

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет»

На правах рукописи



Платонов Виталий Николаевич

**СОГЛАСОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ
ДВИЖИТЕЛЕЙ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ, ДИСКРЕТНО
ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

2.5.4 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,

профессор

Брискин Евгений Самуилович

Волгоград – 2022

Оглавление

Введение	3
ГЛАВА 1. Обзор и анализ систем управления распределением тяговой нагрузки между движителями мобильных роботов	11
1.1 Шагающие движители	13
1.2 Тросовые движители	20
1.3 Движители подводных роботов.....	25
1.4 Якорно-тросовый движитель.....	29
1.5 Способы управления распределением тяговой нагрузки между движителями машин	34
1.6 Способы управления распределением общей нагрузки во взаимосвязанном электроприводе	42
1.7 Заключение по первой главе.....	47
ГЛАВА 2. Метод оптимизации распределения тяговой нагрузки во взаимосвязанном электроприводе движителей мобильного робота, дискретно взаимодействующих с опорной поверхностью	48
2.1 Математическая модель взаимосвязанного электропривода движителей мобильного робота	48
2.2 Синтез критерия оптимального распределения тяговой нагрузки во взаимосвязанном электроприводе движителей мобильного робота	50
2.3 Анализ устойчивости движения мобильного робота, осуществляемого в соответствии с разработанным критерием распределения тяговой нагрузки.	53
2.4 Заключение по второй главе	56
ГЛАВА 3. Математическое моделирование системы управления взаимосвязанным электроприводом движителей мобильного робота, дискретно взаимодействующих с опорной поверхностью	57
3.1 Моделирование программного управления распределением нагрузки между якорно-тросовыми движителями.....	58

3.2 Моделирование управления распределением нагрузки в соответствии с разработанным критерием оптимальности.....	64
3.3 Анализ устойчивости при модельном движении мобильного робота в соответствии с разработанным критерием	74
3.5 Заключение по третьей главе	78
ГЛАВА 4. Стендовое моделирование и экспериментальные исследования.....	79
4.1 Разработка экспериментального стенда.....	79
4.2 Разработка программного обеспечения экспериментального стенда.....	86
4.3 Методика проведения эксперимента.....	93
4.4 Результаты экспериментальных исследований	94
4.5 Заключение по четвертой главе.....	98
Заключение	99
Список литературы	101
Приложения.....	113

Введение

Актуальность темы исследования. Все многообразие используемых в настоящее время конструкций двигателей мобильных роботов определяется конкретной задачей и назначением, а также эксплуатационными требованиями к ходовой части: существуют колесные, гусеничные, шнековые, тросовые, шагающие двигатели и многие другие. Известны мобильные роботы с двигателями, в каждом из которых используются несколько приводов для реализации перемещения. В таких многоприводных двигателях перемещение робота осуществляется одновременной работой всех приводов. Применение многоприводных двигателей требует построения сложных алгоритмов управления движением. Известны мобильные роботы и с одноприводными двигателями, например, цикловые, у которых система управления проще.

Особенностью транспортных машин вообще и мобильных роботов в частности, является применение нескольких двигателей в качестве тяговых механизмов, обеспечивающих движение. Согласованная работа таких механизмов обеспечивается применением различных устройств и систем управления.

Количество двигателей, в большинстве случаев, превосходит число учитываемых степеней свободы роботов. Такие механические системы, определяемые как многопоточные, рассматриваются в работах Кобринского А.Е., Крайнева А.Ф., Глазунова В.А., Саламандры К.Б. Вопросам управления взаимосвязанным электроприводом для таких многопоточных систем посвящены работы Чиликина М.Г., Сандлера А.С., Терехова В.М., Новикова В.А., Борцова Ю.А., Ещина Е.К. и др. Однако в рассмотренных публикациях нагрузка на приводы двигателей являлась стационарной или квазистационарной.

В работах Оходимского Д.Е., Умнова Н.В., Девянина Е.А., Лапшина В.В., Павловского В.Е, Голубева Ю.Ф., Бернса К., Вукобратовича М. Брискина Е.С., Чернышева В.В., Жоги В.В., Малолетова А.В., Шурыгина В.А., Серова В.А., Леонарда А.В. рассматриваются вопросы управления движением шагающих движителей. Как правило, каждый движитель приводится в движение своими двигателями, работающими согласованно с другими для обеспечения требуемого движения мобильного робота как твердого тела.

Особенностью роботизированных комплексов с движителями шагающего типа является дискретное изменение положения точки взаимодействия движителя машины с опорной поверхностью. Существуют моменты времени, когда реализуется тяговый режим, и моменты времени, когда движитель находится в переносе и занимает новое положение – происходит чередование фазы переноса и фазы опоры.

В этом случае, движитель, и соответственно его приводы, испытывают переменную нагрузку. Однако даже в фазе реализации тягового усилия (в фазе опоры) положение опорного элемента движителя относительно центра масс машины также изменяется, поэтому величина тягового усилия в каждом движителе имеет переменный характер.

Ввиду того, что нормальная реакция грунта у машин с шагающими движителями даже в фазе опоры изменяется и воспринимается то одним то другим движителем, возникает задача распределения общей тяговой нагрузки между движителями машины и, соответственно, между их приводами. Т.к. большинство приводов современных роботов являются электрическими, то актуальной является задача распределения общей тяговой нагрузки между электрическими приводами движителей мобильных роботов.

Подобная задача рассматривалась [21], [98], но обычно изучалось программное распределение вертикальных и касательных составляющих

опорных реакций в двигателях шагающей машины, а не моментов, развиваемых их приводами.

Поэтому задача распределения общей тяговой нагрузки между приводами двигателей, при обеспечении требуемого изменения тяговых усилий в соответствии с некоторым критерием, характеризующим оптимальность режимов движения (плавность походки, энергоэффективность и др.), является актуальной.

Целью диссертационной работы является разработка метода управления оптимальным (по уровню тепловых потерь) распределением общей тяговой нагрузки между электроприводами двигателей мобильного робота, дискретно взаимодействующего с опорной поверхностью.

Научная задача, решение которой содержится в диссертации, - исследование закономерностей управления оптимальным (по уровню тепловых потерь) распределением тяговой нагрузки между электроприводами двигателей мобильного робота, дискретно взаимодействующего с опорной поверхностью.

Основные задачи исследования:

1 Анализ методов управления распределением нагрузки в многопоточных системах и во взаимосвязанном электроприводе.

2 Разработка математической модели системы электроприводов, учитывающей зависимость закона перемещения выходного звена каждого двигателя мобильного робота от программного режима его движения.

3 Обоснование и синтез критерия оптимального (по уровню тепловых потерь) распределения общей тяговой нагрузки машины между ее двигателями.

4 Определение на основе предложенного критерия программных зависимостей управляющих воздействий для электроприводов двигателей мобильного робота, дискретно взаимодействующих с опорной поверхностью.

5 Анализ на устойчивость движения мобильного робота, осуществляемого в соответствии с разработанным критерием распределения тяговых усилий.

6 Проведение математического моделирования и экспериментальных исследований.

Объектом исследования являются система электроприводов двигателей мобильного робота, дискретно взаимодействующих с опорной поверхностью.

Предметом исследования является метод оптимизации распределения общей тяговой нагрузки между электроприводами двигателей мобильного робота, дискретно взаимодействующих с опорной поверхностью, обеспечивающий устойчивость программных режимов его поступательного движения.

Методологическую основу работы составили методы, основанные на базовых положениях теории робототехнических систем, теоретической механики, мехатроники, системного анализа и исследованиях в области обработки информации и управления робототехническими комплексами, в том числе тросовыми манипуляторами. При синтезе критерия оптимального распределения тяговой нагрузки между электроприводами применялись методы классического вариационного исчисления и теории оптимального управления. Для экспериментального исследования применялось компьютерное (численное) и стендовое моделирование.

Достоверность полученных результатов обеспечивается строгими математическими выводами, согласованностью с опубликованными результатами научных исследований других авторов, подтверждаются результатами компьютерного моделирования (с проверкой примененных моделей и алгоритмов на задачах, имеющих аналитическое решение), испытаниями системы управления взаимосвязанным электроприводом постоянного тока на экспериментальном стенде. Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на российских и международных научных конференциях, и получили положительный отзыв научной общественности.

Научная новизна диссертации состоит в развитии научно обоснованных методов управления электроприводами движителей мобильных роботов, дискретно взаимодействующих с опорной поверхностью, базирующихся на учете известных закономерностей движения роботов и методах оптимального управления движением механических систем.

На основе анализа основных закономерностей движения роботов и взаимодействия их движителей с опорной поверхностью **доказано**, что существует такое распределение управляющих напряжений, подаваемых на обмотку электродвигателей, которое обеспечивает минимум уровня тепловых потерь, зависящее нелинейно от скорости движения робота, передаточных функций первого порядка механизма движителя и силы сопротивления движению.

Показано, что распределение уровня управляющих воздействий не является постоянным для конкретного движителя, а зависит от скорости движения, силы сопротивления, определяемой физико-механическими свойствами опорной поверхности и походки робота.

В качестве интегрального критерия эффективности I **предложено** использовать величину определенного интеграла за промежуток времени, равному периоду движения движителя от суммы квадратов токов i ,

протекающих в цепях электроприводов всех движителей
$$I = \sum \int_0^{\tau} i^2 dt,$$

зависящих от «походки» робота.

Установлено, что при применении якорно-тросовых движителей, разработанный метод распределения управляющих напряжений, подаваемых на обмотки тяговых электродвигателей, может позволить снизить уровень тепловых потерь по сравнению с равномерным распределением до 7...8%.

На основе исследования динамики поступательного движения робота как твердого тела с якорно-тросовыми движителями и минимумом тепловых потерь в приводных двигателях **сделан вывод**, что движение устойчиво по

Ляпунову при соотношениях между скоростью движения, длиной тросов и величиной шага, удовлетворяющих критериям устойчивости Гурвица.

Наиболее существенные научные результаты, полученные автором, и обладающие научной новизной:

1 Математическая модель системы управления электроприводами двигателей мобильного робота, отличающаяся от известных, декомпозицией общей тяговой нагрузки между ними, и учетом нестационарности такой нагрузки.

2 Метод оптимизации режимов работы системы электроприводов двигателей мобильного робота, дискретно взаимодействующего с опорной поверхностью, разработанный на основе критерия распределения совместной тяговой нестационарной нагрузки.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод оптимизации распределения общей тяговой нагрузки в системе электроприводов двигателей мобильного робота, обеспечивающий получение оптимального решения (синтез управляющих воздействий) относительно показателя энергоэффективности (тепловых потерь в электроприводах).

