

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СИСТЕМ

АЛЕКСАНДРОВСКАЯ ЛЮДМИЛА ИГОРЕВНА

Магистерская диссертация

Компьютерное моделирование процессов управления движением подводных роботов-манипуляторов

Направление 02.04.02

Фундаментальная информатика и информационные технологии
Магистерская программа Автоматизация научных исследований

Научный руководитель,
доктор физ.-мат. наук,
профессор
Веремей Е. И.

Санкт-Петербург

2018

Содержание

Введение.....	3
Постановка задачи.....	5
Обзор литературы.....	8
Глава 1. Математическая модель НПА с манипулятором	10
1.1. Кинематика подводного робота-манипулятора	10
1.2. Динамика подводного робота-манипулятора	13
Глава 2. Синтез стабилизирующего закона управления для НПА с манипулятором	18
2.1. Линеаризация уравнений движения	18
2.2. Синтез стабилизирующего закона управления	20
Глава 3. Разработка имитационно-моделирующего комплекса в среде MATLAB-Simulink	24
3.1. Компьютерное моделирование движения подводного робота- манипулятора.....	24
3.2. Линеаризация компьютерной модели	26
3.3. Компьютерное моделирование системы управления подводным роботом-манипулятором	27
Глава 4. Результаты имитационного моделирования.....	30
4.1. Анализ качества функционирования системы управления подводным роботом-манипулятором	30
Выводы	33
Заключение	34
Список литературы	35
Приложение А	38
Параметры НПА и манипулятора	38

Введение

В 60-е годы XX века впервые появились промышленные роботы, которые успешно заменяли человека при выполнении ряда производственных функций. Однако их применение в те времена было крайне ограниченным, что в существенной мере определялось недостаточными возможностями вычислительной техники. В частности, даже не шла речь об активном использовании роботов под водой. В настоящее время, благодаря бурному развитию технических средств и компьютерных технологий, подводная робототехника имеет огромный спрос и множество сфер применения, что, как следствие, вызывает большой интерес у инженеров и исследователей в области теории управления.

Современные подводные роботы в большинстве случаев устанавливаются на автономные или необитаемые телеуправляемые подводные аппараты (НПА). С их помощью решаются задачи мониторинга и обследования морского дна для разработки природных ресурсов, взятия биологических проб жидкостей и обслуживания подводных сооружений, включая трубопроводы. Также подводные роботы широко используются при проведении поисково-спасательных работ, при изучении подводной флоры и фауны, для инспекции судов и в других случаях[20, 1, 6].

В любом варианте реализации использование подводных манипуляторных комплексов избавляет человека от опасного труда, и, в то же время, сокращает эксплуатационные расходы, делая возможным проведение широкого спектра операций, недоступных человеку.

К первым разработкам НПА относятся исследования, проведенные в 1957 г. тремя учеными из лаборатории прикладной физики Вашингтонского университета, которые создали аппарат под названием Special Purpose Underwater Vehicle (SPURV). В 1970-х гг. работы проводились в Массачусетском технологическом институте, а чуть позже аналогичные работы начали выполнять в Дальневосточном отделении АН СССР.

В настоящее время проектирование, изготовление и исследование НПА осуществляется во всех ведущих мировых державах. К числу наиболее популярных разработок относятся аппараты канадской компании ISE, американской компании NOSC, французского института IFREMER и исландской фирмы GAVIA.

При построении надежного робототехнического комплекса инженерами решаются различные вопросы, связанные с конструктивным проектированием, при этом одним из важнейших этапов, включающим в себя вопросы моделирования, является построение оптимального закона управления объектом.

Следует отметить, что задача управления подводными роботами существенно сложнее, чем для наземных робототехнических комплексов по ряду причин, и требует всестороннего рассмотрения многих практических и теоретических вопросов.

Во-первых, подводный робот имеет существенно ограниченные по своим возможностям каналы связи. В частности, для него невозможно использовать GPS из-за проблем с передачей электромагнитных волн определенных частот под водой. Существенные трудности возникают с надежностью систем компьютерного зрения.

Во-вторых, датчики имеют низкую пропускную способность из-за плохо структурированной окружающей среды.

В-третьих, манипулятор закреплен на мобильном основании, а система приводов имеет нелинейную динамику и испытывает сильное влияние гидродинамических эффектов, что существенно затрудняет оценку динамических параметров и проведение математического моделирования.

Постановка задачи

Подводный манипулятор представляет собой последовательность звеньев, соединенных между собой, с захватывающим устройством, выполняющим определенные полезные операции, которое закреплено на конце одного из звеньев (рис. 1).

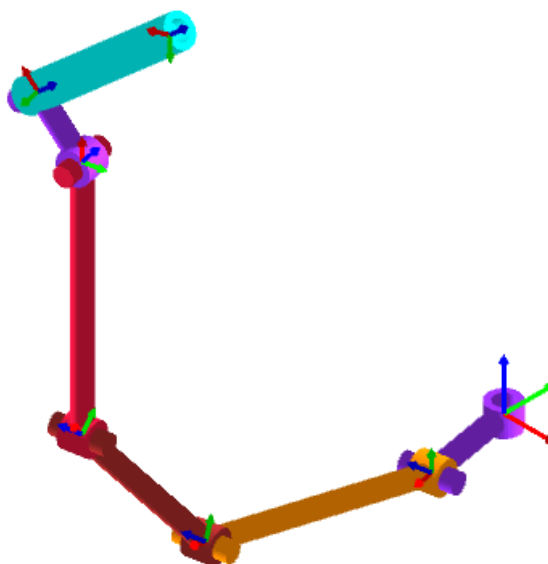


Рис. 1. Шестизвенный подводный робот-манипулятор.

Подвижные соединения между звеньями могут обеспечивать их вращение вокруг одной или нескольких осей или же осуществлять возвратно-поступательное движение (рис. 2). Движение в соединениях обеспечивают соответствующие приводы, которые могут быть электрическими, гидравлическими или пневматическими.



Рис. 2. Типы соединений: а) вращательное соединение; б) поступательное соединение

Важной характеристикой манипуляционного робота является величина рабочей зоны, то есть такого пространства, каждая точка которого может быть достижима. Зависит эта величина от длины звеньев, количества и типов шарниров. Подбираются данные параметры в соответствии с конкретной поставленной задачей.

Входными сигналами для аппарата и манипулятора являются ток и напряжение, гидравлические или пневматические давления. Однако, подводный робот вместе с системой управления может быть инкапсулирован и рассмотрен как единая сущность для взаимодействия с окружающей средой. Тогда на вход такой системы поступают модели желаемых траекторий и прилагаемые силы. Таким образом, система управления поднимает устройство на следующий уровень абстракции.

В данной работе в качестве НПА принят подводный аппарат NPS AUV II (рис. 3), произведенный в Naval Postgraduate School [12, 9], а в качестве робота-манипулятора – шестизвенный манипулятор SMART-3S (рис. 1), разработанный компанией COMAU [8].

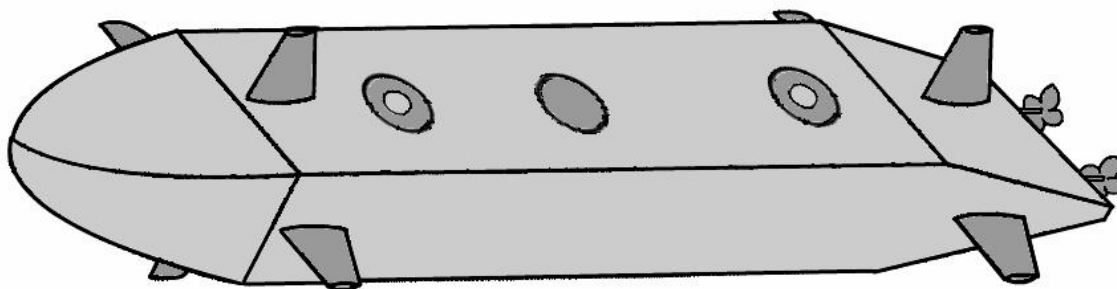


Рис. 3. Схематичное изображение аппарата NPS AUV II

В работе рассматриваются следующие вопросы:

- построение математической модели динамики автономного подводного аппарата с установленным на него шестизвенным манипулятором;
- линеаризация уравнений динамики объекта;
- синтез управления, стабилизирующего положение подводного робота в заданной точке;

– разработка компьютерной модели объекта управления и имитационно-моделирующего комплекса с использованием инструментальных средств среды MATLAB-Simulink;

– исследование поведения системы с обратной связью.

