

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

На правах рукописи



КОНОПЛИН Александр Юрьевич

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОДВОДНОГО  
АППАРАТА В РЕЖИМЕ ЗАВИСАНИЯ ПРИ РАБОТАЮЩЕМ  
МНОГОЗВЕННОМ МАНИПУЛЯТОРЕ**

Специальность: 05.13.01 – Системный анализ, управление  
и обработка информации

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор Филаретов В.Ф.

Владивосток

2015

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Перечень обозначений и сокращений.....	5
Введение.....	6
1. Анализ подходов и методов синтеза систем стабилизации подводного аппарата в режиме зависания и постановка задачи исследования.....	14
1.1. Анализ работ, выполняемых подводными аппаратами, оснащенными многозвенными манипуляторами.....	15
1.2. Анализ существующих методов синтеза систем стабилизации подводных аппаратов в режиме зависания при работающем манипуляторе.....	18
1.3. Анализ особенностей и возможностей существующих методов синтеза систем управления подводными манипуляторами.....	23
1.4. Постановка задачи исследования.....	26
1.5. Выводы.....	28
2. Особенности вычисления силовых воздействий на звенья многозвенного манипулятора, произвольно перемещающегося в водной среде .....	30
2.1. Определение силовых воздействий на однородное цилиндрическое звено подводного манипулятора, совершающее произвольные движения в вязкой среде.....	30
2.2. Рекуррентный алгоритм решения обратной задачи динамики для многозвенного подводного манипулятора.....	34
2.3. Особенности экспериментального определения переменных коэффициентов вязкого трения.....	37
2.4. Описание аэродинамической экспериментальной установки.....	40
2.5. Результаты аэродинамического эксперимента.....	42
2.6. Выводы.....	47

3. Разработка метода синтеза комбинированной автоматической системы стабилизации подводного аппарата в заданной точке пространства.....	49
3.1. Особенности формирования сил тяги движителей подводного аппарата с учетом его кинематической схемы.....	49
3.2. Разработка замкнутой автоматической системы стабилизации линейных и угловых перемещений подводного аппарата.....	52
3.3. Описание математической модели подводного аппарата и установленного на нем многозвенного подводного манипулятора.....	54
3.4. Исследование синтезированной комбинированной системы стабилизации подводного аппарата в режиме зависания.....	58
3.5. Выводы.....	65
4. Разработка методов синтеза систем автоматического управления режимами движения рабочих органов манипуляторов, установленных на подводных аппаратах.....	67
4.1. Описание подводной манипуляционной системы.....	68
4.2. Построение системы автоматической коррекции программной траектории движения рабочего органа подводного манипулятора.....	70
4.3. Исследование системы автоматической коррекции программной траектории движения рабочего органа подводного манипулятора.....	74
4.4. Описание системы формирования программных сигналов управления манипулятором.....	77
4.5. Описание неизменяемой части системы.....	84
4.6. Получение модели объекта управления для синтеза регулятора $R_g$ .....	88
4.7. Исследование системы формирования максимально возможной программной скорости движения рабочего органа манипулятора по заданным пространственным траекториям.....	93
4.8. Выводы.....	95

Заключение.....	97
Литература.....	99
Приложение.....	111

**ПЕРЕЧЕНЬ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ**

ОЗД – обратная задача динамики,

ПА – подводный аппарат,

ПМ – подводный манипулятор,

РМВ – реальный масштаб времени,

РО – рабочий орган,

СК – система координат,

СУ – система управления.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для исследования и освоения Мирового океана активно используются подводные аппараты (ПА). С их помощью удается выполнять широкий спектр технологических и исследовательских работ на любой глубине погружения. Проблемам создания ПА (роботов) различного вида и назначения, в том числе и оснащаемых подводными манипуляторами (ПМ), а также их систем управления (СУ) и навигации посвящены многочисленные работы российских и зарубежных авторов [5, 16-18, 50, 64, 72, 75, 76, 78, 82, 97, 107, 108, 111 и др.]. В этих работах показывается, что многозвенные ПМ, установленные на ПА, способны выполнять сложные манипуляционные операции, успешно заменяя водолазов в экстремальных условиях водной среды.

Во многих случаях подводные манипуляционные операции требуется выполнять быстро в режиме зависания ПА над или вблизи объекта работ, так как время подводных работ часто ограничено, а их стоимость очень высока. В этом режиме работы ПА способен с любой пространственной ориентацией подойти к объекту работ или исследований, занимая наиболее удобное для манипулирования положение, не внося при этом возмущений в придонные слои воды и не используя дополнительного оборудования и механических устройств для жесткой фиксации ПА до начала выполнения технологических операций.

Однако в процессе перемещения ПМ с высокой скоростью в водной среде со стороны этого манипулятора на ПА начинают появляться значительные силовые и моментные воздействия, обусловленные не только инерционными и гравитационными силами, но также и силами, определяемыми взаимодействием движущихся звеньев ПМ с окружающей вязкой средой. Кроме того, на ПА оказывают влияние течения, волнения моря, силовые и моментные воздействия со стороны кабель-троса и др. Все это приводит к незапланированному смещению зависшего в толще воды ПА относительно его

исходного положения и препятствует качественному выполнению многих манипуляционных задач. В отечественных и зарубежных источниках [48, 92, 97, 98] отмечается значительный интерес исследователей к решению проблемы создания высокоточных систем стабилизации ПА в режиме их зависания в водной среде при работающих ПМ. Однако существующие подходы и методы не позволяют в полной мере решить эту важную для практического использования задачу.

Известные системы удержания ПА в заданной точке пространства [48, 92, 97, 98] используют рекуррентный алгоритм решения обратной задачи динамики (ОЗД) ПМ для построения разомкнутой системы компенсации двигателями этих ПА силовых и моментных воздействий, появляющихся при работе ПМ и непрерывно вычисляемых в реальном масштабе времени (РМВ) с помощью этого алгоритма. Однако для расчета воздействий ПМ на ПА в этих работах используется рекуррентный алгоритм решения ОЗД ПМ, предназначенный только для малых чисел Рейнольдса, т.е. для малых скоростей перемещения многозвенника, при которых еще действует принцип суперпозиции этих воздействий на его звенья со стороны вязкой среды. Но при быстрых перемещениях ПМ принцип суперпозиции нарушается, и используемые алгоритмы уже не позволяют корректно вычислять искомые силовые и моментные воздействия.

Кроме того, выполнить точный расчет силовых и моментных воздействий на этот ПА со стороны движущегося ПМ часто не представляется возможным по причине приближенности определения параметров взаимодействий ПМ с окружающей водной средой и механических параметров самой конструкции ПМ. Это приводит к значительному снижению точности стабилизации ПА при использовании разомкнутых СУ.

Поскольку даже эффективная система удержания ПА в заданной точке пространства в силу неизбежных ошибок навигационных приборов, инерционности ПА и динамических запаздываний в работе их двигателей

неспособна точно зафиксировать ПА в пространстве, то даже незначительные смещения ПА от его исходного положения неизбежно повлекут за собой отклонения рабочих органов (РО) ПМ от предписанных пространственных траекторий. Это значительно затрудняет выполнение подводных манипуляционных операций.

Целью и задачей представленной диссертационной работы является разработка и исследование методов синтеза высокоточных систем автоматического управления и стабилизации ПА в режиме их зависания вблизи объектов работ при работающих ПМ, а также методов автоматического управления режимами движения РО этих ПМ для их более точного и быстрого перемещения по заданным пространственным траекториям даже в условиях неизбежных (но незначительных) смещений ПА от исходных положений в пространстве.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи.

1. Разработать метод синтеза комбинированной автоматической системы стабилизации ПА в заданной точке пространства, включающей в себя разомкнутый контур, обеспечивающий подачу на движители ПА сигналов, пропорциональных вычисленному силовому и моментному воздействию со стороны работающего ПМ, и следящую систему, компенсирующую неточности указанных вычислений.

2. Разработать уточненный рекуррентный алгоритм решения ОЗД для ПМ, учитывающий особенности влияния вязкой среды на звенья этого ПМ, совершающие произвольные движения в пространстве с любой скоростью.

3. Разработать метод синтеза системы автоматической коррекции программной траектории движения РО ПМ, установленного на ПА, позволяющей с высокой точностью выполнять манипуляционные операции в режиме зависания ПА вблизи объекта работ, компенсируя с помощью дополнительных движений ПМ ошибки отработки его РО предписанных траекторий, вызванных незапланированным, но незначительным смещением

ПА от заданного положения в пространстве.

4. Разработать метод синтеза системы автоматического управления режимом движением РО ПМ, автоматически формирующей такую максимально возможную текущую программную скорость перемещения характерной точки этого РО вдоль сложных пространственных траекторий, при которой он не отходит от этих траекторий на расстояние, превышающее допустимое.

5. Экспериментально определить переменные коэффициенты вязкого трения, возникающие при поступательном движении звеньев ПМ, величины которых зависят от параметров этого движения в вязкой среде.

В соответствии с поставленными задачами была определена структура диссертации, состоящей из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

В первой главе приводится детальный анализ подводных технологических операций, выполняемых современными ПА с установленными ПМ. На основе анализа указанных операций было выявлено, что самым эффективным для выполнения любых манипуляционных работ является режим стабилизированного зависания ПА в заданной точке пространства вблизи объекта работ (исследований). Приведены результаты анализа особенностей и возможностей существующих методов и подходов к обеспечению стабилизации положения и ориентации ПА в исходном положении и отмечено, что отечественные и зарубежные источники указывают на значительный интерес исследователей к решению проблемы создания высокоточных систем удержания ПА в указанном режиме. Также приведены результаты анализа существующих методов синтеза СУ многозвенными ПМ. Выявлены особенности и недостатки этих подходов и методов, не позволяющие в полной мере решить важную для практического использования задачу точного управления ПМ.

В последнем разделе этой главы формулируются цели и задачи

исследования по разработке новых методов синтеза высокоточных комбинированных систем стабилизации ПА в режиме их зависания в заданной точке пространства при работающих ПМ, а также методов автоматического управления режимами движения РО этих ПМ.

Во второй главе диссертации отмечено, что, имея ряд существенных недостатков и допущений, ни один из существующих методов [94, 95, 97, 98, 109] не позволяет с высокой точностью вычислять величины силовых и моментных воздействий на ПА со стороны работающего ПМ. В этой главе для качественного решения задачи вычисления в РМВ и последующей компенсации двигателями ПА негативных воздействий со стороны движущегося ПМ разрабатывается новая модификация рекуррентного алгоритма решения ОЗД, позволяющая учесть особенности влияния вязкой среды на звенья этого манипулятора, совершающего произвольные движения с высокой скоростью. Так как каждая элементарная часть звена ПМ может иметь различную поперечную скорость движения относительно покоящейся жидкости по величине и направлению, а сила, действующая на эту элементарную часть со стороны вязкой среды, может иметь линейную или квадратичную зависимости от величины линейной скорости движения каждой части, то все звенья ПМ предлагается разбивать на конечное число элементарных частей одинаковой длины и рассчитывать силу вязкого трения, действующую на каждую из этих частей, с учетом значения числа Рейнольдса для всех движущихся частей звена ПМ.

В этой же главе для обеспечения точного вычисления величин силовых и моментных воздействий на ПА со стороны движущегося ПМ предложен универсальный подход к экспериментальному определению переменных коэффициентов вязкого трения, возникающих при поступательных перемещениях звеньев ПМ в водной среде, с помощью аэродинамического эксперимента, использующего аэродинамическую трубу АС-1 Филиала ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». Созданная экспериментальная установка

позволила определить коэффициенты вязкого трения для звеньев ПМ с помощью метода импульсов (по Джонсу) с учетом соблюдения подобия каждого звена и его испытуемой экспериментальной модели по рассчитываемому числу Рейнольдса. На этой установке также были определены зависимости указанных коэффициентов от углов наклона звеньев ПМ к набегающему потоку жидкости.

В третьей главе для принятой схемы установки движителей ПА выполнен расчет тяг, которые должен создавать каждый из этих движителей для компенсации определяемых с помощью разработанного алгоритма решения ОЗД негативных воздействий на ПА со стороны движущегося ПМ. Поскольку из-за приближенности определения параметров взаимодействий многозвенного ПМ с окружающей водной средой возникают ошибки в вычислениях его силовых и моментных воздействий на ПА, то появляется необходимость использования дополнительных следящих по положению и ориентации ПА систем, компенсирующих неточности указанных вычислений.

Для повышения точности стабилизации ПА в режиме его зависания в третьей главе диссертации рассматривается решение задачи синтеза комбинированной автоматической системы. Эта система включает в себя разомкнутый контур, обеспечивающий подачу на движители ПА сигналов, пропорциональных вычисленному силовому и моментному воздействию со стороны работающего манипулятора, и дополнительные замкнутые по всем линейным и угловым перемещениям этого аппарата автоматические системы, использующие высокоточные навигационные бортовые датчики и приборы. Для этих замкнутых систем в каждом контуре управления синтезированы соответствующие регуляторы.

Для исследования эффективности синтезированной комбинированной системы стабилизации создана математическая модель ПА с установленным на нем ПМ типа PUMA. Указанные исследования проводились при различных режимах работы многозвенного ПМ, что позволило объективно подтвердить

высокую эффективность разработанного метода и требуемое качество работы системы стабилизации ПА, синтезированной на основе этого метода.

В четвертой главе диссертации для сохранения заданной динамической точности движения РО ПМ в условиях неизбежных (малых) смещений стабилизируемого в режиме зависания ПА от его исходного положения в пространстве разработан метод синтеза системы автоматической коррекции программой траектории движения этого РО. На основе информации о текущей конфигурации ПМ, а также о линейных и угловых смещениях ПА от заданного положения, синтезированная система позволяет так управлять этим ПМ, чтобы его РО продолжал точно двигаться по предписанной траектории. Это обеспечивается за счет введения дополнительных программных движений ПМ, компенсирующих отклонения ПА от заданного положения. Формирование указанных дополнительных движений ПМ происходит в сочетании с работой комбинированной системы автоматической стабилизации ПА в режиме его зависания, которая обеспечивает требуемую точность этой стабилизации.

Результаты выполненного в четвертой главе математического моделирования полностью подтвердили эффективность предложенного подхода к комплексному решению задачи стабилизации ПА в пространстве в сочетании с автоматической коррекцией траектории движения РО ПМ. При этом предложенная многоуровневая система автоматической стабилизации положения и ориентации ПА позволяет добиться его достаточно точного удержания в заданной точке пространства в процессе работы ПМ, а введенная в контур управления этим многозвенным ПМ синтезированная система коррекции траектории движения РО обеспечивает требуемую динамическую точность управления, вполне достаточную для выполнения многих манипуляционных операций. Реализация синтезированной системы не вызывает затруднений.

В этой же главе предложен метод синтеза системы автоматического управления режимом движения характерной точки РО ПМ, которая

автоматически формирует такую максимально возможную переменную текущую программную скорость перемещения РО вдоль сложных пространственных траекторий, при которой указанная точка не отходит от этих траекторий на расстояние, превышающее допустимое. То есть указанная система одновременно обеспечивает и максимально возможную скорость перемещения РО ПМ вдоль заданной траектории, и заданную точность этого перемещения, учитывая возможный вход отдельных электроприводов многозвенника в насыщение. При этом не требуется непрерывно идентифицировать изменяющиеся параметры ПМ, а сама СУ имеет простую практическую реализацию. В целом в результате исследования синтезированной системы с помощью математического моделирования было выявлено, что ее использование позволяет манипулятору в 1.5 раза быстрее проходить одинаковые участки траекторий, увеличивая почти в 2 раза скорость движения РО ПМ на участках с малой кривизной. При этом на более криволинейных участках траекторий движения РО ПМ эффективность разработанной системы возрастает.

Следует отметить, что все синтезированные в диссертации системы защищены патентами на изобретения.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе, и сделаны обобщающие выводы.

По теме диссертации опубликовано 20 работ. Отдельные ее положения докладывались на трех международных и восьми всероссийских конференциях.

## **1. АНАЛИЗ ПОДХОДОВ И МЕТОДОВ СИНТЕЗА СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОДВОДНОГО АППАРАТА В РЕЖИМЕ ЗАВИСАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В настоящее время для исследования и освоения Мирового океана активно используются ПА, оснащаемые ПМ. С их помощью удается выполнять многие сложные технологические операции на любой глубине погружения. Сейчас наблюдается непрерывное расширение областей применения подводных робототехнических систем за счет выполнения ими новых видов работ. Качественное выполнение подводных манипуляционных операций требует создания принципиально новых систем управления ПА и ПМ, способных обеспечить удержание ПА в водной среде в заданной точке пространства вблизи объекта работ без его посадки на грунт, а также реализовать высокоточное управление движением РО ПМ в указанной ситуации.

В данной главе исследуются и анализируются технологические операции, для эффективного выполнения которых необходима работа ПМ в режиме зависания ПА в водной среде, приводятся результаты анализа существующих методов и подходов к обеспечению стабилизации положения и ориентации ПА в заданной точке пространства, выявляются особенности и недостатки этих подходов и методов, не позволяющие обеспечивать их эффективное применение при выполнении манипуляционных операций в режиме зависания ПА.

В конце главы формулируются цели и задачи исследования по разработке новых методов синтеза высокоточных систем автоматического управления и стабилизации ПА в режиме их зависания в заданной точке пространства при работающих ПМ, а также методов автоматического управления режимами движения РО этих ПМ для более точного и быстрого выполнения различных технологических операций.

### **1.1. Анализ работ, выполняемых подводными аппаратами, оснащенными многозвенными манипуляторами**

Современные ПА, оснащенные многозвенными ПМ, призваны заменить тяжелый и опасный труд водолазов. При этом они способны выполнять широкий спектр технологических операций в течение длительного времени на глубинах, недостижимых для человека в водолажном снаряжении. Работам, выполняемым ПА, посвящено большое количество публикаций. В частности, в работах [13, 16, 17, 46, 71, 72, 77, 80, 85, 86, 106] отмечается, что оборудованные манипуляторами ПА используются для выполнения многих видов работ, среди которых можно отметить следующие.

В области гидрогеологических, гидробиологических, геофизических и гидрохимических исследований выполняется селективный отбор проб грунта и образцов геологических пород; механическое отделение и бурение этих пород из монолитов; сбор отдельных видов биоорганизмов; установка и обслуживание различных приборов; определение состава и плотности грунта с помощью специальных щупов и буров; взятие проб воды в придонном слое и взвеси осадков специальными батометрами; взятие проб осадков грунтовыми герметично закрывающимися трубками; измерение параметров с помощью термисторных датчиков в различных слоях осадочного грунта.

В области нефте- и газодобычи ПА, оснащенные ПМ, используются для оказания помощи при повторном вводе бура в скважину; взятия проб нефти и газа; монтажа и ремонта гидрокоммуникаций; закручивания вентилях; очистки стальных конструкций от обрастания; резки тросов, кабелей и др. При выполнении аварийно-спасательных операций с помощью ПМ осуществляется освобождение винто-рулевой группы судов от намотанных сетей и тросов; срезка болтов; открытие люков; резка металлических обшивок и др. В военных целях осуществляется постановка и снятие мин; создание проходов в сетевых заграждениях; установка взрывных устройств.

Кроме того, ПА выполняют технологические подводные операции по очистке дна акваторий от камней и мусора; по установке и снятию гидроакустических маяков; по проведению сварочных работ, закреплению тросов, кабелей и другой аппаратуры на подводных объектах; по прокладке подводных кабелей, монтажу и демонтажу различного подводного оборудования; по осмотру подводных частей судов, гидросооружений и т.д.

Очевидно, что все перечисленные подводные работы могут быть выполнены только с помощью свободно перемещающихся в подводном пространстве ПА, способных с желаемой пространственной ориентацией подойти к объекту работ или исследований и зафиксироваться в заданной точке пространства без посадки на грунт и без взмучивания придонных слоев. Режим зависания в водной среде является наиболее важным режимом работы ПА, т.к. осуществление каких-либо манипуляционных операций практически невозможно без фиксации ПА вблизи объекта работ. Причем от точности удержания ПА вблизи объекта работ зависит успешность выполнения поставленных манипуляционных задач.

Для качественного выполнения указанных сложных технологических операций закрепленные на ПА ПМ должны иметь не менее шести степеней подвижности, позволяющих их рабочим инструментам перемещаться с любой пространственной ориентацией в любую точку зоны обслуживания этих ПМ. При этом ПА и ПМ должны обладать необходимыми мощностью и грузоподъемностью.

Удержание ПА в заданной точке пространства с заданной ориентацией вблизи объектов работ, необходимое для эффективного выполнения манипуляционных операций, возможно при посадке ПА на грунт, закреплении якорями, фиксации с помощью дополнительных манипуляторов-захватов, а также в процессе стабилизации линейных и угловых смещений ПА от заданного положения в пространстве с помощью упоров, создаваемых движителями этих ПА.

Посадка ПА на грунт часто осложняется наличием растительности или выступающих предметов, а также сложностью рельефа дна. Кроме того, при посадке ПА на дно в большинстве случаев происходит взмучивание придонных слоев, приводящее к потере видимости около объекта работ. В результате до начала осуществления технологических операций, как правило, должно пройти достаточно большое время для восстановления видимости. Более того, если поставленная манипуляционная задача подразумевает частые смены положения ПА на грунте относительно объекта работ, то использование этого способа позиционирования приводит к большим потерям рабочего времени.

Следует отметить, что существует большое количество технологических манипуляционных операций, которые требуется выполнять на значительном расстоянии от дна. В таких случаях может использоваться жесткая фиксация ПА на объекте работ. Для этого применяются специальные манипуляторы-захваты. Однако использование этих устройств возможно лишь в редких случаях, когда форма объекта работ позволяет осуществить это закрепление.

Другим примером жесткой фиксации вблизи объекта работ является постановка ПА на якорь. Якорные системы требуют установки специального оборудования, которое значительно увеличивает вес и габариты ПА. При этом процесс постановки ПА на якорь в заданной точке пространства требует больших временных затрат. Кроме того, зафиксированный с помощью якоря ПА практически полностью теряет маневренность в горизонтальной плоскости.

Таким образом, выполненный анализ показывает, что режим зависания ПА над или вблизи объекта работ является очень важным и может применяться для осуществления многих подводных манипуляционных операций. В этом режиме работы ПА способен с любой пространственной ориентацией подойти к объекту работ, а также легко перемещаться относительно этого объекта, занимая наиболее удобное для выполнения манипуляционных работ положение, не внося возмущений в придонные слои воды. При этом не требуется установка дополнительного оборудования и механических устройств.

Режим зависания ПА в водной среде при работающем ПМ должен обеспечиваться специальными системами стабилизации, которые позволяют удерживать ПА в заданной точке пространства с заданной ориентацией, несмотря на любые возмущающие воздействия со стороны окружающей водной среды, а также силовые и моментные воздействия со стороны работающего с высокой скоростью ПМ. Важность и актуальность решения задачи синтеза указанных систем отмечена в работах многих авторов [16, 71-73].

## **1.2. Анализ существующих методов синтеза систем стабилизации подводных аппаратов в режиме зависания при работающем манипуляторе**

В работах [32, 43, 48, 63, 92, 93, 97, 102, 108] отмечено, что в процессе перемещения ПМ в водной среде со стороны этого манипулятора на ПА начинают действовать значительные силовые и моментные воздействия, обусловленные не только инерционными и гравитационными силами, но также и силами, определяемыми взаимодействием движущегося ПМ с окружающей вязкой средой. Это приводит к смещению ПА относительно исходного положения и препятствует качественному выполнению многих манипуляционных операций. В результате возникает задача автоматической компенсации этих вредных силовых и моментных воздействий на ПА в РМВ. Далее будет выполнен анализ существующих подходов к решению указанной задачи.

В работе [104] представлен алгоритм согласования движений для автономных ПА и установленных на них ПМ. Этот алгоритм формирует желаемые траектории перемещения как ПА, так и ПМ таким образом, чтобы минимизировать общие гидродинамические взаимовлияния. Выполнено численное моделирование, результаты которого подтвердили эффективность предложенного метода. Однако этот подход малоэффективен для выполнения

большинства подводных технологических операций. Кроме того, он требует значительного увеличения затрат времени на выполнение поставленных манипуляционных задач.

В работе [98] описан подход к обеспечению стабилизации положения ПА при работающем ПМ, заключающийся в создании типового адаптивного алгоритма, который обеспечивает отработку ошибки системы стабилизации при внешних возмущениях со стороны ПМ. При этом рассматриваются перемещения ПМ и ПА только в горизонтальной плоскости. Динамические уравнения манипулятора также составляются с учетом его движения только в одной плоскости. Кроме того, остается непонятным, каким образом предполагается формировать ошибку позиционирования ПА в любой точке рабочего пространства без использования специальных навигационных систем.

В работах [93, 102] для определения силовых и моментных воздействий на ПА со стороны ПМ предлагается использовать сило-моментный датчик, установленный между ПА и ПМ. Предлагается оригинальное техническое решение, позволяющее компенсировать измеренные негативные воздействия на ПА с помощью установленного на этом аппарате плавника или весла. При этом перемещения этого плавника оказывают силовые и моментные воздействия на ПА, противоположные по направлению и равные по величине воздействиям, создаваемым работающим ПМ. Но перемещения ПМ и плавника рассматриваются только в вертикальной плоскости, что существенно осложняет практическое использование предложенного решения. При этом использование подобных компенсирующих устройств с ограниченными возможностями значительно усложняет конструкцию ПА.

Для оценки влияний работающего ПМ на ПА в тех случаях, когда установка сило-моментных датчиков между ними невозможна, в работе [102] предложен подход к построению специального наблюдателя. Но результаты моделирования, выполненного в [98, 102], показали, что воздействия со стороны работающего ПМ на ПА являются весьма значительными, и что для

стабилизации ПА все же следует использовать специальные средства автоматического управления.

В работах [43, 63, 94, 95, 97, 99, 109] указано, что для обеспечения высокоточной стабилизации ПА при работающем ПМ необходимо в РМВ точно вычислять величины силовых и моментных воздействий на ПА со стороны ПМ, что, в свою очередь, требует определения влияний водной среды на перемещающиеся в ней звенья ПМ. В частности в работах [95, 99] сделаны попытки описания динамических моделей многозвенных ПМ. В этих моделях предполагается, что коэффициенты присоединенных масс и вязкого трения, возникающие при движении звеньев ПМ в водной среде, являются постоянными. При этом в работе [99] предлагается подход к вычислению и оценке коэффициентов присоединенных масс, но не приводится оценка значений коэффициентов вязкого трения.

В работе [109] сделана попытка получения аналитической зависимости коэффициента вязкого трения звена ПМ от угла его наклона к набегающему потоку жидкости, однако не приводится экспериментального подтверждения указанной зависимости. При этом ни одна из представленных моделей не была проверена экспериментально.

В работе [97] рассматривается плоское движение однозвенного ПМ с высокой скоростью, при которой уже не действует принцип суперпозиции силовых воздействий на звено этого ПМ со стороны вязкой среды ввиду квадратичной зависимости этих воздействий от скоростей движения звена. Для определения указанных силовых воздействий предлагается использовать метод конечных элементов, предполагающий разбиение звена ПМ на конечное число сегментов и представление силы вязкого трения, действующей на это звено, в виде суммы сил, действующих на каждый его сегмент. В этой же работе описаны результаты экспериментального определения коэффициентов присоединенных масс и вязкого трения, возникающих при перемещении цилиндрического звена ПМ в водной среде нормально набегающему потоку

жидкости. Также приводится зависимость указанных коэффициентов от отношения пути, пройденного звеном, к диаметру этого звена, однако никакого обоснования этой зависимости не приводится. При этом методика выполнения экспериментов не обсуждается и не обосновывается, а расчет величин силовых и моментных воздействий на ПА со стороны работающего ПМ предлагается осуществлять только на основе математической модели ПМ, полагая, что реальные перемещения ПМ практически соответствуют задаваемым. Помимо этого, при расчете указанных воздействий не учитываются влияния скоростей и ускорений движения ПА на параметры движения ПМ. Принятые допущения могут привести к значительным ошибкам в определении силовых и моментных воздействий со стороны ПМ на ПА.

В работе [94] описан метод экспериментального определения зависимости коэффициентов вязкого трения от угла наклона звеньев ПМ к набегающему водному потоку. Однако полученные значения этих коэффициентов могут быть использованы для описания динамики только использованного в эксперименте двухзвенного ПМ, имеющего характерное соединение звеньев, а также торец второго звена, создающий во время движения помехи и вихреобразование. При этом в выражения, используемые для расчета искомых коэффициентов, входят только составляющие линейных скоростей движения сегментов звеньев ПМ, направленные перпендикулярно осям этих цилиндрических звеньев. Очевидно, что с помощью этих выражений можно рассчитать коэффициенты вязкого трения, возникающие при движении звеньев перпендикулярно набегающему потоку, но вычисление этих коэффициентов для других углов наклона звеньев ПМ невозможно.