2. Применение метода оптимизации распределения общей тяговой нагрузки в системе электроприводов двигателей мобильного робота.

Результаты, выносимые на защиту:

1 Математическая модель системы взаимосвязанных электроприводов постоянного тока двигателей мобильного робота, включающая декомпозицию общей тяговой нагрузки машины между ними.

2 Закономерности устойчивой работы системы электроприводов двигателей мобильного робота при реализации его поступательного движения в соответствии с разработанным критерием оптимального распределения тяговой нагрузки между ними.

Теоретическая и практическая значимость работы. Реализация результатов работы позволит производить оптимизацию распределения

тяговой нагрузки, реализуемой роботом, между приводами его движителей. Результаты могут быть использованы при проектировании новых и модернизации существующих роботов (например, шагающих), а также применяться для оптимизации режимов работы приводов других робототехнических систем

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались на:

- Международной научно-практической конференции «Прогресс транспортных средств и систем» (г. Волгоград, 9-11 октября 2018 г.);
- XXX международной конференции молодых ученых и студентов МИКМУС-2018 (г. Москва, 20-23 ноября 2018 г.);
- XXXI международной конференции молодых ученых и студентов МИКМУС-2019 (г. Москва, 4-6 декабря 2019 г.);
- XXIII международной конференции CLAWAR-2020 (г. Москва, 24-26 августа 2020 г.).

Реализация и внедрение результатов работы. Теоретические и практические результаты, полученные в рамках работы, использовались при разработке экспериментального образца подводного автономного робота с якорно-тросовыми движителями.

Личный вклад автора. Все научные результаты диссертации, выдвигаемые для защиты, получены автором лично.

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы отражены в 15 публикациях, в том числе 3 статьях в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 статье в иностранном научном издании, 7 статьях в сборниках трудов и тезисов докладов международных научных конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из содержания, введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 103 наименований и приложения. Основная часть работы изложена на 100 страницах и содержит 72 рисунка и 3 таблицы.

ГЛАВА 1. Обзор и анализ систем управления распределением тяговой нагрузки между движителями мобильных роботов

В данной главе рассматриваются многодвигательные мобильные робототехнические комплексы с распределением нагрузки между движителями, а также системы управления таким распределением. На основе выполненного обзора и анализа формулируются задачи, решению которых посвящено диссертационное исследование.

Среди всех робототехнических комплексов мобильные (подвижные) роботы заслуживают особого рассмотрения. Связано это не только с особенностью их конструкции, предусматривающей различные устройства для перемещения - движители, но и с системой управления ими, реализующей заданные законы перемещения элементов движителя при обеспечении того или иного условия: давления на грунт (для гусеничных и колесных движителей), плавности перемещения (например, для шагающих движителей), бесшумности, энергоэффективности и др.

При этом под определением «двигитель» понимается устройство, преобразующее энергию двигателя или внешнего источника в полезную работу по перемещению транспортного средства (или робота в данном случае).

Особенностью транспортных машин вообще и мобильных роботов в частности, является применение нескольких движителей в качестве тяговых механизмов, обеспечивающих движение. Согласованная работа таких механизмов обеспечивается применением различных устройств и систем управления.

Так, в настоящее время известны разработки беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с **распределенной силовой установкой** (Distributed Propulsion). Распределенная силовая установка (рис. 1.1) представляет собой

тип летной силовой установки, в которой тяга создается несколькими двигателями, установленными на БПЛА.



Рисунок 1.1 – БПЛА с распределенной силовой установкой (DP).

Одним из видов распределенной силовой установки является **распределенная электрическая тяга (DEP)**. В такой силовой установке двигатели не имеют общего механического вала или общего источника механической энергии, а представляют собой любую комбинацию устройств, вырабатывающих энергию – генераторы, топливные элементы и др., и устройств, накапливающих ее – аккумуляторы, батареи, конденсаторы и др. Примером применения распределенной электрической тяги являются мультикоптеры, например Volocopter VC1, VC200 (рис. 1.2) и др.



Рисунок 1.2 – Мультикоптеры с распределенной электрической тягой (DEP).

Примерами мультиприводных движителей роботов с распределением нагрузки между элементами самого движителя также являются:

- колесные движители;
- винтомоторные группы мультикоптеров;
- шагающие движители;
- тросовые движители;
- движители подводных автономных аппаратов.

1.1 Шагающие движители

Механизмом шагания называется «механизм, обеспечивающий требуемую траекторию и закон движения опорного элемента (стопы) шагающего движителя относительно корпуса робота» [13]. При этом шагающие движители в зависимости от кинематики движителя и траектории движения опорного элемента могут быть выполнены по различным схемам: цикловым, ортогональным, пантографным, «инсектоморфным», «зооморфным», «антропоморфным» и др. [13].

Одним из первых применений цикловых механизмов шагания является стопоходящая машина, разработанная П.Л. Чебышевым [14] (рисунок 1.3).

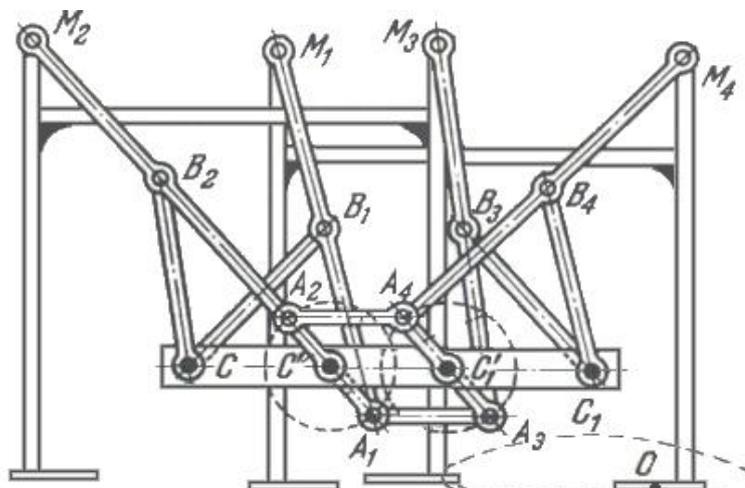


Рисунок 1.3 – Стопоходящая машина П.Л. Чебышева.

В такой машине два кривошипно-шатунных механизма вращаются вокруг осей C и C_1 приводами. Синхронность вращения этих приводов, в данном случае, обеспечивается механической связью между осями кривошипно-шатунных механизмов, однако при применении большего числа пар стоп (числа кривошипно-шатунных механизмов) могут быть применены и другие методы синхронизации угловых скоростей осей.

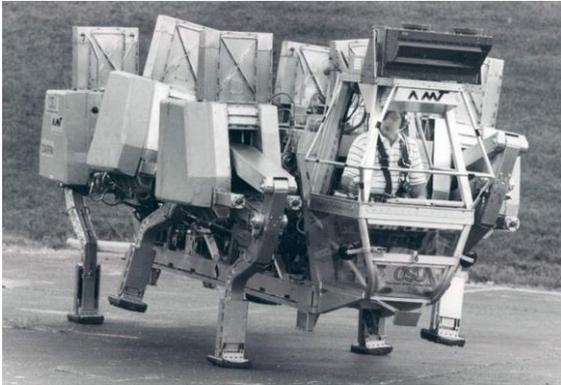
В современных машинах с цикловыми механизмами шагания - «Восьминог», «Восьминог-М» (рисунок 1.4) - применены 4 движителя на основе четырехзвенных цикловых механизмов шагания с пассивно управляемой стопой [15], [16]. Движители объединены попарно в два цикловых кривошипно-шатунных механизма на каждом борту, при этом цикловые механизмы каждого борта приводятся в движение своим электроприводом переменного тока.



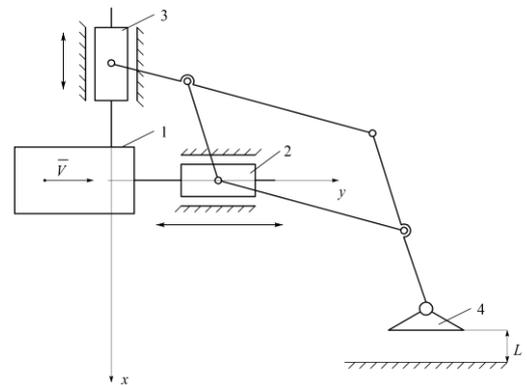
Рисунок 1.4 – Шагающая машина «Восьминог-М».

Под корпусом машины закреплен поворотный круг, на котором установлены два независимых подъемных движителя. Такая конструкция обеспечивает кинематически точный поворот (при вывешивании машины), а также существенно повышает профильную проходимость за счет согласованной работы движителей курсового движения подъемных движителей, установленных на поворотном круге [13].

В основе пантографного шагающего движителя (рисунок 1.5) лежит плоский пантографный механизм [17]. Движение опорной точки в таком механизме обеспечивается согласованным прямолинейным движением его приводов [18].



а)



б)

Рисунок 1.5 – Многоприводный пантографный механизм шагания:

а) – шагающая машина «Adaptive Suspension Vehicle» (США);

б) – кинематическая схема пантографного механизма шагания:

1 – корпус; 2, 3 – приводы; 4 – опорный элемент.

Согласованная работа приводов в пантографном механизме обеспечивается программно, а также наличием жестких механических связей между звеньями механизма.

В инсектоморфных схемах шагающих машин (рисунок 1.6) каждый движитель также содержит несколько приводов, обеспечивающих движение.

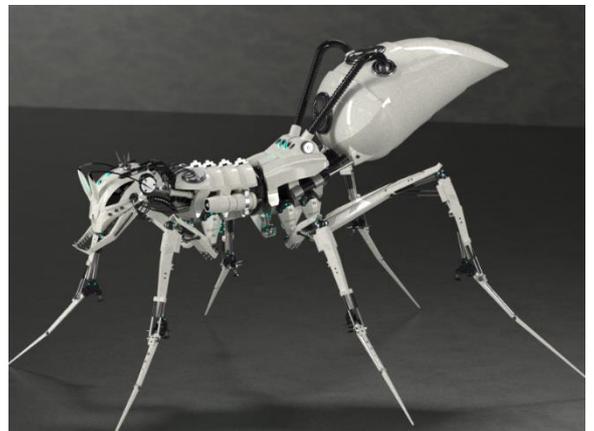


Рисунок 1.6 – Инсектоморфные роботы с мультиприводными шагающими движителями.