Обзор литературы

Востребованность автономных необитаемых подводных аппаратов растет день за днем, вместе с этим увеличивается и число научных публикаций, посвященных данной теме. Исторический обзор разработанных технологий, а также перспектив развития НПА выполнен в докладе [17].

Для построения закона управления динамическим объектом прежде всего необходимо построить его математическую модель. Моделирование подводных аппаратов подробно рассматривается в работах Th. Fossen-a [9, 10], а моделированию НПА с установленными на них манипуляторами особое внимание уделяется в монографии G. Antonelli [8] и в статьях [15, 18].

Для описания вращательных и поступательных движений между соседними звеньями используются подходы, отличающиеся выбором локальных систем координат. Среди популярных можно выделить матричный метод, предложенный Денавитом и Хартенбергом [7], в котором центры локальных систем координат располагают в шарнирах, а оси направляют по правилам, зависящим от кинематики манипулятора. Другой, менее распространенный подход предполагает расположение начала систем координат в центрах масс звеньев, при этом оси направляют вдоль главных осей инерции [2].

Также уравнения кинематики описывают с помощью углов Эйлера или кватернионов, которые хоть и не являются минимальным представлением, однако позволяют избежать сингулярностей, которые могут возникать при переходе от одной системы координат к другой [19].

При выводе уравнений динамики обычно манипулятор рассматривают как последовательность влияющих друг на друга твердых тел, пользуются различными теоретическими законами и формулировками общих уравнений. Как правило, используют уравнения в форме Лагранжа, Ньютона-Эйлера, Аппеля или Д'Аламбера, так как они позволяют решать и прямую, и обратную задачу динамики. Среди неклассических методов получения модели

можно отметить подходы с использованием нейронных сетей и нечеткой логики [2].

Что касается разработки законов управления для подводных робототехнических комплексов, то здесь число используемых подходов и опубликованных работ значительно выше, чем при моделировании. Кинематическая избыточность манипуляторов, т.е. наличие большего числа степеней свободы, чем необходимо для решения задачи, позволяет проектировать более гибкие законы управления. В частности, это может быть полезно в случае, когда на движение робота накладываются ограничения окружающей среды [16].

Методы построения законов управления в основном ориентированы на обеспечение адаптивности и робастности замкнутых систем [8]. В последнее время набирают популярность схемы управления с использованием нейронных сетей [14] и теории нечетких множеств [13, 11].

Серьезной трудностью является незаконченность теоретических исследований в области построения систем управления для объектов с нелинейной динамикой. Существующие решения применяются только для небольшого класса объектов и носят не универсальный характер, при этом являются вычислительно трудоемкими. В связи с этим развитие и изучение методов синтеза управления нелинейными объектами является актуальной задачей.

Глава 1. Математическая модель НПА с манипулятором

Настоящая глава посвящена рассмотрению уравнений кинематики и динамики подводного аппарата и установленного на нем шестизвенного манипулятора. Манипулятор закреплен на неподвижном основании, имеет вращающиеся шарниры и электрические приводы.

1.1. Кинематика подводного робота-манипулятора

Рассматриваемый в работе объект управления, схематично изображенный на рис. 4, представляет собой систему связанных твердых тел, движущихся в жидкости. Кинематика системы твердых тел описывается в терминах обобщенных координат, в качестве которых для подводного аппарата выбираются декартовы координаты и углы Эйлера (или кватернион), а для манипулятора углы между парами последовательных звеньев [8].

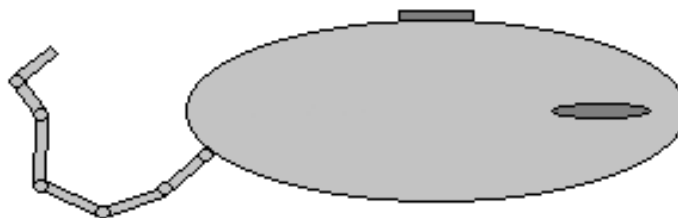


Рис. 4. Схематичное изображение НПА с шестизвенным манипулятором

Предварительно введем несколько систем координат: систему координат, связанную с Землей, систему координат, связанную с НПА, а также системы координат для каждого звена манипулятора на оси его сочленения. Нулевой репер закрепим на основании судна, для которого он будет неподвижным. Далее системы координат нумеруются по порядку: i -ый репер находится на конце i -ого звена.

Положение каждого следующего звена манипулятора q_i определяется

углом его отклонения от оси предыдущего звена, для первого звена это угол отклонения от вертикального положения.

Определим вектор $\boldsymbol{\eta}_1 \in \mathcal{R}^3$ как совокупность координат положения тела в системе, связанной с Землей (абсолютной):

$$\boldsymbol{\eta}_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix},$$

тогда вектор $\dot{\boldsymbol{\eta}}_1 \in \mathcal{R}^3$ будет представлять собой соответствующую производную вектора $\boldsymbol{\eta}_1$ по времени. С помощью вектора $\mathbf{v}_1 \in \mathcal{R}^3$ обозначим вектор линейных скоростей системы отсчета, связанной с телом, относительно абсолютной системы координат:

$$\mathbf{v}_1 = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}.$$

Теперь можно записать следующее выражение для введенных линейных скоростей:

$$\mathbf{v}_1 = \mathbf{R}_I^B \dot{\boldsymbol{\eta}}_1, \quad (1.1)$$

где \mathbf{R}_I^B - матрица поворота, связывающая абсолютную и относительную системы координат.

Аналогично определим векторы, описывающие ориентацию объекта в пространстве. Обозначим через $\boldsymbol{\eta}_2 \in \mathcal{R}^3$ вектор углов Эйлера, а через $\dot{\boldsymbol{\eta}}_2 \in \mathcal{R}^3$ - его производную по времени:

$$\boldsymbol{\eta}_2 = \begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}.$$

Тогда вектор $\dot{\boldsymbol{\eta}}_2 \in \mathcal{R}^3$ будет представлять собой соответствующую про-

изводную вектора $\boldsymbol{\eta}_2$ по времени. Вектором $\mathbf{v}_2 \in \mathcal{R}^3$ обозначим вектор угловых скоростей относительной системы отсчета в абсолютной:

$$\mathbf{v}_2 = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}.$$

Вектор производных углов Эйлера не имеет физического смысла, однако с вектором угловых скоростей он связан с помощью матрицы Якоби:

$$\mathbf{v}_2 = \mathbf{J}_{k.o}(\boldsymbol{\eta}_2)\dot{\boldsymbol{\eta}}_2. \quad (1.2)$$

Матрица Якоби представляет собой матрицу поворота между системами координат, связанными с телом и Землей. Так как при моделировании движения матрицу $\mathbf{J}_{k.o}$ надо будет обращать, следует отметить, что она имеет обратную матрицу не для любого значения своего аргумента из-за наличия вырождения у координатной системы, задаваемой углами Эйлера.

Уравнения движения подводного робота принято рассматривать в матричной форме, поэтому для удобства введем некоторые обозначения [8]. Вектором $\boldsymbol{\eta} \in \mathcal{R}^6$ обозначим вектор

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta}_1 \\ \boldsymbol{\eta}_2 \end{bmatrix},$$

вектором $\mathbf{v} \in \mathcal{R}^6$ обозначим вектор

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix}. \quad (1.3)$$

Тогда матрицу преобразований $\mathbf{J}_e(\mathbf{R}_B^I)$ между двумя рассматриваемыми системами координат определим как

$$\mathbf{J}_e(\mathbf{R}_B^I) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_I^B & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_{k.o} \end{bmatrix},$$

где матрицы \mathbf{R}_I^B и $\mathbf{J}_{k.o}$ введены выше в формулах (1.1) и (1.2) соответствен-

но.

Для системы робот-манипулятор введем вектор, состоящий из вектора скоростей (1.3) и вектора угловых скоростей звеньев манипулятора, а также матрицу преобразования между рассмотренными ранее системами координат:

$$\boldsymbol{\zeta} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_k \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\eta}}_1 \\ \dot{\boldsymbol{\eta}}_2 \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix}.$$

Подробные выражения для указанных выше матриц приведены в [9].