В работе [103] представлена обобщенная модель, включающая в себя как ПА, так и закрепленный на нем ПМ, позволяющая учитывать постоянные времени, мощность и насыщения двигателей, а также частоту обновления и шумы датчиков этого ПА. Для проверки предложенной модели выполнено имитационное моделирование работы ПМ на незакрепленном ПА. Результаты

моделирования позволяют проанализировать зависимость пространственных смещений ПА в водной среде от характера движений ПМ. К недостаткам предложенной обобщенной модели можно отнести использование упрощенного описания ПМ, не учитывающего важных эффектов влияния вязкой среды на движущиеся в ней звенья этого ПМ, а также использование постоянных значений коэффициентов вязкого трения, что весьма приближенно. В этой же работе для выполнения подводных задач, связанных с движением этих ПА по заранее заданной траектории, предложен подход к управлению ПА с помощью системы с прогнозирующей моделью, использующей линеаризующую обратную связь. Однако этот подход неприменим для решения задачи стабилизации ПА в режиме его зависания в водной среде.

Наиболее интересные результаты получены в работе [48], где, к сожалению, рассмотрена только разомкнутая система компенсации движителями ПА силовых и моментных воздействий со стороны работающего ПМ, основанная на расчете в РМВ величин этих воздействий. При этом схема расположения движителей построена таким образом, чтобы обеспечивать формирование главного вектора и главного момента сил компенсации с любой их ориентацией в пространстве. Для расчета указанных векторов предложен наиболее эффективный и компактный рекуррентный алгоритм решения ОЗД многозвенного ПМ, учитывающий воздействия вязкой среды на движущиеся в ней звенья ПМ.

Недостатком предложенного алгоритма является то, что он предназначен только для малых чисел Рейнольдса, т.е. для малых скоростей перемещения многозвенника. Но современные ПМ, устанавливаемые на рабочие ПА, могут перемещаться с высокими скоростями. Для таких ПМ указанный принцип суперпозиции нарушается, и алгоритм, предложенный в работе [48], уже не позволяет правильно вычислять силовые и моментные воздействия на произвольно движущиеся звенья ПМ.

Следует отметить, что в работах [48, 63, 97] указывается на

необходимость использования следящих по положению автоматических систем, построенных на основе навигационной информации об истинном положении и ориентации ПА в заданной точке пространства, для увеличения точности удержания ПА в заданной точке пространства с заданной ориентацией. Это объясняется тем, что ввиду сложности математического описания движущегося ПМ и его взаимодействия с водной средой вычисления искомых силовых и моментных воздействий на ПА со стороны этого ПМ в некоторых случаях могут осуществляться приближенно, что снижает точность стабилизации этого ПА в пространстве.

Таким образом, выполненный детальный анализ существующих систем и устройств стабилизации ПА в толще воды показывает, что эта важная для практического использования задача еще далека от завершения и требуется искать новые эффективные пути ее решения.

### **1.3. Анализ особенностей и возможностей существующих методов синтеза систем управления подводными манипуляторами**

В режиме зависания ПА вблизи объекта работ управление ПМ может осуществляться в ручном, полуавтоматическом или супервизорном режимах работы с помощью специальных задающих органов или целеуказателей. Особенности таких способов и устройств управления описаны в работах [14, 15, 20, 33, 42, 51, 52, 53 - 55]. В частности в работах [51, 52] рассматриваются методы полуавтоматического телеуправления многозвенными манипуляторами, позволяющие с помощью простейших задающих устройств, кинематические схемы которых отличаются от кинематических схем соответствующих манипуляторов, выполнять сложные технологические операции, автоматически учитывая изменяющуюся во время работы пространственную ориентацию оптической оси телекамеры, используемой для обзора рабочего пространства.

Однако в этих работах представлены только методы и алгоритмы выработки сигналов программного управления, и не учитываются особенности взаимодействий ПМ с вязкой средой.

В работе [19] выполнен анализ существующих ПМ, а в работе [74] рассматриваются примеры использования ПМ с компьютерным телеуправлением. В этой же работе исследуются виды работ, которые могут выполняться с помощью разработанных манипуляционных систем.

В работе [91] выполнен анализ рабочей зоны ПМ, установленного на ПА, а также анализ оптимальной конфигурации этого многозвенника для выполнения подводных технологических операций с целью снижения нагрузки на оператора этого ПМ.

К настоящему времени разработано большое количество подходов [7, 8, 12, 23, 26 – 31, 36, 40, 45, 47, 49, 69, 84, 90, 96, 101, 105], позволяющих синтезировать высокоточные СУ исполнительными устройствами манипуляторов. Главный недостаток этих подходов заключается в том, что в процессе формирования сигналов управления не учитываются особенности вязкой среды, в которой работает ПМ.

В работе [47] предложен метод синтеза адаптивных корректирующих устройств электроприводов каждой степени подвижности ПМ, обеспечивающих требуемую динамическую точность и инвариантность других показателей качества их работы к эффектам взаимовлияния между всеми степенями подвижности этого манипулятора. Так как скорректированные сигналы управления электроприводами формируются на основе алгоритма решения ОЗД манипулятора, то указанный метод может быть использован и для адаптивной коррекции электроприводов ПМ.

Однако заданная динамическая точность работы манипуляторов сохраняется не на всех участках сложных пространственных траекторий и только в том случае, когда все их усилительные и исполнительные элементы не входят в насыщение при отработке сигналов управления, сформированных

этими системами. Снижение динамической точности управления даже при использовании высококачественных СУ наблюдается и при повышенной скорости движения в отдельных суставах ПМ, что часто имеет место при высокой скорости перемещения их РО по отдельным участкам сложных траекторий.

В работе [49] был предложен метод подстройки параметров программных сигналов движения многосвязников на основе амплитудно-частотных характеристик их приводов, обеспечивающий максимально возможную скорость движения РО без снижения заданной динамической точности управления. Однако для использования указанного метода в процессе работы ПМ в водной среде необходимо точно определять параметры этих амплитудно-частотных характеристик, что является достаточно сложной задачей. Кроме того, использование точных аналитических выражений, описывающих указанные характеристики, значительно усложняет использование этого метода.

Интересный алгоритм стабилизации положения ПМ, установленного на ПА, предложен в работе [87], где для прогнозирования смещений ПА используется наблюдатель, основанный на модели этого ПА с установленным ПМ. Предполагаемые движения ПА должны компенсироваться манипуляционной системой в нужный момент времени. К недостаткам этого подхода можно отнести использование при построении наблюдателя динамической модели ПМ, не учитывающей все особенности взаимодействия движущихся звеньев этих ПМ с окружающей водной средой. Кроме того, представленный алгоритм имеет сложную практическую реализацию.

В целом анализ существующих методов синтеза СУ ПМ показал, что даже при использовании современных СУ этими ПМ не удастся обеспечить качественное выполнение манипуляционных операций в условиях незапланированных смещений ПА от заданного положения в пространстве. Поэтому задача разработки методов автоматического управления режимами

движения рабочих органов этих ПМ для более точного и быстрого выполнения различных подводных технологических операций также остается актуальной по сей день.

#### **1.4. Постановка задачи исследования**

На основе проведенного анализа было определено, что решить задачу обеспечения высокоточной стабилизации ПА в режиме их зависания при работающих ПМ можно с использованием известного подхода, реализующего рекуррентный алгоритм решения ОЗД ПМ для построения разомкнутой системы компенсации движителями ПА силовых и моментных воздействий, появляющихся при работе ПМ [48] и непрерывно вычисляемых в РМВ с помощью этого алгоритма. Однако, как уже было отмечено ранее, расчет воздействий со стороны движущегося ПМ на стабилизируемый ПА с использованием указанного рекуррентного алгоритма возможен только для малых чисел Рейнольдса, при которых еще действует принцип суперпозиции этих воздействий на его звенья со стороны вязкой среды ввиду линейной зависимости указанных воздействий от скоростей движения всех звеньев ПМ.

В результате для более точного вычисления и последующей компенсации движителями ПА негативных воздействий со стороны работающего ПМ в диссертации предлагается разработать новую модификацию известного рекуррентного алгоритма решения ОЗД [48], но уже для ПМ, перемещающихся в водной среде с высокими скоростями. Этот алгоритм должен учитывать и квадратичную зависимость возникающих воздействий от скорости движения звеньев ПМ. Для реализации нового алгоритма решения ОЗД все звенья ПМ целесообразно разбивать на малые элементы [63, 94, 97] и в дальнейшем вычислять суммарные силовые воздействия со стороны вязкой среды на все эти элементы.

Для обеспечения более точного вычисления указанных воздействий

следует точно определить коэффициенты вязкого трения, возникающего при реальном перемещении звеньев ПМ в водной среде, а также зависимости этих коэффициентов от углов наклона звеньев к набегающему потоку жидкости.

Однако выполнить точный расчет силовых и моментных воздействий на этот ПА со стороны движущегося ПМ часто не представляется возможным по причине приближенности определения параметров взаимодействий ПМ с окружающей водной средой и механических параметров самой конструкции ПМ. Это приводит к значительному снижению точности стабилизации ПА при использовании разомкнутых СУ. Поэтому для увеличения точности этой стабилизации необходимо вводить комбинированные СУ, включающие в себя указанный выше разомкнутый контур и дополнительные замкнутые по всем линейным и угловым перемещениям автоматические системы, использующие высокоточные навигационные бортовые датчики и приборы.

Поскольку даже комбинированная система стабилизации в силу неизбежных ошибок навигационных приборов, инерционности ПА и динамических запаздываний в работе их движителей неспособна точно зафиксировать ПА в пространстве, то даже незначительные смещения ПА от его исходного положения неизбежно повлекут за собой отклонения РО ПМ от предписанных пространственных траекторий. Для сохранения заданной точности движений этих РО в диссертации предлагается разработать метод синтеза системы непрерывной автоматической коррекции программных траекторий этих движений с учетом незапланированных смещений ПА от их исходных положений. Эта коррекция, обеспечивая дополнительное перемещение РО ПМ, должна осуществляться на основе информации о реальном угловом и линейном смещении ПА относительно его исходного положения, которая должна формироваться с помощью высокоточных навигационных и гироскопических систем, а также датчиков, непрерывно измеряющих конфигурацию ПМ.

Кроме того, для увеличения скорости выполнения подводных

технологических операций необходимо разработать метод синтеза СУ режимом движения РО ПМ, автоматически формирующей такую максимально возможную текущую программную скорость перемещения этого РО вдоль сложных пространственных траекторий, при которой этот орган не отходит от указанной траектории на расстояние, превышающее допустимое. Разработку этого метода предлагается выполнять на основе подхода, рассмотренного в работе [64] и позволяющего задавать предельно возможную скорость перемещения этих РО по всем участкам пространственных траекторий с учетом возможного входа движителей ПА в насыщение. Для формирования указанных программных сигналов предполагается вводить дополнительный контур, который на основе информации о текущей точности движения ПА по заданным пространственным траекториям должен задавать максимально возможное значение желаемой скорости этого движения. При этом необходимо учитывать кинематические и динамические особенности ПМ с постоянно изменяющейся конфигурацией исполнительного органа.

Указанный комплексный подход должен обеспечить качественное решение проблемы обеспечения высокоточной стабилизации ПА в режиме его зависания в водной среде вблизи объекта работ, а также точное и быстрое выполнения различных манипуляционных операций в этой среде.

### **1.5. Выводы**

В первой главе на основе выполненного анализа подводных технологических операций было выявлено, что самым эффективным для выполнения любых манипуляционных работ является режим стабилизируемого зависания ПА в заданной точке пространства вблизи объекта работ. Отечественные и зарубежные источники указывают на значительный интерес исследователей к решению проблемы создания высокоточных систем стабилизации ПА в указанном режиме. Однако, существующие методы и

подходы еще не позволяют в полной мере решить эту важную для практического использования задачу, и требуется искать новые эффективные пути ее решения.

Исходя из этого, целью диссертации является разработка и исследование новых методов синтеза высокоточных систем автоматического управления и стабилизации ПА в режиме их зависания в заданной точке пространства при работающих ПМ, а также методов автоматического управления режимами движения РО этих ПМ для более точного и быстрого выполнения различных технологических операций.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе будут решены следующие задачи:

- разработать метод точной комплексной стабилизации ПА в режиме его зависания над или вблизи объекта работ при работающем ПМ;
- разработать методы синтеза систем автоматического управления режимами движения рабочих органов ПМ, установленных на ПА, для точного и быстрого выполнения произвольных технологических операций;
- разработать эффективный алгоритм решения ОЗД для многостепенного ПМ, звенья которого совершают произвольные движения в водной среде;
- экспериментально определить параметры вязкого трения при произвольном перемещении звеньев ПМ под водой.

## **2. ОСОБЕННОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЗВЕНЬЯ МНОГОЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА, ПРОИЗВОЛЬНО ПЕРЕМЕЩАЮЩЕГОСЯ В ВОДНОЙ СРЕДЕ**

Как уже отмечалось в первой главе, ни один из известных методов не позволяет с высокой точностью вычислить силовые и моментные воздействия на ПА со стороны закрепленного на нем перемещающегося ПМ. В этой главе для решения задачи вычисления силовых и моментных воздействий на ПА со стороны произвольно движущегося ПМ предлагается использовать рекуррентный алгоритм решения ОЗД, позволяющий более точно учитывать все основные особенности взаимодействия звеньев этого манипулятора с вязкой водной средой. Этот алгоритм построен на основе полученных ранее соотношений, описанных в работах [48, 63].

Для более точного вычисления величин вязких трений в главе описаны особенности экспериментального определения переменных коэффициентов этих трений, зависящих от углов наклона звеньев ПМ к набегающему потоку жидкости.

### **2.1. Определение силовых воздействий на однородное цилиндрическое звено подводного манипулятора, совершающее произвольные движения в вязкой среде**

В работе [48] уже решалась задача определения силовых воздействий на однородное цилиндрическое звено ПМ, перемещающееся в водной среде с малой скоростью, при которой можно было использовать принцип суперпозиции. Ниже будут рассмотрены особенности вычисления этих воздействий при высоких скоростях перемещения звеньев ПМ, когда указанный принцип становится несправедливым [63].

Будем рассматривать ПМ с шарнирами пятого класса. Это имеет место

практически во всех современных манипуляторах. В этом случае число звеньев ПМ всегда будет совпадать с числом его степеней подвижности (свободы). Рассмотрим  $i$ -е ( $i = \overline{1, n}$ ) однородное цилиндрическое звено ПМ (см. рис. 2.1), совершающее произвольное движение в водной среде с произвольной, определяемой возможностями приводов скоростью, где  $n$  – число звеньев (степеней подвижности) ПМ. При этом движении каждая элементарная часть  $\delta h_i^*$  звена  $i$  может иметь различную скорость движения относительно покоящейся жидкости не только по величине, но и по направлению. В работах [32, 43, 48] отмечается, что сила, действующая на элементарную часть  $\delta h_i^*$  со стороны вязкой среды, может линейно или по квадратичному закону зависеть от величины скорости движения этой части. Поэтому использование подхода, описанного в работе [48] и предполагающего рассмотрение всех звеньев ПМ без их деления на элементарные части, корректно только при малых скоростях движения ПМ, когда принцип суперпозиции при разделении линейной и угловой скоростей движения этих звеньев на продольные и поперечные составляющие остается справедливым. При высоких скоростях движения ПМ, как отмечается в работах [63, 94, 97], каждое его звено необходимо обязательно разбивать на  $N$  элементарных частей длиной  $\delta h_i^*$  (см. рис. 2.1). При этом значение  $N$  определяется длиной соответствующего звена ПМ.

На рис. 2.1 введены следующие обозначения:  $X_i Y_i Z_i$  - связанная со звеном  $i$  правая система координат (СК), построенная на основе подхода Денавита – Хартенберга [84]; вектор  $v_i \in R^3$  - линейной скорости движения шарнира  $i$ ;  $\omega_i \in R^3$  - угловая скорость вращения звена  $i$ ;  $p_i^* \in R^3$  - вектор, совпадающий с продольной осью звена  $i$ , определяющий положение шарнира  $(i + 1)$  относительно шарнира  $i$ ;  $e_{Li} \in R^3$  - единичный вектор, направленный вдоль продольной оси звена  $i$ ;  $h_j^* \in R^3$  - вектор, определяющий центр масс

элементарной части  $j$  звена  $i$  длиной  $\delta h_i^*$  относительно шарнира  $i$ ;

$\alpha_i^* = \arccos \frac{v_i \cdot p_i^*}{|v_i| |p_i^*|}$  – угол между векторами  $v_i$  и  $p_i^*$ ;  $l_i$  и  $r_i$  – соответственно,

длина и радиус круглого поперечного сечения звена  $i$ ;  $(\times)$  и  $(\cdot)$  – соответственно, векторное и скалярное произведения векторов.

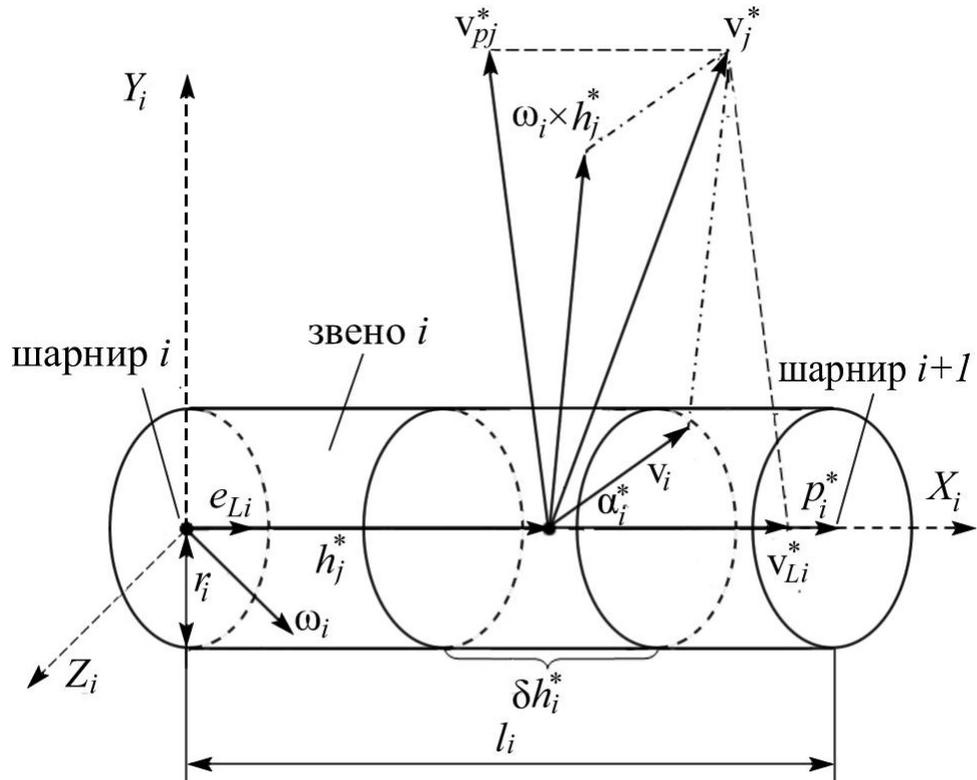


Рис. 2.1. Схема расположения векторов скоростей элементарной части звена  $i$  при произвольном пространственном движении ПМ

Векторы  $v_i$  и  $\omega_i$  могут быть определены с помощью рекуррентных соотношений [48, 84]

$$v_i = A_i^{i-1} (v_{i-1} + \omega_{i-1} \times p_{i-1}^*), \quad v_1 = v_0, \quad i = \overline{2, n};$$

$$\omega_i = A_i^{i-1} \omega_{i-1} + e_i \cdot \dot{q}_i, \quad \omega_0 = \omega_0^*, \quad i = \overline{1, n},$$

где  $A_i^{i-1}$  – матрица перевода векторов из  $(i-1)$  - й в  $i$  - ю СК;  $e_i = (0\ 0\ 1)^T$  – единичный вектор, направленный вдоль оси шарнира  $i$ ;  $v_0 \in R^3$  – линейная скорость точки крепления ПМ к ПА,  $\omega_0^* \in R^3$  – угловая скорость вращения ПА;  $q_i$  – обобщенная координата  $i$  ПМ.

Вектор линейной скорости движения центра масс каждого элемента  $j$  звена  $i$  определяется выражением  $v_j^* = v_i + \omega_i \times h_j^*$ ,  $j = \overline{1, N}$ , где  $h_j^* = \frac{1}{2}(2j-1)\delta h_i^* e_{Li}$ .

Вектор  $v_j^*$  разобьём на поперечную  $v_{pj}^* \in R^3$  и продольную  $v_{Li}^* \in R^3$  составляющие (см. рис. 2.1). При этом вектор  $v_{Li}^*$ , являющийся проекцией вектора  $v_i$  на вектор  $p_i^*$ , одинаков для всех элементарных частей звена  $i$  и определяется выражением  $v_{Li}^* = |v_i| e_{Li} \cos \alpha_i^*$ , а вектор  $v_{pj}^*$  каждой элементарной части  $j$  может быть определен по формуле  $v_{pj}^* = v_j^* - v_{Li}^*$ .

В работах [32, 48] указано, что при малых значениях числа Рейнольдса ( $Re \leq 10^3$ ) силовое воздействие со стороны вязкой среды на движущееся цилиндрическое тело линейно от величины скорости этого движения, а при больших ( $10^3 < Re \leq 2 \cdot 10^5$ ) указанная зависимость является квадратичной. На практике при работе ПМ всегда выполняется неравенство  $Re < 2 \cdot 10^5$ .

Используя общую формулу для определения чисел  $Re$  [32]:  $Re = \frac{\rho v D}{\eta}$ , (где  $\rho$  и  $\eta$  – соответственно, плотность и вязкость жидкости;  $v$  и  $D$  – соответственно, линейная скорость и характерный размер тела) можно определить эти числа для цилиндрических звеньев ПМ (или их участков), движущихся параллельно  $Re_{Li} = \frac{\rho v_{Li}^* l_i}{\eta}$ , и перпендикулярно  $Re_{pj} = \frac{2\rho v_{pj}^* r_i}{\eta}$  их продольным осям со скоростями  $v_{Li}^*$  и  $v_{pj}^*$ , соответственно.

Для  $Re_{Li} \leq 10^3$  составляющая силы вязкого трения, направленная вдоль продольной оси звена ПМ, определяется по формуле  $F_{RLi} = k_{Li} \eta v_{Li}^*$ , а для  $10^3 < Re_{Li} \leq 2 \cdot 10^5$  - по формуле  $F_{RLi} = \frac{1}{2} \rho k_{Li} s_i v_{Li}^{*2}$ , где  $k_{Li}$  - экспериментально определяемый коэффициент;  $s_i = \pi r_i^2$  - площадь основания цилиндрического звена  $i$ .

Поперечная сила вязкого трения, действующая на соответствующую элементарную часть  $j$  звена  $i$ , при  $Re_{pj} \leq 10^3$  определяется по формуле  $F_{Rpj} = k_{pi}^* \eta v_{pj}^*$ , а при выполнении неравенства  $10^3 < Re_{pj} \leq 2 \cdot 10^5$  - по формуле  $F_{Rpj} = \rho k_{pi}^* r_i \delta h_i^* v_{pj}^{*2}$ , где  $k_{pi}^*$  - экспериментально определяемый коэффициент.

Суммарную силу  $F_{Rpi} = \sum_{j=1}^N F_{Rpj}$ , действующую на звено  $i$ , можно определить как сумму сил, приложенных к каждой элементарной части  $j$  этого звена. Так как точка приложения силы  $F_{Rpi}$  к звену  $i$  неизвестна, то момент  $M_{Rpi}$  от этой силы в шарнире  $i$  лучше определить суммой  $M_{Rpi} = \sum_{j=1}^N M_{Rpj}$  моментов  $M_{Rpj} = h_j^* \times F_{Rpj}$ , создаваемых силами  $F_{Rpj}$ .

Определив силовые и моментные воздействия со стороны вязкой среды на каждое из движущихся звеньев ПМ [10], можно перейти к составлению алгоритма решения ОЗД, позволяющего определить силовые и моментные воздействия в каждом суставе многозвенника, а в результате - искомые силовые и моментные воздействия на ПА со стороны работающего ПМ.

## 2.2. Рекуррентный алгоритм решения обратной задачи динамики для многозвенного подводного манипулятора

В основу рекуррентного алгоритма решения ОЗД для многозвенного ПМ

положена хорошо известная двухэтапная схема вычислений. Согласно этой схеме вначале, начиная с первого и кончая последним звеном манипулятора, последовательно по рекуррентным соотношениям осуществляется вычисление угловых скоростей и ускорений центров масс его звеньев. После этого также по рекуррентным формулам в обратном порядке производится определение сил и моментов, действующих во всех его шарнирах.

С учётом полученных выше соотношений алгоритм решения ОЗД для ПМ запишется в виде

$$\begin{aligned}
\omega_i &= A_i^{i-1} \cdot \omega_{i-1} + e_i \cdot \dot{q}_i \cdot \bar{\sigma}_i, \omega_0 = \omega^*_0, i = \overline{1, n}; \\
\dot{\omega}_i &= A_i^{i-1} \cdot \dot{\omega}_{i-1} + [(A_i^{i-1} \cdot \omega_{i-1}) \times e_i \cdot \dot{q}_i + e_i \cdot \ddot{q}_i] \cdot \bar{\sigma}_i, \dot{\omega}_0 = \dot{\omega}^*_0, i = \overline{1, n}; \\
\ddot{P}'_i &= A_i^{i-1} \cdot (\ddot{P}'_{i-1} + \delta_{i-1} \cdot p_{i-1}^*) + (2\dot{q}_i \cdot \omega_i \times e_i + \ddot{q}_i \cdot e_i) \cdot \bar{\sigma}_i, \ddot{P}'_0 = P_0^*, i = \overline{1, n}; \\
\ddot{r}_{mi} &= \ddot{P}'_i + \delta_i \cdot r_i^*, i = \overline{1, n}; \\
v_i &= A_i^{i-1} \cdot (v_{i-1} + \omega_{i-1} \times p_{i-1}^*), v_1 = v_0, i = \overline{2, n}; \\
v_{Ai} &= v_i + \omega_i \times r_i^*, \psi_i = \arccos \frac{v_{Ai} \cdot p_i^*}{|v_{Ai}| \cdot |p_i^*|}, i = \overline{1, n}; \\
\alpha_i^* &= \arccos \frac{v_i \cdot p_i^*}{|v_i| \cdot |p_i^*|}, \beta_i^* = \arccos \frac{\omega_i \cdot p_i^*}{|\omega_i| \cdot |p_i^*|}, i = \overline{1, n}; \\
r_{pi} &= r_i^* + K_{Ai} \cdot v_{Ai}, i = \overline{1, n}; \\
v_j^* &= v_i + \omega_i \times h_j^*, \omega_{Li} = |\omega_i| e_{Li} \cos \beta_i^*, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, N}; \\
v_{Li}^* &= |v_i| e_{Li} \cos \alpha_i^*, v_{pj}^* = v_j^* - v_{Li}^*, i = \overline{2, n}, j = \overline{1, N}; \\
Re_{Li} &= \frac{\rho v_{Li}^* l_i}{\eta}, i = \overline{n, 1}; \\
\text{если } Re_{Li} &\leq 10^3, \text{ то } F_{RLi} = k_{Li} \eta v_{Li}^*, i = \overline{n, 1}; \\
\text{если } Re_{Li} &> 10^3, \text{ то } F_{RLi} = \frac{1}{2} \rho k_{Li} s_i v_{Li}^{*2}, i = \overline{n, 1}; \\
Re_{pj} &= \frac{2\rho v_{pj}^* r_i}{\eta}, i = \overline{n, 1}, j = \overline{1, N};
\end{aligned} \tag{2.1}$$

если  $\text{Re } p_j \leq 10^3$ , то  $F_{Rpj} = k_{pi}^* \eta v_{pj}^*$ ,  $i = \overline{n, 1}$ ,  $j = \overline{1, N}$ ;

если  $\text{Re } p_j > 10^3$ , то  $F_{Rpj} = \frac{1}{2} \rho k_{pi}^* r_i \delta h_i^* v_{pj}^{*2}$ ,  $i = \overline{n, 1}$ ,  $j = \overline{1, N}$ ;

$$F_{Rpi} = \sum_{j=1}^N F_{Rpj}, i = \overline{n, 1}, j = \overline{1, N};$$

$$M_{Rpj} = h_j^* \times F_{Rpj}, j = \overline{1, N};$$

$$M_{Rpi} = \sum_{j=1}^N M_{Rpj}, i = \overline{n, 1}, j = \overline{1, N};$$

$$M_{Li} = k_{Li}^* \eta r_i \omega_{Li}, i = \overline{n, 1};$$

$$F_i = A_i^{i+1} \cdot F_{i+1} + (m_i + \Pi_{mi}) \cdot \ddot{r}_{mi} + F_{RLi} + F_{Rpi}, F_{n+1} = 0, i = \overline{n, 1};$$

$$M_i = A_i^{i+1} \cdot M_{i+1} + p_i^* \times (A_i^{i+1} \cdot F_{i+1}) +$$

$$+ r_i^* \times (m_i \cdot \ddot{r}_{mi}) + r_{pi} \times (\Pi_{mi} \cdot \ddot{r}_{mi}) + (\tau_i + T_i) \cdot \dot{\omega}_i +$$

$$+ \omega_i \times ((\tau_i + T_i) \cdot \omega_i) + M_{Rpi} + M_{Li}, M_{n+1} = 0, i = \overline{n, 1};$$

где  $\delta_i = \begin{bmatrix} -(\omega_{i(2)}^2 + \omega_{i(3)}^2) & \omega_{i(1)} \cdot \omega_{i(2)} - \dot{\omega}_{i(3)} & \omega_{i(1)} \cdot \omega_{i(3)} + \dot{\omega}_{i(2)} \\ \omega_{i(1)} \cdot \omega_{i(2)} + \dot{\omega}_{i(3)} & -(\omega_{i(1)}^2 + \omega_{i(3)}^2) & \omega_{i(2)} \cdot \omega_{i(3)} - \dot{\omega}_{i(1)} \\ \omega_{i(1)} \cdot \omega_{i(3)} - \dot{\omega}_{i(2)} & \omega_{i(2)} \cdot \omega_{i(3)} + \dot{\omega}_{i(1)} & -(\omega_{i(1)}^2 + \omega_{i(2)}^2) \end{bmatrix}$  (нижний

цифровой индекс в круглых скобках указывает на их номер в соответствующих векторах);  $v_{Ai} \in R^3$  - линейная скорость центра величины звена  $i$ ;  $\sigma_i = 1$ , если шарнир  $i$  поступательный и  $\sigma_i = 0$ , если он вращательный ( $\overline{\sigma}_i = 1 - \sigma_i$ );  $m_i$  - масса звена  $i$ ;  $\dot{\omega}_i \in R^3$  - его угловое ускорение;  $\omega_{Li} \in R^3$  - составляющая угловой скорости  $\omega_i$ , параллельная продольной оси звена  $i$ ;  $\Pi_{mi}$  - присоединенные к звену  $i$  массы жидкости;  $\ddot{r}_{mi} \in R^3$  - линейное ускорение центра масс звена  $i$ ;  $r_{pi} \in R^3$  - вектор, задающий положение центра масс  $\Pi_{mi}$  относительно шарнира  $i$ ;  $r_i^* \in R^3$  - вектор, задающий положение центра масс звена относительно шарнира  $i$ ;  $k_{Li}^*$  - экспериментально определяемый коэффициент;  $K_{Ai}$  - параметр, зависящий от  $|v_{Ai}|$  и угла  $\psi_i$ ;  $\tau_i \in R^{3 \times 3}$  - тензор инерции звена  $i$  относительно его

центра масс;  $T_i \in R^{3 \times 3}$  - тензор инерции массы жидкости, присоединенной к звену  $i$ ;  $F_i, M_i \in R^3$  - сила и момент этой силы, действующие в шарнире  $i$ , соответственно;  $P_0^* = -g + \ddot{P}_{\text{ПА}}$ , если центры масс звеньев ПМ не совпадают с их центрами величины;  $P_0^* = g \left( \frac{w_i}{m_i} - 1 \right) + \ddot{P}_{\text{ПА}}$ , если центры масс звеньев совпадают с их центрами величины;  $\ddot{P}_{\text{ПА}} \in R^3$  - линейное ускорение точки крепления ПМ к ПА;  $g$  - ускорение свободного падения тела;  $w_i$  - масса жидкости, вытесненной звеном  $i$ .