Каждый такой привод обладает несколькими степенями свободы и, следовательно, описываются несколькими обобщенными координатами, изменяющимися под воздействием нескольких приводов [13], [19].

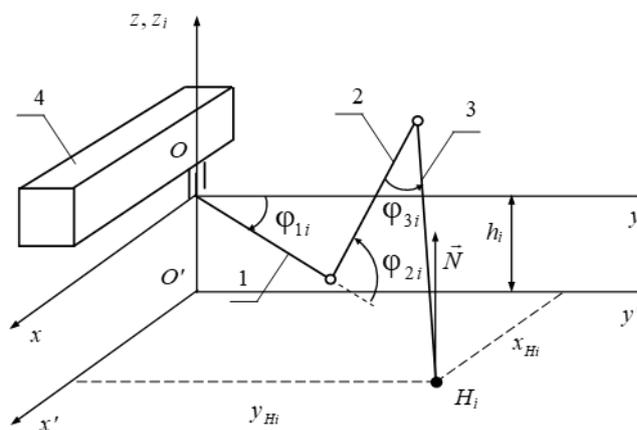
В этих случаях важной задачей является задача об управлении каждым двигателем с целью обеспечения программного движения робота или с минимальными энергозатратами, или с минимальными усилиями, развиваемыми приводами, или минимальным перемещением рабочего органа [20] и др.

Важность этой задачи подчеркивается еще и тем, что для шагающих движителей характерна нелинейная связь между угловой или линейной скоростью исполнительного двигателя и скоростью курсового движения рабочей точки (стопы) движителя, изменением положения стопы относительно корпуса робота, наличием двух фаз движения: фазы опоры и фазы переноса в новое положение [20], [21].

Так, например, для шагающей машины с инсектоморфными движителями «НМША» (рис. 1.7), разработанной институтом прикладной математики им. М. В. Келдыша АН СССР,



а)



б)

Рисунок 1.7: а) – Шестиногий шагающий макет НМША;

б) – кинематическая схема многоприводного инсектоморфного механизма шагания: 1, 2, 3 – звенья шагающего движителя; 4 – корпус робота.

курсовое перемещение стопы X_{Hj} относительно корпуса робота в фазе ее взаимодействия с опорной поверхностью зависит от работы трех приводов:

$$\left. \begin{aligned} x_{Hj} &= \left[l_1 + l_2 \cos \varphi_{2j} + l_3 \sin \left(\varphi_3 + \varphi_2 - \frac{\pi}{2} \right) \right] \sin \varphi_{1j}; \\ y_{Hj} &= \left[l_1 + l_2 \cos \varphi_{2j} + l_3 \sin \left(\varphi_3 + \varphi_2 - \frac{\pi}{2} \right) \right] \cos \varphi_{1j}; \\ z_{Hj} &= l_2 \sin \varphi_{2j} - l_3 \cos \left(\varphi_3 + \varphi_2 - \frac{\pi}{2} \right). \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

где l_1, l_2, l_3 – длины звеньев механизма; $\varphi_{1j}, \varphi_{2j}, \varphi_{3j}$ – углы поворота роторов приводных двигателей j -го движителя.

Строгие энергетические оценки и оценки усилий, развиваемых приводами в таком движителе, отсутствуют, что объясняется отсутствием учета сил сопротивления движению. Известна лишь оценка мощности приводов, затрачиваемой на поддержание веса робота при известном распределении нормальных нагрузок [13].

Так, при поступательном движении с постоянной скоростью шагающей машины, имеющей инсектоморфные движители, мгновенная мощность W для поддержания веса машины определяется выражениями:

$$\left. \begin{aligned} W &= 0.5W_1 \left(1 + \frac{W_1}{|W_1|} \right) + 0.5W_2 \left(1 + \frac{W_2}{|W_2|} \right), \\ W_1 &= N \left[l_2 \cos \varphi_2 - l_3 \cos (\varphi_2 + \varphi_3) \right] \dot{\varphi}_2, \\ W_2 &= N l_3 \cos (\varphi_2 + \varphi_3) \dot{\varphi}_3 \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

где N – нормальная реакция грунта.

В ортогональных схемах шагающих движителей [13], [22]-[26] также используется несколько приводов для работы движителя. Так, сдвоенный ортогонально-поворотный движитель (рисунок 1.8) включает в себя два ортогональных механизма шагания с двумя вертикальными приводами и приводы поворота плоскости шагания движителя относительно корпуса робота.

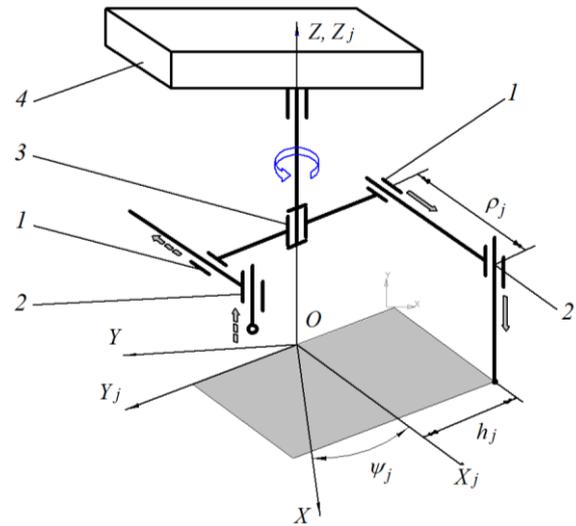


Рисунок 1.8 – Сдвоенный ортогональный движитель (а) и его кинематическая схема (б):

При этом, в [27], [28] показано, что при взаимодействии опоры шагающего движителя с грунтом возникают колебания, параметры которых зависят от характеристик грунта и скорости чередования фаз переноса и опоры опорного элемента. Изменение нормальной реакции грунта за один цикл работы шагающего движителя для упругого грунта представлено на рисунке 1.9.

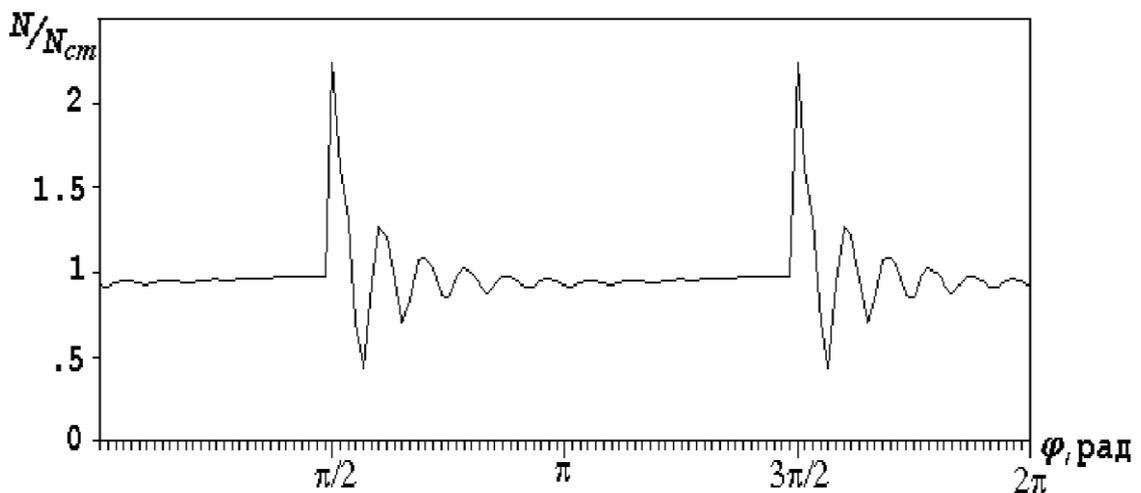


Рисунок 1.9 - Изменение нормальной реакции грунта за один цикл работы шагающего движителя для упругого грунта [29].

Таким образом, **особенностью роботизированных комплексов с движителями шагающего типа** является дискретное изменение положения точки взаимодействия движителя машины с опорной поверхностью. Существуют моменты времени, когда реализуется тяговый режим, и моменты времени, когда движитель находится в фазе переноса и занимает новое положение – происходит чередование фазы переноса и фазы опоры. В этом случае движитель и соответственно его приводы испытывают переменную нагрузку [27]-[29]. Однако даже в фазе реализации тягового усилия положение опорного элемента движителя относительно корпуса также изменяется, что влияет на величину такого тягового усилия.

Так, например, в колесном движителе нагрузка (реакция опоры) на его опорный элемент – колесо – остается постоянной, т.к. в процессе движения центра масс машины перемещаются и колеса. В движителях же шагающего типа опорный элемент – стопа – в фазе опоры остается неподвижной, в то время как центр масс машины перемещается, что обуславливает переменный характер нагрузки в движителе и, соответственно в его приводах (рисунок 1.10).

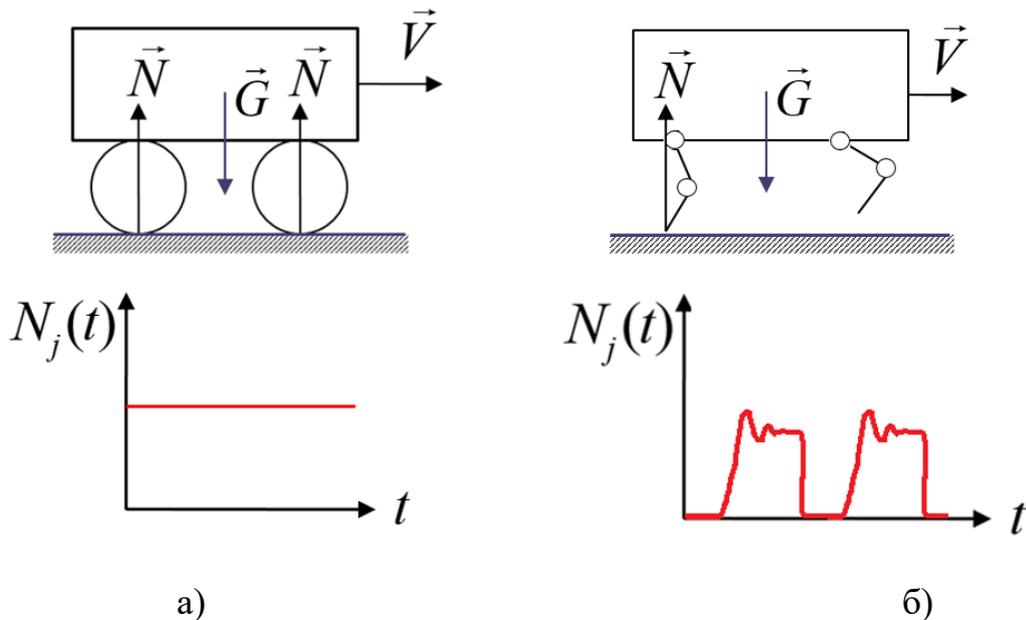


Рисунок 1.10 – Взаимодействие различных движителей с опорной поверхностью: а) – колесного; б) – шагающего типа: $N(t)$ – нормальная реакция опорной поверхности; $V(t)$ – поступательная скорость.