1.2. Динамика подводного робота-манипулятора

Динамику твердого тела, обозначим его B , опишем, основываясь на законах Ньютона. Для этого определим ρ как плотность частицы объема dV , тогда масса этой частицы равна ρdV , r определим как радиус-вектор твердого тела B в некоторой инерциальной системе координат. Пусть внутренность всего твердого тела обозначается как V_B , тогда его масса m равна

$$m = \int_{V_B} \rho dV,$$

Радиус-вектор центра масс \mathbf{p}_c равен

$$\mathbf{p}_c = \frac{1}{m} \int_{V_B} \mathbf{p} \rho dV,$$

импульс представляется формулой

$$\mathbf{l} = \int_{V_B} \dot{\mathbf{p}} \rho dV = m \dot{\mathbf{p}}_c.$$

Теперь можно записать второй закон Ньютона для системы с постоянной массой:

$$\mathbf{f} = \dot{\mathbf{i}} = m \frac{d}{dt} \dot{\mathbf{p}}_c = m \ddot{\mathbf{p}}_c,$$

где \mathbf{f} - результирующая внешних сил.

Определим тензор инерции \mathbf{I}_o твердого тела B относительно начала координат рассматриваемого репера:

$$\mathbf{I}_o = \int_{V_B} \mathbf{S}^T(\mathbf{p}) \mathbf{S}(\mathbf{p}) \rho dV,$$

где \mathbf{S} – кососимметричный оператор. Тензор инерции представляет собой симметричную положительно определенную матрицу, на диагонали которой расположены моменты инерции относительно трех координатных осей (главные моменты инерции), а не диагональные элементы представляют собой смешанные моменты инерции. Зависимость двух тензоров инерции \mathbf{I}_o и \mathbf{I}'_o в двух различных системах отсчета с единым началом и матрицей поворота \mathbf{R} определяется формулой:

$$\mathbf{I}_o = \mathbf{R} \mathbf{I}'_o \mathbf{R}^T.$$

Для того чтобы рассчитать тензор инерции относительно другой точки, можно воспользоваться теоремой Штейнера:

$$\mathbf{I}_o = \mathbf{I}_c + m \mathbf{S}^T(\mathbf{p}_c) \mathbf{S}(\mathbf{p}_c),$$

где \mathbf{I}_c - тензор инерции, вычисленный относительно параллельной оси, проведенной через центр масс.

Моментом импульса твердого тела относительно точки Ω служит следующий вектор \mathbf{k}_Ω :

$$\mathbf{k}_\Omega = \int_{V_B} \dot{\mathbf{p}} \times (\mathbf{p}_\Omega - \mathbf{p}) \rho dV,$$

где \mathbf{p}_Ω - радиус вектор точки Ω .

Для преобразований в дальнейших уравнениях используются следующие тождества:

$$\mathbf{p}_\Omega - \mathbf{p}_c = \mathbf{R}_b^I r_c^b,$$

$$\dot{\mathbf{R}}_{B^*}^I = \omega \times (\mathbf{R}_{B^*}^I),$$

$$\mathbf{R}_I^B (\omega \times \mathbf{R}_{B^*}^I) = \mathbf{v}_2 \times \bullet,$$

$$\omega = \mathbf{R}_B^I \mathbf{v}_2,$$

$$\dot{\omega} = \mathbf{R}_B^I \dot{\mathbf{v}}_2,$$

$$\dot{\mathbf{p}}_C = \mathbf{R}_B^I (\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2 \times \mathbf{r}_C^b),$$

$$\mathbf{I}_C = \mathbf{R}_B^I \mathbf{I}_C^b \mathbf{R}_I^B,$$

где r_C^b - вектор центра масс в системе координат, связанной с телом.

Теперь запишем уравнение движения в матричной форме с использованием введенного обозначения (1.3):

$$\mathbf{M}_{RB} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{RB} \mathbf{v}(\mathbf{v}) = \boldsymbol{\tau}_v,$$

где $\boldsymbol{\tau}_v = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_1 \\ \boldsymbol{\tau}_2 \end{bmatrix},$

$$\boldsymbol{\tau}_1 = m\dot{\mathbf{v}}_1 + m\dot{\mathbf{v}}_2 \times r_C^b + m\mathbf{v}_2 \times \mathbf{v}_1 + m\mathbf{v}_2 \times (\mathbf{v}_2 \times r_C^b)$$

- вектор результирующих сил,

$$\boldsymbol{\tau}_2 = \mathbf{I}_C^b \dot{\mathbf{v}}_2 + \mathbf{v}_2 \times (\mathbf{I}_C^b \mathbf{v}_2) + m\mathbf{v}_2 \times (\mathbf{v}_1 \times r_C^b) + m\dot{\mathbf{v}}_1 \times r_C^b$$

- вектор момента силы, матрица \mathbf{M}_{RB} - симметричная, положительно определенная:

$$\mathbf{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m\mathbf{I}_3 & -m\mathbf{S}(\mathbf{r}_C^b) \\ m\mathbf{S}(\mathbf{r}_C^b) & \mathbf{I}_{O_b} \end{bmatrix},$$

\mathbf{I}_3 - единичная матрица размером 3×3 , \mathbf{I}_{O_b} - тензор инерции в относительной системе координат. Матрица \mathbf{M}_{RB} характеризует инертность тела и может быть однозначно представлена формулой, матрица \mathbf{C}_{RB} отвечает за составля-

ющие кориолисовых и центробежных сил и не имеет однозначного выражения.

Принимая во внимание силы, действующие на рассматриваемый объект, а именно силы инерции, гидродинамические эффекты, гравитацию, плавание, работу двигателей, можно получить следующее представление уравнений динамики:

$$\mathbf{M}_v \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_v \mathbf{v}(\mathbf{v}) + \mathbf{D}_{RB}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}_{RB}(\mathbf{R}_B^I) = \mathbf{B}_v \mathbf{u}_v,$$

Здесь матрица \mathbf{M}_v характеризует инерционность системы, матрица \mathbf{C}_v содержит компоненты кориолисовых и центробежных сил, матрица $\mathbf{D}_{RB}(\mathbf{v})$ определяет демпфирование, $\mathbf{g}_{RB}(\mathbf{R}_B^I)$ – вектор гравитационных сил, правая часть $\mathbf{B}_v \mathbf{u}_v$ представляет управляющие воздействия.

Формулы (1.1)-(1.2), описывающие отношения между скоростями в относительной и абсолютной системе координат запишем в компактной форме:

$$\boldsymbol{\zeta} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_I^B & \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times n} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_{k,O}(\mathbf{R}_I^B) & \mathbf{O}_{3 \times n} \\ \mathbf{O}_{n \times 3} & \mathbf{O}_{n \times 3} & \mathbf{I}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_1 \\ \dot{\mathbf{q}}_2 \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_k \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_1 \\ \dot{\mathbf{q}}_2 \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix}.$$

Для звеньев манипулятора осуществляется последовательный переход из системы отсчета, связанной с последним звеном, в систему отсчета, связанную с Землей. При этом производятся соответствующие преобразования величин сил и моментов с учетом возникающих сил инерции из-за перехода между неинерциальными системами отсчета.

Вращающий момент, действующий на i -ое звено можно рассчитать по формуле:

$$\tau_{q,i} = \boldsymbol{\mu}_i^i \mathbf{z}_{i-1}^i + f_{di} \text{sign}(\dot{q}_i) + f_{vi} \dot{q}_i,$$

где f_{di} и f_{vi} – коэффициенты сухого и вязкого трения двигателя соответственно, $\boldsymbol{\mu}_i^i$ – момент, действующий на i -ое звено в его системе координат, \mathbf{z}_{i-1}^i – единичный вектор в направлении от $(i-1)$ -ого звена к i -ому. Определим

вектор $\boldsymbol{\tau}_q = [\tau_{q,1} \dots \tau_{q,n}]^T \in \mathfrak{R}^n$, где n - число звеньев манипулятора, и вектор $\boldsymbol{\tau}$ сил и моментов, действующих на аппарат и на звенья манипулятора, как

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_v \\ \boldsymbol{\tau}_q \end{bmatrix}.$$

Таким образом, можно записать матричное уравнение динамики для подводного робота в следующем виде:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\boldsymbol{\zeta}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \boldsymbol{\zeta})\boldsymbol{\zeta} + \mathbf{D}(\mathbf{q}, \boldsymbol{\zeta})\boldsymbol{\zeta} + \mathbf{g}(\mathbf{q}, \mathbf{R}_B^I) = \boldsymbol{\tau}, \quad (1.4)$$

принимая во внимание размерности указанных матриц:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \mathfrak{R}^{(6+n) \times (6+n)}, \mathbf{C}(\mathbf{q}, \boldsymbol{\zeta})\boldsymbol{\zeta} \in \mathfrak{R}^{(6+n)}, \mathbf{D}(\mathbf{q}, \boldsymbol{\zeta})\boldsymbol{\zeta} \in \mathfrak{R}^{(6+n)}, \mathbf{g}(\mathbf{q}, \mathbf{R}_B^I) \in \mathfrak{R}^{(6+n)}, \boldsymbol{\tau} \in \mathfrak{R}^{(6+n)}.$$

Глава 2. Синтез стабилизирующего закона управления для НПА с манипулятором

В первом параграфе настоящей главы рассмотрен вопрос линеаризации введенных ранее уравнений движения. Второй параграф посвящен синтезу стабилизирующего закона управления для линеаризованной модели подводного робота-манипулятора.