Таким образом, рассмотренный выше рекуррентный алгоритм (2.1) решения ОЗД для ПМ позволяет вычислить силу  $F_1$  и момент  $M_1$ , с которыми движущийся в СК  $X_1Y_1Z_1$  в водной среде ПМ воздействует на ПА в точке его крепления к этому аппарату [60]. Указанные сила и момент должны быть скомпенсированы соответствующими тягами движителей ПА для его точной стабилизации в режиме зависания в заданной точке подводного пространства с заданной ориентацией.

### 2.3. Особенности экспериментального определения переменных коэффициентов вязкого трения

Поскольку аналитического определения коэффициентов вязкого трения при движении звеньев ПМ в водной среде ввиду их сложной зависимости от параметров движения этих звеньев и многих других физических факторов не существует, то для точного вычисления величин силовых и моментных воздействий на ПА со стороны работающего ПМ эти коэффициенты необходимо определять экспериментально.

Необходимо отметить, что числа Рейнольдса становятся меньше  $10^3$  для звеньев ПМ с диаметрами поперечных сечений 0.1 м при их перемещениях в водной среде со скоростями, меньшими 0.01 м/с. Однако, в процессе

выполнения большинства рабочих операций звенья ПМ имеют значительно большие скорости, при которых появляются заметные динамические воздействия на ПА. Поэтому согласно рекомендациям, изложенным в работе [32], при значениях чисел Рейнольдса меньше  $10^3$  влиянием вязкой среды на звенья этих ПМ можно пренебрегать, но в некоторых случаях в разработанном алгоритме решения ОЗД ПМ все же целесообразно использовать приведенные в работах [25, 32] значения коэффициентов вязкого трения, не зависящие от углов наклона звеньев ПМ к набегающему потоку жидкости, и при малых скоростях движения звеньев.

При экспериментальном определении указанных коэффициентов в процессе движения звеньев ПМ со скоростями, при которых числа Рейнольдса находятся в диапазоне  $10^3 < Re \leq 2 \cdot 10^5$ , каждое звено ПМ представлялось в виде однородного цилиндрического тела, на которое со скоростью  $v_p \in R^3$  набегал встречный водный поток. В этом случае со стороны вязкой среды оказываются силовые воздействия на эти звенья, имеющие квадратичную зависимость от величины скорости их перемещения [32]:

$$F_v = \frac{1}{2} \rho k^* \hat{S} v_p^2, \quad (2.2)$$

где  $k^*$  – коэффициент вязкого трения;  $\hat{S}$  – площадь проекции боковой поверхности звена ПМ на плоскость, нормальную вектору  $v_p$ .

В работе [25] отмечено, что при строго поперечном обтекании тел цилиндрической формы в указанном диапазоне чисел Рейнольдса коэффициент вязкого трения практически не изменяется, т.е. можно принять  $k^* = \text{const}$ .

Поскольку каждый торец каждого звена ПМ соединен либо с соседним звеном, либо с его РО, либо с ПА, то торцы этих звеньев не будут влиять на величину коэффициента  $k^*$ , которая не зависит от длины звеньев ПМ. Поэтому

при экспериментальном определении  $k^*$  звено ПМ должно рассматриваться как бесконечно длинное. Однако при наклоне звена ПМ к набегающему потоку жидкости согласно выражению (2.2) величина  $F_v$  будет меняться пропорционально длине указанного звена.

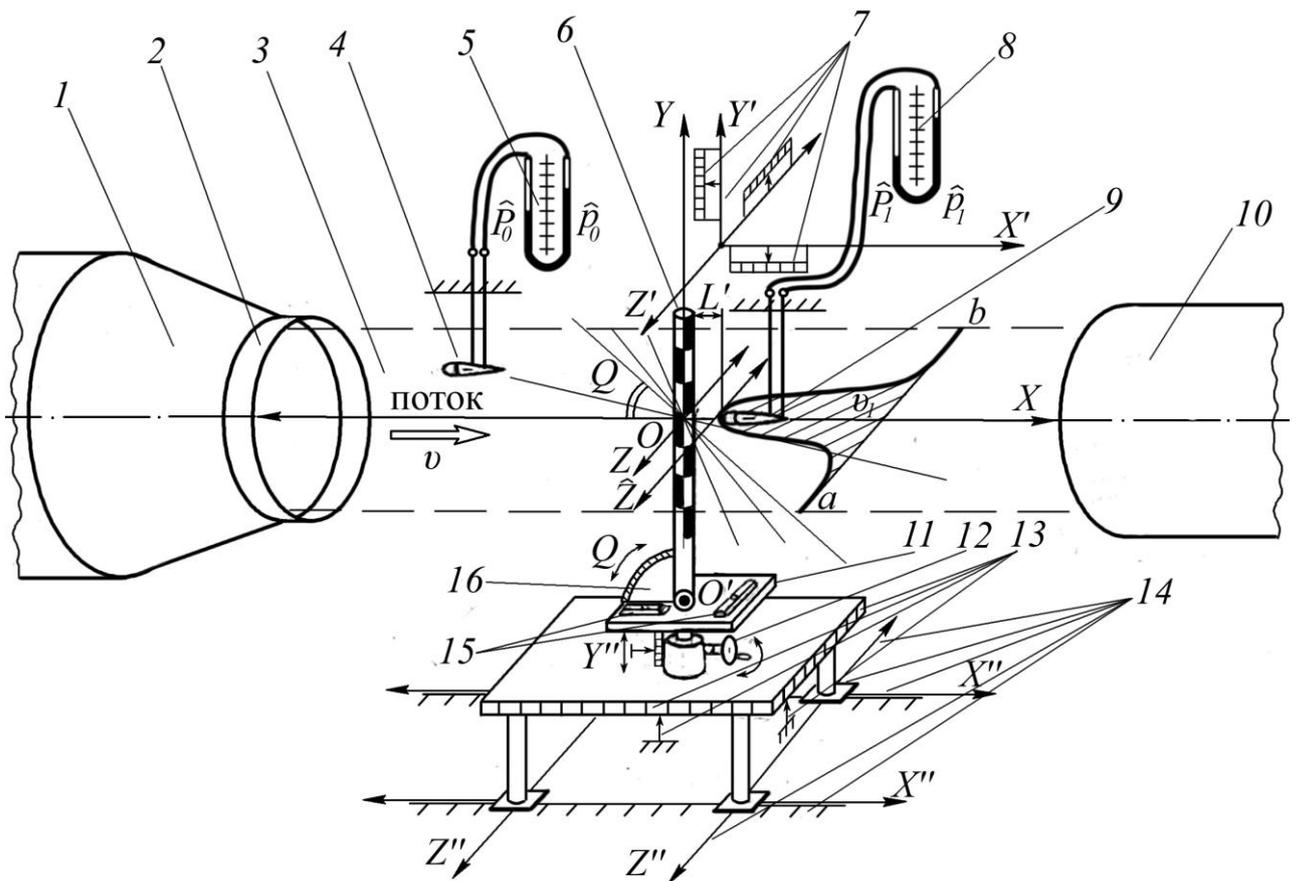
Определить величину коэффициента  $k^*$  для бесконечно длинного однородного цилиндрического звена ПМ можно с помощью аэродинамического эксперимента, соблюдая при этом подобие звена ПМ и его модели по числу Рейнольдса [70]. При определении коэффициента  $k^*$  наиболее приемлем метод импульсов (по Джонсу) [35], отличающийся высокой точностью, простотой и удобством при проведении экспериментов. При использовании этого метода коэффициент  $k^*$  для длинного цилиндрического звена ПМ можно рассчитать по формуле [35]:

$$k^* = \frac{2}{D} \int_a^b \sqrt{\frac{\hat{P}_1 - \hat{p}_1}{\hat{P}_0 - \hat{p}_0}} \left( 1 - \sqrt{\frac{\hat{P}_1 - \hat{p}_0}{\hat{P}_0 - \hat{p}_0}} \right) d\hat{Z} = \frac{2}{D} \int_a^b \varphi(\hat{Z}) d\hat{Z} = \frac{2S}{D}, \quad (2.3)$$

где величины полного напора  $\hat{P}_0$  и статического давления  $\hat{p}_0$ , определяемые пневмометром, расположенным перед моделью звена ПМ в невозмущенном потоке;  $\hat{P}_1$  и  $\hat{p}_1$  - величины полного напора и статического давления в спутном следе за звеном ПМ, соответственно (они определяются специальным пневмометром, который перемещается в этом следе по оси  $\hat{Z}$ , перпендикулярной вектору скорости  $v_p$  набегающего потока и лежащей в горизонтальной плоскости при вертикальном расположении звена на фиксированном расстоянии  $L'$  от его поверхности);  $a$  и  $b$  - границы спутного следа по оси  $\hat{Z}$ ;  $S$  - площадь, ограниченная экспериментальной кривой  $\varphi(\hat{Z})$ . При расположении звена ПМ под углом  $Q$  к набегающему потоку  $D = \hat{d}/\sin Q$ ;  $\hat{s} = \hat{l}\hat{d} \sin Q$ , где  $\hat{d}$  и  $\hat{l}$  - диаметр и длина звена, соответственно.

## 2.4. Описание аэродинамической экспериментальной установки

Экспериментальные исследования по определению коэффициентов вязкого трения проводились в аэродинамической трубе АС-1 Филиала ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» [11]. Схема используемой экспериментальной установки приведена на рис. 2.2.



1 – конфузор; 2 – сопло; 3 – рабочая часть; 4 и 9 – приемники полного и статического давлений; 5 и 8 - «U» - образные дифференциальные жидкостные микроманометры; 6 – модель звена ПМ; 7 – координатник; 10 – диффузор; 11 – рабочий стол; 12 – подъемник рабочего стола; 13 – подвижная платформа с координатными шкалами; 14 – направляющие платформы; 15 – приборы юстировки рабочего стола; 16 – шкала угловых координат

Рис. 2.2. Схема экспериментальной установки

В рабочей части АС-1 в центре потока установлена выполненная из алюминимагниевого сплава модель 6 цилиндрического звена ПМ, геометрически подобная реальному звену ПМ диаметром  $\hat{d} = 0.05\text{м}$ . При любом значении угла  $Q$  торцы модели 6 не попадают в поток, чтобы не создавать помех и вихреобразования в рабочей зоне аэродинамической трубы. Все перемещения звена и измерительных приборов выполнялись в прямоугольной СК XYZ, ось X которой совпадает с направлением вектора  $v$  скорости воздушного потока, ось Y вертикальна, а ось Z составляет правую тройку. При этом центр СК XYZ расположен в центре рабочей части аэродинамической трубы, где поле скоростей известно и постоянно.

В экспериментальных исследованиях применялся пневмометрический метод измерения полного напора и статического давления в потоке с помощью приемников 4 и 9 этого давления. Измерение указанных величин производилось лабораторными жидкостными «U» - образными дифференциальными микроманометрами 5 и 8. Расположение приемника давлений, фиксирующего величины  $\hat{P}_1$  и  $\hat{p}_1$  в следе за моделью, на одинаковом для всех углов  $Q$  расстоянии  $L' = 0.02\text{м} = \text{const}$  вдоль оси  $\hat{Z}$ , параллельной оси Z СК XYZ и образующей с ней горизонтальную плоскость, осуществлялось с помощью координатника 7 с координатными шкалами X'Y'Z'.

Для повышения точности измерений ось цилиндрического звена 6 при любом значении угла  $Q$  всегда проходила через точку O (см. рис. 2.2). Для этого при наклоне указанного звена на угол  $Q$  в шарнире O'' оно перемещалось в горизонтальной и вертикальной плоскостях с помощью подвижной платформы с координатными шкалами X''Y''Z'' до совпадения оси цилиндра с точкой O. Контроль угла  $Q$  осуществлялся с помощью шкалы угловых координат 16. При этом положение рабочего стола 11 строго в горизонтальной плоскости контролировалось приборами юстировки 15.

Для каждого исследуемого угла  $Q$  после установки звена ПМ в желаемое

положение производилось измерение величин  $\hat{P}_1$  и  $\hat{p}_1$  приемниками 4 и 9, перемещаемыми из исходного положения за звеном 6 по оси  $\hat{Z}$  с шагом 0,005м до значений  $+(-)0.07м$ , и с шагом 0.01м до значения  $+(-)0.17м$ .

Общий вид экспериментальной аэродинамической установки показан на рис. 2.3. На этом рисунке изображено положение модели звена ПМ под углом  $Q = 90^\circ$  к набегающему воздушному потоку. На рис. 2.4 показано положение указанной модели при  $Q = 45^\circ$ .

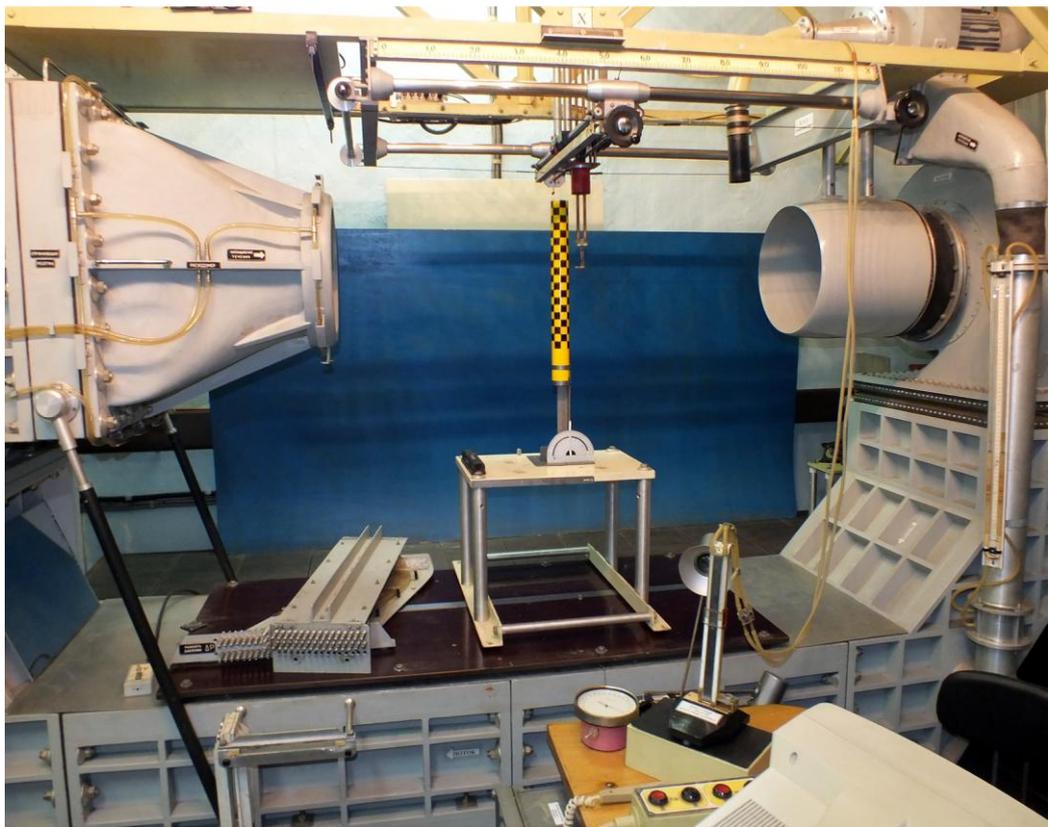


Рис. 2.3. Общий вид аэродинамической экспериментальной установки

## 2.5. Результаты аэродинамического эксперимента

Для каждого положения звена 6 в воздушном потоке на основе измерений величин  $\hat{P}_0$ ,  $\hat{P}_1$ ,  $\hat{p}_0$  и  $\hat{p}_1$  в реальном масштабе времени по формуле

$v_s = \sqrt{\frac{2g\xi(\hat{P}_1 - \hat{p}_1)}{\rho}}$  строилась эпюра скорости  $v_s$  в спутном аэродинамическом следе, где  $g = 9.81$  – коэффициент перевода единицы давления (мм водяного столба) в единицу  $H/m^2$ ;  $\xi = 0,9 \div 1$  – поправочный коэффициент приёмников давления [9, 62]. При этом атмосферная барометрическая плотность среды  $\rho$  определялась до начала измерений и оставалась неизменной в процессе этих измерений.

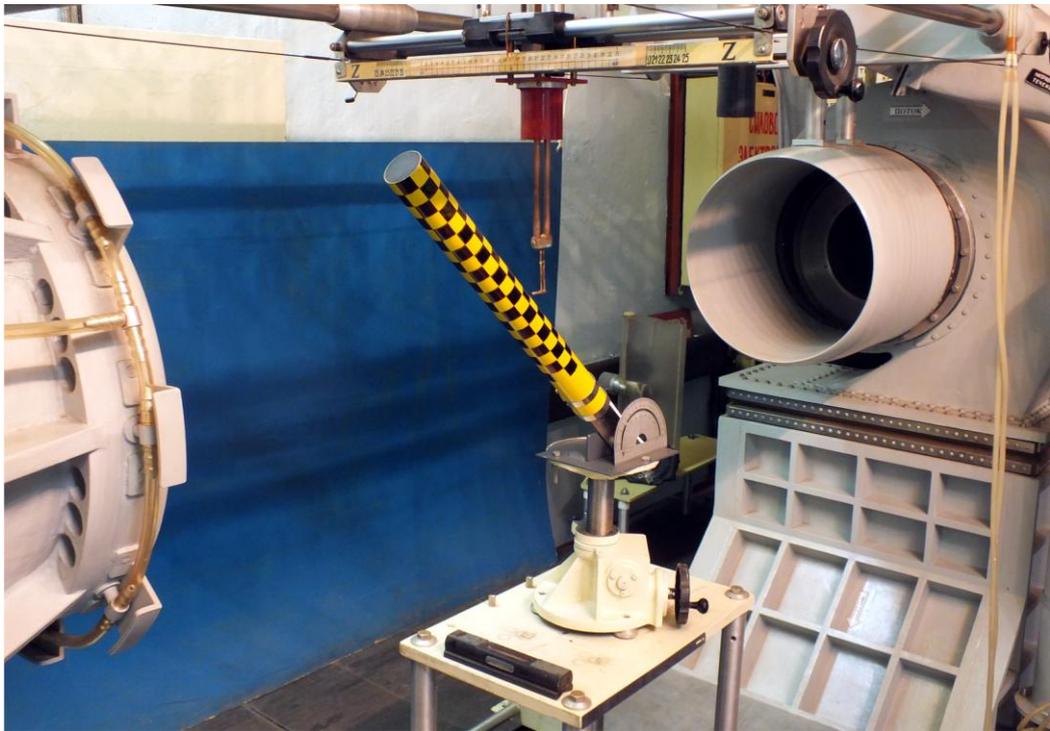
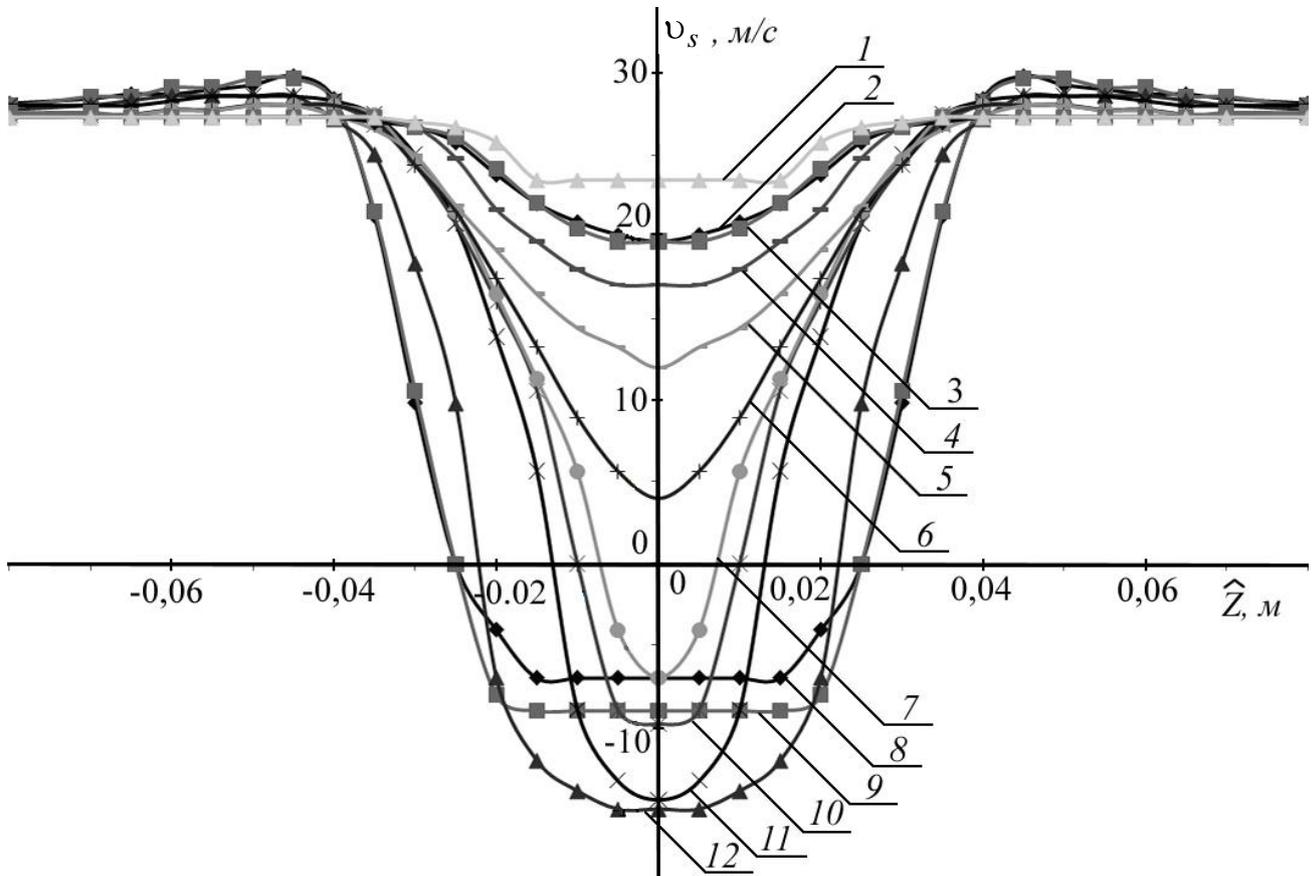


Рис. 2.4. Вид аэродинамической установки при расположении модели звена ПМ под углом  $Q = 45^\circ$  к набегающему воздушному потоку

Скорость невозмущенного потока  $v_p$  в аэродинамической трубе составляла  $26 м/с$ . Поэтому при  $Q = 90^\circ \div 12^\circ$  число Рейнольдса находилось в диапазоне  $9 \cdot 10^4 < Re \leq 4.3 \cdot 10^5$ . Значения коэффициента  $k^*$  для каждого положения звена  $\delta$  рассчитывались по формуле (2.3), а площадь  $S$ , ограниченная экспериментальной кривой  $\varphi(\hat{Z})$ , вычислялась методом графического интегрирования в разработанной компьютерной программе.

На рис. 2.5 показано построенное семейство эпюр скорости  $v_s$  при изменении  $Q$  от  $90^\circ$  до  $12^\circ$ .



1 -  $Q^0 = 12^\circ$ ; 2 -  $Q^0 = 17^\circ$ ; 3 -  $Q^0 = 22^\circ$ ; 4 -  $Q^0 = 27^\circ$ ; 5 -  $Q^0 = 30^\circ$ ; 6 -  $Q^0 = 35^\circ$ ; 7 -  $Q^0 = 38^\circ$ ; 8 -  $Q^0 = 90^\circ$ ; 9 -  $Q^0 = 75^\circ$ ; 10 -  $Q^0 = 40^\circ$ ; 11 -  $Q^0 = 45^\circ$ ; 12 -  $Q^0 = 60^\circ$

Рис. 2.5. Экспериментальные кривые профиля скоростей в следе за цилиндрическим звеном ПМ при различных углах  $Q$  к набегающему воздушному потоку

Из этого рисунка видно, что при  $Q = 90^\circ \div 38^\circ$  боковая граница следов криволинейна, и из-за интенсивного срыва потока с боковой поверхности модели цилиндрического звена ПМ имеется тенденция к формированию обратного течения. При значениях  $Q$  ниже  $35^\circ$  обратные течения исчезают, и с уменьшением значения угла  $Q$  наблюдается уменьшение площади эпюр, что свидетельствует об уменьшении «дефекта скорости» в спутном

аэродинамическом следе модели звена ПМ.

Полученные экспериментальные кривые подтверждают общую картину турбулентного следа, соответствующую гипотезе турбулентности потока Тейлора [1].

В таблице 2.1. приведены экспериментально полученные значения коэффициента вязкого трения  $k^*$  при различных углах наклона звена ПМ к набегающему воздушному потоку, а на рис. 2.6 показана зависимость значений искомого коэффициента  $k^*$  от углов  $Q$ .