1.2 Тросовые движители

Тросовый привод является одной из наиболее удобных систем дистанционного управления различными агрегатами грузовых автомобилей, автобусов, сельскохозяйственных, строительных машин, судов, требующих нажимного действия. Тросовые движители и приводы находят все большее применение в различных механизмах [30]: коробках передач, манипуляторах, роботах (рис. 1.11).

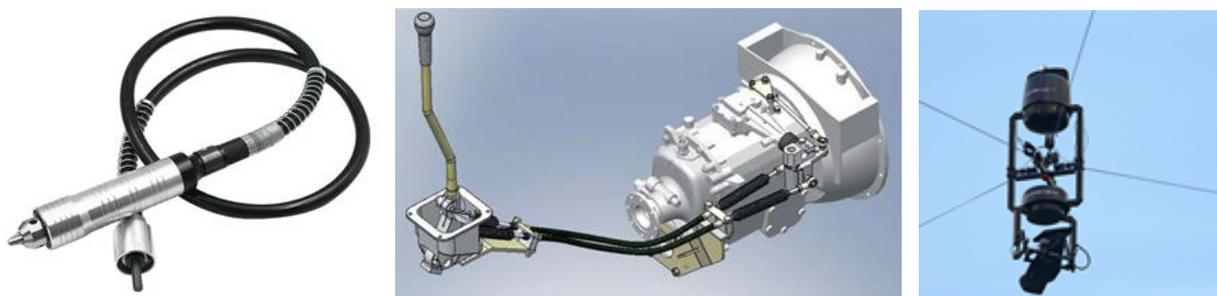


Рисунок 1.11 – Применение тросовых приводов.

Обладая всеми преимуществами ременной передачи: плавность работы, бесшумность, компенсация перегрузок (за счет проскальзывания), легкий монтаж, отсутствие необходимости смазки, тросовые приводы обладают и собственными преимуществами: возможность передачи потока мощности в любом направлении (под любым углом), малый радиус изгиба передачи, возможность развивать значительные вращательные скорости.

Робототехнические комплексы с **кабельным (тросовым) приводом** являются разновидностью параллельных манипуляторов, в которых исполнительными механизмами являются гибкие кабели (тросы). Один конец каждого кабеля закреплен на роторе и намотан на него, а другой конец подсоединяется к рабочему органу.

Преимуществом кабельных манипуляторов является намного меньший вес исполнительных механизмов – тросов – в сравнении с жесткими соединениями, присущими традиционным манипуляторам последовательной или параллельной структуры. Это позволяет использовать кабели

значительной длины, без существенного увеличения веса конструкции. Вследствие применения кабельного привода, исполнительный элемент робота может достигать высоких величин ускорений и скоростей, обеспечивая при этом значительные размеры рабочей зоны.

В многих работах [31]-[36] рассматривалась кинематика и динамика кабельных роботов. Динамический анализ кабельных роботов отличается от анализа других роботов параллельной структуры ввиду того, что кабельный привод оказывает только тянущее воздействие на объект и не может обеспечивать толкающего. Таким образом, роботом совершается работа только в том случае, если усилия во всех его тросах принимают неотрицательные значения, т.е. натянуты. Многие исследования были посвящены анализу рабочего пространства и оптимизации кабельных роботов.

Рабочую зону и управляемость кабельных роботов можно улучшить, увеличив число кабелей в конструкции робота. Следовательно, избыточность приводов играет ключевую роль в разработке кабельных роботов. Для обеспечения однозначного управления положением и ориентацией рабочего органа кабельного робота в пространстве необходимо не менее 6 связей, соединенных с ним. При меньшем числе тросов контролируется только положение рабочего органа, но не его ориентация, что в ряде задач является приемлемым. При этом управление роботом с недостаточным количеством управляющих воздействия часто является более сложным [42].

Наиболее широко в настоящее время тросовые приводы распространены в системах позиционирования камер над стадионами – системы SpiderCam, SKYCAM (рис. 1.12). В таких системах, как правило, камера позиционируется 4 тросами, каждый из которых соединен со своим независимым электроприводом. Управление всеми четырьмя электроприводами осуществляется с единого вычислительного устройства.

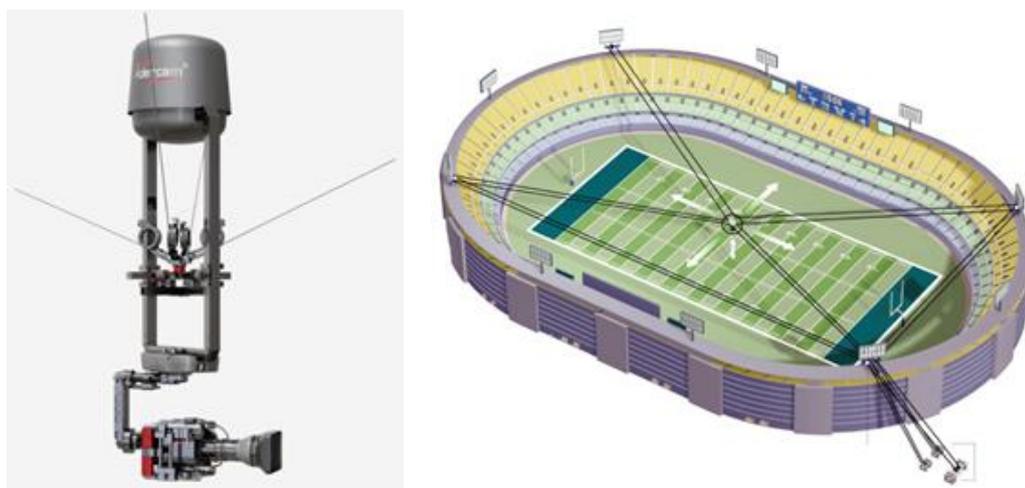


Рисунок 1.12 – Системы позиционирования камер над стадионами.

В настоящее время известны кабельные симуляторы (рис. 1.13), предназначенные для имитации полета [39].

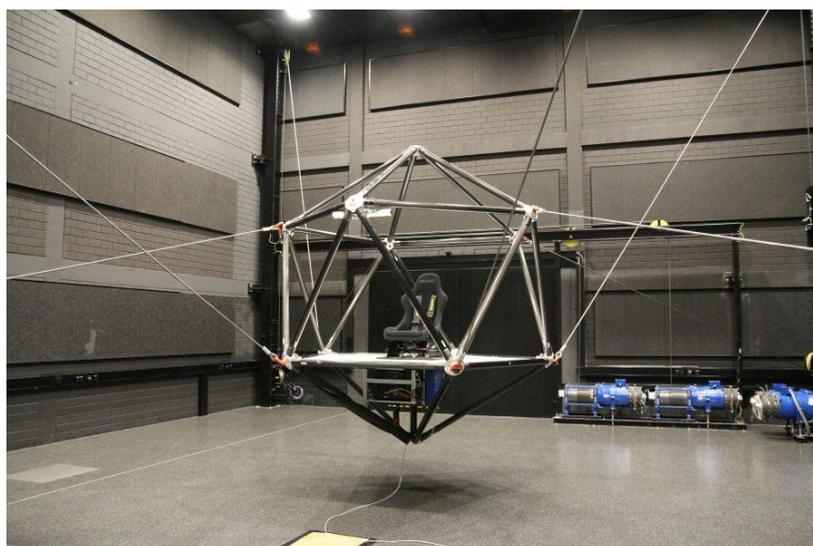


Рисунок 1.13 – Кабельный симулятор полета.

Тренажер, разработанный Fraunhofer IPA совместно с департаментом биологической кибернетики института Макса Планка (Германия), – побочный, демонстрационный результат проекта по реализации концепции кабельного транспорта для перемещения по крупным объектам.

Данный симулятор полета представляет собой кабину весом 80 кг, подвешенную на роботизированной системе тросов. Приводы тросов – лебедки мощностью 467 л.с. – создают тягу до 1,4 тонны, обеспечивая

мгновенное ускорение до 420 м/с^2 в любом направлении. Подобные величины нереализуемы на стационарных симуляторах на основе платформы Стюарта.

В [31] рассмотрено семейство роботов IPAnema для погрузочно-разгрузочных и сборочных операций (рис. 1.14).



Рисунок 1.14 – Семейство роботов IPAnema:

а) – IPAnema1; б) – IPAnema2;

Известны также различные кабельные роботы [32]-[35]. Так, в [33] представлен кабельный робот параллельной структуры для 3D печати (рис. 1.15).



Рисунок 1.15 – Кабельный робот параллельной структуры для 3D печати.

В [42] представлен отечественный кабельный робот. Прототип тросового робота, разработанный в Университете Иннополис совместно с компанией ARCODIM (рисунок 1.16), представляет собой модульную реконфигурируемую систему, оснащённую четырьмя управляемыми лебедками и допускающую до 12 лебедок в узловые точки рамы. Система управления построены на основе комплектующих фирмы Omron.



а)



б)

Рисунок 1.16 – Прототип тросового робота (а), разработанного в университете Иннополис, и его механизм намотки (б).

1.3 Движители подводных роботов

Среди наиболее распространенных можно выделить следующие типы движителей подводных роботов:

- винтовые;
- водометные;
- колесные;
- гусеничные;
- шагающие.

Самые распространенные – винтовые и водометные движители – характеризуются простотой конструкции и системы управления [44]-[46]. Число движителей может варьироваться в зависимости от общего назначения подводного аппарата и функций каждого движителя в отдельности (рисунок 1.17). Такие движители могут быть как основными – тяговыми, так и вспомогательными – подруливающими и направляющими.



Рисунок 1.17 – Многоприводные винтовые движители подводных роботов.