2.1. Линеаризация уравнений движения

Линейные математические модели занимают особое место среди моделей различных элементов систем управления, а также систем обработки сигналов. Во-первых, это связано с тем обстоятельством, что линейные приближения уравнений динамики являются основой для изучения вопросов устойчивости движений модели по отношению к малым изменениям начальных условий (устойчивости по Ляпунову). Во-вторых, на базе линейных моделей решается важнейший класс задач в теории управления, а именно задачи аналитического построения стабилизирующих законов управления.

Широкое применение линейных систем обусловлено изученностью их свойств и особенностей, а также большим количеством опубликованных теоретических результатов. В то же время для исследования и анализа нелинейных систем на данный момент не существует универсальных методов и подходов.

Однако следует учитывать, что методы анализа устойчивости нелинейных систем, основанные на линейных приближениях, гарантируют лишь локальную устойчивость (в малой окрестности исследуемого движения).

Необходимо отдельно отметить тот факт, современные программные комплексы в большинстве случаев позволяют автоматизировать процесс поиска линейных приближений для нелинейных систем. Например, поддержка данной функциональности представлена в пакете MATLAB-Simulink.

Итак, для нахождения линейного приближения уравнения движения

подводного робота-манипулятора разрешим уравнение (1.4) относительно старшей производной $\dot{\zeta}$ и перепишем его в следующем виде:

$$\dot{\zeta} = \mathbf{F}(\bar{\zeta}, \bar{\tau}), \quad (2.1)$$

где все компоненты функции \mathbf{F} непрерывно дифференцируемы по совокупности своих аргументов. Будем считать, что каким-либо образом заданы векторные функции $\bar{\zeta} = \bar{\zeta}_p(\mathbf{t})$ и $\bar{\tau} = \bar{\tau}_p(\mathbf{t})$, определяющие некоторое контролируемое движение объекта и удовлетворяющие системе уравнений (2.1):

$$\dot{\bar{\zeta}}_p \equiv \mathbf{F}(\bar{\zeta}_p, \bar{\tau}_p). \quad (2.2)$$

Обозначим через $\zeta = \zeta(t)$ и $\tau = \tau(t)$ отклонения переменных уравнения (2.1) от заданного контролируемого движения:

$$\bar{\zeta}(t) = \bar{\zeta}_p(t) + \zeta(t), \quad (2.3)$$

$$\bar{\tau}(t) = \bar{\tau}_p(t) + \tau(t). \quad (2.4)$$

После подстановки формул (2.3)-(2.4) в исходное уравнение (2.1) с учетом тождества (2.2) получим систему уравнений возмущенного движения объекта управления в отклонениях от контролируемого движения:

$$\dot{\zeta} = \mathbf{G}(\zeta, \tau), \quad (2.5)$$

где $\mathbf{G}(\zeta, \tau) = \bar{\zeta}(t) = \mathbf{F}(\bar{\zeta}_p + \zeta, \bar{\tau}_p + \tau) - \mathbf{F}(\bar{\zeta}_p, \bar{\tau}_p)$. Отсюда следует, что при условии $\zeta(t) = 0$ и $\tau(t) = 0$ система уравнений (2.5) находится в положении равновесия, что соответствует контролируемому движению, удовлетворяющему (2.1).

Учитывая свойства векторной функции \mathbf{F} , ее приращение в уравнении (2.5) согласно теореме Лагранжа имеет линейной приближение, которое принимает следующий вид:

$$\dot{\zeta} = \mathbf{G}(\zeta, \tau) \approx \mathbf{A}(t)\zeta + \mathbf{B}(t)\tau.$$

Будем считать, что рассматриваемая модель и контролируемое движе-

ние таковы, что матрицы \mathbf{A}, \mathbf{B} не зависят от времени. Также в дальнейшем будем использовать общепринятые обозначения в теории линейных систем для векторов состояния и управления \mathbf{x} и \mathbf{u} соответственно. Таким образом, линейная модель рассматриваемого объекта управления будет иметь вид

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}. \quad (2.6)$$

Частная конкретизация построения модели (2.6) представлена, например, в работе [4].

2.2. Синтез стабилизирующего закона управления

Построение стабилизирующего закона управления в данной работе основывается на интенсивно развивающейся концепции управления с прогнозом, именуемого в англоязычной литературе как MPC (Model Predictive Control) [5].

Ключевым достоинством MPC-идеологии является относительная простота схемы формирования обратной связи, основывающаяся на численных методах оптимизации, а также ее адаптивность, позволяющая управлять многомерными объектами со сложной структурой, учитывать ограничения на управляющие и контролируемые переменные.

В то же время, ввиду первоначально практической ориентации подхода он обладает таким недостатком, как слабая математическая обоснованность. Другой актуальной проблемой подхода является отсутствие гарантии устойчивости системы в общем случае. Кроме того, использование данного метода на практике требует наличия значительных вычислительных ресурсов на борту подвижного объекта.

Решать задачу о построении управления с прогнозом будем на базе дискретных (цифровых) систем. Целесообразность данного подхода объясняется тем, что, во-первых, сбор информации с датчиков, а также обработка полученных данных происходит в дискретном времени. Во-вторых, цифровые вычислительные устройства имеют более низкую стоимость, чем аналоговые.

Для этого выполним дискретизацию по времени уравнений (2.6) линейного приближения. Получим систему линейных разностных уравнений следующего вида:

$$\tilde{\mathbf{x}}[k+1] = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{x}}[k] + \tilde{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{u}}[k], \quad (2.7)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$ - номер такта, соответствующий дискретному моменту времени $t = k\Delta t$, Δt - шаг дискретности. Векторы $\tilde{\mathbf{x}}$ и $\tilde{\mathbf{u}}$ представляют собой состояние объекта и управление соответственно в моменты времени $t = k\Delta t$.

Очевидно, что чем меньше шаг дискретизации, тем ближе полученная модель к аналоговому варианту, однако тем выше вычислительные затраты. Поэтому при выборе шага необходимо найти компромисс между допустимой погрешностью и нагрузкой на вычислительное устройство. Практическое осуществление дискретизации (2.6) в интегрированной среде MATLAB будет представлено ниже в главе 3.

Для оценки качества процесса управления будем рассматривать линейно-квадратичный функционал

$$\tilde{J} = \tilde{J}(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{u}}) = \sum_{k=1}^P [(\tilde{\mathbf{x}}[k] - \mathbf{r}[k])^T \mathbf{R}_k (\tilde{\mathbf{x}}[k] - \mathbf{r}[k]) + \tilde{\mathbf{u}}[k-1]^T \mathbf{Q}_k \tilde{\mathbf{u}}[k-1]], \quad (2.8)$$

заданный на движениях объекта (2.7). Здесь $\mathbf{r}[k]$ - задающий сигнал в моменты времени $t = k\Delta t$, P - горизонт прогноза, \mathbf{R}_k и \mathbf{Q}_k - положительно определённые симметричные матрицы. При этом полагаем, что цель управления заключается в достижении положения, определяемого последовательностью $\{\mathbf{r}[k]\}$, где $k = 0, 1, 2, \dots$. С помощью $\tilde{\mathbf{x}}$ и $\tilde{\mathbf{u}}$ обозначены последовательности $\tilde{\mathbf{x}} = \{\tilde{\mathbf{x}}[k]\}$ и $\tilde{\mathbf{u}} = \{\tilde{\mathbf{u}}[k]\}$ соответственно. Понятно, что при одинаковых значениях задающего сигнала величина функционала зависит только от управления, что позволяет поставить следующую оптимизационную задачу:

$$\tilde{J} = \tilde{J}(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{u}}) = \tilde{J}(\tilde{\mathbf{u}}) \rightarrow \inf_{\tilde{\mathbf{u}} \in \Omega_u}, \quad (2.9)$$

где множество Ω_u - множество допустимых векторов управлений.