Табл. 2.1. Значения коэффициента  $k^*$  при различных углах  $Q$

$Q^0$	$90^0$	$75^0$	$60^0$	$45^0$	$40^0$	$38^0$	$35^0$	$30^0$	$27^0$	$22^0$	$17^0$	$12^0$
$k^*$	0,523	0,519	0,568	0,327	0,235	0,192	0,186	0,163	0,108	0,069	0,0548	0,0263

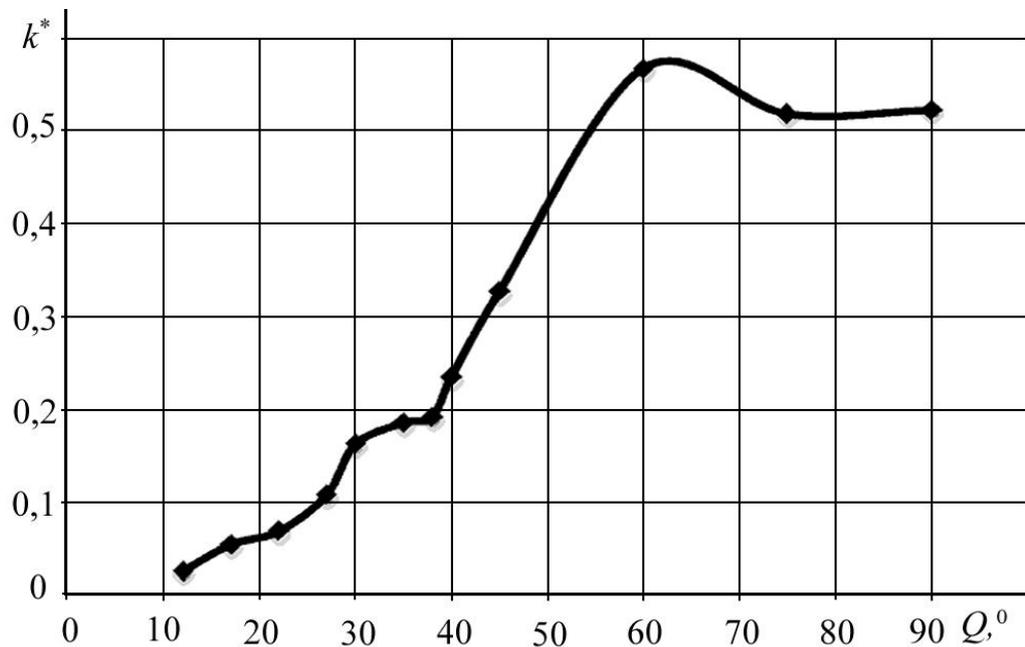


Рис. 2.6. График зависимости значений коэффициента  $k^*$  от углов  $Q$  для бесконечно длинного цилиндрического звена ПМ

При выполнении аэродинамического эксперимента погрешности измерений определялись погрешностями измерительных приборов и погрешностями визуальных наблюдений. Первые относятся к систематическим погрешностям, а вторые - к случайным [6]. При этом общие приборные погрешности для измерителей приемников динамического и статического давлений 4 и 9 не превышали 5%, а для дифференциальных жидкостных микроманометров 5 и 8 – 3%. Эти пределы погрешностей измерений соответствуют требованиям к методам и средствам измерений, изложенным в ГОСТ 16263-70, ГОСТ 8.009-84 и ГОСТ 8.505-84.

Для подтверждения результатов аэродинамического эксперимента были выполнены морские испытания с использованием установки, изображенной на рис. 2.7.



Рис. 2.7. Морская экспериментальная установка

При перемещении цилиндрического стержня с постоянной скоростью нормально к набегающему потоку жидкости измерялась сила вязкого трения  $F_v$ , действующая на этот стержень. Затем по формуле (2.2) рассчитывались

коэффициенты вязкого трения. Значения этих коэффициентов, полученные в результате натуральных испытаний, более чем на 15% превышают значения этих же коэффициентов, полученных в аэродинамическом эксперименте. Это объясняется тем, что торцы протягиваемого в водной среде звена приводят к дополнительному увеличению определяемых коэффициентов вязкого трения. С учетом отмеченного, определенные в различных экспериментах коэффициенты вязкого трения являются близкими по их значениям. Однако при необходимости значения указанных коэффициентов могут уточняться с использованием более точных методов и подходов.

Результаты проведенных экспериментов показали, что с помощью используемой экспериментальной установки можно достаточно просто и точно определить коэффициенты вязкого трения, возникающего при поступательном перемещении любого звена ПМ в водной среде. Знание этих коэффициентов позволяет определить недостающие параметры предложенного алгоритма решения ОЗД ПМ (2.1) и корректно рассчитать силовые и моментные воздействия на ПА со стороны движущегося в водной среде многозвенного ПМ.

## **2.6. Выводы**

1. Так как каждая элементарная часть звена ПМ может иметь различную поперечную скорость движения относительно покоящейся жидкости по величине и направлению, а сила, действующая на эту элементарную часть со стороны вязкой среды, может иметь линейную или квадратичную зависимости от величины линейной скорости движения этой части, каждое звено ПМ предложено разбивать на конечное число элементарных частей одинаковой длины и рассчитывать силу вязкого трения, действующую на каждую из этих частей, с учетом значения числа Рейнольдса для каждой движущейся элементарной части.

2. Для более точного вычисления в РМВ силовых и моментных воздействий на ПА со стороны движущегося многозвенного ПМ разработан рекуррентный алгоритм решения ОЗД, учитывающий все основные особенности влияния вязкой среды на звенья ПМ.

3. Для точного вычисления указанных силовых и моментных воздействий предложена методика и создана установка для экспериментального определения коэффициентов вязкого трения, появляющегося при перемещениях звеньев ПМ в водной среде. Эта экспериментальная установка построена на основе аэродинамической трубы АС-1 Филиала ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». В процессе экспериментов было показано, что значения коэффициентов вязкого трения не зависят от длин звеньев ПМ.

4. Проведенные экспериментальные исследования позволили определить искомые значения коэффициентов вязкого трения, а также их зависимость от углов наклона звеньев ПМ к набегающему потоку жидкости.

### **3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА СИНТЕЗА КОМБИНИРОВАННОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОДВОДНОГО АППАРАТА В ЗАДАННОЙ ТОЧКЕ ПРОСТРАНСТВА**

В силу реально существующих погрешностей и неточностей определения параметров взаимодействия с окружающей водной средой движущихся звеньев ПМ, а также механических параметров конструкции многозвенника, рассчитываемые с помощью разработанного во второй главе алгоритма решения ОЗД негативные силовые и моментные воздействия на ПА со стороны этого ПМ не могут быть точно скомпенсированы в РМВ тягами двигателей ПА. Это может привести к значительному снижению точности стабилизации ПА при использовании только указанных разомкнутых СУ. В результате возникает необходимость использования дополнительных следящих по положению и ориентации ПА систем, компенсирующих неточности указанных вычислений.

В третьей главе диссертации решается задача синтеза комбинированной автоматической системы, включающей в себя разомкнутый контур, обеспечивающий подачу на двигатели ПА сигналов, пропорциональных вычисленному силовому и моментному воздействию со стороны работающего ПМ, и дополнительные замкнутые по всем линейным и угловым перемещениям этого аппарата автоматические системы, которые должны использовать высокоточные навигационные бортовые датчики и приборы.

Ниже будет рассмотрена последовательность синтеза указанной комбинированной системы, включающей несколько контуров управления.

#### **3.1. Особенности формирования сил тяги двигателей подводного аппарата с учетом его кинематической схемы**

Для формирования главного вектора и главного момента сил,

компенсирующих вычисленные с помощью разработанного алгоритма решения ОЗД негативные воздействия на ПА со стороны ПМ, схема расположения движителей этого аппарата должна обеспечивать его движение по всем шести степеням подвижности (см. рис. 3.1).

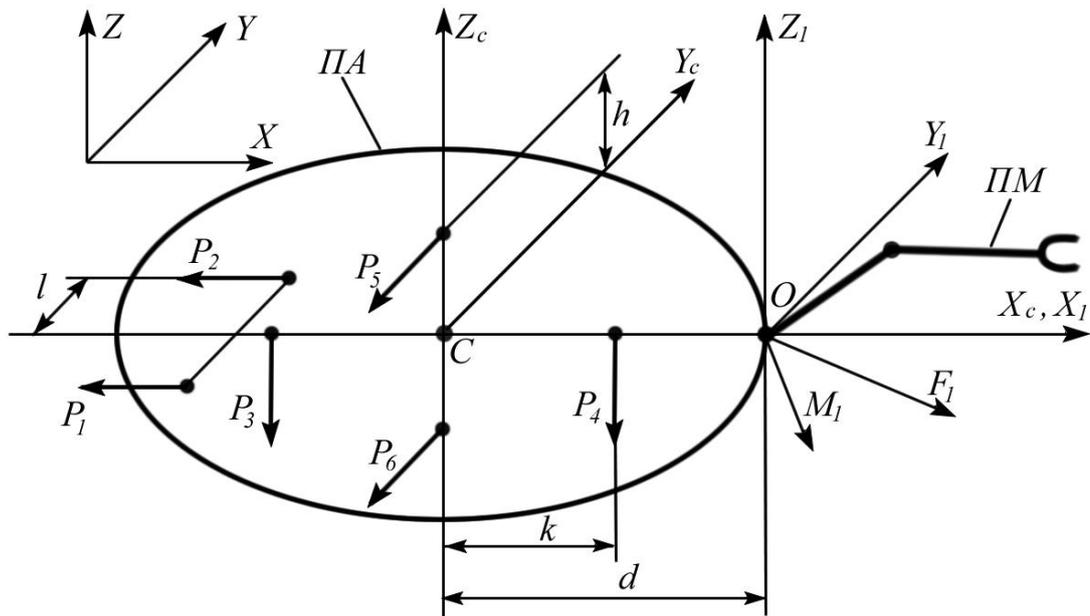


Рис. 3.1. Схема расположения движителей и ПМ на ПА

Первый поворотный шарнир ПМ установлен в точке  $O$ , которая является началом правой СК  $X_1Y_1Z_1$ , жестко связанной с ПА. В этой СК с помощью алгоритма решения ОЗД (2.1), разработанного во второй главе диссертации, вычисляются результирующие векторы силы  $F_1$  и момента  $M_1$ , которые действуют на ПА со стороны движущегося ПМ.

На рис. 3.1 введены следующие обозначения:  $P_i (i = \overline{1,6})$  – тяги движителей ПА, направления которых совпадают с продольными осями соответствующих движителей;  $l, h, k, d$  – геометрические параметры ПА и компоновки движителей. Пространственные перемещения ПА происходят в абсолютной СК  $XYZ$ . Расчет тяг, которые должен создавать каждый движитель ПА для компенсации силовых и моментных воздействий со стороны

работающего ПМ удобно выполнять в связанной с ПА правой СК  $X_c Y_c Z_c$ , центр которой располагается в точке  $C$ , совпадающей с центром тяжести (точкой симметрии) аппарата. Оси СК  $X_c Y_c Z_c$  параллельны осям СК  $X_1 Y_1 Z_1$  и являются осями симметрии ПА. При этом оси  $X_c$  и  $X_1$  совпадают.

Из рис. 3.1 видно, что для прямолинейного движения ПА необходимо вращение каждого движителя соответствующей пары в одну сторону, а для его вращательного движения относительно осей СК  $X_c Y_c Z_c$  вращение движителей соответствующей пары должно происходить в разные стороны. Очевидно, что указанным на рис. 3.1 расположением движителей можно добиться любой ориентации в пространстве главного вектора и главного момента сил результирующей тяги ПА.

Учитывая геометрические параметры ПА (см. рис. 3.1), несложно получить требуемое значение тяг  $P_i$  для каждого (из шести) его движителей с целью компенсации силовых и моментных воздействий на ПА со стороны работающего ПМ:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= -\frac{F_{x1}}{2} - \frac{M_{z1} + dF_{y1}}{2l}, \\
 P_2 &= -\frac{F_{x1}}{2} + \frac{M_{z1} + dF_{y1}}{2l}, \\
 P_3 &= -\frac{F_{z1}}{2} + \frac{-M_{y1} + dF_{z1}}{2k}, \\
 P_4 &= -\frac{F_{z1}}{2} + \frac{M_{y1} - dF_{z1}}{2k}, \\
 P_5 &= -\frac{F_{y1}}{2} + \frac{M_{x1}}{2h}, \\
 P_6 &= -\frac{F_{y1}}{2} - \frac{M_{x1}}{2h},
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

где  $F_{x1}$ ,  $F_{y1}$  и  $F_{z1}$  - проекции силы  $F_1$ , а  $M_{x1}$ ,  $M_{y1}$  и  $M_{z1}$  - проекции момента

$M_1$  на соответствующие оси СК  $X_1Y_1Z_1$ . Выражения (3.1) определяют все тяги, которые необходимо создавать соответствующими двигателями ПА.

### 3.2. Разработка замкнутой автоматической системы стабилизации линейных и угловых перемещений подводного аппарата

Далее будет рассмотрено решение задачи синтеза замкнутой автоматической системы стабилизации положения и ориентации ПА в режиме его зависания в водной среде над объектом работ с учетом уже рассчитанных и компенсируемых силовых и моментных воздействий на этот аппарат со стороны работающего многозвенного ПМ.

Реальное положение и ориентация ПА в СК  $XYZ$  задаются вектором  $\eta = [x, y, z, \gamma, \alpha, \beta]^T \in R^6$ , где  $x, y, z$  - координаты положения точки  $C$  ПА;  $\gamma, \alpha, \beta$  - его углы крена, дифферента и рысканья;  $x_0, y_0, z_0, \gamma_0, \alpha_0, \beta_0$  - программные значения элементов вектора  $\eta$  ПА, которые необходимо стабилизировать.

Для принятой схемы установки двигателей ПА (см. рис. 3.1) управление линейной  $x$  и угловой  $\beta$  координатами вектора  $\eta$  обеспечивается тягами  $P_1$  и  $P_2$ , управление координатами  $z$  и  $\alpha$  - тягами  $P_3$  и  $P_4$ , а координатами  $y$  и  $\gamma$  - тягами  $P_5$  и  $P_6$ . В связи с этим замкнутая автоматическая система стабилизации ПА должна состоять из трех аналогичных одновременно работающих следящих подсистем, каждая из которых управляет одной из трех пар соответствующих двигателей [56].

В СК  $X_cY_cZ_c$  со стороны двигателей на ПА действуют результирующая сила  $T_c = [T_{xc}, T_{yc}, T_{zc}]^T \in R^3$ , где  $T_{xc} = P_1 + P_2$ ,  $T_{yc} = P_5 + P_6$ ,  $T_{zc} = P_3 + P_4$ , и момент  $M_c = [M_{xc}, M_{yc}, M_{zc}]^T \in R^3$ , где  $M_{xc} = (P_6 - P_5)h$ ;  $M_{yc} = (P_3 - P_4)k$ ;  $M_{zc} = (P_1 - P_2)l$ , с помощью которых осуществляется стабилизация положения и ориентации ПА в заданной точке пространства.

На рис. 3.2 показана структурная схема подсистемы, стабилизирующей ПА по линейной  $x$  и угловой  $\beta$  координатам вектора  $\eta$  с помощью пары движителей Д1 и Д2, создающих тяги  $P_1$  и  $P_2$ , соответственно. Остальные две следящие подсистемы имеют аналогичные схемы. На этом рисунке  $R_x$  и  $R_\beta$  – регуляторы в цепях стабилизации линейного и углового перемещений ПА, соответственно;  $P_{0x}$  и  $P_{0\beta}$  – желаемые значения тяг, необходимых для управления линейной  $x$  и угловой  $\beta$  координатами перемещения ПА, соответственно.

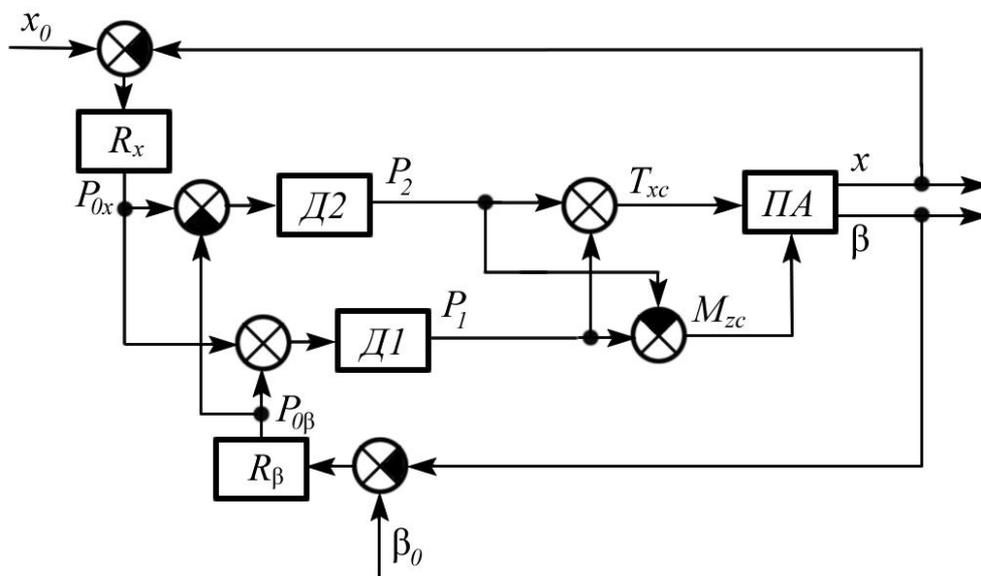


Рис. 3.2. Структурная схема типовой подсистемы автоматической системы стабилизации ПА по двум координатам

Рассматриваемая подсистема работает следующим образом. Поскольку для прямолинейного движения ПА по оси  $X$  СК  $XUYZ$  необходимы вращения движителей Д1 и Д2 в одну сторону, то на эти движители подается сигнал  $P_{0x}$ . Для вращательного движения ПА относительно оси  $Y$  абсолютной СК вращение этих движителей должно происходить в разные стороны, поэтому на движители Д1 и Д2 необходимо подавать сигналы  $P_{0\beta}$  и  $-P_{0\beta}$ , соответственно. Так как соответствующие линейные и угловые перемещения ПА осуществляются

одновременно с помощью одной пары движителей, то на движители Д1 и Д2 следует подать сигналы  $P_{0x} + P_{0\beta}$  и  $P_{0x} - P_{0\beta}$ , соответственно. Эти сигналы, соответственно, формируют тяги  $P_1$  и  $P_2$  (см. рис. 3.2), которые оказываются на ПА силовое  $T_{xc2}$  и моментное  $M_{zc}$  воздействия, благодаря которым и стабилизируются его положение и ориентация в пространстве [59, 61].

### 3.3. Описание математических моделей подводного аппарата и установленного на нем многозвенного подводного манипулятора

Для исследования особенностей функционирования и эффективности синтезированной двухконтурной системы стабилизации ПА (см. рис. 3.2) с работающим ПМ использована математическая модель, представленная системой двенадцати нелинейных дифференциальных уравнений [79]. В матричной форме эта система имеет вид:

$$M\dot{\tilde{\nu}} + (C(\tilde{\nu}) + D(\tilde{\nu}))\tilde{\nu} + g(\eta) = \tau_c,$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)\tilde{\nu},$$

где  $M \in R^{6 \times 6}$  - матрица инерции (включающая присоединенные массы и присоединенные моменты инерции жидкости);  $D(\tilde{\nu}) \in R^{6 \times 6}$  - матрица гидродинамических сил и моментов;  $\tau_c = [T_{xc}, T_{yc}, T_{zc}, M_{xc}, M_{yc}, M_{zc}]^T \in R^6$  - вектор проекций тяг и моментов, создаваемых движителями ПА, на оси СК  $X_c Y_c Z_c$ ;  $C(\tilde{\nu}) \in R^{6 \times 6}$  - матрица кориолисовых и центробежных сил;  $g(\eta) \in R^6$  - вектор гидростатических сил и моментов;  $\tilde{\nu} = [\tilde{\nu}_x, \tilde{\nu}_y, \tilde{\nu}_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T \in R^6$  - вектор проекций линейной и угловой скоростей движения ПА на оси СК  $X_c Y_c Z_c$ ;  $J(\eta)$  - матрица перехода из СК  $X_c Y_c Z_c$  в абсолютную СК.

Все элементы указанной модели ПА, подробно описанные в работе [67],

имеют следующие параметры:  $m_a = 300 \text{ кг}$  - масса ПА;  $\lambda_{11} = 80 \text{ кг}$ ,  $\lambda_{22} = 140 \text{ кг}$ ,  $\lambda_{33} = 140 \text{ кг}$ ,  $\lambda_{44} = 5 \text{ кгм}^2$ ,  $\lambda_{55} = 30 \text{ кгм}^2$ ,  $\lambda_{66} = 30 \text{ кгм}^2$  ( $\lambda_{ij} = 0, i \neq j, i, j = \overline{(1,6)}$ ) - соответствующие присоединенные массы и присоединенные моменты инерции жидкости;  $Y_c = 0.02 \text{ м}$  - метацентрическая высота ПА;  $J_{xx} = 9 \text{ кгм}^2$ ,  $J_{yy} = 30 \text{ кгм}^2$ ,  $J_{zz} = 30 \text{ кгм}^2$  - моменты инерции ПА относительно его главных осей инерции;  $d_{1x} = 30 \text{ кгс}^{-1}$ ,  $d_{2x} = 10 \text{ кгм}^{-1}$ ,  $d_{1y} = 60 \text{ кгс}^{-1}$ ,  $d_{2y} = 30 \text{ кгм}^{-1}$ ,  $d_{1z} = 60 \text{ кгс}^{-1}$ ,  $d_{2z} = 30 \text{ кгм}^{-1}$ ,  $d'_{1x} = 20 \text{ Нмс}$ ,  $d'_{2x} = 10 \text{ Нмс}^2$ ,  $d'_{1y} = 40 \text{ Нмс}$ ,  $d'_{2y} = 20 \text{ Нмс}^2$ ,  $d'_{1z} = 40 \text{ Нмс}$ ,  $d'_{2z} = 20 \text{ Нмс}^2$  - коэффициенты вязкого трения, соответствующие линейной и квадратичной зависимостям гидродинамических сил (моментов) от скорости движения ПА по его отдельным степеням свободы;  $d = 0.7 \text{ м}$ ;  $l = h = k = 0.5 \text{ м}$ . При использовании специальных средств адаптивной коррекции [48, 50] все движители ПА представлены в виде апериодических звеньев первого порядка, имеющих постоянные времени  $T_d = 0.1 \text{ с}$  и коэффициенты усиления  $K_d = 2$ . В используемых моделях эти движители описаны соответствующими дифференциальными уравнениями первого порядка.

Все регуляторы, включая  $R_x$  и  $R_\beta$  (см. рис. 3.2), для следящих СУ, обеспечивающих стабилизацию всех линейных и угловых перемещений ПА, синтезированы с помощью программного пакета Matlab Simulink Response Optimization. Все эти регуляторы имеют структуру ПИД – регуляторов и описываются передаточными функциями вида:  $R_l(s) = k_{pl} + \frac{k_{il}}{s} + \frac{k_{dl}s}{0.01s + 1}$ , ( $l = x, y, z, \gamma, \alpha, \beta$ ).

Поскольку используемый программный пакет не позволяет одновременно синтезировать два регулятора подсистемы (см. рис. 3.2), то для каждой из трех подсистем ПА вначале синтезировался регулятор указанного вида в следящей системе стабилизации угловой координаты, а затем с учетом этого

синтезированного регулятора выполнялся синтез регулятора в следящей системе стабилизации линейной координаты. Затем вновь синтезировался регулятор в цепи стабилизации угловой координаты с учетом синтезированного регулятора в цепи стабилизации соответствующей линейной координаты, а потом – и регулятор в цепи стабилизации линейной координаты при новых значениях параметров регулятора, предназначенного для стабилизации соответствующей угловой координаты. Эта процедура содержала две итерации, после которых параметры всех регуляторов в рассматриваемых цепях всех подсистем ПА стабилизировались. В результате для всех синтезируемых подсистем стабилизации были получены следующие параметры всех регуляторов:  $k_{px} = 41$ ,  $k_{ix} = 25$ ,  $k_{dx} = 568$ ;  $k_{py} = 4$ ,  $k_{iy} = 1$ ,  $k_{dy} = 686$ ;  $k_{pz} = 35$ ,  $k_{iz} = 2$ ,  $k_{dz} = 539$ ;  $k_{p\gamma} = 153$ ,  $k_{i\gamma} = 24$ ,  $k_{d\gamma} = 237$ ;  $k_{p\alpha} = 78$ ,  $k_{i\alpha} = 13$ ,  $k_{d\alpha} = 380$ ;  $k_{p\beta} = 35$ ,  $k_{i\beta} = 1$ ,  $k_{d\beta} = 878$ , обеспечивающие устойчивость и заданное качество работы рассматриваемых следящих систем даже с учетом взаимовлияний во всех каналах стабилизации положения и ориентации ПА.

В процессе моделирования учитывались только три первые переносные степени подвижности ПМ типа PUMA (координаты  $q_i$  ( $i = \overline{1,3}$ )), кинематическая схема которого представлена на рис. 3.3. Параметры этого ПМ имеют следующие значения:  $l_1 = l_2 = 0.5$  м - длины звеньев ПМ;  $m_1 = m_2 = 3.9$  кг - массы звеньев. Причем центры тяжести звеньев ПМ, имеющих форму цилиндра радиусом основания  $r_1 = r_2 = 0.05$  м и нейтральную плавучесть, совпадают с их центрами масс. Тензоры инерции этих звеньев относительно их центров масс имеют диагональный вид, причем  $\tau_{111} = \tau_{211} = 5 \cdot 10^{-3}$  кгм<sup>2</sup>,  $\tau_{122} = \tau_{133} = \tau_{222} = \tau_{233} = 8.4 \cdot 10^{-2}$  кгм<sup>2</sup> - элементы тензоров инерции первого  $\tau_1$  и второго  $\tau_2$  звеньев, соответственно.

Кроме того  $\Pi_1 = \Pi_2 = 1.075$  кг;  $|r_1^*| = |r_2^*| = 0.25$  м;  $\rho = 1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> - плотность воды;  $T_{111} = T_{211} = 1.4 \cdot 10^{-3}$ ,  $T_{122} = T_{133} = T_{222} = T_{233} = 2.6 \cdot 10^{-2}$  кгм<sup>2</sup> -

диагональные элементы тензоров инерции масс жидкости, присоединенной к соответствующим звеньям ПМ;  $J = 10^{-4} \text{ кгм}^2$  - моменты инерции роторов электродвигателей и вращающихся частей редукторов;  $i_p = 100$  - передаточные отношение редукторов в каждой степени подвижности ПМ;

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} \cos q_1 & \sin q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \sin q_1 & -\cos q_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_3^2 = \begin{bmatrix} \cos q_2 & \sin q_2 & 0 \\ -\sin q_2 & \cos q_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \text{матрицы направляющих}$$

косинусов для рассматриваемой кинематической схемы ПМ;

$$k_{p1}^* = k_{p2}^* = 0.523; \quad K_{A2} = \sin \psi_2; \quad k_{L1} = k_{L2} = 0.012.$$

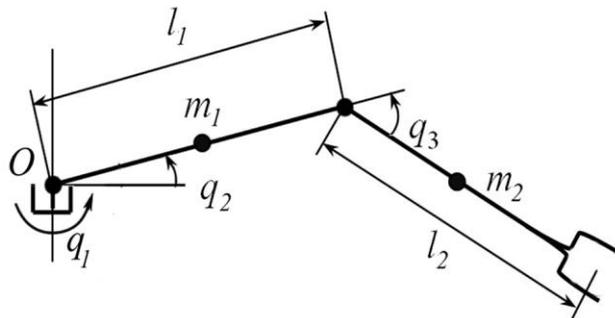


Рис. 3.3. Кинематическая схема ПМ

Отметим, что в СУ электроприводами каждой степени подвижности ПМ уже включены описанные в работе [47] адаптивные корректирующие устройства, обеспечивающие требуемую динамическую точность и инвариантность других показателей качества их работы к эффектам взаимовлияния между всеми степенями подвижности этого ПМ, перемещающегося в вязкой среде. В результате передаточные функции скорректированных электроприводов каждой степени подвижности ПМ при любых законах изменения обобщенных координат в процессе его движения

$$\text{будут иметь вид } W_n(s) = \frac{q_i(s)}{q_i^*(s)} = \frac{k_n}{(T_1 s + 1)s}, \text{ где } k_n = \frac{1}{i_p k_\omega}, \quad T_1 = \frac{R_a J}{k_m k_\omega} \text{ с; } R_a = 0.2 \text{ Ом}$$

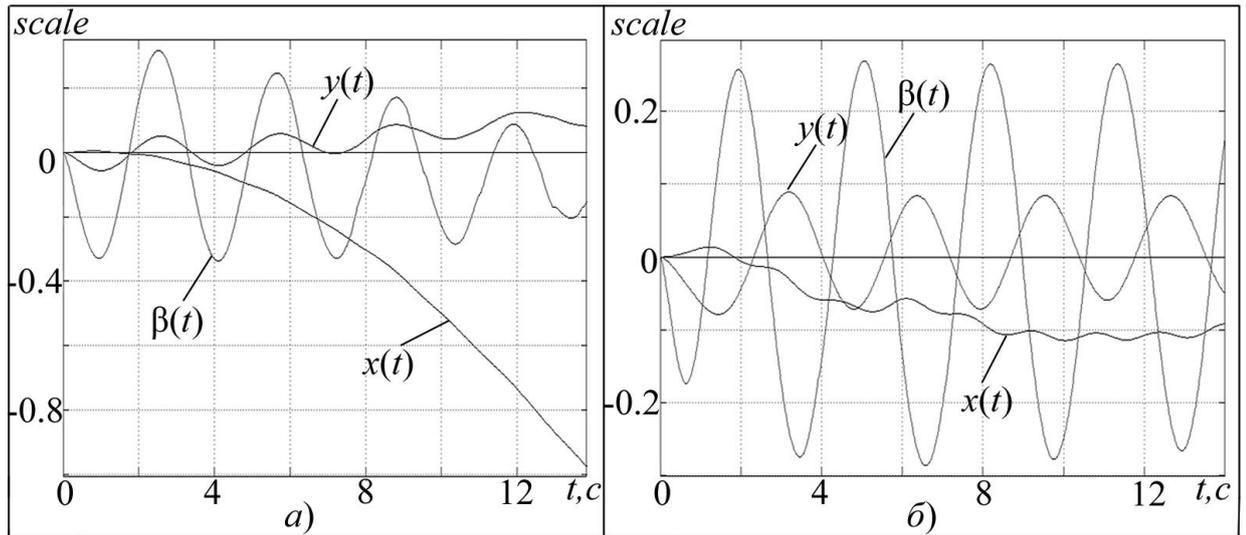
- активное сопротивление якорной цепи;  $k_{\omega} = 0.02 \text{ Вс}$  - коэффициент противоЭДС;  $k_m = 0.02 \text{ Нм/А}$  - моментный коэффициент.