Основное преимущество такого типа движителей – способность изменения вектора тяги [47]. Однако, применение водометных, винтовых и гребных колесных движителей возможно для подводных роботов, обладающих мореходными качествами, и требуют особого расчет, а при мощных течениях или иной возмущающей внешней силе (например, при работах в зоне истечения подводного флюида) водометные и винтовые

двигатели требуют дополнительных управляющих воздействий и, соответственно, энергозатрат для надежного позиционирования робота относительно грунта. управляемость аппаратов с винтовыми и водометными двигателями резко снижается. Увеличение массы же аппарата для решения этой задачи (за счет приема балласта) увеличивает энергозатраты на маневры [48].

Для проведения работ на морском грунте наибольшее распространение получили колесные и гусеничные двигатели автономных подводных аппаратов. Известны различного типа подводные бульдозеры, экскаваторы, кабелеукладчики, а также донные самоходные добычные агрегаты (рисунок 1.18). Большинство подводных бульдозеров разработаны японскими фирмами («Hitachi», «Komatsu», «Sumimoto» и др.), специализирующимися на производстве наземных бульдозеров. В глубоководных бульдозерах, например в Komatsu UB, в качестве тягового привода используется трехфазный электродвигатель, погруженный в масло. Электропитание осуществляется по кабелю.



а)



б)

Рисунок 1.18 – Многоприводные двигатели подводных аппаратов для работ на морском грунте: а) – колесные; б) – гусеничные.

Эксплуатация подводных гусеничных и колесных автономных аппаратов показывает, что условия морского дна, характеризующиеся сложным рельефом и низкой несущей способностью грунтов, зачастую делают непригодными традиционные типы движителей. Так, гусеничные машины могут работать только на плотных грунтах с небольшими уклонами дна [49]. Маневры таких аппаратов также чреваты попаданием посторонних предметов в элементы движителя, что приводит либо к его заклиниванию, либо к частичной неработоспособности (схождение или обрыв гусеницы).

В связи с этим для проведения работ на морском грунте наиболее удачным является применение подводных аппаратов с движителями шагающего типа. В сравнении с гусеничными и колесными движителями, шагающие обладают более высокими возможностями по грунтовой и профильной проходимости [50–55]. Подводные аппараты с движителями шагающего типа также характеризуются меньшими энергозатратами для совершения перемещения - в отличие от колесных и гусеничных, грунт не является препятствием для их движения, а лишь требует необходимых затрат мощности на прессование [56].

Разработка подводных аппаратов с движителями шагающего типа ведется в различных странах [5], [57]. Наиболее известные аппараты – Ariell-II (США), Crabster CR200I (Южная Корея), Silver2 (Италия), МАК-1 (Россия) (рисунок 1.19).

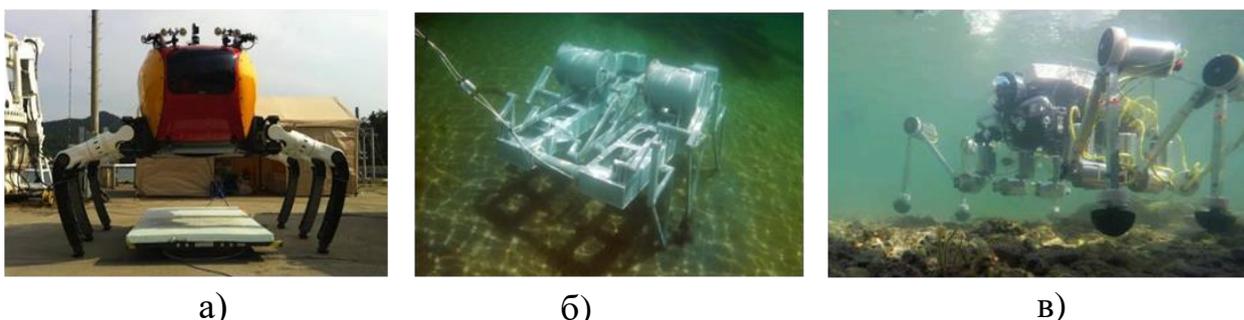


Рисунок 1.19 – Подводные аппараты с шагающими движителями:

а) – Crabster CR200I (Южная Корея); б) – МАК-1 (Россия);

в) - Silver2 (Италия).

Одним из перспективных направлений применений подводных аппаратов с движителями шагающего типа может быть разведка и добыча полезных ископаемых на континентальном шельфе [7], [9], [58], [59]. Применение тяжелых самоподъемных оснований подводных буровых комплексов при значительном количестве точек бурения (более сотни) в этом случае экономически нецелесообразно, а применение легких самоподъемных добычных комплексов характеризуются недостаточной безопасностью.

В [58] показана концепция применения роботизированной шагающей платформы с ортогональными движителями, которые характеризуются высокими показателями энергетической эффективности в сочетании с относительно простым способом адаптации к опорной поверхности, а также концепция применения нескольких таких платформ для перемещения общей нагрузки (рисунок 1.20).



Рисунок 1.20 – Концепция применения нескольких роботизированных шагающих платформ для осуществления совместной полезной работы на морском грунте [58].

1.4 Якорно-тросовый движитель

К одной из перспективных технологий добычи и разведки новых месторождений углеводородов на континентальном шельфе можно отнести применение автономного подводного робототехнического комплекса с якорно-тросовыми движителями [9], [12]. Якорно-тросовый движитель сочетает в себе преимущества движителей шагающего типа - более высокие возможности по грунтовой и профильной проходимости, а также обладает всеми достоинствами кабельного привода – высокая динамика. Концепт такого аппарата представлен на рисунке 1.21.

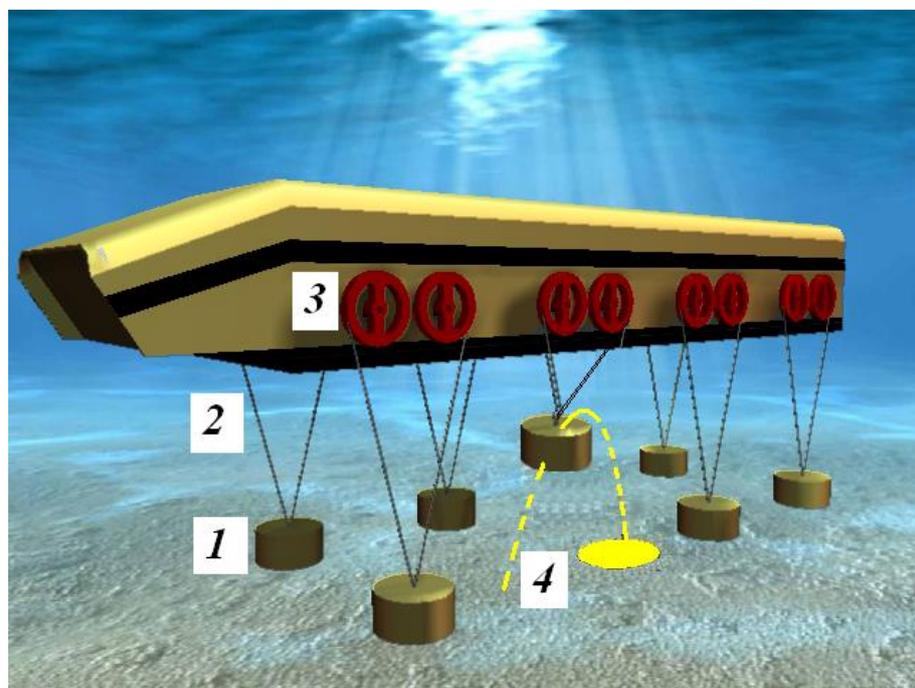


Рисунок 1.21 – Мобильный подводный робот с якорно-тросовыми движителями: 1 – якорь; 2 – тросы; 3 – маховики; 4 – траектория переноса якоря.

Принцип работы якорно-тросового движителя схож с принципом работы шагающего движителя. Отличие состоит в том, что опорная поверхность в якорно-тросовом движителе – якорь – не жестко закреплен с

приводом, а связана с ним тросами. Чередование фаз переноса и опоры якорей позволяет осуществлять перемещение робота методом «подтягивания» к опорному якорю.

Якорно-тросовый движитель может быть использован для перемещения автономного подводного или надводного робототехнического комплекса за счет тяги, возникающей вследствие натяжения тросов, идущих к якорю (рис. 1.22).

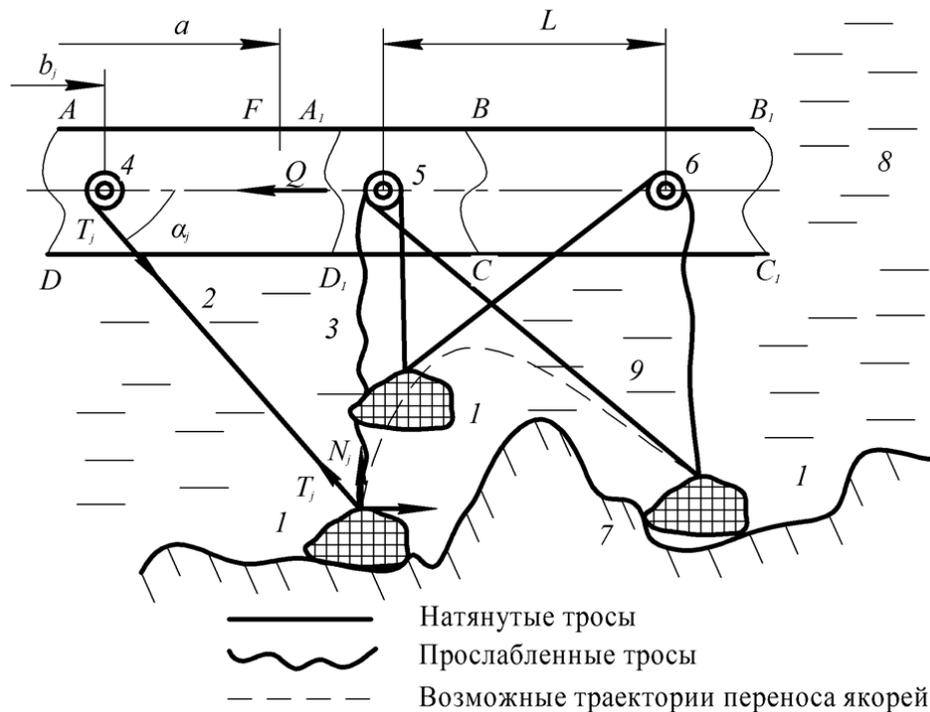


Рисунок 1.22 - Кинематическая схема якорно-тросового движителя мобильного робота с положительной плавучестью: $ABCD, A_1B_1C_1D_1$ – соответственно исходное и последующее положение фрагмента робота; 1 – якорь; 2, 3 – тросы; 4, 5, 6 – управляемые маховики; 7 – профиль дна; 8 – водная среда; 9 – траектория переноса якоря.