Наряду с моделью (2.7) будем рассматривать линейную прогнозирующую модель

$$\mathbf{x}[i+1] = \mathbf{A}\mathbf{x}[i] + \mathbf{B}\mathbf{u}[i], \quad (2.10)$$

которая иницируется на начальном такте состоянием $\tilde{\mathbf{x}}[k]$ объекта (2.7). При этом будем считать, что для произвольной последовательности векторов управления $\mathbf{u} = \{\mathbf{u}[i]\} \equiv \{\tilde{\mathbf{u}}[i]\} = \tilde{\mathbf{u}}$ соответствующие последовательности векторов состояния $\tilde{\mathbf{x}} = \{\tilde{\mathbf{x}}[i]\}$ и $\mathbf{x} = \{\mathbf{x}[i]\}$ достаточно близки между собой по евклидовой норме.

Тогда на основе прогнозирующей модели (2.10) можно предсказать поведение объекта (2.7), решив систему (2.10) для моментов времени $i = \overline{k, k+P-1}$, где P – горизонт прогноза. В результате получим последовательность из $k+P$ векторов управления и соответствующих им векторов состояния, что трактуется как прогноз движения объекта (2.7) с горизонтом P (рис. 5).

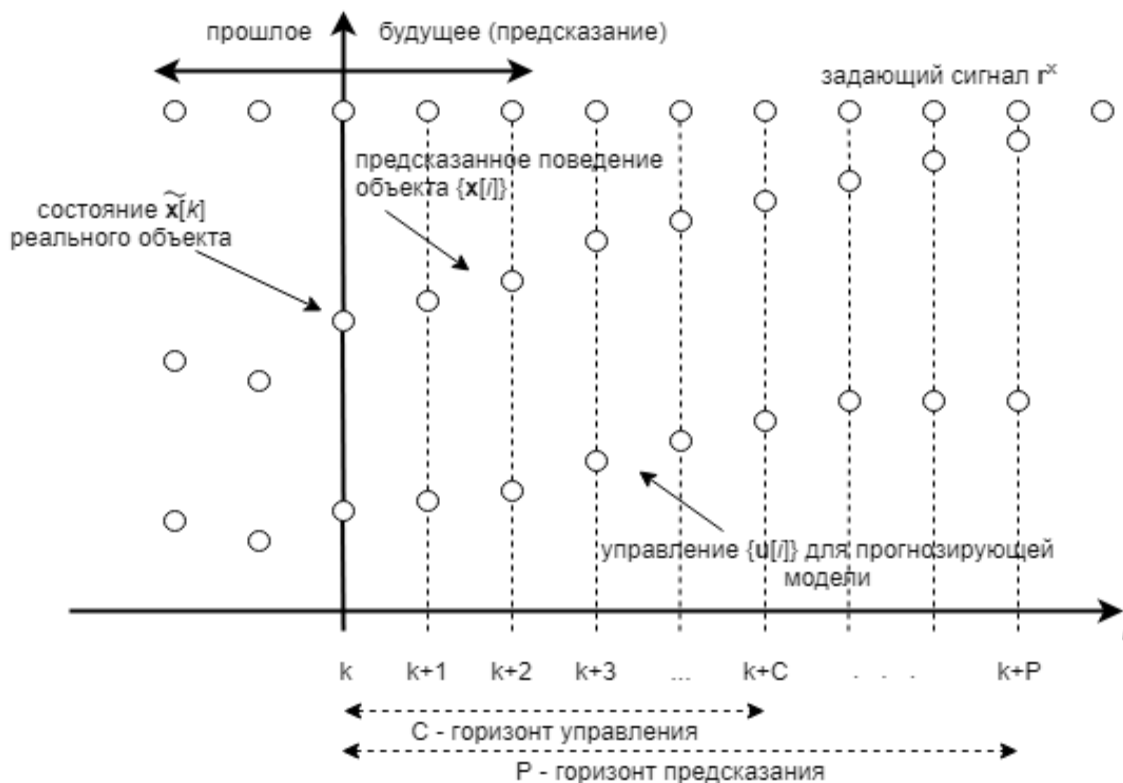


Рис. 5. Прогноз движения объекта.

Схема управления с прогнозом с использованием обратной связи состоит из следующих шагов:

1. Измеряется текущее состояние объекта $\{\tilde{\mathbf{x}}[k]\}$.
2. На основе функционала (2.8) выбирается оптимальное программное управление для прогнозирующей модели (2.10).
3. Полученное управление реализуется для объекта (2.7) только на текущем такте (горизонт управления $C = 1$).
4. Для следующего такта $k + 1$ повторяем шаги 1-3.

Рассмотренная схема представляет собой метод управления с прогнозом с удаляющимся горизонтом. Заметим, что в силу достаточной простоты функционала (2.8) решение оптимизационной задачи (2.9) можно найти аналитически, что представлено, например, в работе [5].

В результате будем иметь последовательность векторов, определяющих оптимальное управление, из которой будем использовать только первый элемент, представляемый равенством

$$\mathbf{u}^*[k] = \mathbf{K}\mathbf{x}[k] + \mathbf{T}\bar{\mathbf{r}},$$

где матрицы \mathbf{K} и \mathbf{T} определяются аналитическим решением оптимизационной задачи (2.9).

Глава 3. Разработка имитационно-моделирующего комплекса в среде MATLAB-Simulink

Современный уровень развития вычислительной техники делает метод компьютерного моделирования одним из самых эффективных методов анализа поведения сложных систем. Главным преимуществом использования компьютерных моделей реальных объектов в процессе исследовательского проектирования систем управления является возможность многократного проведения вычислительных экспериментов, в то время как реальные эксперименты затруднены, экономически нецелесообразны или опасны. С другой стороны, из-за трудоемкости проведения аналитического анализа поведения сложных динамических систем компьютерное моделирование становится простым и удобным инструментом для прикладного математика или инженера-исследователя.

3.1. Компьютерное моделирование движения подводного робота-манипулятора

В настоящей работе в качестве инструментального программного средства поддержки компьютерного моделирования динамических объектов используется пакет прикладных программ MATLAB[®] с подсистемой динамического моделирования Simulink[®].

Система MATLAB предоставляет пользователю набор наиболее эффективных численных методов для решения широкого круга математических задач общего характера, а также большое количество специализированных инструментов для решения задач в различных областях, среди которых финансовый анализ, базы данных, нейронные сети, нечеткая логика, визуализация, сбор и анализ данных и другие. Кроме того, пакет сопровождается подробной технической документацией, а все его подпрограммы поставляются в исходных кодах на языке MATLAB, что позволяет при необходимости лег-

ко модифицировать методы в соответствии с запросами конкретного пользователя.

В частности, MATLAB включает в себя средства для анализа и синтеза систем управления динамическими объектами. Так, подсистема Simulink, работающая в непосредственном взаимодействии с основной частью системы MATLAB, на базе библиотеки стандартных блоков позволяет построить компьютерную модель динамического объекта и провести имитационное моделирование с возможностью графического отображения динамических параметров.

Существо имитационного моделирования заключается в расчете правых частей системы обыкновенных дифференциальных уравнений, соответствующей Simulink-модели, а также в интегрировании данной модели некоторым численным методом, выбор которого определяется пользователем.

Результаты имитационного моделирования могут быть сохранены в рабочем пространстве MATLAB и использованы для последующей обработки.

На рис. 6 изображена блок-схема Simulink-модели подводного робота-манипулятора. Поскольку математически движение робота описывается обыкновенным дифференциальным уравнением второго порядка, в модели присутствуют цепочки из двух интеграторов.

