевод с японского Асая, С. Кигами, Кодзима и др. Москва : Мир, 1987. 384 с.
6. Никифоров С. О. Циклоидальные манипуляторы: новые схемы, механика, давление, применение / С. О. Никифоров // Вестник машиностроения. 2002. № 6. С. 3–8.
7. Новиков Е. А. Выбор электродвигателей и передач промышленных роботов с электроприводом / Е. А. Новиков, В. А. Тейтельбаум, И. Б. Челпанов // Труды ЛПИ. 1988. № 428. С. 43–48.
8. Никифоров С. О. Идентификация и выбор компоновочных структур быстродействующих манипуляторов / С. О. Никифоров, Б. Е. Мархадаев // Вестник машиностроения. 1990. № 10. С. 43–45.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2022619861. Компьютерная программа кинематического анализа циклоидальных манипуляторов от 26. 05. 2022 года.
10. Никифоров С. О., Сумкин А. Г. Устройство для вычеркивания циклоидных кривых : авторское свидетельство. № 1108022-БИ. 1984. № 30.
11. Применение топологических методов структурного и кинематического анализа и синтеза при формировании компоновочных структур быстродействующих циклоидальных манипуляторов / С. О. Никифоров, Ю. А. Сушков, И. К. Никифоров, Т. В. Кочева. Улан-Удэ : Изд-во БИЕН СО РАН, 1994. 34 с.
12. Никифоров С. О. Матрично-кодový метод расчета зубчатопрычажных циклоидальных манипуляторов с цепной передачей / С. О. Никифоров // Вестник машиностроения. 2003. № 8. С. 27–30.



13. Никифоров С. О. Модульное структурное проектирование безреверсных манипуляторов / С. О. Никифоров, Б. Е. Мархадаев // Вестник машиностроения. 2013. № 7. С. 41–49.
14. Сушков А. Ю. Графы зубчатых механизмов / А. Ю. Сушков. Ленинград : Машиностроение, 1971. 216 с.
15. Игнатьев М. Б. Голономные автоматические системы / М. Б. Игнатьев. Москва ; Ленинград : Изд-во АН СССР, 1963. 204 с.
16. Никифоров С. О. Экстремальные свойства стационарных движений двухшарнирного манипулятора / С. О. Никифоров, Б. Е. Мархадаев, А. Г. Сумкин // Известия СО АН СССР. 1985. № 6, вып. 3. С. 122–124 [Серия технических наук].
17. Устройство для вычерчивания циклоидальных кривых : авторское свидетельство СССР. № 1108022–БИ. 1984. № 30.
18. Устройство для вычерчивания циклоидальных кривых : авторское свидетельство СССР. № 1418071–БИ. 1988. № 31.
19. Циклоидальный робот : информационный листок / Бур. ЦНТИ. № 78. – 90.
20. Сосоров Е. В. Мехатронные манипуляционные системы с импульсными двигателями / Е. В. Сосоров, С. О. Никифоров. Улан-Удэ : Изд-во БГСХА им. В. Р. Филиппова, 2011. 106 с.
21. Операционные системы реального времени безреверсных манипуляторов / Э. Б. Мандаров, В. В. Бальжинов, Ю. Л. Шурыгин и др. // Проблемы механики современных машин : материалы VI Международной конференции. Улан-Удэ : Изд-во ВСГТУ, 2015. Т. 3. 304 с.
22. Челпанов К. Б. Устройство промышленных роботов / К. Б. Челпанов. Ленинград : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. 224 с.
23. Особенности конструкции роботов модульного типа / Б. Н. Сурнин, В. П. Степанов, И. В. Калабин, А. Г. Баранов // Станки и инструменты. 1978. № 7. С. 13–16.
24. Кравченко Н. Ф. Выбор оптимальных технологических схем модульных промышленных роботов / Н. Ф. Кравченко // Вестник машиностроения. 1986. № 11. С. 3–7.
25. Никифоров С. О. Приложение дискретной математики в мехатронике / С. О. Никифоров, Б. Е. Мархадаев // Автоматизация и современные технологии. 2006. № 7. С. 7–14.
26. Сосонкин В. Л. Системы числового программного управления / В. Л. Сосонкин, Г. М. Мартинов. Москва : Логос, 2005. 216 с.



27. Стандартная общественная лицензия GNU (GPL). Версия 2. URL : <http://sit-salsk.ru>
28. Игнатьев М. Б. Голономные автоматические системы / М. Б. Игнатьев. Москва ; Ленинград : Изд-во АН АССР, 1963. 204 с.
29. Никифоров С. О. К аналогии в подходах к описанию движений небесных тел механиком средневекового Востока Ат-Туси и циклоидальных манипуляторов в мехатронике / С. О. Никифоров, Б. Е. Мархадаев, Б. С. Никифоров // Ученые записки ЗабПГУ. 2011. С. 127–131.
30. Применение методов дискретной математики при модульном синтезе мехатронных устройств / С. О. Никифоров, Б. С. Никифоров, Е. Б. Мандаров, Н. М. Рабданова // Вестник БГУ. 2010. Вып. 9. С. 211–216.
31. Application of methods of discrete mathematics at modular synthesis of mechatronic devices / S. O. Nikiforov, B. S. Nikiforov, E. V. Mandarov, N. M. Rabdanova. 2010
32. Показатели качества безреверсных мехатронных манипуляторов / С. О. Никифоров, Ю. Л. Шурыгин, Э. Б. Мандаров // Вестник ВСГУТУ. 2014. № 3. С. 35–43.
33. Сосоров Е. В. Методы расчета и проектирования манипуляционных систем с импульсными двигателями : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05. 02. 05 / Е. В. Сосоров. Санкт-Петербург, 2003. 136 с.
34. Управление и применение роторных мехатронных манипуляционных систем / С. О. Никифоров, Б. Е. Мархадаев, А. Н. Павлов, Б. С. Никифоров // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 6. С. 10–17.
35. Павлов А. Н. Роботы с манипуляционными системами переменной структуры : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05. 02. 05 / А. Н. Павлов. Улан-Удэ, 2006. 119 с.
36. Хозонхонова Д. Д. Исследование модернизированных циклоидальных манипуляторов и их устройств : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05. 02. 05 / Д. Д. Хозонхонова. Санкт-Петербург, 2000. 119 с.

Научное издание

Семён Очирович Никифоров

БЕЗРЕВЕРСНЫЕ МЕХАТРОННЫЕ
МАНИПУЛЯТОРЫ

Монография

Редактор З. З. Арданова
Компьютерная верстка Н. Ц. Тахинаевой
Дизайн обложки Э. Дашиевой

Свидетельство о государственной аккредитации
№ 2670 от 11 августа 2017 г.

Подписано в печать 23.03.2026. Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. 6,85. Уч.-изд. л. 5,72. Тираж 500. Заказ 30.
Цена свободная

Издательство Бурятского госуниверситета им. Д. Банзарова
670000, г. Улан-Удэ, ул. Ранжурова, 4
rio@bsu.ru

Отпечатано в типографии Издательства БГУ
670000, г. Улан-Удэ, ул. Сухэ-Батора, 3а