Работа якорно-тросового движителя аналогична работе шагающего с той лишь разницей, что платформа не опирается на него, а цепляется с помощью него за опорную поверхность.

Движителем является якорь, двумя тросами 2 и 3 связанный с вращающимися в соответствии с определенными законами маховиками приводов. В исходном положении трос 3 прослаблен, якорь при отсутствии течения занимает положение на одной вертикали с маховиком 5. При вращении маховика трос 2 натягивается и при отсутствии проскальзывания якоря по дну, происходит перемещение мобильного робота. На рисунке 1 показан фрагмент мобильной платформы с якорно-тросовым движителем $ABCD$, которая перемещается в положение $A_1B_1C_1D_1$ таким образом, чтобы ось маховиков 4 в новом положении совпала с осью маховика 5 в исходном. Ось маховика 5 перемещается в положение 6. Затем совместным согласованным управлением маховиками осуществляется перемещение якоря в новое положение. Далее описанный цикл повторяется.

Для якорно-тросовых движителей в тросе, работающем тяговом режиме, генерируется усилие T_j , зависящее от курсового перемещения робота-понтонна усилий в тросах других движителей, зависящих от реализуемой походки [8] и силы сопротивления движению Q :

$$T_{jx} = T_j \cdot \cos \alpha_j, \quad \alpha_j = \alpha_j(x) \quad (1.3)$$

Учитывая, что T_{jx} зависит и от силы сопротивления движению, определяемой скоростью, в общем случае:

$$T_{jx} = T_{jx}(x, \dot{x}, Q) \quad (1.4)$$

Конкретный вид зависимости (1.4) зависит от распределения усилий между движителями [10].

Особенностью робототехнических систем с якорно-тросовыми движителями является применение избыточного, с точки зрения обеспечения задаваемого движения платформы робота, количества движителей, что

объясняется необходимостью надежного взаимодействия якорей с трудно прогнозируемым рельефом дна и его физико-механическими свойствами.

В общем случае, количество двигателей определяется весом мобильного робота-понтон, тяговыми свойствами двигателя конкретного конструктивного исполнения, а также требованиями к маневренности [11], [12].

Для однозначного описания движения абсолютно твердого тела необходимо минимум 6 управляющих воздействий (для платформы робота – 6 якорно-тросовых двигателей, рис. 1.23).

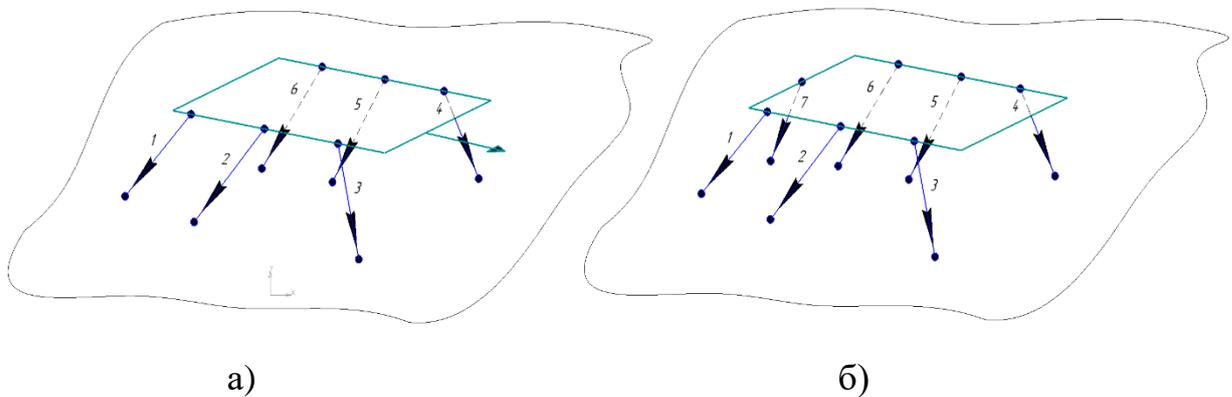


Рисунок 1.23 – Динамическая неопределенность при избыточном числе N тросовых двигателей: а) $N = 6$; б) $N > 6$.

В случае отсутствия надежного взаимодействия хотя бы одного якоря с грунтом, движение робота становится неопределимым. Поэтому в силу превышения числа управляющих воздействия над количеством обобщенных координат, имеет место динамическая неопределенность.

Однако, в решении технической задачи эта неопределенность является полезной. Она позволяет накладывать дополнительные условия на управляющие воздействия, оптимальные в том или ином смысле.

Решением такой динамической неопределенности является установление дополнительных соотношений между усилиями, развиваемыми тросами в том или ином двигателе. Такое соотношение может быть задано

априорно [84] на основе конструктивных особенностей, определяемых конкретной реализацией движителей и робота-понтонa, либо устанавливаться в процессе поиска оптимума какой-либо целевой функции.

Таковыми целевыми функциями т.е. критериями оптимального распределения между несколькими движителями могут быть:

- минимизация суммарных энергозатрат в цикле «опора-перенос» движителя;
- ограничения, налагаемые при поворотах робота-понтонa на величины угловых скоростей или ускорений (обеспечение плавности маневрирования);
- ограничения на величины углов крена или дифферента (курсовая и/или поперечная остойчивость).

1.5 Способы управления распределением тяговой нагрузки между двигателями машин.

Задачи распределения совместной нагрузки между несколькими двигателями транспортных машин не нова (рисунок 1.24) – во многих технических системах применяются многоприводные схемы для реализации передачи мощности на общий приводной механизм.

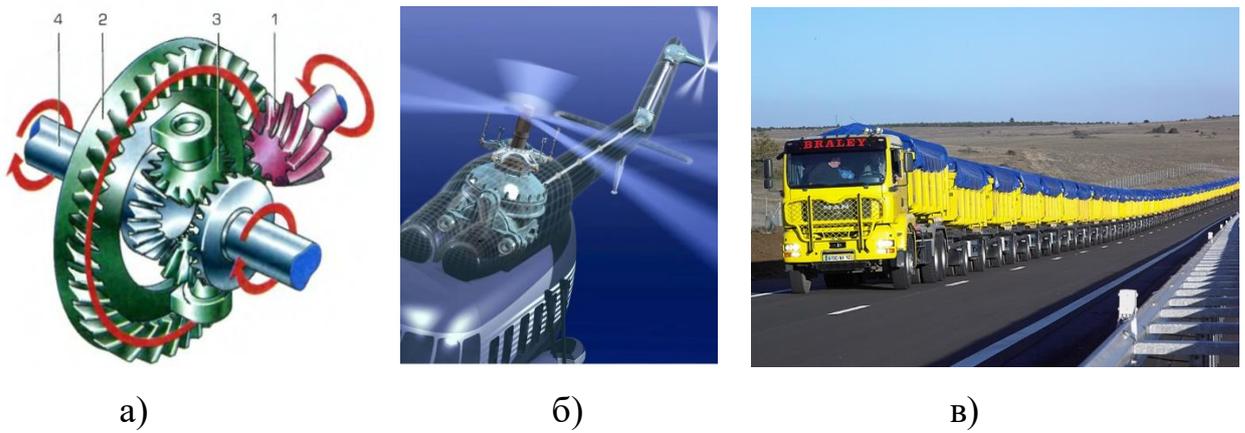


Рисунок 1.24 – Типичные технические системы с распределением совместной нагрузки между несколькими приводными элементами: а) – автомобильный дифференциал; б) – главный редуктор вертолета; в) - автопоезд с активными прицепами.

Простейшим примером распределения нагрузки являются **автомобильные дифференциалы** различных типов, служащие для регулирования «потока» мощности двигателя на два и большее число двигателей, – для автомобиля – колес [60-62].

При этом в простом колесном дифференциале система управления распределением мощности между двигателями (колесами) отсутствует.

Примером управляемого распределения нагрузки в простейшем случае может также служить автомобильный дифференциал, но с повышенным внутренним сопротивлением (дифференциал ограниченного проскальзывания, LSD). Критерием управления распределением нагрузки в

таким дифференциале является величина сцепления двигателя с опорной поверхностью – большая мощность будет передаваться на колесо с наименьшим проскальзыванием относительно дороги. Определение колеса с наилучшим сцеплением с дорогой осуществляется на основе сравнения отталкивающих осевых сил, возникающих в парах конических передач сателлитов и полуосей, которые тем больше, чем больше крутящий момент (в паре с полуосью с наилучшим сцеплением). Действие этой осевой силы на пакет фрикционных дисков осуществляет блокировку коронной шестерни дифференциала с соответствующей полуосью. Однако управление распределением нагрузки в таком дифференциале условно, т.к. конструктивно выделенные элементы системы управления отсутствуют (дифференциал с повышенным внутренним сопротивлением относится к самоблокирующимся).

Активное управление распределением нагрузки реализовано в автомобильных дифференциалах с принудительной блокировкой. Активация блокировки такого дифференциала осуществляется по команде электронного блока управления на основании измерений датчиками крутящих моментов (угловых скоростей) либо водителем транспортного средства непосредственно (вручную). Известны также дифференциалы с электромеханической системой принудительной блокировки, где для сцепления полуосей с корпусом используется электромагнитная муфта.

При рассмотрении автомобильного дифференциала как объекта управления распределением нагрузки, в качестве управляемого параметра можно выделить степень свободы движения корпуса дифференциала, сателлитов и полуосевых шестерней относительно друг друга – коэффициент блокировки, а в качестве управляющего параметра – соотношение крутящих моментов или угловых скоростей ведомых полуосей $M_{лев}^{кр} / M_{пр}^{кр}$, $\omega_{лев} / \omega_{пр}$.

Коэффициент блокировки характеризует соотношение моментов на отстающем и на забегающем колесах. Для простого межколесного дифференциала он равен единице — такой дифференциал делит крутящий

момент между полуосями поровну. Для самоблокирующихся дифференциалов коэффициент блокировки обычно составляет от 1 до 5, т.е. при наивысшем коэффициенте такой дифференциал может реализовать на отстающем колесе в пять раз больше крутящий момент, чем на забегающем.

Оптимизация режима движения колесных движителей по криволинейным траекториям (при поворотах) реализована в системе активного распределения крутящего момента (Active Torque Transfer System, ATTS). На нужную ось перераспределяется от 30 до 70% крутящего момента, на одно из задних колес – от 0 до 100%. В обычных условиях до 70% крутящего момента передается на передние колеса. При больших ускорениях до 70% крутящего момента поступает на заднюю ось для улучшения динамики разгона и одновременной стабилизации движения. При ускорении в повороте почти 100% крутящего момента может передаваться на заднее внешнее колесо.