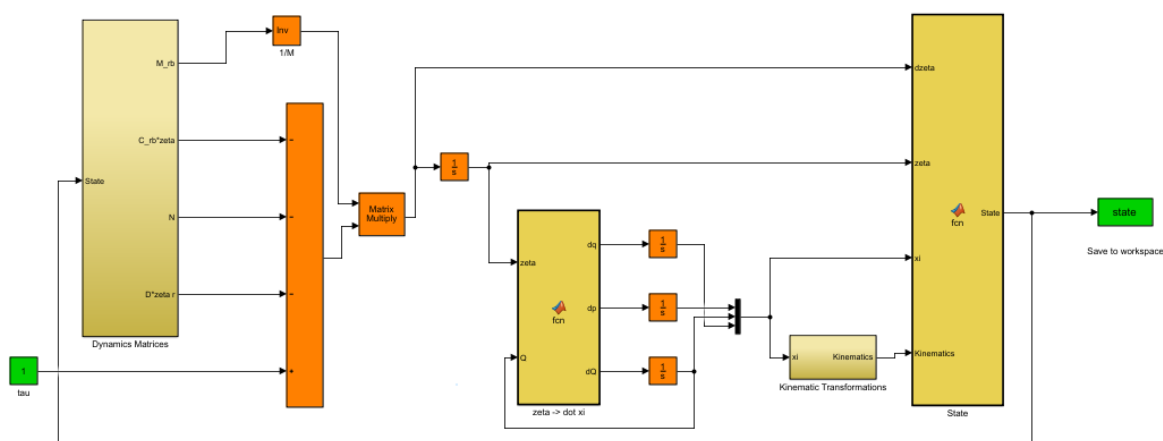


Рис. 6. Схема компьютерной модели подводного робота-манипулятора в подсистеме Simulink.

В блоке «*Dynamics Matrices*» согласно уравнению динамики (1.4) происходит вычисление матрицы инерции системы твердых тел, векторов массовых сил, сил трения, кориолисовой силы (т.н. обобщенных сил). Так как матрица инерции в (1.4) стоит перед производной вектора состояния, перед умножением на сумму векторов всех обобщенных сил она обращается. Один из членов суммы обобщенных сил (блок «*tau*») является вектором управления. Вход «*State*» блока «*Dynamics Matrices*» представляет собой вектор состояния системы, состоящий из обобщенных координат и скоростей.

На следующем этапе происходит интегрирование полученного вектора с нулевыми начальными условиями, благодаря чему мы получаем вектор обобщенной скорости. В блоке «*zeta → dot xi*» происходят кинематические преобразования, обеспечивающие переход между системой отсчета, связанной с НПА, в систему отсчета, связанную с землей, после чего выделяются компоненты вектора скорости для декартовых координат и углов Эйлера судна, углов положений звеньев манипулятора. Их последующее интегрирование с заданными начальными условиями позволяет вычислить текущий вектор обобщенных координат.

На последнем шаге в блоке «*State*» вектора обобщенных координат, обобщенных скоростей, вторых производных обобщенных координат и структура данных с матрицами перехода между системами отсчета объединяются в одну структуру данных, описывающую состояние (именно такая структура подается на вход блока вычисления динамических матриц и векторов). Эта же структура в блоке «*Save to workspace*» сохраняется в рабочее пространство MATLAB для дальнейшей обработки.

3.2. Линеаризация компьютерной модели

Как отмечалось выше, линеаризацию уравнений динамики объекта управления можно провести в системе MATLAB автоматически. Для это используется функция `linmod()`, входными аргументами которой являются имя Simulink-модели, линеаризацию которой нужно выполнить, а также значения

векторов состояния и управления, в окрестности которых ищется линейное приближение. Исполняемый код на языке MATLAB приведен ниже:

```
% Задание рабочей точки для линеаризации
x = Simulink.BlockDiagram.getInitialState('UVMS_lin');
u = zeros(12,1);

% Линеаризация в заданной точке
[A,B,C,D]= linmod('UVMS_lin', x, u);

% Формирование ss-объекта на основе 4-х матриц
ss_sys = ss(A, B, C, D);
```

Результатом работы функции является структура данных, содержащая матрицы, входящие в уравнение (2.6), т.е. представление линейной модели в пространстве состояний.

В настоящей работе в качестве точки, в окрестности которой выполняется линеаризация, используются значения вектора состояния, соответствующие начальному условию, а вектор управления полагается нулевым.

3.3. Компьютерное моделирование системы управления подводным роботом-манипулятором

Для оценки качества функционирования системы управления наряду с МРС-идеологией в работе реализован известный и широко применяемый метод управления на основе LQR-оптимизации. Данный метод также предполагает использование пропорциональной линейной обратной связи по состоянию объекта:

$$\mathbf{u} = \mathbf{Kx},$$

где матрица \mathbf{K} в дискретном случае доставляет минимум функционала

$$J = J(\mathbf{K}) = \sum_{n=0}^{\infty} [\mathbf{x}'(n, \mathbf{K})\mathbf{Q}\mathbf{x}(n, \mathbf{K}) + \mathbf{u}'(n, \mathbf{K})\mathbf{R}\mathbf{u}(n, \mathbf{K})].$$

Матрицы \mathbf{Q} и \mathbf{R} имеют тот же смысл, что и в выражении для функционала (2.8). Подробнее о подходе можно прочитать, например, в [3]. Программный код с использованием функции пакета MATLAB для поиска матрицы \mathbf{K} представлен ниже:

```
% Построение матрицы K на базе LQR-оптимизации
[Klqr, S, e] = dlqr(dss_sys.a, dss_sys.b, Q, R);
```

На вход функции подаются матрицы дискретной системы, а также матрицы \mathbf{Q} и \mathbf{R} , характеризующие рассматриваемый функционал. Результатом работы функции служат искомая матрица \mathbf{K} , массив корней характеристического полинома замкнутой системы \mathbf{e} и матрица \mathbf{S} , представляющая собой решение уравнения Риккати, возникающего в ходе решения задачи оптимизации.

Так как в работе осуществляется построение цифрового управления, полученную линейную модель, для которой рассчитываются матрицы управления, необходимо дискретизовать. Сделать это можно с помощью функции `c2d()`, входными аргументами которой являются исходная линейная аналоговая система и шаг дискретизации. Ниже приведен соответствующий фрагмент кода:

```
% Дискретизация линейной аналоговой системы
ts = 0.01;
dss_sys = c2d(ss_sys, ts);
```

Обратимся к рис. 7, на котором представлена схема Simulink-модели объекта управления с использованием обратной связи.

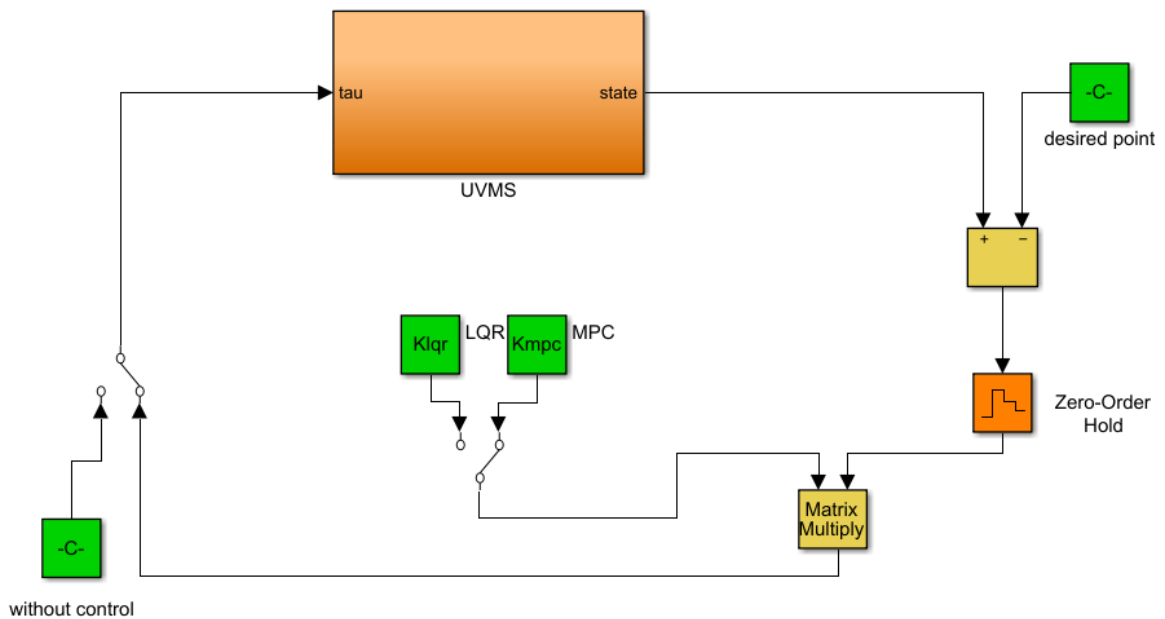


Рис. 7. Схема simulink-модели системы с управлением

Рассматриваемая система позволяет переключаться между двумя регуляторами, построенными на базе теории управления с прогнозом (блок «MPC») и линейно-квадратичной оптимизации (блок «LQR»), а также рассматривать поведение системы при отсутствии управляющих воздействий («without control»). Нелинейная модель объекта управления, представленная ранее на рис. 6, здесь для удобства вынесена в подсистему - блок «UVMS», входом которого является управление τ , выходом – вектор состояния $state$. Блок «Zero-Order Hold» обеспечивает дискретизацию сигнала, поступающего с выхода непрерывной модели. На вход регулятора подается отклонение текущего вектора состояния от желаемого положения, которое задается в блоке «desired point».