### 3.4. Исследование синтезированной комбинированной системы стабилизации подводного аппарата в режиме зависания

Для исследования работы синтезированной системы вначале было выполнено математическое моделирование режима стабилизации ПА в заданной точке пространства при движении ПМ в горизонтальной плоскости. При этом полагалось, что  $q_1(t)$  изменяется по закону  $q_1(t) = 0.5 \sin(2t)$ , а  $q_2(t) = q_3(t) = 0$ . Причем здесь и далее будем полагать, что в начальный момент времени оси абсолютной  $XYZ$  и связанной с ПА СК  $X_c Y_c Z_c$  совпадают, а вектор  $P^*(t) = [x^*, y^*, z^*] \in R^3$  задает текущее желаемое положение характерной точки схвата ПМ в абсолютной СК  $XYZ$ .

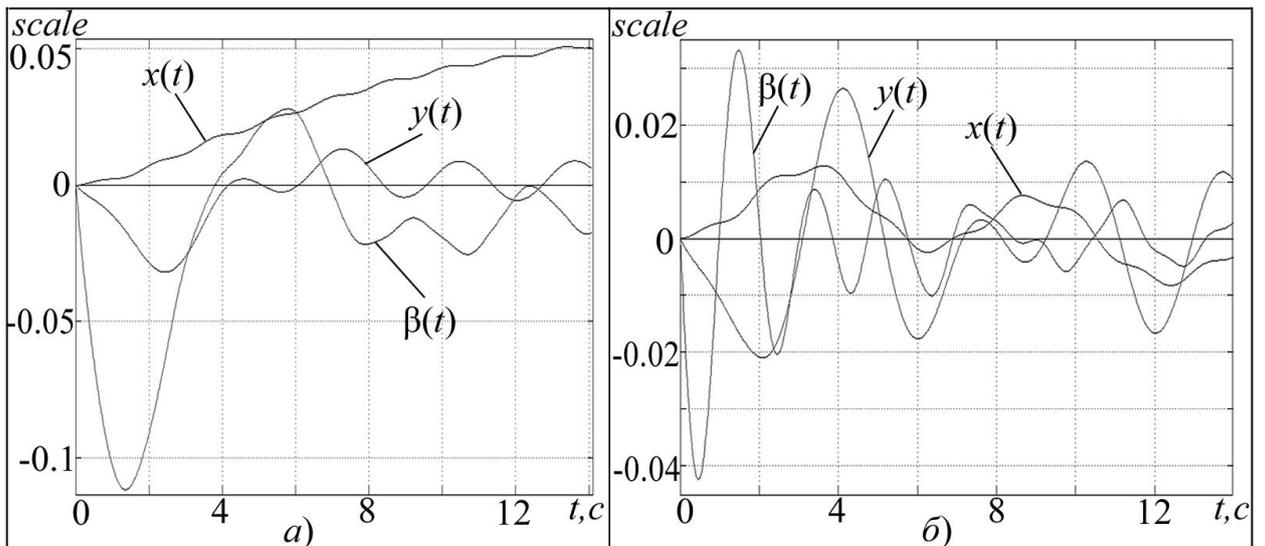
Процессы изменения координат  $\beta(t)$ ,  $x(t)$  и  $y(t)$  ПА при указанном движении ПМ показаны на рис. 3.4 и 3.5. При этом на рис. 3.4а показаны движения ПА, не оснащенного никакой системой стабилизации, на рис. 3.4б – его движения при использовании только замкнутой автоматической системы стабилизации линейных и угловых перемещений ПА, на рис. 3.5а – движения с использованием только разомкнутой системы стабилизации, обеспечивающей отработку движителями рассчитанных силовых и моментных воздействий на ПА со стороны работающего ПМ, а на рис. 3.5б – движения ПА с использованием полной комбинированной системы стабилизации. Во всех перечисленных случаях в начальный момент времени  $z(t_0) = \alpha(t_0) = \gamma(t_0) = 0$ , а при движении ПМ скорость перемещения его РО достигала  $1 \text{ м/с}$ .

Из представленных рисунков видно, что использование только замкнутой системы стабилизации позволяет в 8 раз уменьшить линейные и в 1.2 раза угловые смещения ПА.



$$\beta(t) = \text{scale } \text{rad}; y(t) = \text{scale } \text{m}; x(t) = \text{scale } \text{m}.$$

Рис. 3.4. Результаты моделирования при движении ПМ в горизонтальной плоскости



$$\beta(t) = \text{scale } \text{rad}; y(t) = \text{scale } \text{m}; x(t) = \text{scale } \text{m}.$$

Рис. 3.5. Результаты моделирования работы синтезированной системы при движении ПМ в горизонтальной плоскости

Использование только разомкнутой системы стабилизации почти в 20 раз снижает линейные и в 3.2 раза угловые смещения ПА. Однако точности указанных систем, работающих по отдельности, всё равно недостаточно для

выполнения ответственных манипуляционных операций в режиме зависания ПА над объектом работ. Использование же разработанной комбинированной системы стабилизации (см. рис. 3.5б) приводит к снижению в 37 раз линейных и в 9 раз угловых смещения ПА. Эта точность стабилизации уже позволяет качественно выполнять многие подводные технологические операции.

Процессы изменения всех линейных и угловых координат ПА при линейном движении РО ПМ, описываемом уравнениями

$$\begin{cases} \dot{x}^* = 0.5/\sqrt{3}, \\ y^* = x^* - 1, \\ z^* = x^*, \end{cases} \quad (3.2)$$

в пространстве с постоянной скоростью  $0.5 \text{ м/с} = \text{const}$  показаны на рис. 3.6, 3.7 и 3.8. Начальная точка траектории движения РО ПМ имела координаты:  $x_0^* = 0.7 \text{ м}$ ;  $y_0^* = -1 \text{ м}$ ;  $z_0^* = 0 \text{ м}$ .

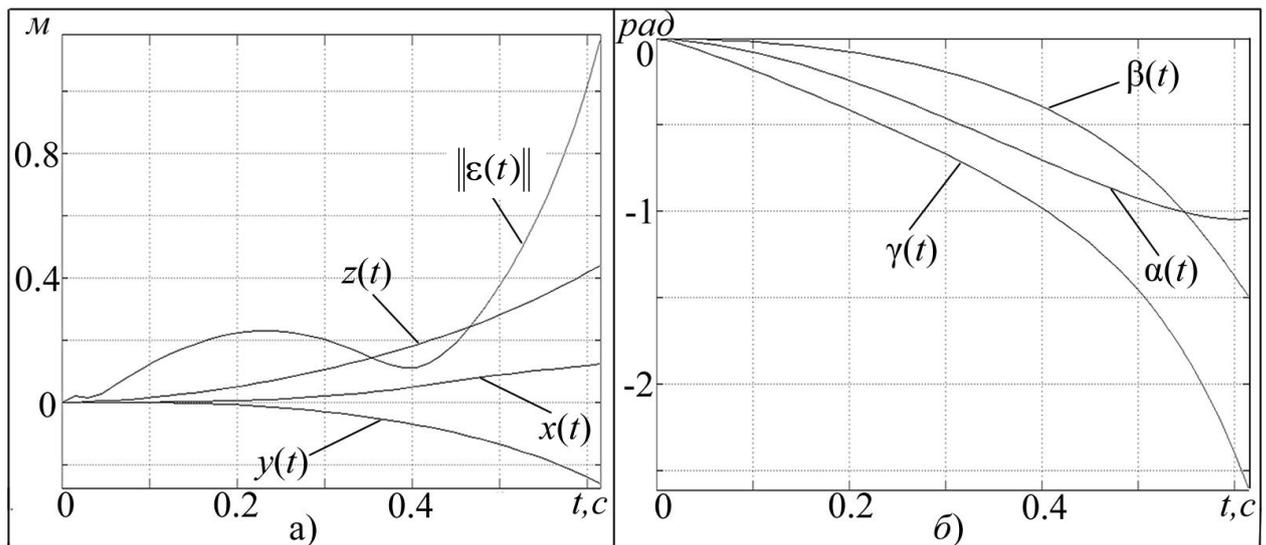


Рис. 3.6. Результаты моделирования без систем стабилизации ПА при движении ПМ по пространственной траектории

На этих же рисунках помимо смещений ПА показана также евклидова норма  $\|\varepsilon(t)\|$  вектора динамической ошибки отслеживания РО ПМ программной точки, движущейся в СК  $XYZ$  с заданной скоростью по указанной выше пространственной траектории.

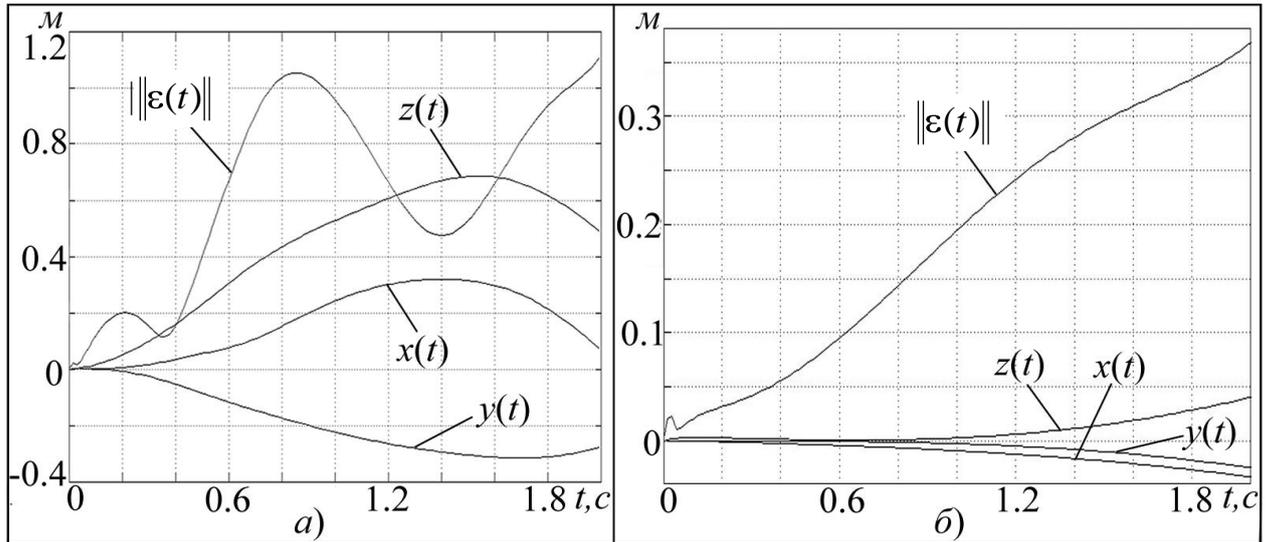


Рис. 3.7. Результаты моделирования с использованием замкнутой (а) и разомкнутой (б) систем стабилизации ПА при движении ПМ по пространственной траектории

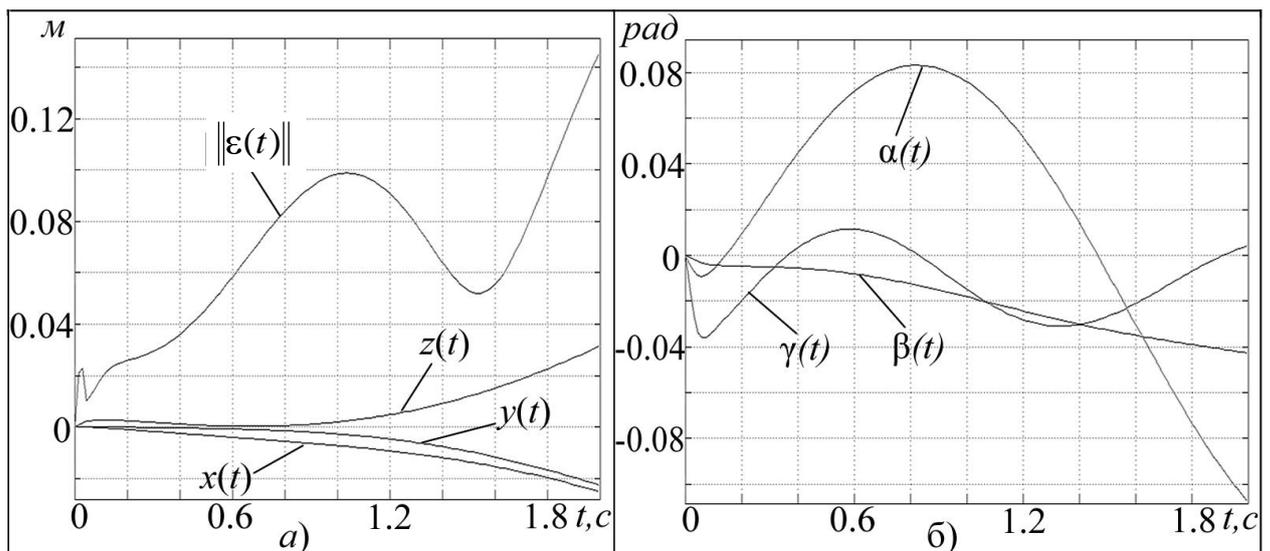


Рис. 3.8. Результаты моделирования работы синтезированной комбинированной системы стабилизации ПА при движении ПМ по пространственной траектории

При этом на рис. 3.6а и 3.6б показаны  $\|\varepsilon(t)\|$  и отклонения ПА, не оснащенного какой-либо системой стабилизации, на рис. 3.7а – те же отклонения, но при использовании только замкнутой автоматической системы стабилизации ПА, на рис. 3.7б – движения с использованием только его разомкнутой системы стабилизации с точно рассчитываемыми параметрами, а на рис. 3.8а и 3.8б – движения ПА с использованием разработанной комбинированной системы стабилизации.

Из рисунков 3.6а и 3.6б видно, что вообще без систем стабилизации в процессе работы ПМ всего за 0.6с угловые смещения ПА достигают  $2 \text{ рад}$ , а величина  $\|\varepsilon(t)\|$  -  $1 \text{ м}$ , то есть ПА опрокидывается, и выполнение манипуляционных операций становится невозможным. Использование только замкнутой автоматической системы стабилизации (см. рис. 3.7а) не дает опрокинуться ПА, но точность его стабилизации ввиду реальных динамических запаздываний в системе все равно остается неприемлемой для работы ПМ.

Стабилизация ПА только с помощью отработки его движителями непрерывно и точно рассчитываемых силовых и моментных воздействий со стороны работающего ПМ (см. рис. 3.7б) позволяет стабилизировать линейные и угловые смещения ПА в пределах  $0.05 \text{ м}$  и  $0.33 \text{ рад}$ , соответственно, но при этом величина  $\|\varepsilon(t)\|$  все равно достигает  $0.37 \text{ м}$ .

Использование же синтезированной комбинированной системы стабилизации (см. рис. 3.8а и 3.8б) в сравнении с разомкнутой системой стабилизации (см. рис. 3.7б) приводит к снижению в 1.6 раза линейных и в 3 раза угловых смещения ПА, а также в 2.4 раза снижает величину  $\|\varepsilon(t)\|$ . При этом точности стабилизации ПА становится уже достаточно для выполнения многих манипуляционных операций.

Однако, как уже отмечалось ранее, обеспечить точное вычисление силовых и моментных воздействий на ПА со стороны движущегося ПМ практически невозможно из-за неизбежной приближенности определения

механических параметров самой конструкции ПМ, а также параметров его взаимодействий с окружающей вязкой средой. Поэтому для всесторонней оценки эффективности разработанного метода и качества синтезированной на его основе системы стабилизации было выполнено моделирование удержания ПА при различных погрешностях расчета величин негативных воздействий на этот ПА со стороны движущегося ПМ.

На рис. 3.9 представлены сравнительные результаты численного моделирования удержания ПА в заданной точке пространства с помощью разомкнутой системы стабилизации при движении ПМ по прямолинейной пространственной траектории (3.2) при погрешностях вычислений силовых и моментных воздействий со стороны этого ПМ на ПА, составляющих 10% (см. рис. 3.9а) и 15% (см. рис. 3.9б).

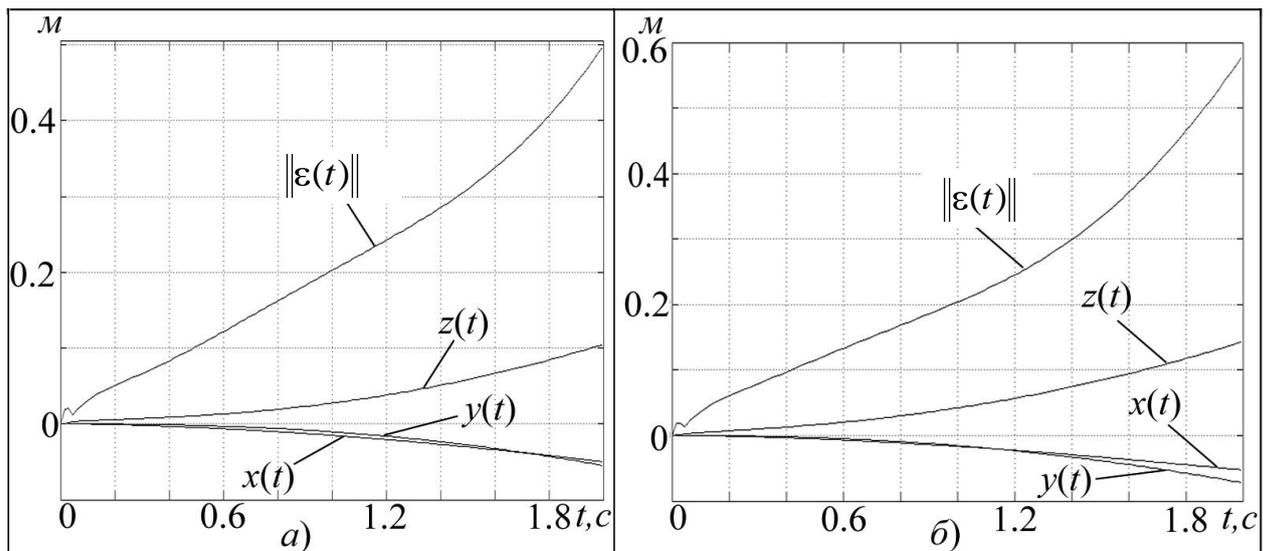


Рис. 3.9. Результаты моделирования удержания ПА с помощью разомкнутой СУ при различных погрешностях в расчете величин воздействий ПМ на ПА

Кроме того, на рис. 3.10 приведены результаты моделирования стабилизации ПА при перемещении РО ПМ по той же траектории, но с использованием разработанной комбинированной системы стабилизации при 10% (см. рис. 3.10а) и 15% (см. рис. 3.10б) погрешностях вычислений величин

указанных воздействий ПМ на ПА.

Из этих рисунков видно, что при стабилизации ПА с помощью комбинированной системы в процессе движения ПМ по пространственной траектории (3.2) с той же скоростью и погрешностях расчета силовых и моментных воздействий ПМ на ПА, не превышающих 10%, величина  $\|\varepsilon(t)\|$  увеличивается всего до 0.17 м, а при погрешностях 15% - до 0.18 м. При использовании разомкнутой системы стабилизации ПА, тех же законах движения ПМ и 10% погрешностях вычисления его силовых и моментных воздействий на ПА величина  $\|\varepsilon(t)\|$  достигает 0.5 м, а при 15% погрешностях – 0.58 м.

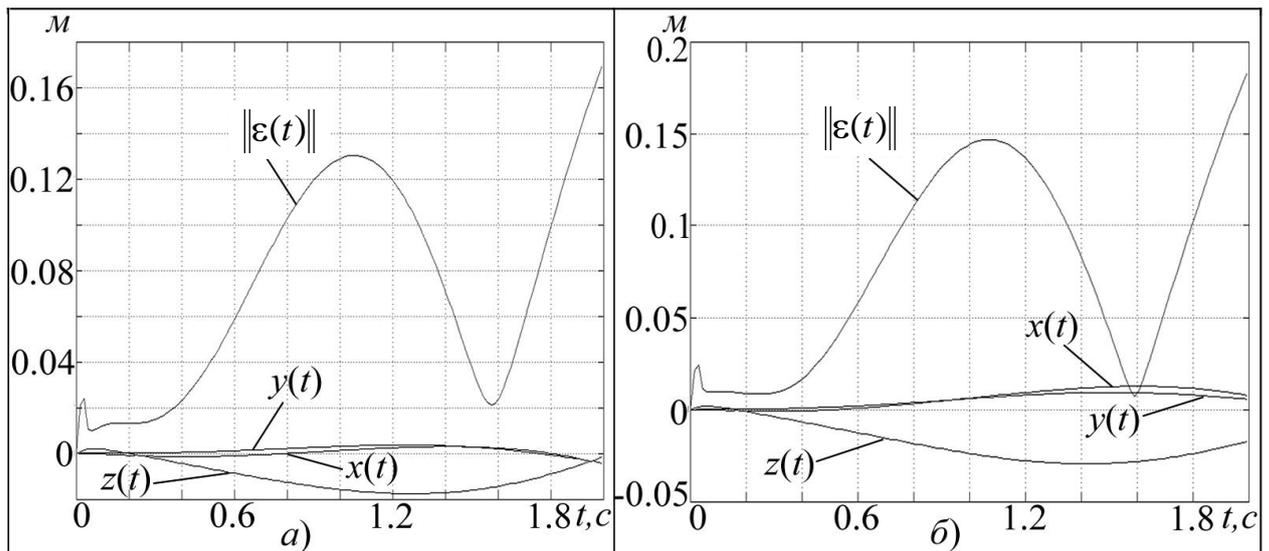


Рис. 3.10. Результаты моделирования удержания ПА с помощью комбинированной СУ при различных погрешностях в расчете величин воздействий ПМ на ПА

Очевидно, что в процессе стабилизации ПА с помощью разомкнутой системы при 10% погрешностях указанных расчетов величина  $\|\varepsilon(t)\|$  увеличивается на 35%, а при использовании комбинированной системы стабилизации ПА и тех же погрешностях вычислений значение  $\|\varepsilon(t)\|$  возрастает только на 17%. Это подтверждает необходимость обязательного использования

именно комбинированной системы удержания ПА в заданной точке пространства.

Результаты выполненного моделирования полностью подтвердили эффективность работы синтезированной комбинированной системы стабилизации ПА в режиме зависания, включающей прямой канал управления двигателями, строящийся на основе вычисления силовых и моментных воздействий манипулятора на этот ПА, и замкнутую систему, «дорабатывающую» неточности указанных вычислений. Использование предложенной системы стабилизации позволяет значительно расширить круг работ, качественно выполняемых подводными манипуляционными комплексами на высоких скоростях.

### **3.5. Выводы**

1. В данной главе предложен метод синтеза комбинированной замкнутой автоматической системы стабилизации положения и ориентации ПА в режиме его зависания в водной среде вблизи объекта выполнения работ. При этом инвариантность работы ПА к внешним силовым воздействиям, создаваемым работающим с высокой скоростью ПМ, обеспечивается с помощью тяг его винтов, пропорциональных указанным внешним воздействиям, вычисляемым в РМВ с помощью разработанной во второй главе модификации алгоритма решения ОЗД для ПМ.

2. Для выполнения исследований работоспособности и эффективности разработанного метода была создана математическая модель ПА с установленным на нем ПМ типа PUMA. При этом были синтезированы регуляторы в каналах замкнутых подсистем стабилизации линейных и угловых перемещений ПА.

3. Результаты выполненного математического моделирования полностью подтвердили эффективность и высокое качество синтезированной системы

стабилизации ПА в различных режимах ее работы. Разработанная комбинированная система стабилизации ПА позволяет добиться его точного удержания в заданной точке пространства, достаточного для выполнения технологических манипуляционных операций. При этом следует отметить, что без использования систем стабилизации ПА в процессе работы ПМ он опрокидывается, и выполнение манипуляционных операций становится вообще невозможным.

#### **4. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СИНТЕЗА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ДВИЖЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ МАНИПУЛЯТОРОВ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА ПОДВОДНЫХ АППАРАТАХ**

На основе разработанного в предыдущей главе метода могут быть синтезированы и практически реализованы высокоточные комбинированные автоматические системы стабилизации ПА в заданной точке пространства при работающих ПМ, которые позволяют решить задачу быстрого и качественного выполнения подводных технологических операций при меньшей утомляемости операторов. Однако и при наличии системы автоматического удержания во время работы в режиме зависания ПА продолжает, хоть и незначительно, незапланированно смещаться от заданного положения, поскольку даже комбинированная система стабилизации в силу неизбежных ошибок навигационных приборов, инерционности ПА и динамических запаздываний в работе его движителей неспособна точно зафиксировать ПА в пространстве. В результате даже незначительные смещения этого аппарата от его исходного положения неизбежно повлекут за собой отклонения РО ПМ от предписанных пространственных траекторий. Это значительно снижает точность выполнения многих манипуляционных операций.

Для сохранения заданной точности движения РО ПМ, установленного на ПА, в диссертации предлагается синтезировать систему непрерывной автоматической коррекции программной траектории движения этого органа с учетом незапланированных смещений ПА от его исходного положения уже в процессе движения ПМ. Указанная коррекция должна осуществляться на основе информации о реальном угловом и линейном смещении ПА относительно его исходного положения, получаемой от высокоточных навигационных и гироскопических систем, а также информации о непрерывно изменяющейся конфигурации ПМ, обеспечивая дополнительное перемещение

его РО.

Кроме того, для увеличения скорости выполнения подводных технологических операций в данной главе разрабатывается метод синтеза системы управления режимом движением РО ПМ, автоматически формирующей такую максимально возможную текущую программную скорость перемещения этого органа вдоль сложных пространственных траекторий, при которой он не отходит от этих траекторий на расстояние, превышающее допустимое.

#### 4.1. Описание подводной манипуляционной системы

На рис. 4.1 показан ПА с закрепленным на нем (в точке  $O$ )  $n$  - степенным ПМ, который способен перемещаться в передней полусфере перед этим аппаратом. Каждая степень подвижности ПМ приводится в движение соответствующим приводом. Будем полагать, что ПА оснащен высокоточной навигационной системой, позволяющей в пределах рабочей зоны ПМ определять его местоположение с точностью не ниже  $0.01\text{ м}$  [5, 18, 78, 88, 89, 100, 110], бортовыми гироскопами, точно измеряющими углы крена, дифферента и рысканья ПА, а также разработанной в предыдущих главах диссертации комбинированной системой его автоматической стабилизации в пространстве, которая за счет соответствующих тяг движителей обеспечивает приемлемую компенсацию силовых и моментных воздействий на ПА со стороны работающего ПМ.

На рис 4.1 введены следующие обозначения: 1- заданная (неизменная) в абсолютной СК  $XYZ$  желаемая пространственная траектория движения РО ПМ, которая, как правило, определяется и задается до начала работ и должна быть точно отработана этим РО после вывода ПА (возможно в ручном режиме) в заданную точку пространства с заданной ориентацией; 2 - ПА в исходном положении; 3 - многозвенный ПМ в исходном положении; 4 - ПА в положении,

смещенном относительно исходного; 5 - новое положение ПМ, обеспечивающее точное прохождение его РО по траектории 1.

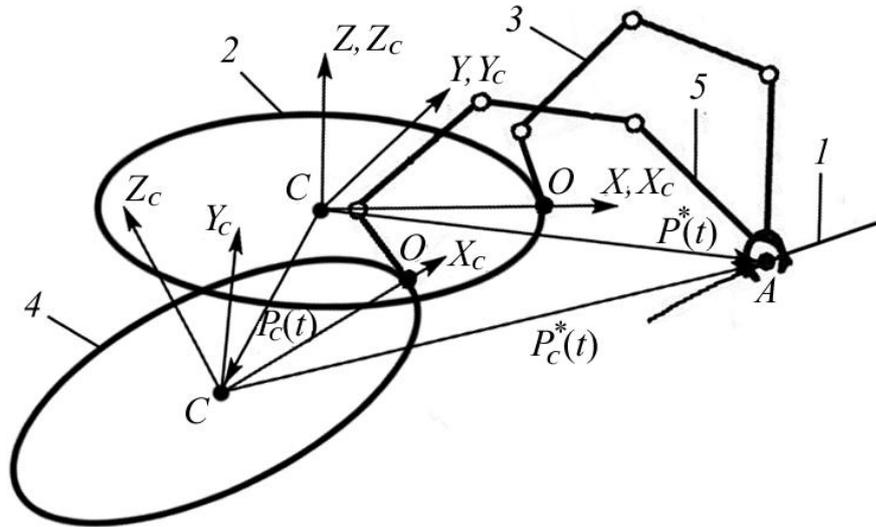


Рис. 4.1. ПА и схема расположения СК

В исходном положении 2 с центром масс ПА, который совпадает с центром его величины, совмещены начала абсолютной  $XYZ$  и жестко связанной с корпусом ПА  $X_c Y_c Z_c$  СК, оси которых в исходном положении ПА совпадают. Оси связанной СК совпадают с осями симметрии ПА, при этом ось  $Y_c$  является его продольной осью. Вектор  $P_c^*(t) \in R^3$  задает текущее желаемое положение характерной точки  $A$  РО ПМ в СК  $X_c Y_c Z_c$ , в которой он работает, а вектор  $P_c(t) \in R^3$  - смещение точки  $C$  в СК  $XYZ$ .