Во многих работах проводится исследование распределения мощности между ведущими мостами в машинах с колесными движителями [63]-[66], при этом основополагающую роль играют сцепные свойства грунтов [67]. В [64] представлено распределение сил тяги между тягачом и прицепами в **активном автопоезде**, в котором на прицепах имеются ведущие мосты, включающиеся для улучшения проходимости на отдельных грунтах. Для определения необходимого характера распределения сил тяги между тягачом и прицепами вводится коэффициент β распределения тяговых усилий:

$$\beta = \frac{P_{кп}}{\sum_{m=1}^3 P_{km}}, \quad (1.5)$$

где P_{km} – тяговые усилия тягача, $P_{кп}$ – тяговые усилия прицепа.

Для сравнительной оценки эффекта включения активного привода введено понятие коэффициента эффективности $k_{эф}$ использования активного привода прицепа, который характеризует рост силы тяги на крюке при включении ведущих осей прицепа. При этом значительную роль на значение коэффициента эффективности $k_{эф}$ влияет относительные массы тягача и прицепов ($k_{ам}$). Зависимость коэффициента эффективности использования активного привода прицепа от удельной массы тягача представлена на рисунке 1.25.

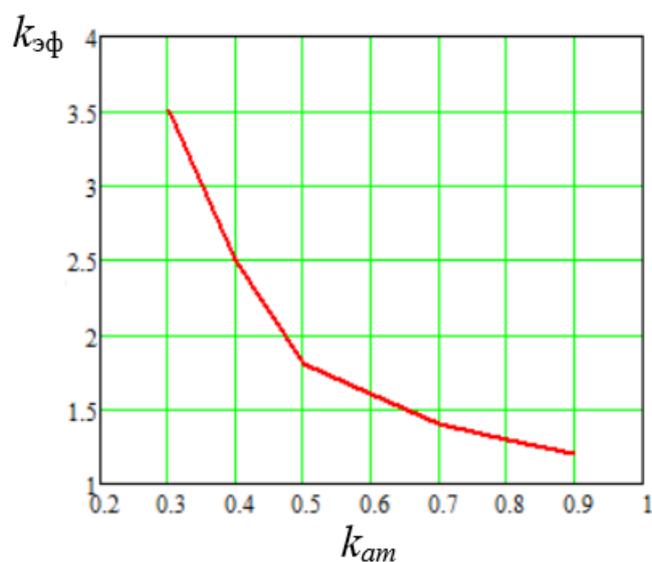


Рисунок 1.25 – Зависимость коэффициента эффективности использования активного привода прицепа автопоезда от удельной массы тягача [64].

Таким образом, в [64] показано, что эффективность включения ведущих мостов активных прицепов и, следовательно, эффективность распределения тяговых усилий в автопоезде, зависит от относительной массы такого прицепа.

В [65] представлена многокритериальная оптимизация распределения мощности между двигателями колесных машин. В качестве цели при поиске распределения мощности между ведущими колесами, сформулирован принцип пропорциональности буксований ведущих колес. Целевая функция оптимизации имеет вид:

$$F(k_p^0) = \min_{k_p} \max_i \{f_i(k_p)\}, \quad i = 1, n, \quad (1.6)$$

где k_p – коэффициент распределения мощности; $f_i(k_p)$ – частные критерии оптимизации. При этом, в процессе поиска оптимальных законов распределения мощности между ведущими колесами, обеспечивающими максимальную эффективность, учитывается ряд ограничений: обеспечение принципиальной возможности движения машины; ограничения, накладываемые на сцепные свойства машины; ограничения, накладываемые на допустимые величины буксования колес. Зависимости коэффициента оптимального распределения мощности от массы колесной машины и силы внешних сопротивлений движению представлены на рисунке 1.26.

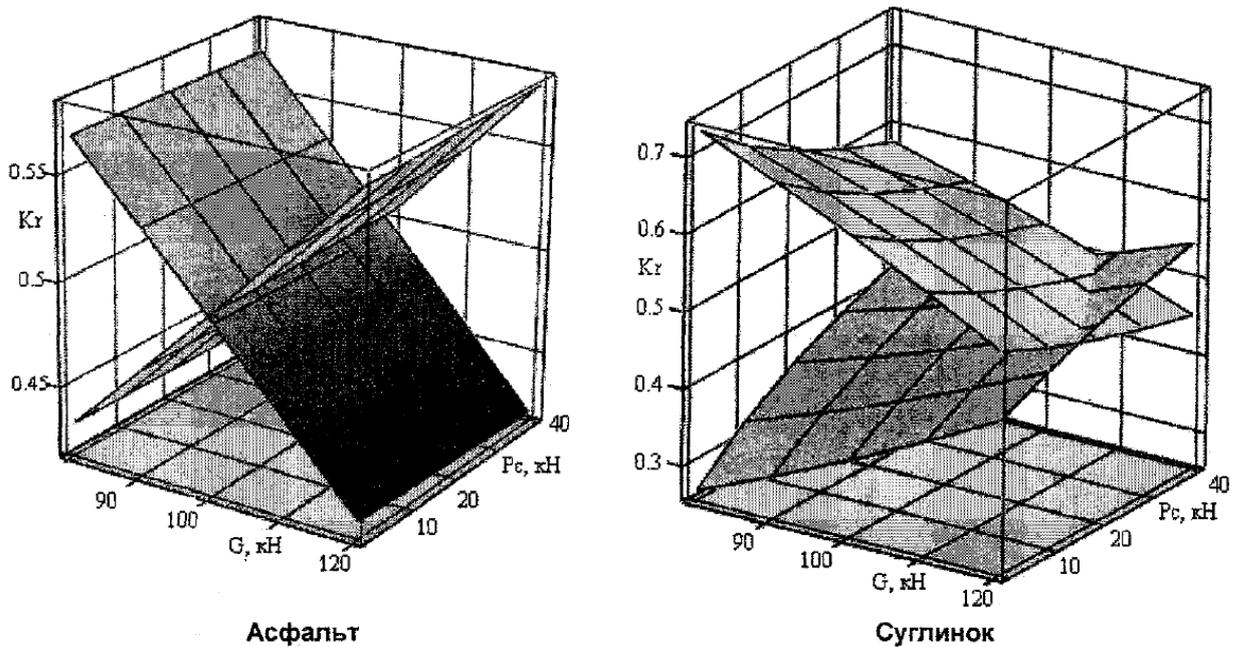


Рисунок 1.26 - Зависимости коэффициента оптимального распределения мощности от массы колесной машины (G) и силы внешних сопротивлений движению (P_c) [65].

Таким образом, в [65] показано, что при увеличении массы машины, а также при увеличении внешних сил сопротивления движению, доля

крутящего момента, приходящегося на колеса переднего моста, уменьшается (рисунок 1.26).

Возможны и варианты, когда каждый движитель приводится в движение своим двигателем [68]-[70], или несколькими двигателями. Простейшим примером такого случая может быть применение **мотор-колес** (рисунок 1.27).

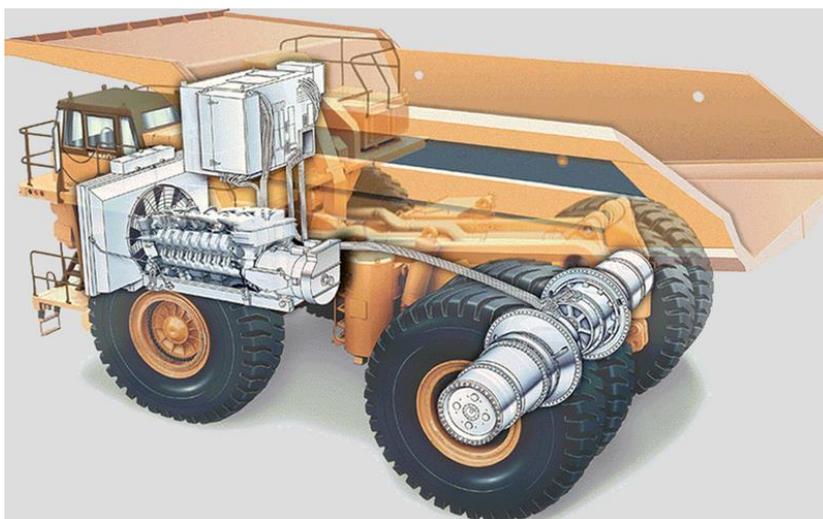


Рисунок 1.27 – Установка мотор-колес в заднем мосте карьерного самосвала «БелАЗ».

Другим ярким примером многодвигательных машин являются **мультикоптеры**. Распределение тяговых усилий между несущими винтами в мультикоптерах определяется их конструкцией, числом несущих винтов и требуемыми в данный момент значениями проекций векторов линейной и угловой скоростей. Так, например, для октокоптера (рис. 1.28) управляющее воздействие на j -ю винтомоторную группу $u_j(t)$ и матрица распределения усилий между ними Γ имеет вид:

$$u_j(t) = \Gamma \cdot \omega_j^2(t), \quad \Gamma = \begin{pmatrix} f_{1x} & \dots & f_{8x} \\ f_{1y} & \dots & f_{8y} \\ f_{1z} & \dots & f_{8z} \\ m_{1x} & \dots & m_{8x} \\ m_{1y} & \dots & m_{8y} \\ m_{1z} & \dots & m_{8z} \end{pmatrix}, \quad j=1\dots 8. \quad (1.7)$$

где f_j , m_j – коэффициенты пропорциональности между квадратом угловой скорости ω_j^2 j -й винтомоторной группы, и тяговым усилием и соответственно моментом, развиваемыми ею.