Как уже было отмечено выше, метод управления с прогнозом не гарантирует устойчивость системы с управлением, поэтому нужно обязательно проверять собственные значения матрицы $\mathbf{A} + \mathbf{BK}_{mpc}$.

Глава 4. Результаты имитационного моделирования

Оценку качества построенного в главе 2 управления для робота-манипулятора произведем с использованием методов имитационного моделирования, в ходе которого установим и проанализируем закономерности изменения состояния исследуемой механической системы.

Основные параметры модели, использующиеся в эксперименте, например, масса и длина судна, параметры, определяющие кинематику манипулятора, приведены в приложении.

4.1. Анализ качества функционирования системы управления подводным роботом-манипулятором

В вычислительном эксперименте будем использовать следующие начальные условия: декартовы координаты НПА $(0, 0, 0)$; углы Эйлера $(0, 0, 0)$; положения звеньев манипулятора $(0, \frac{\pi}{2.8}, -\frac{\pi}{1.3}, \frac{\pi}{3}, -\frac{\pi}{2}, 0)$; нулевые скорости изменения для всех обобщенных координат. Внешние возмущения не моделировались. Командные сигналы (управляющие воздействия) определяются видом управления (MPC или LQR) и вектором состояния объекта.

Прежде всего, был проведен анализ поведения механической системы без управления при заданных начальных условиях, из которого был сделан вывод о масштабах времени, на которых имеет смысл использовать линейную модель, оценен горизонт прогноза для MPC.

После чего для двух вариантов управления в форме обратной связи (linear-quadratic regulator и model predictive control) построены графики изменения координат судна и манипулятора. Приведем некоторые из них (на всех графиках изображены отклонения соответствующих координат от целевой точки). Графики переходных процессов для регулятора на основе MPC (горизонт прогноза составляет $60 \times 0,08 \approx 5$ сек):

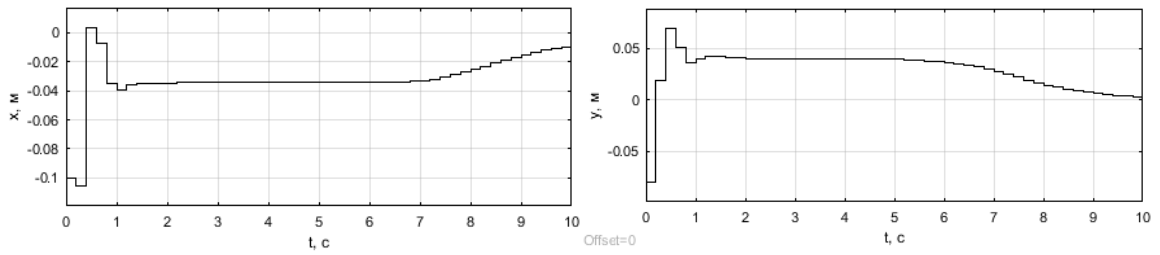


Рис. 8. Отклонения координат судна x , y от заданного значения (в метрах) для MPC-регулятора.

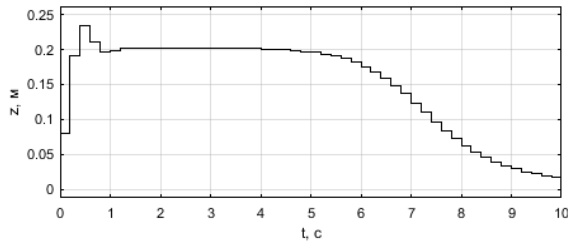


Рис. 9. Отклонения координат судна z от заданного значения (в метрах) для MPC-регулятора.

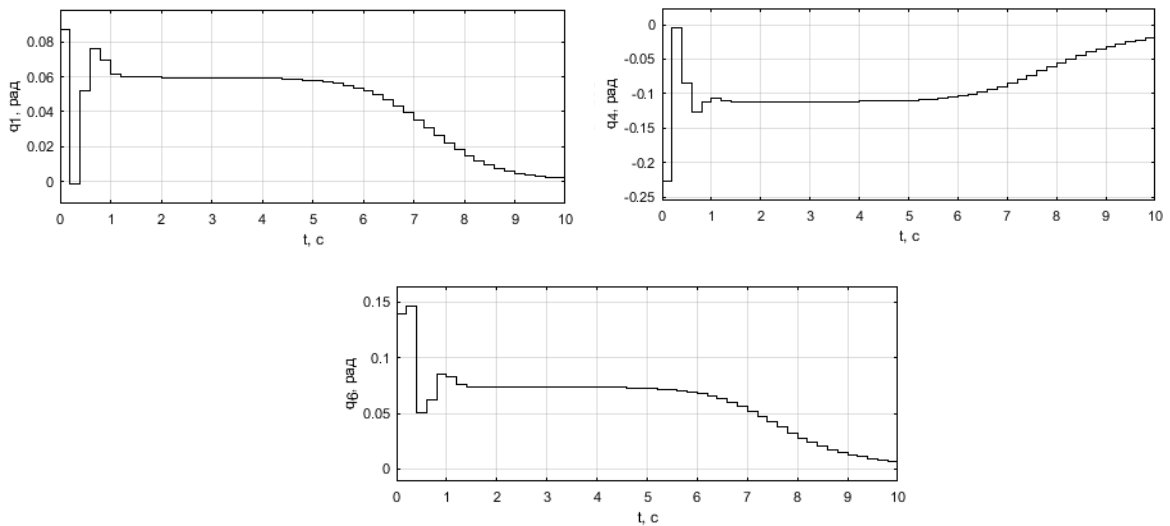
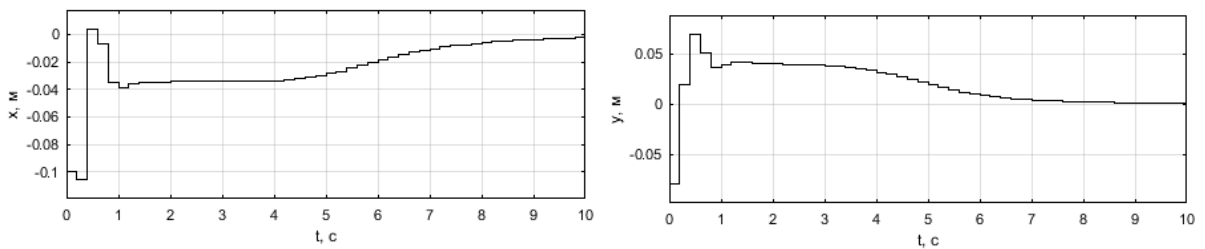


Рис. 10. Отклонения координат 1, 4 и 6 звеньев манипулятора от заданного значения (в радианах) для MPC-регулятора.

Графики переходных процессов для регулятора на основе LQR:



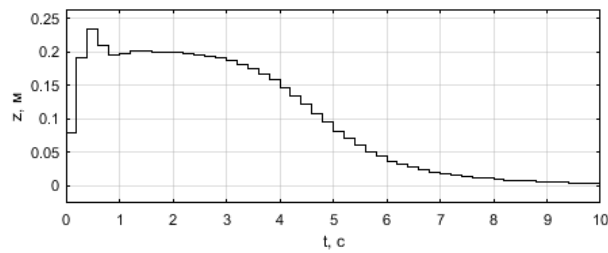


Рис. 11. Отклонения координат судна x, y, z от заданного значения (в метрах) для LQR-регулятора.