В текущий момент времени желаемые значения координат характерной точки  $A$  РО ПМ в абсолютной СК задаются вектором  $P^*(t)$ , введенным в третьей главе, и определяются выражениями [34]:

$$\begin{cases} \dot{x}^* = v^*(t)/\Phi(x^*), \\ y^* = g_y(x^*), \\ z^* = g_z(x^*), \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\Phi(x^*) = \sqrt{\left(\frac{\partial g_y(x^*)}{\partial x^*}\right)^2 + \left(\frac{\partial g_z(x^*)}{\partial x^*}\right)^2 + 1} = \sqrt{g'_y(x^*)^2 + g'_z(x^*)^2 + 1}$$

где  $v^*(t)$  - модуль вектора желаемой скорости движения точки  $A$  по траектории;  $g_y(x^*), g_z(x^*)$  - функции, описывающие соответствующие проекции траектории движения точки  $A$  на оси СК  $XYZ$ .

Из рис. 4.1 видно, что при отклонении ПА от исходного положения 2 в процессе работы ПМ в положение 4  $x^* \neq x_c^*, y^* \neq y_c^*, z^* \neq z_c^*$ , поэтому использовать выражения (4.1) для определения траектории движения РО ПМ в СК  $X_c Y_c Z_c$  уже нельзя. Исходя из этого, в рассматриваемой главе ставится задача создания системы, которая, учитывая текущие смещения ПА (вместе с СК  $X_c Y_c Z_c$ ) относительно его исходного положения, позволяла бы автоматически вычислять положение точки  $A$  в СК  $X_c Y_c Z_c$  (вектор  $P_c^*(t)$ ) и так управлять РО этого ПМ, чтобы он продолжал двигаться по траектории, непрерывно вычисляемой в СК  $XYZ$  с помощью выражения (4.1). При этом угловые и линейные смещения ПА относительно его исходного положения при наличии указанной выше системы автоматической стабилизации не должны превышать некоторых пределов, зависящих от параметров и кинематической схемы ПМ. То есть его конструкция в процессе слежения за некоторой точкой на траектории должна быть способна обработать возникающие смещения ПА.

#### **4.2. Построение системы автоматической коррекции программной траектории движения рабочего органа подводного манипулятора**

Будем полагать, что в некоторый момент времени при работе ПМ произошло смещение точки  $C$  ПА относительно начала СК  $XYZ$  и некоторый его произвольный поворот в этой СК. Бортовые гироскопы измеряют угол тангажа  $\alpha$ , образуемый продольной осью  $Y_c$  ПА с горизонтальной плоскостью

$X'Y'$  (см. рис. 4.2), угол  $\beta$  рысканья, образуемый проекцией  $Y_c'$  продольной оси  $Y_c$  на горизонтальную плоскость и направлением оси  $Y$ , и угол крена  $\gamma$ , образуемый при повороте ПА вокруг его продольной оси  $Y_c$  [41, 68]. При этом координаты  $\Delta x(t)$ ,  $\Delta y(t)$  и  $\Delta z(t)$  вектора  $P_c(t) \in R^3$ , определяющего линейное смещение точки  $C$  в СК  $XYZ$  (см. рис.4.1) относительно исходного положения ПА, измеряются высокоточной навигационной системой.

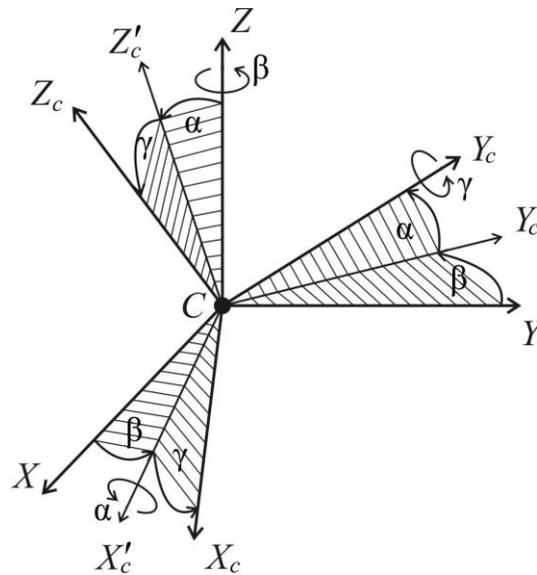


Рис. 4.2. Угловые перемещения связанной СК

Для решения поставленной задачи необходимо найти элементы вектора  $P_c^*(t)$  в СК  $X_c Y_c Z_c$ , зная элементы векторов  $P^*(t)$  и  $P_c(t)$  СК  $XYZ$ . Очевидно (см. рис. 4.1), что элементы вектора  $P_c^*(t)$  в СК  $XYZ$  можно получить с помощью разности двух векторов  $P^*(t) - P_c(t)$ , а элементы этого вектора в СК  $X_c Y_c Z_c$  - с помощью выражения

$$P_c^*(t) = R^T (P^*(t) - P_c(t)) \quad (4.2)$$

где  $R \in R^{3 \times 3}$  – матрица поворотов СК  $X_c Y_c Z_c$  относительно СК  $XYZ$  [84].

Для составления матрицы  $R$  необходимо представить поворот ПА вместе с СК  $X_c Y_c Z_c$  в виде последовательности элементарных поворотов. Оси, относительно которых отсчитываются углы соответствующих поворотов СК  $X_c Y_c Z_c$ , и последовательность этих поворотов должны выбираться такими, чтобы получаемые при этом углы  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  действительно соответствовали углам, которые будут измеряться бортовыми гироскопами. Это условие выполняется при следующей последовательности элементарных поворотов СК  $X_c Y_c Z_c$  (см. рис. 4.2): вначале осуществляется поворот на угол  $\beta$  вокруг оси  $Z$  (ему соответствует матрица элементарного поворота  $R_{Z,\beta}$ ). Затем выполняется поворот на угол  $\alpha$  вокруг повернутой оси  $X_c'$  (ему соответствует матрица элементарного поворота  $R_{X_c',\alpha}$ ). И, наконец, поворот на угол  $\gamma$  вокруг оси  $Y_c$  (ему соответствует матрица элементарного поворота  $R_{Y_c,\gamma}$ ). Указанные матрицы поворотов имеют стандартный вид [24]:

$$R_{X_c',\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha & -S\alpha \\ 0 & S\alpha & C\alpha \end{bmatrix}, R_{Y_c,\gamma} = \begin{bmatrix} C\gamma & 0 & S\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\gamma & 0 & C\gamma \end{bmatrix}, R_{Z,\beta} = \begin{bmatrix} C\beta & -S\beta & 0 \\ S\beta & C\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

где  $S\alpha = \sin \alpha$ ;  $S\beta = \sin \beta$ ;  $C\alpha = \cos \alpha$ ;  $C\beta = \cos \beta$ ;  $C\gamma = \cos \gamma$ . Учитывая выражения (4.3), составим матрицу  $R$  для описанной последовательности поворотов СК  $X_c Y_c Z_c$  вместе с ПА:

$$R = R_{Z,\beta} R_{X_c',\alpha} R_{Y_c,\gamma} = \begin{bmatrix} C\beta C\gamma - S\alpha S\beta S\gamma & -S\beta C\alpha & S\gamma C\beta + S\alpha S\beta C\gamma \\ S\beta C\gamma + S\alpha S\gamma C\beta & C\alpha C\beta & S\beta S\gamma - S\alpha C\beta C\gamma \\ -S\gamma C\alpha & S\alpha & C\alpha C\gamma \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

Необходимо подчеркнуть, что только матрица (4.4) может использоваться в выражении (4.2) для определения элементов вектора  $P_c^*(t)$ , так как любая

другая, составленная посредством иной последовательности элементарных поворотов, не может быть реализована на основе информации, получаемой от бортовых гироскопов.

После подстановки транспонированной матрицы  $R$  в выражение (4.2) будем иметь:

$$P_c^*(t) = \begin{bmatrix} (C\beta C\gamma - S\alpha S\beta S\gamma)(x^* - \Delta x) + (S\beta C\gamma + S\alpha S\gamma C\beta)(y^* - \Delta y) - S\gamma C\alpha(z^* - \Delta z) \\ - S\beta C\alpha(x^* - \Delta x) + C\alpha C\beta(y^* - \Delta y) + S\alpha(z^* - \Delta z) \\ (S\gamma C\beta + S\alpha S\beta C\gamma)(x^* - \Delta x) + (S\beta S\gamma - S\alpha C\beta C\gamma)(y^* - \Delta y) + C\alpha C\gamma(z^* - \Delta z) \end{bmatrix}.$$

Обобщенная блок-схема разработанной системы автоматической коррекции программной траектории движения РО многозвенного ПМ показана на рис. 4.3.

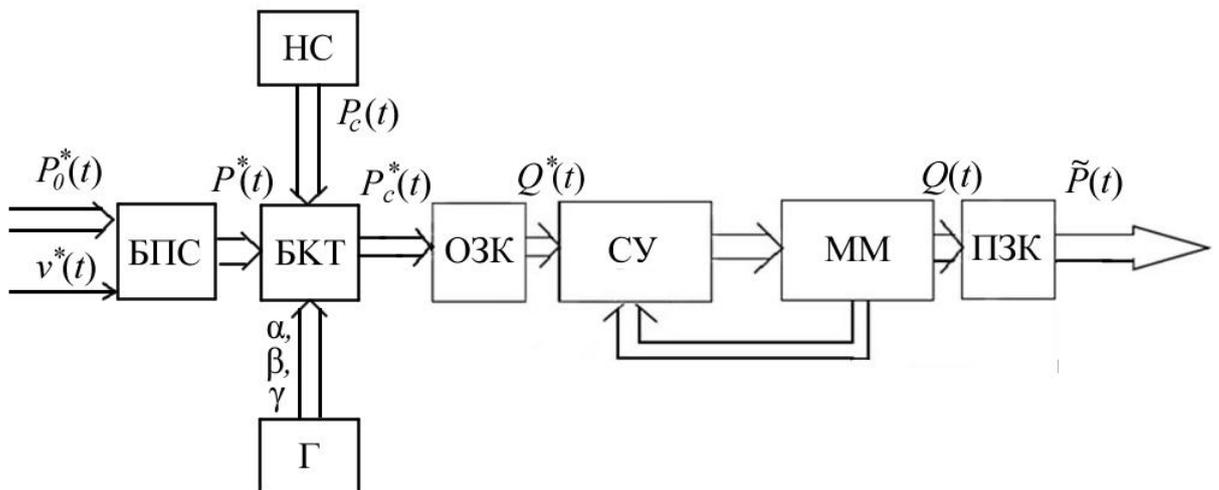


Рис. 4.3. Обобщенная блок-схема системы автоматической коррекции программной траектории движения РО ПМ, установленного на ПА

На рис. 4.3. введены следующие обозначения: СУ – система управления приводами ПМ; ММ – многозвенный ПМ; БПС – блок формирования программных сигналов движения РО ПМ; БКТ – блок коррекции траектории

движения РО ПМ; НС – навигационная система ПА; Г – блок гироскопов;  $P_0^*(t) = [x_0^*, y_0^*, z_0^*]^T \in R^3$  – вектор начального положения РО манипулятора в СК XYZ;  $\tilde{P}(t) = [\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}] \in R^3$  – вектор, задающий реальное положение характерной точки А РО ПМ в абсолютной СК XYZ; ОЗК – блок решения обратной задачи кинематики ПМ; ПЗК – блок решения прямой задачи кинематики ПМ;  $Q(t) = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$  и  $Q^*(t) = (q_1^*, q_2^*, \dots, q_n^*)^T$  – векторы обобщенных координат  $q_i$  и  $q_i^*$  ПМ, соответственно, определяющих реальное и желаемое положения характерной точки РО этого многозвенника.

#### 4.3. Исследование системы автоматической коррекции программной траектории движения рабочего органа подводного манипулятора

Для исследования работы многозвенового ПМ типа PUMA с параметрами, приведенными в третьей главе диссертации, и синтезированной СУ (см. рис. 4.3), было выполнено математическое моделирование движения его РО в горизонтальной плоскости по траектории, описываемой уравнением  $(z^* = g_z(x^*) = \text{const})$

$$y^* = -0.4 \sin(25x^*) - 0.1,$$

когда значение  $x^*(t)$  формировалось с помощью выражения

$$\dot{x}^* = \frac{0.7}{\sqrt{(1 + (-10 \cos(25x^*))^2)}},$$

полученного на основе выражения (4.1). При этом  $v^*(t) = 0.7$  м/с, а начальная точка траектории движения РО имела координаты:  $x_0^* = 0.7$  м,  $y_0^* = -0.1$  м,

$$z_0^* = 0 \text{ м.}$$

Для большей наглядности результатов моделирования предполагалось, что в процессе работы ПМ его основание, являющееся неточно стабилизируемым в пространстве ПА, изменяет свои линейные и угловые координаты по законам:  $P_c(t) = [0.04 \sin(1.5t), 0.05 \sin(2t), 0.03 \sin(2t)]^T$ ;  $\alpha = 0.06 \sin(2.5t)$ ;  $\beta = 0.04 \cos(2t)$ ;  $\gamma = 0.06 \cos(2t)$ .

На рис. 4.4 показаны процессы изменения  $\tilde{x}(t)$ ,  $\tilde{y}(t)$ ,  $\tilde{z}(t)$  и величины  $\|\varepsilon(t)\|$  в процессе движения РО ПМ по заданной пространственной траектории с использованием автоматической коррекции траектории движения РО этого ПМ (см. рис. 4.3), а на рис. 4.5.а – отклонение  $\|\varepsilon(t)\|$  при движении РО по той же траектории, но без использования синтезированной системы.

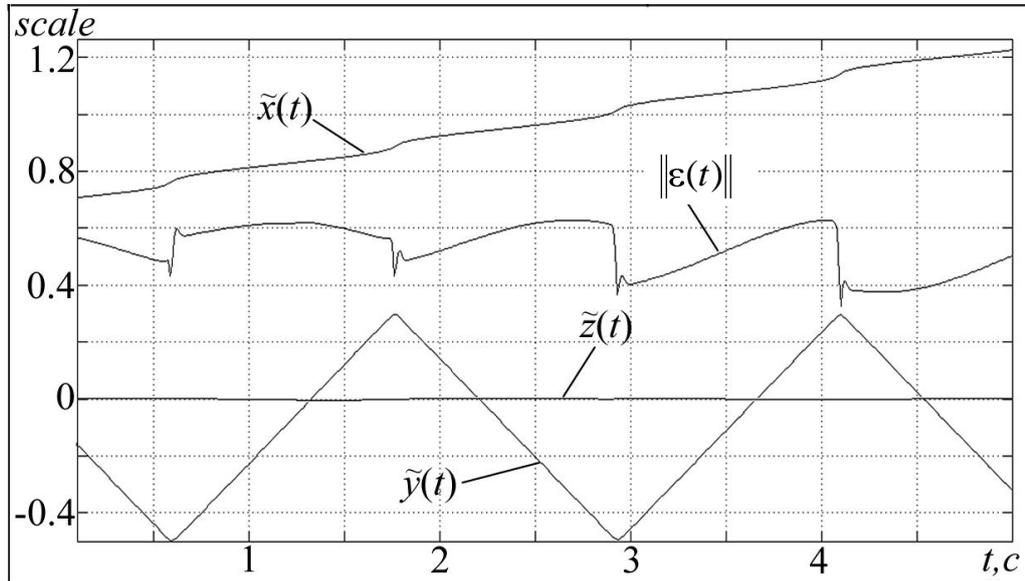
Из этих рисунков видно, что синтезированная СУ благодаря дополнительным движениям манипулятора позволяет в десятки раз непрерывно повышать точность перемещения его РО.

Кроме того, на рис. 4.5.б показаны процессы изменения величины  $\|\varepsilon(t)\|$  и линейных координат ПА в процессе удержания этого аппарата в режиме зависания с помощью комбинированной системы стабилизации при тех же законах движения ПМ (3.2), что и на рис. 3.8а, но уже с использованием синтезированной системы коррекции программной траектории движения РО ПМ.

Сравнивая полученные результаты (см. рис. 4.5.б) с результатами моделирования без дополнительной коррекции траектории РО ПМ, представленными на рис. 3.8.а, несложно заметить, что при тех же смещениях ПА от исходного положения разработанная система позволяет в 15 раз уменьшить величину  $\|\varepsilon(t)\|$  при движении РО ПМ по той же пространственной траектории (3.2).

Это же имеет место и в тех случаях, когда требуется существенно

увеличить динамическую точность при непрерывном перемещении многозвенного ПМ по любым другим пространственным траекториям.



$$\tilde{y}(t) = \text{scale } m; \tilde{x}(t) = \text{scale } m; \tilde{z}(t) = \text{scale } m; \|\varepsilon(t)\| = \text{scale } 0.02 m.$$

Рис. 4.4. Процессы изменения  $\tilde{x}(t)$ ,  $\tilde{y}(t)$ ,  $\tilde{z}(t)$  и  $\|\varepsilon(t)\|$  в синтезированной системе

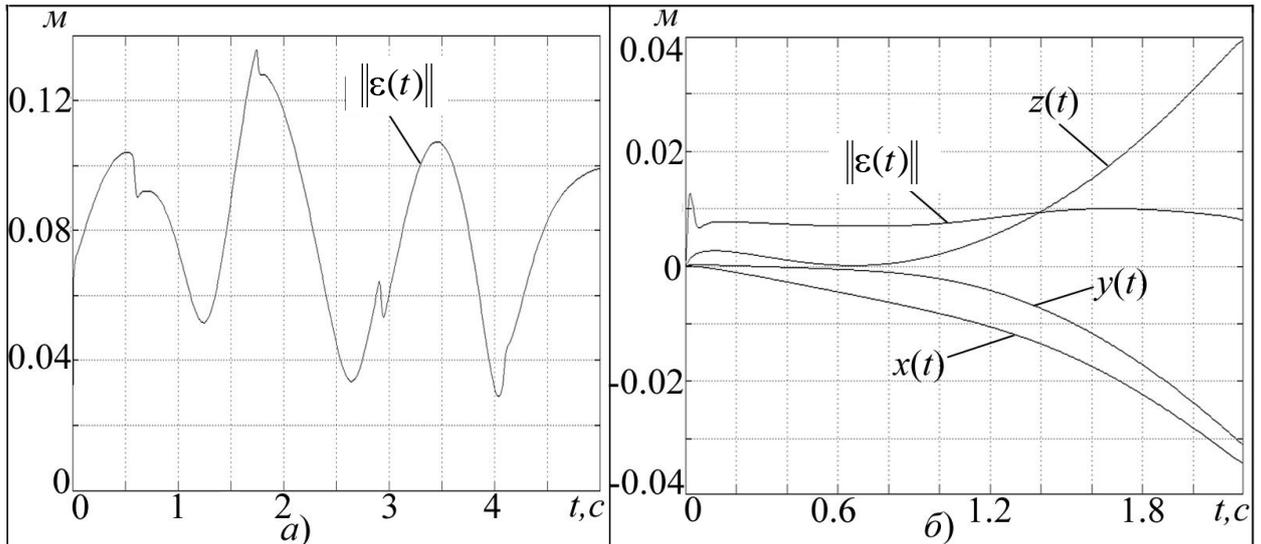


Рис. 4.5. Результаты численного моделирования

Результаты моделирования полностью подтвердили эффективность предложенного подхода к комплексному решению задачи стабилизации ПА в пространстве в сочетании с автоматической коррекцией траектории движения РО ПМ. Предложенная многоуровневая система автоматической стабилизации положения и ориентации ПА [22, 57, 58, 81] позволяет добиться его достаточно точного удержания в заданной точке пространства в процессе работы ПМ, а введенная в контур управления этим ПМ синтезированная система непрерывной коррекции траектории движения РО [38, 39] обеспечивает требуемую динамическую точность управления, вполне достаточную для выполнения многих манипуляционных операций.

#### **4.4. Описание системы формирования программных сигналов управления манипулятором**

Скорость выполнения технологических работ, осуществляемых подводными манипуляционными комплексами, в основном определяется скоростью выполнения соответствующих манипуляционных операций с помощью многозвенных ПМ, РО которых могут двигаться по сложным пространственным траекториям. При этом увеличение быстродействия ПМ особенно актуально в условиях жесткой фиксации ПА вблизи объекта работ, либо в процессе их высокоточной стабилизации в режиме зависания, когда смещения ПА от исходного положения практически отсутствуют и не оказывают влияния на точность выполнения указанных операций.

В настоящее время уже создано большое количество методов [44, 47, 90, 96 и др.], позволяющих синтезировать высокоточные СУ (адаптивные, самонастраивающиеся, оптимальные и т. д.) указанными манипуляторами. Однако, как показали исследования, заданная динамическая точность работы ПМ сохраняется не на всех участках сложной пространственной траектории и только в том случае, когда все их усилительные и исполнительные элементы не

входят в насыщение при отработке сигналов управления, сформированных этими системами. Причем при входе их в насыщение могут появиться такие отклонения РО ПМ от заданной траектории, которые могут значительно затруднить выполнение поставленных манипуляционных задач. Снижение динамической точности управления даже при использовании высококачественных СУ наблюдается и при повышенной скорости движения в отдельных суставах ПМ, что часто имеет место при высокой скорости перемещения его РО по отдельным участкам сложных траекторий.

Исключить вход в насыщение можно, используя более мощные усилительные и исполнительные устройства, но это неминуемо приводит к значительному увеличению массы и инерционности звеньев и, как следствие, к увеличению взаимовлияний между степенями подвижности многозвенника. А это, в свою очередь, также снижает динамическую точность управления даже при использовании высококачественных СУ всеми приводами ПМ. Однако сохранить заданную точность управления было бы возможно, снижая скорость движения РО ПМ на тех участках программной траектории, которые имеют большую кривизну.

В работе [64] рассмотрен подход к автоматическому формированию программных сигналов движения ПА, позволяющий задавать предельно возможную скорость их перемещения по всем участкам пространственных траекторий с учетом возможного входа двигателей в насыщение. Для формирования указанных программных сигналов вводился дополнительный контур, который на основе информации о текущей точности движения ПА по заданным пространственным траекториям задавал максимально возможное значение желаемой скорости этого движения. Указанный подход можно применить и для синтеза системы формирования программных сигналов движения многозвенного ПМ, однако для этого необходимо учесть кинематические и динамические особенности этих сложных многосвязных динамических объектов управления с постоянно изменяющейся конфигурацией

исполнительного органа.

Рассмотрим  $n$  степенной ПМ (см. рис. 4.6), который приводится в движение с помощью  $n$  приводов и имеет СУ вида:

$$u(t) = F_u(\varepsilon(t), Q^*(t)) \in R^n, \quad (4.5)$$

где  $\varepsilon_q(t) = Q^*(t) - Q(t) \in R^n$  - вектор, элементами которого являются динамические ошибки каждого привода ПМ.

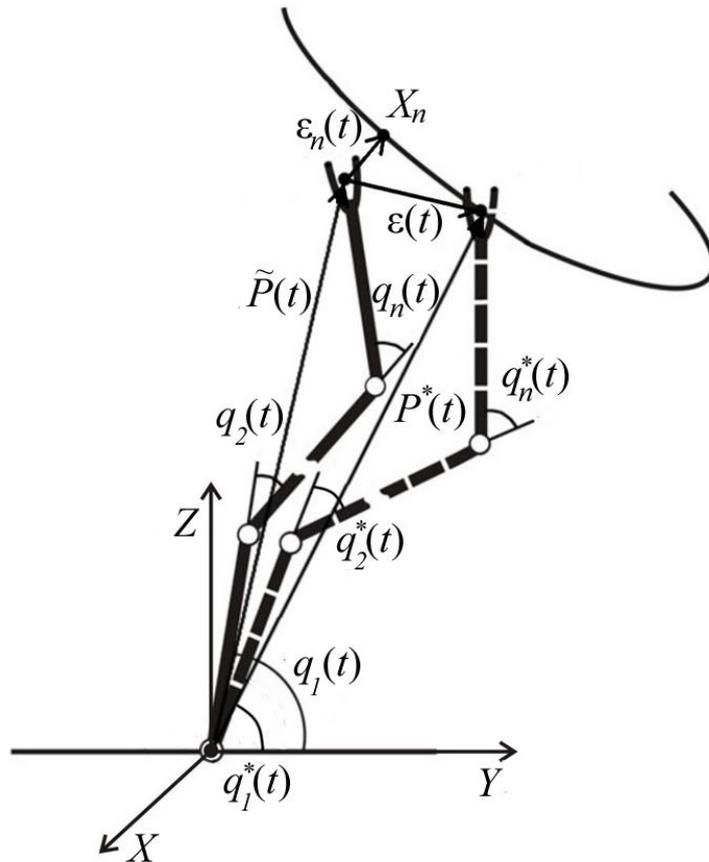


Рис. 4.6. Схема движения РО ПМ по заданной траектории

Вектор  $Q(t)$  связан с вектором  $\tilde{P}(t) = (x, y, z)^T$  реального положения РО ПМ в абсолютной СК  $XYZ$  с помощью соотношений [84, 105]:

$$Q(t) = F_I(\tilde{P}(t)), \quad \tilde{P}(t) = F_D(Q(t)), \quad (4.6)$$

где  $F_D(\cdot) \in R^3$ ,  $F_I(\cdot) \in R^n$  - векторные функции, описывающие решения прямой и обратной задачи кинематики рассматриваемого манипулятора, соответственно.

Пусть движение РО ПМ по желаемой пространственной траектории в абсолютной СК задается с помощью выражений (4.1), тогда можно записать:

$$\dot{P}^*(t) = F_X^*(x^*)v^*(t), \quad (4.7)$$

где  $F_X^*(x^*) = [(1/\Phi(x^*), g'_y(x^*)/\Phi(x^*), g'_z(x^*)/\Phi(x^*))]^T$ .

С учетом выражений (4.6) и (4.7) можно записать:

$$\dot{Q}^*(t) = \frac{\partial F_I}{\partial P^*} \dot{P}^*(t) = \frac{\partial F_I}{\partial P^*} F_X^*(x^*)v^*(t). \quad (4.8)$$

Учитывая выражение (4.8), несложно показать, что вектор  $\varepsilon_q(t) = \dot{Q}^*(t) - \dot{Q}(t)$  определяется функциональной зависимостью:

$$\varepsilon_q(t) = f_\varepsilon(v^*(t), F_I(P^*), F_X^*(x^*), F_u(\cdot)). \quad (4.9)$$

Однако при наличии  $\varepsilon_q(t) \neq 0$  в СК XYZ появляется вектор  $\varepsilon(t) \neq 0 \in R^3$ , определяющий отклонение вектора положения характерной точки РО ПМ  $\tilde{P}(t)$  от вектора его желаемого положения  $P^*(t)$ , а также вектор  $\varepsilon_n(t) \neq 0 \in R^3$  отклонения этой точки от заданной траектории ее движения (см. рис. 4.6). Следует отметить, что основание ПМ (точка его крепления к ПА) считается

неподвижным, при этом  $\|\varepsilon_n(t)\|$  зависит от  $\|\varepsilon_q(t)\|$  и от параметров заданной траектории движения РО ПМ:

$$\varepsilon_n(t) = f_n(\varepsilon_q(t), F_X^*(x^*)). \quad (4.10)$$

Из выражений (4.9) и (4.10) видно, что уменьшить  $\|\varepsilon_n(t)\|$  без изменения СУ (4.5) можно только за счет уменьшения  $v^*(t)$ .

С учетом отмеченного в данной главе диссертации ставится и решается задача разработки метода синтеза системы автоматического формирования такой желаемой скорости  $v^*(t)$  движения характерной точки РО ПМ по заданной пространственной траектории, которая позволила бы при наличии любой устойчивой СУ (4.5) обеспечить движение РО ПМ по этой траектории с максимально возможной скоростью, гарантирующей выполнение неравенства:

$$\varepsilon_n(t) \leq \varepsilon_{n\max}, \quad (4.11)$$

где  $\varepsilon_{n\max}$  - максимально допустимое отклонение РО от заданной траектории.

Выбор режима (скорости) движения РО ПМ по отдельным участкам траектории можно осуществить на этапе планирования этой траектории, решая уравнение  $\varepsilon_n = 0$  (4.10) относительно переменной  $v^*$ . Однако аналитического решения этого уравнения не существует, а его численное решение требует использования мощной ЭВМ, что приводит к значительному усложнению СУ манипулятором. Но для решения поставленной задачи можно использовать подход, предложенный в работе [64]. Этот подход заключается в создании дополнительного контура управления для автоматического формирования желаемой скорости движения РО ПМ в зависимости от его текущего отклонения  $\varepsilon_n$  от заданной траектории. При этом текущее значение желаемой

скорости должно обеспечивать неизменное выполнение неравенства (4.11). Этого можно достичь путем уменьшения скорости движения РО на тех участках траектории, где в наибольшей степени проявляются взаимовлияния в степенях подвижности ПМ, требующие наличия больших компенсирующих сигналов, необходимых для обеспечения требуемой точности управления ПМ.