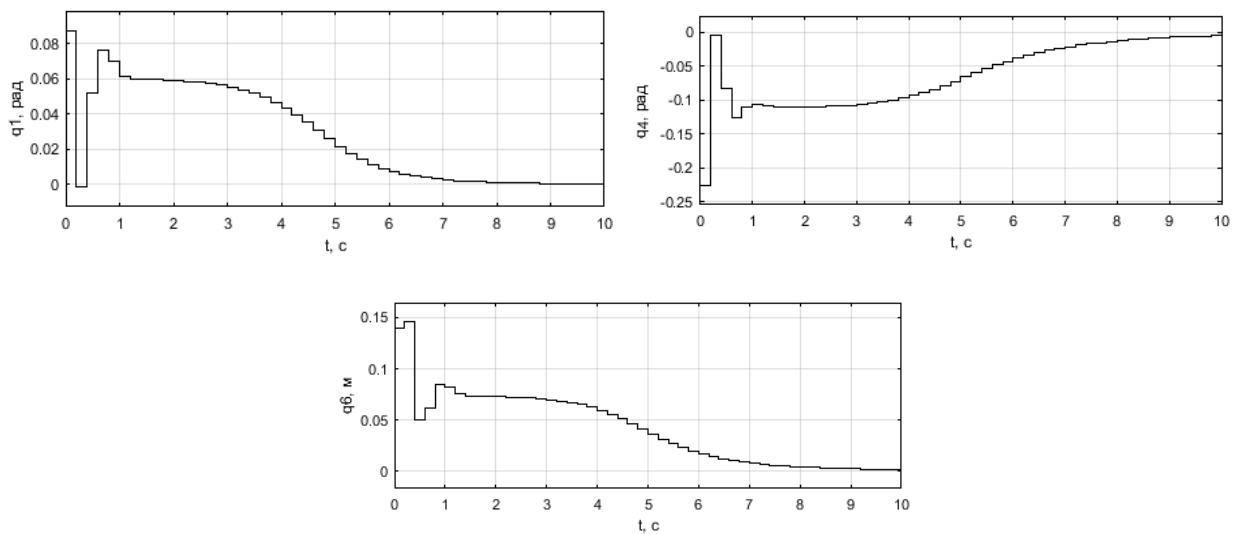


Рис. 12. Отклонения координат 1, 4 и 6 звеньев манипулятора от заданного значения (в радианах) для LQR-регулятора

Как видно из приведенных графиков, результаты управления с прогнозом удовлетворительные. Качество построенного управления с использованием LQR практически не отличается от MPC. Отметим, что целевой функционал управления в MPC задействует значения линейной модели в нескольких первых точках относительно начальной, в то время как в LQR неявно используется бесконечное количество точек (решается уравнение Рикатти). В нашем случае модель является в существенном нелинейной, а значит использование линейного приближения на больших масштабах времени нецелесообразно и может приводить к большим погрешностям управления. Таким образом, применение MPC в случае сильно выраженных нелинейностей может быть целесообразным и давать не худший результат.

Выводы

В ходе выполнения работы получены следующие результаты, которые выносятся на защиту:

- построена математическая модель динамики подводного аппарата с установленным на него шестизвенным манипулятором, указан способ нахождения ее линейного приближения, выполнена дискретизация модели;

- рассмотрены два подхода к синтезу цифрового закона управления в форме обратной связи;

- разработаны компьютерная модель и имитационно-моделирующий комплекс системы управления в системе MATLAB-Simulink;

- проведено имитационное моделирование поведения системы с обратной связью, в рамках которого выполнен анализ построенного управления для подводного робота-манипулятора.

Заключение

В данной работе рассмотрены вопросы, связанные с построением уравнений динамики автономного подводного судна с шестизвенным манипулятором. В силу широкого применения линейных стационарных систем на практике особое внимание уделено вопросу нахождения линейного приближения полученных уравнений. Также выполнено моделирование объекта управления в дискретном времени.

Построенный в системе MATLAB-Simulink имитационно-моделирующий комплекс позволяет исследовать поведение системы при наличии управления в форме обратной связи на базе управления с прогнозом (MPC) или на базе линейно-квадратичной оптимизации (LQR), а также при отсутствии управляющих воздействий. Предложенные подходы к построению управления обеспечивают стабилизацию объекта управления в заданном положении. Полученные результаты имитационного моделирования позволяют сделать вывод о состоятельности построенной системы управления.

Направлением для дальнейших исследований и работы могли бы стать добавление астатизма в систему управления, а также учет ограничений на управляющие воздействия, моделирование и фильтрация шума в каналах измерений.

Список литературы

1. Бахарев С.А., Карасев В.В., Карасев А.В. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов в процессе изучения мирового океана. // Научные труды дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2015. - с. 41–51.
2. Белоусов, И.Р. Формирование уравнений динамики роботоманипуляторов. М.: Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, 2002. - 31 с.
3. Веремей Е.И. Линейные системы с обратной связью. – СПб.: Лань, 2013. – 448 с.
4. Веремей Е.И., Корчанов В.М., Коровкин М.В., Погожев С.В. Компьютерное моделирование систем управления движением морских подвижных объектов. – СПб.: НИИ Химии СПбГУ, 2002. – 370 с.
5. Веремей Е.И., Сотникова М.В. Управление с прогнозирующими моделями. – Воронеж: Научная книга, 2016. – 214с.
6. Макаров И.М., Топчеев Ю.И. Робототехника. Истории и перспективы. – М.: Наука; МАИ, 2003. – 349 с.
7. Ayob M.A., Zakaria W. N. W., Jalani J. Forward kinematics analysis of a 5-axis RV-2AJ robot manipulator. // 2014 Electrical Power, Electronics, Communications, Control and Informatics Seminar (EECCIS), Malang, 2014. - pp. 87-92.
8. Antonelli G. Underwater Robots: Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems. – Berlin: Springer, 2005. – 265 p.
9. Fossen T.I. Guidance and Control of Ocean Vehicles. – New York: Wiley, 1994. – 300p.
10. Fossen T.I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. – John Wiley & Sons, Ltd, 2011. – 596p.
11. Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M. An Introduction to Fuzzy Control. –

- Berlin: Springer-Verlag, 1995.
12. Healey, J. and Lineard D. Multivariable Sliding-Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 18, No 3, 1993. - pp. 327–338.
 13. Kumbala K., Jamshid M. Control of robotic manipulator using fuzzy logic. // *Proceedings of 1994 IEEE 3rd International Fuzzy Systems Conference, Orlando, FL*, Vol.1, 1994. - pp. 518-523.
 14. Lee M., Choi H.S. A Robust Neural Controller for Underwater Robot Manipulators // *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 11, 2000. - pp. 1465–1470.
 15. Li R., Anvar A. Parsa, Anvar A.M., Lu T. Dynamic Modeling of Underwater Manipulator and its Simulation. // *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 12, 2012.
 16. Maciejewski A., Klein C. Obstacle Avoidance for Kinematically Redundant Manipulators in Dynamically Varying Environments. // *International Journal of Robotics Research*, SAGE Publications, Vol.4, 1985. – pp. 109–117.
 17. Sahu B., Subudhi B. The State of Art of Autonomous Underwater Vehicles in Current and Future Decades. // *2014 First International Conference on Automation, Control, Energy and Systems (ACES)*, Hooghy, 2014. - pp. 1-6.
 18. Schjolberg I., Fossen T.I. Modeling and Control of Underwater Vehicle-Manipulator Systems // *Proceedings the 3'd Conference on Marine Craft Maneuvering and Control (MCMC'94)*, Southampton, UK, 1994.
 19. Vidakovic J., Lazarevic M., Kvirgic V. Dancuo Z., Ferenc G. Advanced Quaternion Forward Kinematics Algorithm Including Overview of Different Methods for Robot Kinematics // *FME Transactions*, Belgrade University, Vol. 42 No.3, 2014. – pp. 189-199.
 20. Wynn R., Huvenne V., Bas T., Murton B., Connelly D., Bett B., Ruhl H., Morris K., Peakall J., Parsons D., Sumner E., Darby S., Dorrell R., Hunt J. Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contribu-

tions to the advancement of marine geoscience. // *Marine Geology*, no. 352, Elsevier, 2014. – pp. 451–468.

Приложение А

Параметры НПА и манипулятора

В данном приложении приведены основные параметры рассматриваемой в работе модели подводного робота-манипулятора.

Параметры лодки: длина судна 5,3 м, масса 5454,54 кг.

Массы звеньев манипулятора, а также их параметры в представлении Денавита-Хартенберга приведены в таблице 1.

	Масса, кг	a ,	d ,	θ ,	α , рад
Звено 1	30	0.15	0	q_1	$\frac{\pi}{2}$
Звено 2	80	1	0	q_2	0
Звено 3	50	0.7	0	q_3	0
Звено 4	40	0.4	0	q_4	$-\frac{\pi}{2}$
Звено 5	30	0.1	0	q_5	$-\frac{\pi}{2}$
Звено 6	35	0.2	0.25	q_6	0

Таблица 1. Параметры манипулятора