Обобщенная структурная схема системы, формирующей программные сигналы движения РО многозвенного ПМ, показана на рис. 4.7. На этой схеме введены следующие обозначения:  $Rg$  – регулятор желаемой скорости движения РО ПМ; ОЗК – блок решения обратной задачи кинематики; СУ – система управления приводами ПМ; БФО – блок формирования отклонения характерной точки РО от заданной траектории; ММ – многозвенный ПМ; ПЗК – блок решения прямой задачи кинематики;  $e_{on} = \text{const} (e_{on} \leq \varepsilon_{n \max})$  – величина, обеспечивающая выполнение неравенства (4.11).

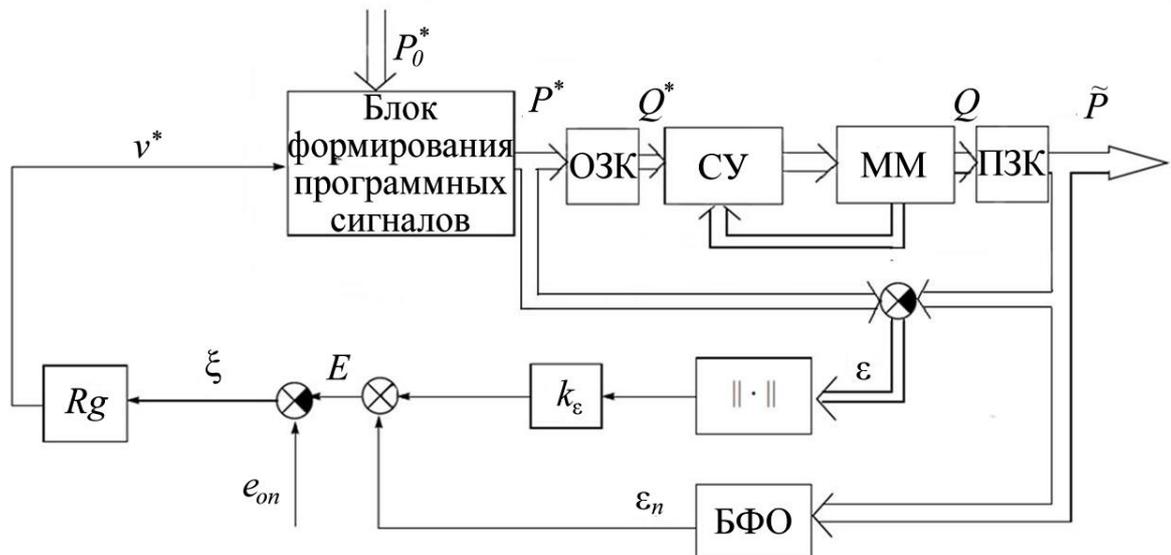


Рис. 4.7. Обобщенная структурная схема системы автоматического формирования желаемой скорости движения РО ПМ по заданной траектории

Динамическая точность движения РО ПМ оценивается с помощью комплексной величины  $E(t)$ , которая рассчитывается по формуле [64]:

$$E(t) = k_\varepsilon \varepsilon_m(t) + \varepsilon_n(t), \quad (4.12)$$

где  $\varepsilon_m$  – евклидова норма вектора динамической ошибки слежения РО ПМ манипулятора в абсолютной СК

$$\varepsilon_m(t) = \|\varepsilon(t)\| = \|P^*(t) - \tilde{P}(t)\| = \sqrt{\varepsilon_x^2(t) + \varepsilon_y^2(t) + \varepsilon_z^2(t)}, \quad (4.13)$$

$k_\varepsilon = \text{const}$  – положительный коэффициент, определяемый с помощью выражения  $k_\varepsilon = e_{on} / \varepsilon_m^{\text{доп}}$ ,  $\varepsilon_m^{\text{доп}} = \text{const}$  – допустимое значение  $\varepsilon_m(t)$ ;  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  – величины текущих отклонений характерной точки РО ПМ от программной точки по соответствующим осям СК XYZ.

Первое слагаемое выражения (4.12) позволяет ограничить величину  $v^*(t)$  при движении РО ПМ точно по заданной траектории, но с некоторым запаздыванием относительно программной точки, перемещающейся по этой траектории, а второе слагаемое ограничивает  $v^*(t)$  с учетом текущего значения  $\varepsilon_n(t)$ , которое формируется на выходе БФО и определяет расстояние от текущего положения характерной точки этого органа до ближайшей точки  $X_n = (x_n, g_y(x_n), g_z(x_n))$  на программной траектории (см. рис. 4.6). Координаты точки  $X_n$  определяются после решения относительно переменной  $x_n$  уравнения [64]

$$(x_n - \tilde{x}) + g'_y(x_n)(g_y(x_n) - \tilde{y}) + g'_z(x_n)(g_z(x_n) - \tilde{z}) = 0.$$

Значение  $v^*(t)$  формируется регулятором Rg (см. рис. 4.7), на вход которого поступает сигнал  $\xi(t) = e_{on} - E(t)$ . Этот регулятор работает

следующим образом. Если  $\xi(t) < 0$ , то справедливо неравенство  $E(t) > e_{\text{он}}$  и  $Rg$  будет уменьшать  $v^*(t)$ . Это приведет к снижению значения  $\|\varepsilon_q(t)\|$ , а, следовательно, и величин  $\varepsilon_n(t)$ ,  $\varepsilon(t)$  и  $E(t)$ . Если  $\xi(t) > 0$ , то  $E(t) < e_{\text{он}}$  и  $v^*(t)$  будет возрастать. При этом величина  $v^*$  никогда не должна быть отрицательной.

#### 4.5. Описание неизменяемой части системы

При синтезе регулятора  $Rg$  вначале следует описать ту неизменяемую часть системы, которая расположена между сигналами  $v^*(t)$  и  $E(t)$  (см. рис. 4.7) и является объектом управления для регулятора  $Rg$ . Эта часть описывается уравнениями (4.6), (4.8), (4.10), (4.12), а также  $n$  дифференциальными уравнениями  $m$  порядка

$$\varepsilon_i^{(m)} = F_{\varepsilon_i}(\varepsilon_i^{(m-1)}, \dots, \dot{\varepsilon}, \varepsilon, q_i^{*(p)}, \dots, \dot{q}_i^*, q_i^*), \quad i = \overline{1, n}, \quad p \leq m, \quad (4.14)$$

определяющими динамику каждого следящего привода ПМ с учетом его СУ (4.5).

Указанная неизменяемая часть слишком сложна для непосредственного использования при синтезе  $Rg$ . Поэтому применим подход, использованный ранее в работе [64], позволяющий упростить эту часть. Этот подход заключается в замене нелинейных преобразований, содержащихся в выражениях (4.6), (4.8), (4.10), (4.12), линейными зависимостями с переменными коэффициентами. При этом регулятор  $Rg$  должен обеспечивать неизменное выполнение условия (4.11) для всех возможных комбинаций этих коэффициентов.

В работе [64] была показана справедливость равенства  $\varepsilon_n = k_e \varepsilon_m$  и

замены выражения (4.13) выражением  $\varepsilon_m = \tilde{k}_m (|\varepsilon_x| + |\varepsilon_y| + |\varepsilon_z|) = \tilde{k}_m \tilde{\varepsilon}_m$ , где  $0 \leq k_e \leq 1$ ,  $1/\sqrt{3} \leq \tilde{k}_m \leq 1$ . С учетом этих замен выражение (4.12) можно переписать в виде:

$$E = k_\varepsilon \varepsilon_m + \varepsilon_n = k_\varepsilon \tilde{k}_m \tilde{\varepsilon}_m + k_e \varepsilon_m = k_\varepsilon \tilde{k}_m \tilde{\varepsilon}_m + k_e \tilde{k}_m \tilde{\varepsilon}_m = (k_\varepsilon + k_e) \tilde{k}_m \tilde{\varepsilon}_m = \tilde{k}_e \tilde{k}_m \tilde{\varepsilon}_m, \quad (4.15)$$

где  $k_\varepsilon \leq \tilde{k}_e < k_\varepsilon + 1$ .

Согласно выражению (4.6) можно записать:

$$\varepsilon = F_D(Q^*) - F_D(Q). \quad (4.16)$$

Полагая, что СУ (4.5) обеспечивает близость  $Q^*$  и  $Q$ , линейризуем функции  $F_D(\cdot)$  в окрестности точек  $Q_0 = (Q^* + Q)/2$ , разложив их в ряд Тэйлора, и подставим в выражение (4.16) только линейные члены этого разложения. В результате получим

$$\begin{aligned} \varepsilon = F_D(Q^*) - F_D(Q) &\approx \left( F_D(Q_0) + \frac{\partial F_D(Q)}{\partial Q} \Big|_{Q=Q_0} (Q^* - Q_0) \right) - \\ &- \left( F_D(Q_0) + \frac{\partial F_D(Q)}{\partial Q} \Big|_{Q=Q_0} (Q - Q_0) \right) = \frac{\partial F_D(Q)}{\partial Q} \Big|_{Q=Q_0} (Q^* - Q) = \frac{\partial F_D(Q)}{\partial Q} \Big|_{Q=Q_0} \varepsilon_q = \tilde{F}_{FD} \varepsilon_q. \end{aligned} \quad (4.17)$$

С учетом выражения (4.17) элемент  $\tilde{\varepsilon}_m$  в (4.15) можно представить в виде:

$$\tilde{\varepsilon}_m = \sum_{i=1}^3 \left| \sum_{j=1}^n k_{FDij} \varepsilon_j \right|,$$

где  $k_{FDij}$  - текущие значения элементов матрицы  $\tilde{F}_{FD}$ . Далее вместо  $\tilde{\varepsilon}_m$  будем использовать оценку  $\tilde{\tilde{\varepsilon}}_m$  ее максимальной величины:

$$\tilde{\tilde{\varepsilon}}_m \leq 3\tilde{k}_{FD} \sum_{j=1}^n |\varepsilon_j| = \tilde{\tilde{\varepsilon}}_m, \quad (4.18)$$

где  $\tilde{k}_{FD}$  - величина максимально возможного по модулю значения элементов матрицы  $\tilde{F}_{FD}$ , т.е.  $\tilde{k}_{FD} = \max |k_{FDij}|, i = \overline{1,3}, j = i, n$ . Использование величины  $\tilde{\tilde{\varepsilon}}_m$  позволяет существенно упростить описание неизменяемой части системы.

Полагаем, что в приводах ПМ уже используются СУ, позволяющие описать их динамику с помощью линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Эти системы описаны в работе [47]. В этом случае уравнение (4.14) можно представить в операторной форме:

$$\varepsilon_i(s) = \Phi_{\varepsilon_i}(s)q_i^*(s), \quad (4.19)$$

где  $\Phi_{\varepsilon_i}(s)$  - передаточная функция по ошибке, описывающая динамику  $i$ -го привода ПМ, замкнутого единичной отрицательной обратной связью.

С учетом выражений (4.15), (4.18) и (4.19) и справедливости равенства  $|a| = a \operatorname{sign}(a)$  можно записать:

$$E(s) = 3\tilde{k}_{FD}\tilde{k}_m\tilde{k}_e \sum_{i=1}^n \Phi_{\varepsilon_i}(s)q_i^*(s)\operatorname{sign}(\varepsilon_i). \quad (4.20)$$

Передаточные функции  $\Phi_{\varepsilon_i}(s)$  могут иметь разные параметры для разных степеней подвижности ПМ, однако в процессе синтеза регулятора  $Rg$  будем полагать, что все эти передаточные функции имеют одинаковые параметры,

соответствующие передаточной функции  $\Phi_{\varepsilon_i}(s)$  привода его степени подвижности  $m$ , работающего в самых неблагоприятных условиях эксплуатации. В результате уравнение (4.20) можно переписать в виде:

$$E(s) = 3\tilde{k}_{FD}\tilde{k}_m\tilde{k}_e\Phi_{\varepsilon m}(s)\sum_{i=1}^n q_i^*(s)\text{sign}(\varepsilon_i). \quad (4.21)$$

Векторное уравнение (4.8), записанное в области изображений, имеет вид:

$$Q^*(s) = \left[ \frac{\partial F_I}{\partial P^*} F_X^*(x^*) \right] v^*(s)/s = \tilde{k}_v v^*(s)/s, \quad (4.22)$$

где  $\tilde{k}_v = (\tilde{k}_{v1}, \tilde{k}_{v2}, \dots, \tilde{k}_{vn})^T$  - вектор текущих значений соответствующих функций, изменения которых принимаются незначительными за время переходных процессов, протекающих в каждом приводе ПМ.

С учетом (4.22) выражение (4.21) переписывается в виде:

$$E(s) = 3\tilde{k}_{FD}\tilde{k}_m\tilde{k}_e\Phi_{\varepsilon m}(s)\frac{v^*(s)}{s}\sum_{i=1}^n \tilde{k}_{vi}\text{sign}(\varepsilon_i). \quad (4.23)$$

Коэффициент  $\tilde{k}_{vi}$  определяет скорость изменения обобщенной координаты  $q_i^*$ . Но, поскольку привод  $i$ -ой степени подвижности ПМ является инерционным объектом, то, как показано в работе [64], его программный сигнал движения опережает текущее выходное значение. Следовательно, знак динамической ошибки по соответствующей координате будет совпадать со знаком желаемой скорости изменения этой координаты. Исключения составляют лишь редкие случаи резкого изменения знака желаемой скорости, когда указанное условие на коротких интервалах времени нарушается. Исходя

из вышесказанного, выражение (4.23) можно переписать в следующем виде:

$$E(s) = 3\tilde{k}_{FD}\tilde{k}_m\tilde{k}_e\Phi_{\varepsilon m}(s)\frac{v^*(s)}{s}\sum_{i=1}^n|\tilde{k}_{vi}|. \quad (4.24)$$

С учетом выражения (4.24) передаточная функция рассматриваемой части системы (см. рис. 4.7) запишется в виде

$$W(s) = E(s)/v^*(s) = 3\tilde{k}_{FD}\tilde{k}_m\tilde{k}_e\left(\sum_{i=1}^n|\tilde{k}_{vi}|\right)\frac{\Phi_{\varepsilon m}(s)}{s}. \quad (4.25)$$

Выражение (4.25) содержит коэффициенты  $\tilde{k}_{FD}, \tilde{k}_m, \tilde{k}_e, \tilde{k}_{vi} (i = \overline{1, n})$ , значения которых заранее неопределенны и могут меняться в известных диапазонах. Поэтому необходимо определить граничные значения этих коэффициентов, которые должны быть такими, чтобы регулятор, синтезированный для этих значений, работал с заданным качеством для всех возможных их вариаций из заданного диапазона.

Определив параметры модели объекта управления, описываемой выражением (4.25), можно любым известным методом синтезировать регулятор  $Rg$ , гарантирующий устойчивость системы после замыкания ее единичной отрицательной обратной связью и обеспечивающий ей заданное качество управления. Далее рассмотрим получение модели для синтеза регулятора  $Rg$ .

#### 4.6. Получение модели объекта управления для синтеза регулятора $Rg$

Рассмотрим манипулятор типа PUMA, изображенный на рис. 3.3. Как и ранее, будем рассматривать только три первые переносные степени подвижности этого ПМ, полагая, что  $l_1 = l_2 = 0.5$  м;  $m_1 = m_2 = 3$  кг,  $m_T = 0.5$  кг -

масса РО манипулятора;  $J_{s1} = 0.007 \text{ кгм}$ ,  $J_{s2} = 0.005 \text{ кгм}$  – моменты инерции соответствующих звеньев ПМ относительно их продольных осей; а  $J_{n1} = 0.14 \text{ кгм}$ ,  $J_{n2} = 0.2 \text{ кгм}$  – моменты инерции этих звеньев относительно их центральных осей, перпендикулярных продольным осям.

Примем, что во всех степенях подвижности ПМ используются одинаковые приводы с электродвигателями постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов, которые описываются передаточными функциями

$$W_n(s) = \frac{q_i(s)}{q_i^*(s)} = \frac{k_n}{(T_1 s + 1)s}, \quad (4.26)$$

имеющими следующие параметры:  $k_n = \frac{1}{i_p k_\omega} = 0.5$ ,  $T_1 = \frac{R_a J}{k_m k_\omega} = 0.05 \text{ с}$ ,

$R_a = 0.2 \text{ Ом}$  – активное сопротивление якорной цепи;  $k_\omega = 0.02 \text{ Вс}$  – коэффициент противоЭДС;  $k_m = 0.02 \text{ Нм/А}$  – моментный коэффициент;  $J = 10^{-4} \text{ кгм}^2$  – момент инерции ротора электродвигателя и вращающихся частей редуктора;  $i_p = 100$  – передаточное отношение редуктора.

Примем, что допустимые диапазоны изменения обобщенных координат этого ПМ имеют следующие значения:

$$-\pi < q_1 < \pi; \quad -\pi/2 < q_2 < \pi/2; \quad -\pi/2 < q_3 < \pi/2. \quad (4.27)$$

Вектор-функции, описывающие решение прямой и обратной задачи кинематики для используемого ПМ, соответственно, имеют вид [37]:

$$F_D(Q) = \begin{bmatrix} c_1(l_2c_\theta + l_1c_2) \\ s_1(l_2c_\theta + l_1c_2) \\ l_1s_2 + l_2s_\theta \end{bmatrix}, \quad (4.28)$$

$$F_I(\tilde{P}) = \begin{bmatrix} q_1 = \arctan(\tilde{y}/\tilde{x}) \\ \arccos \frac{\tilde{z}l_2s_3 + (l_1 + l_2c_3)\tilde{x}/c_1}{2l_2l_1c_3 + l_1^2 + l_2^2} \\ -\arccos \frac{\tilde{z}^2 + (\tilde{x}/c_1)^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \end{bmatrix}, \quad (4.29)$$

где  $s_\theta = \sin\theta$ ,  $c_\theta = \cos\theta$ ,  $s_i = \sin q_i$ ,  $c_i = \cos q_i$ ,  $\theta = q_2 + q_3$ .

С учетом выражений (4.17) и (4.28) можно определить элементы матрицы  $\tilde{F}_{FD}$

$$\tilde{F}_{FD} = \begin{bmatrix} -s_1(l_2c_\theta + l_1c_2) & -c_1(l_2s_\theta + l_1s_2) & -c_1l_2s_\theta \\ c_1(l_2c_\theta + l_1c_2) & -s_1(l_2s_\theta + l_1s_2) & -s_1l_2s_\theta \\ 0 & l_1c_2 + l_2c_\theta & l_2c_\theta \end{bmatrix}. \quad (4.30)$$

С учетом значений параметров ПМ, неравенств (4.27) и выражения (4.30) определим диапазоны изменения элементов матрицы  $\tilde{F}_{FD}$

$$\tilde{F}_{FD} = \begin{bmatrix} -1 \leq k_{FD11} \leq 1 & -1 \leq k_{FD12} \leq 1 & -0.5 \leq k_{FD13} \leq 0.5 \\ -1 \leq k_{FD21} \leq 1 & -1 \leq k_{FD22} \leq 1 & -0.5 \leq k_{FD23} \leq 0.5 \\ 0 & -1 \leq k_{FD32} \leq 1 & -0.5 \leq k_{FD33} \leq 0.5 \end{bmatrix}$$

и выберем значение коэффициента  $\tilde{k}_{FD} = 1$  в выражении (4.25) с учетом условий (4.18).

С учетом выражений (4.22) и (4.29) найдем элементы вектора  $\tilde{k}_v$

$$\tilde{k}_v = \frac{\partial F_I}{\partial P^*} F_X^*(x^*) = - \left[ \begin{array}{c} \frac{-y^* + x^* g'_y(x^*)}{(x^{*2} + y^{*2})\Phi(x^*)} \\ \frac{l_1 + l_2 c_3 + l_2 s_3 c_1 g'_z(x^*)}{\sqrt{1 - \left( \frac{z^* l_2 s_3 + (l_1 + l_2 c_3) x^* / c_1}{2l_1 l_2 c_3 + l_1^2 + l_2^2} \right)^2} (2l_1 l_2 c_3 + l_1^2 + l_2^2) c_1 \Phi(x^*)}} \\ \frac{x^* + z^* c_1^2 g'_z(x^*)}{\sqrt{1 - \left( \frac{z^{*2} + (x^* / c_1)^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right)^2} l_1 l_2 c_1^2 \Phi(x^*)}} \end{array} \right]. \quad (4.31)$$

Для вычисления элементов вектора  $\tilde{k}_v$  необходимо задать траекторию движения характерной точки РО ПМ. Пусть эта точка движется в горизонтальной плоскости ( $z^* = g_z(x^*) = \text{const}$ ) по траектории, описываемой уравнением

$$y^* = -0.3 \sin(14x^*) - 0.1. \quad (4.32)$$

Тогда значение  $x^*(t)$  можно сформировать с использованием выражения

$$\dot{x}^* = \frac{v^*(t)}{\sqrt{(1 + (-4.2 \cos(14x^*))^2)}}, \quad (4.33)$$

полученного с учетом соотношений (4.1). При этом начальная точка траектории движения РО ПМ имеет координаты:  $x_0^* = 0$  м;  $y_0^* = -0.1$  м;  $z_0^* = 0.5$  м.

Используя выражения (4.31) - (4.33) и учитывая геометрические размеры ПМ, найдем максимальные по модулю значения элементов вектора  $\tilde{k}_v$ :

$|\tilde{k}_{v1}| = 3.9, |\tilde{k}_{v2}| = 6, |\tilde{k}_{v3}| = 5.4$ . В результате будем иметь  $\sum_{i=1}^n |\tilde{k}_{vi}| = 15.3$ .

Введем в СУ электроприводами каждой степени подвижности ПМ адаптивные корректирующие устройства, описанные в [2-4] и обеспечивающие требуемую динамическую точность и инвариантность других показателей качества их работы к эффектам взаимовлияния между всеми степенями подвижности перемещаемого многозвенника. В результате передаточные функции скорректированных электроприводов каждой степени подвижности манипулятора будут иметь вид (4.26) с параметрами  $k_n = 70, T_1 = 0.006$  с при любых законах изменения всех обобщенных координат ПМ в процессе его движения.

Передаточные функции по ошибке этих трех приводов будут иметь вид:

$$\Phi_{\varepsilon m}(s) = \frac{1}{1 + W_n(s)} = 0.0143 \frac{(0.006s + 1)s}{(0.01422s + 1)(0.00008s + 1)}. \quad (4.34)$$

В результате с учетом выражения (4.34), значений коэффициентов  $\tilde{k}_{FD}, \sum_{i=1}^n |\tilde{k}_{vi}|$  и коэффициентов  $\tilde{k}_m = 1, \tilde{k}_e = 1.3$  выражение (4.25), описывающее объект управления, для которого и должен быть синтезирован регулятор  $Rg$ , можно записать в окончательном виде:

$$W(s) = 0.853 \frac{0.006s + 1}{(0.01422s + 1)(0.00008s + 1)}. \quad (4.35)$$

Поскольку система с передаточной функцией (4.35) не будет терять устойчивость при различных коэффициентах усиления, то регулятор  $Rg$  (см. рис. 4.7) может иметь простейший вид пропорционального регулятора с

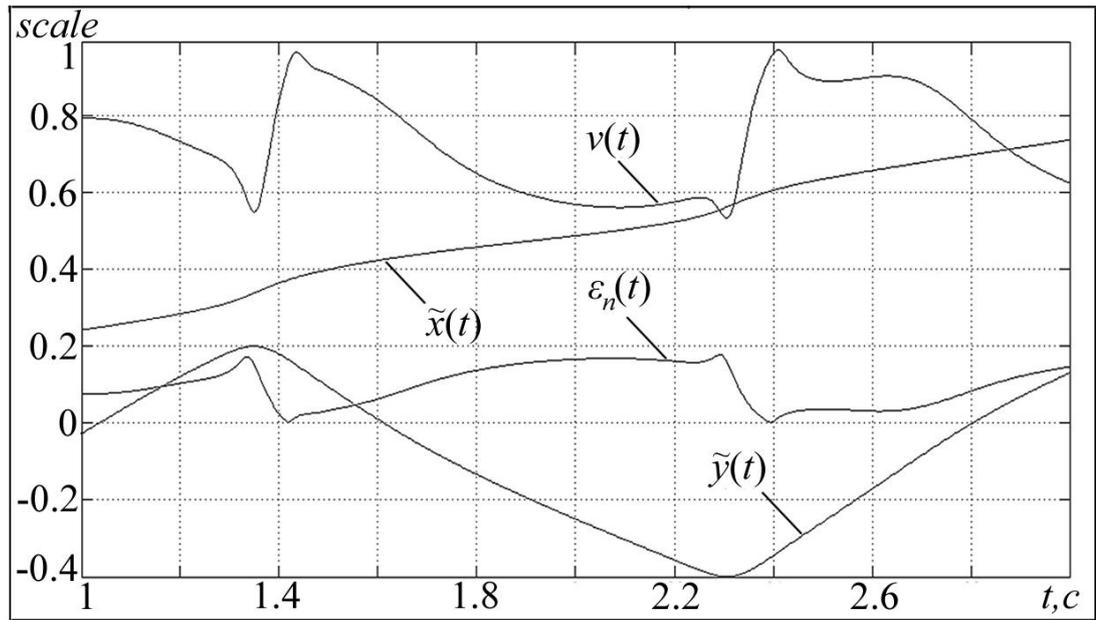
коэффициентом усиления  $k_r = 1000$ . Кроме того, при моделировании полагалось, что  $e_{on} = 4.9 \cdot 10^{-4}$  м (см. рис. 4.7).

В следующем разделе будет приведено исследование эффективности работы синтезированной системы в целом (см. рис. 4.7).

#### **4.7. Исследование системы формирования максимально возможной программной скорости движения рабочего органа манипулятора по заданным пространственным траекториям**

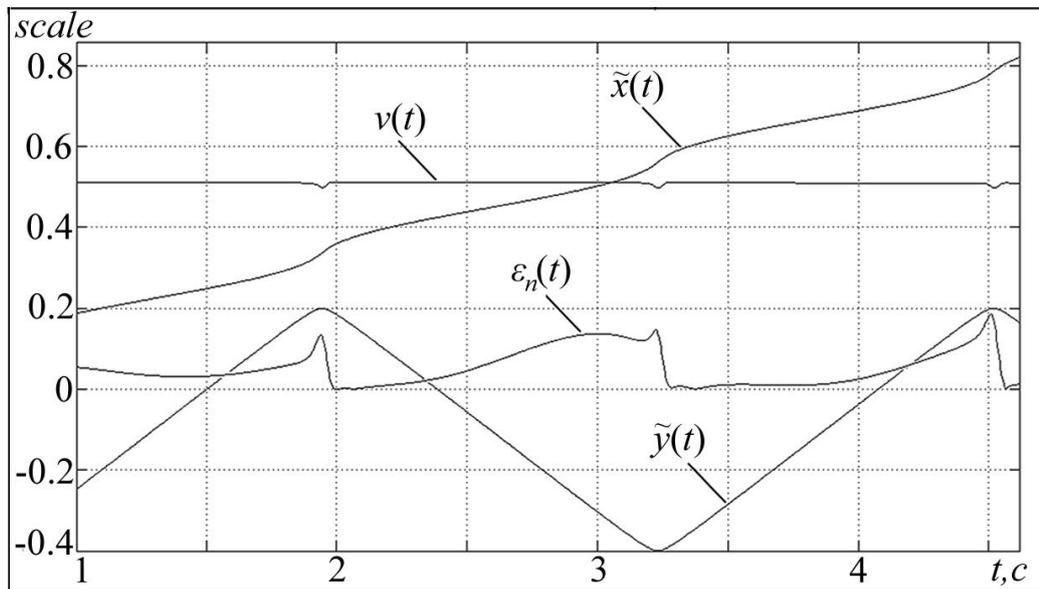
Для исследования работы ПМ (см. рис. 3.3) с указанными выше параметрами выполнено математическое моделирование его движения по траектории, определяемой выражениями (4.32) и (4.33), с использованием синтезированной СУ, изображенной на рис. 4.7. На рис. 4.8 показаны процессы изменения  $\tilde{x}(t)$ ,  $\tilde{y}(t)$ ,  $\varepsilon_n(t)$  и реальной скорости движения характерной точки РО ПМ  $v(t)$  по траектории, описанной выражениями (4.32) и (4.33), при использовании СУ (см. рис.4.7). Из этого рисунка видно, что минимальное значение  $v(t)$  достигается при движении характерной точки РО ПМ по участкам траектории, имеющим наибольшую кривизну (см. кривую  $\tilde{y}(t)$ ). На этих же участках, где меняется направление движения РО ПМ, наблюдается возрастание  $\varepsilon_n(t)$ , но при сохранении условия (4.11).

Для сравнения на рис. 4.9 представлены результаты моделирования движения характерной точки РО этого ПМ по той же траектории, но без использования синтезированной СУ и со скоростью  $v^*(t) = 0.51$  м/с = const, которая на всех участках траектории движения РО также обеспечивает выполнение условия (4.11). Из этого рисунка также видно большое возрастание  $\varepsilon_n$  на криволинейных участках траектории, а также на тех участках, где меняется направление движения РО ПМ.



$v(t) = \text{scale } m/c$ ;  $\tilde{y}(t) = \text{scale } m$ ;  $\tilde{x}(t) = \text{scale } m$ ;  $\varepsilon_n(t) = \text{scale} \cdot 0.0025 m$ .

Рис. 4.8. Процессы изменения  $v(t)$ ,  $\tilde{x}(t)$ ,  $\tilde{y}(t)$  и  $\varepsilon_n(t)$  в синтезированной системе



$v(t) = \text{scale } m/c$ ;  $\tilde{y}(t) = \text{scale } m$ ;  $\tilde{x}(t) = \text{scale } m$ ,  $\varepsilon_n(t) = \text{scale} \cdot 0.0025 m$ .

Рис. 4.9. Процессы изменения  $v(t)$ ,  $\tilde{x}(t)$ ,  $\tilde{y}(t)$  и  $\varepsilon_n(t)$  в системе без использования системы автоматического формирования программных сигналов

Приведенные рисунки показывают, что использование разработанной СУ позволяет манипулятору в 1.5 раза быстрее пройти одинаковые участки траектории, увеличивая в 2 раза скорость движения РО ПМ на участках с малой кривизной. Если участков с малой кривизной траектории будет много, а кривизна редких, но сложных участков – большой, то эффективность синтезированной системы резко возрастает.

Таким образом, результаты проведенного математического моделирования полностью подтвердили высокую эффективность разработанного в диссертации метода синтеза систем автоматического управления режимами движения РО многозвенных ПМ, установленных на ПА [21, 65, 66, 83].

#### **4.8. Выводы**

В четвертой главе рассмотрены методы синтеза систем автоматической коррекции движений РО ПМ, установленных на ПА, а также систем автоматического управления режимами движения этих РО. Для оценки эффективности функционирования синтезированных систем выполнено математическое моделирование их работы.

1. Было показано, что для сохранения заданной точности движения РО ПМ в условиях неизбежных, но незначительных смещений от исходного положения в пространстве стабилизируемого ПА, необходимо использовать разработанный метод синтеза системы автоматической коррекции программных движений РО многозвенного ПМ, установленного на ПА. Эта система на основе информации о текущих значениях линейных и угловых смещениях ПА от заданного положения позволяет так управлять ПМ, чтобы его РО продолжал двигаться по предписанной траектории. Это достигается путем введения дополнительных движений ПМ, компенсирующих смещение ПА из исходного положения. Синтезированную систему предполагается использовать

в сочетании с разработанной во второй главе комбинированной системой автоматической стабилизации ПА в режиме его зависания. При этом конструкция многозвенника в процессе слежения за некоторой точкой на траектории должна быть способна отработать возникающие смещения ПА.

2. Результаты моделирования полностью подтвердили эффективность предложенного подхода к комплексному решению задачи стабилизации ПА в пространстве в сочетании с автоматической коррекцией движения РО ПМ. При этом предложенная многоуровневая система автоматической стабилизации положения и ориентации ПА позволяет добиться его достаточно точного удержания в заданной точке пространства в процессе работы ПМ, а введенная в контур управления этим ПМ синтезированная система коррекции движения РО обеспечивает требуемую точность управления, вполне достаточную для выполнения многих манипуляционных операций. Реализация синтезированной системы не вызывает затруднений.

3. Предложенный метод синтеза СУ режимом движения характерной точки РО ПМ позволяет автоматически формировать такую максимально возможную текущую программную скорость перемещения этого РО вдоль сложных пространственных траекторий, при которой указанная точка не отходит от этих траекторий на расстояние, превышающее допустимое. При этом разработанная система одновременно обеспечивает и максимально возможную скорость перемещения РО ПМ вдоль заданной траектории, и заданную точность этого перемещения, учитывая возможный вход отдельных электроприводов в насыщение и не требуя идентификации изменяющихся параметров ПМ.

4. Математическое моделирование синтезированной системы показало, что с ее помощью ПМ может в 1.5 раза быстрее пройти одинаковые участки траекторий, увеличивая почти в 2 раз скорость движения РО на участках с малой кривизной. При этом на более сложных траекториях движения ПМ эффективность разработанной системы возрастает.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации разработаны и исследованы новые методы синтеза высокоточных систем автоматической стабилизации ПА в режиме их зависания в заданной точке пространства при работающих ПМ, а также методы автоматического управления режимами движения РО этих ПМ для более точного и быстрого выполнения различных манипуляционных операций.

При этом были получены следующие новые результаты:

1. Разработан рекуррентный алгоритм решения ОЗД для ПМ, перемещающихся с высокой скоростью в водной среде. Благодаря учету основных особенностей взаимодействия звеньев ПМ с водной средой предложенный алгоритм позволил точно рассчитать силовые и моментные воздействия, оказываемые работающими ПМ на ПА.

2. Предложена методика и создана установка для экспериментального определения коэффициентов вязкого трения, возникающих при перемещениях звеньев ПМ в водной среде, а также зависимостей этих коэффициентов от текущих значений углов наклона указанных звеньев к набегающему потоку жидкости. Определение значений этих коэффициентов позволяет значительно повысить точность вычисления негативных динамических воздействий на ПА со стороны движущегося ПМ.

3. Разработан и исследован метод синтеза высокоточной комбинированной автоматической системы стабилизации ПА в режиме его зависания вблизи объекта работ, позволяющей добиться точного удержания ПА в заданной точке пространства при движущимся ПМ.

4. Разработан метод синтеза системы автоматической коррекции программных движений РО ПМ, установленного на ПА. С помощью этого метода удалось обеспечить высокоточное выполнение манипуляционных операций в условиях неизбежных, но незначительных смещений ПА от исходного положения в пространстве в режиме его зависания.

4. Предложен метод синтеза системы автоматического управления режимом движения характерной точки РО ПМ, с помощью которого была решена задача увеличения скорости выполнения подводных технологических операций посредством формирования такой максимально возможной переменной скорости движения РО ПМ по предписанным пространственным траекториям, при которой сохранялась заданная точность этого движения.

6. Результаты математического моделирования и экспериментальных исследований подтвердили эффективность и высокое качество работы синтезированных СУ по сравнению с существующими системами.

В целом разработанные в диссертации подходы и методы позволяют качественно выполнять подводные манипуляционные операции, а также способствуют расширению круга работ, выполняемых ПА с установленными на них многозвенными ПМ.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. – М.: ЭКОЛИТ, 2011. – 720 с.
2. Авторское свидетельство СССР № 2063866. Устройство для управления приводом робота / В.Ф.Филаретов. БИ № 20,1996.
3. Авторское свидетельство СССР № 2066626. Устройство для управления приводом робота / В.Ф.Филаретов. БИ № 26,1996.
4. Авторское свидетельство СССР № 2115539. Устройство для управления приводом робота / В.Ф.Филаретов. БИ № 20,1998.
5. Бобков В.А., Борисов Ю.С. Навигация подводного аппарата на малых дистанциях по оптической информации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. №2. С. 75-78.
6. Брянский Л.Н., Дойников А.С. Краткий справочник метролога: Справочник. – М.: Изд. стандартов, 1991. – 79 с.
7. Воробьев Е.Н., Письменная Е.В. Синтез алгоритма управления движением манипулятора по заданной траектории на основе динамической модели исполнительного механизма // Машиностроение. -1983. –N.2. –С.50-54.
8. Вукобратович М., Стокич Д. Управление манипуляционными роботами. –М.: Наука, 1985. -384с.
9. Гетьман А.В., Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Итоги аэродинамических исследований сопротивления звена манипулятора подводного аппарата. Материалы 10-й международной научно-практической конференции «Проблемы транспорта Дальнего востока». Владивосток, 2013. С. 17-21.
10. Гетьман А.В., Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Силы и моменты, действующие на манипулятор подводного аппарата в морской среде. Материалы 10-й международной научно-практической конференции «Проблемы транспорта Дальнего востока». Владивосток, 2013. С. 9-11.

11. Гетьман А.В., Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Экспериментальный метод измерения сопротивления звена манипулятора подводного аппарата // Материалы 56-й Всероссийской научной конференции. Фундаментальные и прикладные вопросы естествознания. - Владивосток: Филиал ВУНЦ ВМФ "ВМА им. Н.Г.Кузнецова", Том III. 2013. С. 52-59.

12. Динамика управления роботами / В.В. Козлов, В.П. Макарычев, А.В. Тимофеев и др. Под ред. Е.И. Юревича. –М.: Наука, 1984. -334с.

13. Дорин В.С. Системы технических средств освоения океана, проблемы их создания // Тез. докл. V Всесоюзной конф. Технические средства изучения и освоения океана. –Л.: Кораблестроительный институт, 1985. –Вып. 1. –С.4.

14. Евлахов О.В., Косырев Е.В. Управление манипуляционными устройствами подводных обитаемых и телеуправляемых аппаратов // Тез. докл. V Всесоюзной конф. Технические средства изучения и освоения океана. –Л.: Кораблестроительный институт, 1985. –Вып.2 –С.84.

15. Захаров М.М., Ремезов И.О. телеуправляемый подводный манипулятор // Тез. докл. первой Всесоюзной конф. по исследованию и освоению ресурсов мирового океана. Владивосток, 1976. –С.78-81.

16. Илларионов Г.Ю. Необитаемые подводные аппараты и их системы. Владивосток: Дальневосточный университет, 1990. -56с.

17. Илларионов Г.Ю., Сидоренков В.В., Потапов А.С. Противоминные необитаемые подводные аппараты. Владивосток: Дальневосточный университет, 1991. -115с.

18. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И. Навигационно-управляющий комплекс многоцелевого автономного подводного робота и особенности его применения в высоких широтах Арктики / Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана. Новосибирск. 2010. С. 13-18.

19. Кихней Г.П., Филаретов В.Ф., Юрчик Ф.Д. Разработка и испытание подводного обзорного комплекса. //Тез. докл. Всесоюзной школы.

Технические средства и методы освоения океанов и морей. –М.: Институт океанологии АН СССР, 1989. –Т.1 –С.95.

20. Ковальчук А.К. Полуавтоматическое управление подвижным манипуляционным роботом вблизи объекта работ // Тез. докл. V Всесоюзной конф. Технические средства изучения и освоения океана. –Л.: Кораблестроительный институт, 1985. –Вып.2. –С.85.

21. Коноплин А.Ю. Метод синтеза системы автоматического управления режимом движения схвата манипулятора по сложным пространственным траекториям // Сб. работ победителей отборочного тура Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов, аспирантов и молодых ученых по нескольким междисциплинарным направлениям / Мин-во образования и науки РФ, Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. (НПИ). - Новочеркасск: Лик, 2011. С. 186-188.

22. Коноплин А.Ю. Система автоматической коррекции программной траектории движения многозвенного манипулятора, установленного на подводном аппарате // Сб. трудов 4-ой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». Москва, 2011. С. 257-259.

23. Коренев Г.В. Целенаправленная механика управляемых манипуляторов. –М.: Наука, 1979. -447с.

24. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., 1973 г., 832 с.

25. Корпачев В.П. Теоретические основы водного транспорта леса: Учебное пособие для вузов. - М.: Издательство "Академия Естествознания", 2009. - 237 с.

26. Крутько П.Д., Лакота Н.А. Конструирование алгоритмов управления движением манипуляционных роботов на основе решения обратной задачи динамики // Изв. АН. СССР. Техническая кибернетика. -1981. –N.1. –С.52-58.

27. Крутько П.Д., Лакота Н.А. Синтез алгоритмов управления движением

роботов по методу обратных задач динамики. Координатная форма задания траекторий // Изв. АН. СССР. Техническая кибернетика. -1982. –N.1. –С.154-159.

28. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. –М.: Наука, 1987. -307с, 1988. -328с.

29. Крутько П.Д., Лакота Н.А. Метод обратных задач динамики в теории конструирования алгоритмов управления манипуляционных роботов. Задача стабилизации // Изв. АН. СССР. Техническая кибернетика. -1987. –N.3. –С.82-91.

30. Крутько П.Д., Лакота Н.А. Метод обратных задач динамики в теории конструирования алгоритмов управления манипуляционных роботов. Осуществление назначенных траекторий // Изв. АН. СССР. Техническая кибернетика. -1987. –N.4. –С.190-199.

31. Крутько П.Д. Алгоритмы адаптивного управления исполнительными системами манипуляторов // Изв. АН. СССР. Техническая кибернетика. -1988. –N.4. –С.3-13.

32. Куафе Ф. Взаимодействие робота с внешней средой. М.: Мир, 1985. - 285 с.

33. Кулаков Ф.М. Супервизорное управление манипуляционными роботами. –М.: Наука, 1980. -448с.

34. Лебедев А.В. Формирование желаемой траектории пространственного движения динамического объекта // Сб. тр. ДВО РИА. Вып. 9. Владивосток: Изд-во ДВГТУ. 2004. С. 68 –71.

35. Мартынов А.К. Экспериментальная аэродинамика. – М.: 1958. – 348 с

36. Медведев В.С., Лесков А.Г., Ющенко А.С. Системы управления манипуляционных роботов. –М.: Наука, 1978. -416с.

37. Механика промышленных роботов. Кн. 2: Расчет и проектирование механизмов / Под. ред. К.В. Фролова, Е.И. Воробьева. М.: Высшая Школа. 1988. – 367 с.

38. Патент РФ на изобретение № 2462745. Система коррекции траектории движения манипулятора // В.Ф.Филаретов, А.Ю. Коноплин. Бюл. № 27. 2012.

39. Патент РФ на изобретение РФ № 2475799. Способ управления подводным манипулятором в режиме зависания подводного аппарата // В.Ф.Филаретов, А.Ю. Коноплин патент. Бюл. № 5. 2013.

40. Патент РФ на изобретение № 2487008. Электропривод манипулятора // В.Ф.Филаретов, А.Ю. Коноплин патент. Бюл. № 19. 2013.

41. Пельпор Д.С., Михалев И.А., Бауман В.А. Гироскопические приборы и системы: Учеб. для вузов по спец. «Гироскоп. приборы и устройства»-2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1988. 424 с.

42. Письменный Г.В. Полуавтоматическая система управления подводными манипуляторами // Тез. докл. Всесоюзного совещания по робототехническим системам. –М.: Наука, 1978. –С.131.

43. Попов А.В. О способах оценки сил и моментов при взаимодействии манипулятора с окружающей средой // Научно-Технические Ведомости СПбГТУ, 2006. – № 5. – Т.1. – С. 169–172.

44. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука. 1978. - 256 с.

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

46. Рождественский В.В. Перспективы развития и использования подводных технических средств для изучения и освоения мирового океана // Тез. докл. на V Всесоюзной конф. Технические средства изучения и освоения океана. –Л.: АН СССР, 1985. –С.5-6.

47. Филаретов В.Ф. Самонастраивающиеся системы управления приводами манипуляторов. Владивосток: Изд-во ДВГТУ. 2000. - 304 с.

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

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

50. Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А. Устройства и системы управления подводных роботов. - М.: Наука, 2005. 270 с.

51. Филаретов В. Ф., Кацурин А. А., Пугачев Ю. А. Метод полуавтоматического комбинированного управления манипулятором с помощью подвижной телекамеры // Мехатроника, автоматизация, управление, 2009. № 2. С.38-45.

52. Филаретов В. Ф., Кацурин А. А. Метод полуавтоматического позиционного управления манипулятором с помощью телекамеры, изменяющей пространственную ориентацию своей оптической оси // Мехатроника, автоматизация, управление, 2008. № 9. С.15-22.

53. Филаретов В.Ф., Кихней Г.П., Юрчик Ф.Д. Об одном способе телеуправления манипулятором // Изв. ВУЗов. Электромеханика, N.3., 1992. – С.94-98.

54. Филаретов В.Ф., Кихней Г.П., Юрчик Ф.Д. Способ полуавтоматического управления манипулятором // Изв. ВУЗов. Электромеханика, N.1-2., 1995. –С.79-83.

55. Филаретов В.Ф., Кихней Г.П., Юрчик Ф.Д. Разработка способа полуавтоматического телеуправления манипуляционными роботами // Межд. научно-тех. конф. –Санкт-Петербург. -1996. –С.139-145.

56. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Метод синтеза системы многоуровневой автоматической стабилизации подводного аппарата в водной среде в процессе выполнения манипуляционных операций // Материалы 7-й Российской мультikonференции по проблемам управления (РМКПУ-2014). Санкт-Петербург, 2014. С. 198-208.

57. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической коррекции

программной траектории движения многозвенного манипулятора, установленного на подводном аппарате // Мехатроника, автоматизация, управление, 2013. № 1. С.40-45.

58. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической коррекции программной траектории движения многозвенного манипулятора, установленного на подводном аппарате // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». Санкт-Петербург, 2012. С. 295-302.

59. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем манипуляторе. Труды XII Всерос. совещ. по проблемам управления. Москва, 2014. С. 3570-3382.

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

61. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 2 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. №7. С. 29-34.

62. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Гетьман А.В. Экспериментальное определение коэффициента вязкого трения для расчета силового воздействия на перемещающееся звено подводного манипулятора // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». Санкт-Петербург, 2014. С. 219-223.

63. Филаретов В.Ф., Русских А.А. Особенности формирования сил и моментов, действующих на звено манипулятора, совершающего произвольные движения в водной среде / Вестник ДВГТУ. 2009. №2. С. 91-97. (<http://science.fentu.ru/vestnik/2009/3/osob/>).

64. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Синтез систем автоматического формирования программных сигналов управления движением подводного аппарата по сложным пространственным траекториям // Известия РАН. Теория и системы управления. 2010. № 1. С. 99–107.

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

66. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Коноплин А.Ю. Синтез системы автоматического формирования программных сигналов движения многозвенного манипулятора // Материалы 7-й научно-технической конференции "Мехатроника, автоматизация, управление". Санкт-Петербург, 2010. С. 404-407.

67. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Мурсалимов Э.Ш., Метод идентификации параметров математической модели подводного аппарата// Мехатроника, автоматизация и управление. 2012. № 10. 64-70 с.

68.Фридлендер Г.О., Козлов М.С. Авиационные гироскопические приборы. М. Оборонгиз 1961г., 390с.

69. Шахинпур М. Курс робототехники. –М.: Мир, 1990. -527с.

70. Юрьев Б.Н. Экспериментальная аэродинамика. Часть 1. Теоретические основы экспериментальной аэродинамики. М.—Л., 1939. -302 с.

71. Ястребов В.С. Телеуправляемые подводные аппараты (с манипуляторами). –Л.: Судостроение, -1973. -199 с.

72. Ястребов В.С., Игнатъев М.Б., Кулаков Ф.М. и др. Подводные роботы. –Л.: Судостроение, 1977. -368 с.

73. Ястребов В.С., Филатов А.М. Системы управления движением робота. –М.: Машиностроение, 1979. -176 с.

74. Batlle J., Fuertes J.M., Marti J., Pacheco L., Melendez J. Telemanipulated Arm for Underwater Applications // Proc. of the seventh Int. Conf. on Advanced

Robotics. –Catalonia, Spain. -1995. –V.1. –P.267-272.

75. Bessa W. M., Dutra M. S., and Kreuzer E. Depth control of remotely operated underwater vehicles using an adaptive fuzzy sliding mode controller, *Robot. Auton. Syst.*, vol. 56, 2008, pp. 670-677.

76. Chyba M., Cazzaro D., Invernizzi L., Andonian M. Trajectory Design for Autonomous Underwater Vehicles for Basin Exploration. 9<sup>th</sup> International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries. 2010. pp. 139-151.

77. Curado F., Novel T. Approaches to Geophysical Navigation of Autonomous Underwater Vehicles . 4th International Conference Computer Aided Systems Theory - EUROCAST 2013., 2013. Part II. pp 349-356.

78. Eustice R., Pizarro O. Hanumant Singh Visually augmented navigation for autonomous underwater vehicles // *IEEE Journal oceanic engineering*. 2009. 1-18 p.

79. Fossen, T.I. Guidance and control of ocean vehicles, John Wiley & Sons Ltd., 1994, 494 p.

80. Ferri G., Jakuba M.V., Yoerger D.R. A novel method for hydrothermal vents prospecting using an autonomous underwater robot, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2008. pp.1055-1060.

81. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu. System of Automatically Correction of Program Trajectory of Motion of Multilink Manipulator Installed on Underwater Vehicle // 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. Vienna. 26-26 November 2014, CD-ROM.

82. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu., Konoplin N.Yu. Method of Synthesis of Automatic Correction Systems of Underwater Vehicles Linear Displacements // 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. Vienna. 26-26 November 2014, CD-ROM.

83. Filaretov V.F., Yukhimets D.A., Konoplin A.Yu. Synthesis of System for Automatic Formation of Multilink Manipulator Velocity// The Second RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM 2014). Tehran

IRAN. 15-17 October 2014, CD-ROM.

84. Fu K.S., Gonzalez R.C., Lee C.S. Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence. –McGraw-Hill, Inc., -1987. -580p.

85. German C. R., Yoerger D. R., Jakuba M., Shank T. M., Langmuir C. H., Nakamura K.I. Hydrothermal exploration with the autonomous benthic explorer. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers 55/2. 2008. pp.203-219.

86. Giacomo Marani, Song K. Choi, Junku Yuh. Underwater autonomous manipulation for intervention missions AUVs. Ocean Engineering. Volume 36, Issue 1, January 2009, P. 15–23.

87. Hildebrandt M., Christensen L., Kerdels J., Albiez J. Realtime motion compensation for ROV-based tele-operated underwater manipulators. OCEANS 2009 - EUROPE. Bremen. May 2009. pp. 1-6.

88. Hinüber E. New approaches in high-performance navigation solutions for AUVs and ROVs / iMAR. www.imar-navigation.de. 2010.

89. Horgan J., Toal D. Computer vision applications in the navigation of unmanned underwater vehicles // Underwater Vehicles. In-Tech. 2009. 582 p.

90. Isaacs M.W., Hoagg J.B., Morozov A.V., Bernstein D.S. A numerical study on controlling a nonlinear multilink arm using a retrospective cost model reference adaptive controller. Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), 2011 50th IEEE Conference. pp. 8008 – 8013.

91. Jun B.-H., Lee P.-M., Lee J. Manipulability analysis of underwater robotic arms on ROV and application to task-oriented joint configuration // Ocean '04 - MTS/IEEE Techno-Ocean '04: Bridges across the Oceans - Conference Proceedings. V. 3, 2004, P.1548-1553.

92. Koval, E.V. Automatic stabilization system of underwater manipulation robot. OCEANS '94. 'Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation.' Proceedings (Volume:1 ).1994. pp. 807-812.

93. Lapierre L., Fraisse P., Dauchez P. Position/Force Control of an Underwater Mobile Manipulator. Journal of Robotic Systems V. 20, Issue 12,

December 2003. pp. 707–722.

94. Leabourne K.N., Rock S.M. Model Development Of An Underwater Manipulator For Coordinated Arm-Vehicle Control. OCEANS '98 Conference Proceedings. V.2. Oct 1998. pp. 941 – 946.

95. Levesque B., Richard M.J. Dynamic analysis of a manipulator in a fluid environment. *International Journal of Robotics Research*, 13(3). 1994. pp. 221-231.

96. Lee Ching-Hung, Hsueh Hao-Yuan. Velocity observer-based fuzzy adaptive control of multi-link robotic manipulators. *Fuzzy Theory and its Applications (iFUZZY)*, International IEEE Conference. 2012. pp. 208 – 214.

97. McLain T. W., Rock S. M., Lee M. J. Experiments in the coordinated control of an underwater arm/vehicle system. *Autonomous Robots*, vol. 3, 1996. no. 2-3, pp. 213–232.

98. Mahesh H., Yuh J., Kakshmi R. A Coordinated Control of AN Underwater Vehicle and Robotic Manipulator // *Journal of Robotic Systems*. -1991. –V.8.-No.3. – P.339-370.

99. McMillan S., Orin D.E., McGhee R.B. Efficient dynamic simulation of an unmanned underwater vehicle with a manipulator. *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, 1994. pp. 1133-1140.

100. Miller P.A., Farrell J.A., Zhao Y., Djapic V. Autonomous underwater vehicle navigation. *IEEE J. Ocean. Eng.* 2010, 35, pp. 663-678.

101. Paul R/ *Robot Manipulators: mathematics, programming and Control*. – Cambridge, USA. -1981. -300p.

102. Ryu J.-H., Kwon D.-S., Lee P.-M. Control of Underwater Manipulators Mounted on an ROV Using Base Force Information. *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*. Seoul, Korea, V.4. 2001. pp. 3238 – 3243.

103. Santhakumar M. Investigation into the Dynamics and Control of an Underwater Vehicle-Manipulator System. *Modelling and Simulation in Engineering*. Volume 2013, Article ID 839046, 13 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2013/839046>

104. Sarkar, N. Podder, T.K. Coordinated motion planning and control of autonomous underwater vehicle-manipulator systems subject to drag optimization. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, V.26 , Issue 2 . 2002. pp. 228 – 239.
105. Siciliano B., Khatib O. *Handbook of robotics*. Springer Verlag, Berlin, 2008.1628p.
106. Simon D., Kapellos K., Espiau B. Formal Verification of Mission and Tasks Application to Underwater Robotics // *Proc. of the seventh Int. Conf. on Advanced Robotics*. -1995.-V. 1. –P. 165-170.
107. Smith R.N., Chyba M., Wilkens G.R., Catone C. A Geometrical Approach to the Motion Planning Problem for a Submerged Rigid Body. *Int. J. of Control*. 2009. 82/9, pp.1641 -1656
108. Soylu S., Buckham B.J., Podhorodeski R.P. Dynamics and control of tethered underwater-manipulator systems, *OCEANS 2010*, pp. 1 – 8.
109. Tarn T. J., Shoults G. A., Yang S. P. A dynamic model of an underwater vehicle with a robotic manipulator using Kane's method. *Autonomous Robots*, V.3, no. 2-3, 1996. pp. 269–283.
110. Xianbo Xiang, Lionel Lapierre, Bruno Jouvencel, Guohua Xu and Xinhan Huang Cooperative acoustic navigation scheme for heterogenous autonomous underwater vehicles / *Underwater Vehicles*. In-Tech, 2009, 582p., 531-544p.
111. Zhang M., and Chu Z. Adaptive sliding mode control based on local recurrent neural networks for underwater robot. *Ocean. Eng.*, vol. 45, 2012, pp. 56-62.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

## Акты внедрения результатов диссертационной работы

«Утверждаю»  
Зам. директора  
Института биологии моря ДВО РАН  
по научной работе



к.б.н. В.В. Ивин

\_\_\_\_\_ 2014 г.

## АКТ

использования результатов  
диссертационной работы А.Ю. Коноплина «Система автоматической  
стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем  
многозвенном манипуляторе»

Настоящий акт составлен о том, что в ИБМ ДВО РАН используются результаты, полученные в диссертационной работе А.Ю. Коноплина при выполнении телеуправляемыми подводными аппаратами некоторых подводных манипуляционных операций.

С помощью предложенного алгоритма решения обратной задачи динамики для многозвенных подводных манипуляторов оцениваются негативные динамические воздействия на подводный аппарат со стороны манипулятора, и задаются параметры движения этого манипулятора, приводящие к минимальным смещениям зависшего в толще воды аппарата относительно исходного положения.

В ходе последующей модернизации подводных аппаратов будет использована разработанная комбинированная система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем манипуляторе, а также система автоматической коррекции траектории движения рабочего органа подводного манипулятора. Предварительные исследования показали, что за счет использования предложенных систем управления удастся значительно увеличить качество выполнения подводных манипуляционных операций.

Гл. специалист лаб. производственной биологии \_\_\_\_\_ В.А. Денисов

Вед. инженер лаб. производственной биологии \_\_\_\_\_ А.Л. Кузнецов

Вед. инженер лаб. производственной биологии \_\_\_\_\_ А.М. Колтунов

**УТВЕРЖДАЮ**  
 Проректор по науке и  
 инновациям ДВФУ  
 А.В. Цук  
 «15» января 2017 г.



### АКТ

внедрения результатов диссертационной работы «Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе» ассистента кафедры Автоматизации и управления Инженерной школы ДВФУ Коноплина Александра Юрьевича в научную работу и учебный процесс кафедры Автоматизации и управления Дальневосточного федерального университета (направление подготовки бакалавров 221000.62 – Мехатроника и робототехника).

Комиссия в составе председателя, профессора кафедры Автоматизации и управления, д.т.н., профессора А.Н. Жирабка и членов: доцента кафедры Автоматизации и управления, к.т.н. Д.А. Юхимца, доцента кафедры Автоматизации и управления, к.т.н. А.А. Кацурина, доцента кафедры Автоматизации и управления, к.т.н. А.В. Зуева составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы ассистента кафедры Автоматизации и управления А.Ю. Коноплина на тему «Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе» внедрены в научную работу и учебный процесс кафедры Автоматизации и управления Дальневосточного федерального университета, а именно:

1. высокоточная комбинированная автоматическая система стабилизации подводного аппарата в заданной точке пространства при работающем в вязкой среде манипуляторе;
2. рекуррентный алгоритм решения обратной задачи динамики для подводного манипулятора, перемещающегося с высокой скоростью в водной среде;
3. система автоматической коррекции программных траекторий движения рабочего органа манипулятора, установленного на подводном аппарате.
4. подход к экспериментальному определению коэффициентов вязкого трения, возникающих при поступательных перемещениях звеньев манипулятора в водной среде.

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

Члены комиссии: \_\_\_\_\_ к.т.н. Д.А. Юхимец

\_\_\_\_\_ к.т.н. А.А. Кацурин

\_\_\_\_\_ к.т.н. А.В. Зув