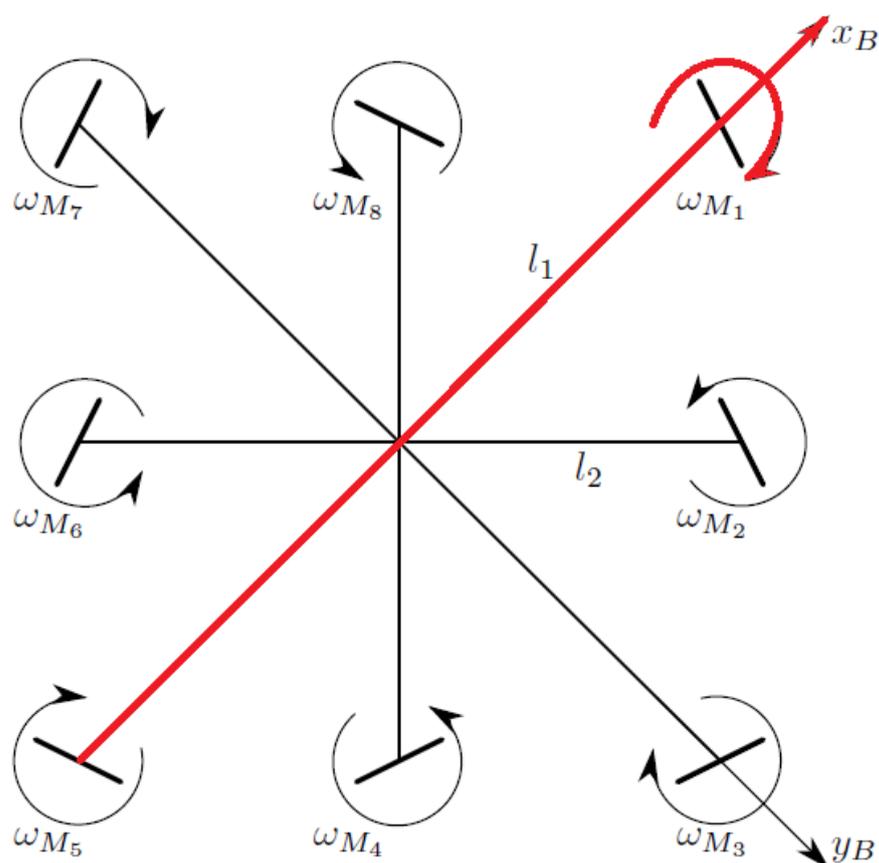
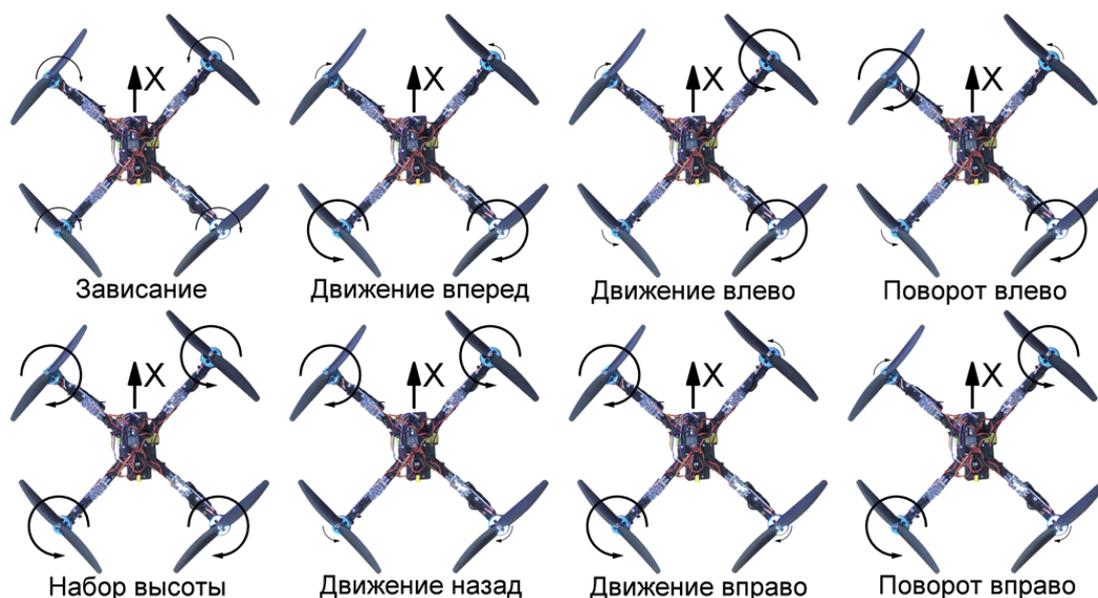


Рисунок 1.28 – Схема расположения винтомоторных групп в октокоптере и связанная с ним система координат.

В соответствии (1.7), 1-я винтомоторная группа M_1 в схеме октокоптера на рис. 1.26 не создает силы и момента вдоль оси X , т.е. при задании общего вектора скорости вдоль оси X или вращательного момента вдоль нее она не

используется. Задействование винтомоторных групп квадрокоптера при различных заданных направлениях полета представлено на рисунке 1.29.



1.29 - Задействование винтомоторных групп квадрокоптера при различных заданных направлениях полета.

Подводные аппараты также снабжаются многодвижительными системами. В [48] представлена задача декомпозиции управления движением автономного необитаемого подводного аппарата. Рассматриваемый подводный аппарат снабжен четырьмя маршевыми движителями, используемыми для управления величинами курса, дифферента и хода. Для распределения эффективности движителей между этими регуляторами (степени задействования движителей) введены коэффициенты «порционного» распределения.

1.6 Способы управления распределением общей нагрузки во взаимосвязанном электроприводе

Известны робототехнические комплексы, в которых каждый отдельный движитель приводится в действие несколькими электродвигателями, работающими совместно [75]-[77]. Такой привод называется **многосвязным (взаимосвязанным) электроприводом**. Структура многосвязного электропривода с общей нагрузкой представлена на рисунке 1.30 [78].

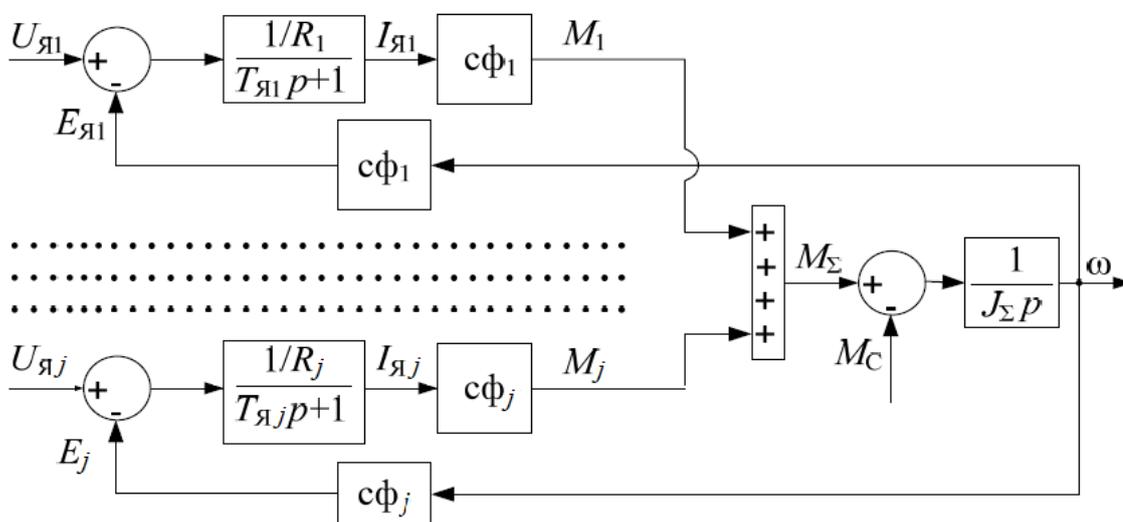


Рисунок 1.30 – Структура многосвязного электропривода с общей нагрузкой: J – момент инерции; $T_я$ – постоянная времени; $U_я$ – управляющее напряжение; E – ЭДС; $сф$ – произведение конструктивной постоянной электродвигателя и магнитного потока; p – переменная Лапласа.

В общем, решение задачи распределения общей нагрузки между асинхронными электроприводами, управляемыми преобразователями частоты, зависит от схемы подключения такового [80].

Как правило, вариант многодвигательного электропривода с групповым преобразователем частоты применяется для двигателей одинаковой мощности, с близкими к друг другу характеристиками

скольжения. В других случаях для выравнивания нагрузки и управления соотношениями моментов нагрузки механически взаимосвязанных электроприводов применяются индивидуальное управление каждым электродвигателем своим преобразователем. В такой структуре управления взаимосвязанным электроприводом существует несколько возможностей (рисунок 1.29) решения задачи управления распределения моментов между электродвигателями.

На рисунке 1.31 представлена схема управления распределения моментов между электродвигателями, при которой один из приводов является ведущим, - в нем реализуется схема управления скоростью (посредством регулятора скорости) и моментом (посредством блока управления моментом). Ведомые же приводы, вращающиеся с той же скоростью что и ведущий, реализуют только заданный момент, пропорциональный задающим коэффициентам $k_{смj}$.

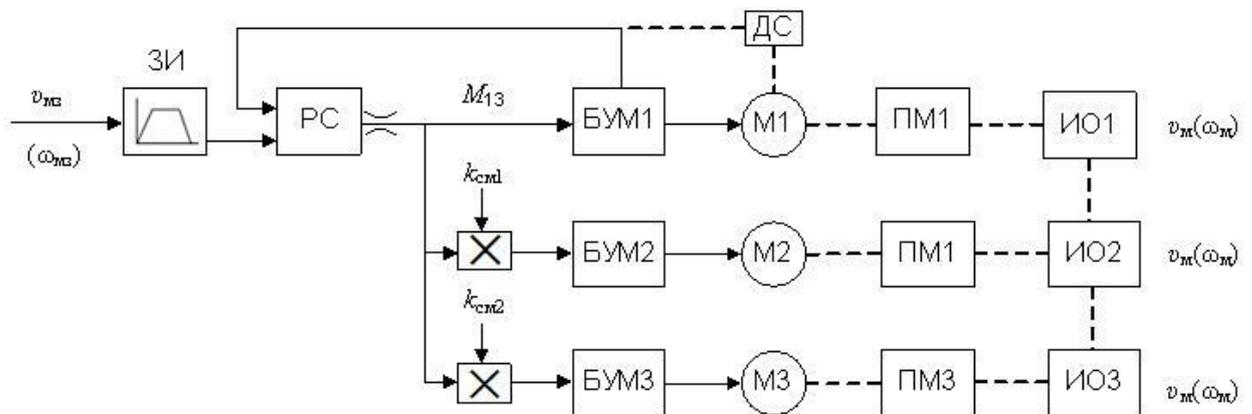


Рисунок 1.31 – Схема управления распределением совместной нагрузки во взаимосвязанном электроприводе с подчиненным управлением:

РС – регулятор скорости; ДС – датчик скорости; ЗИ – задатчик интенсивности; БУМ – блок управления моментом; РСМ – регуляторы соотношения моментов; ПМ – преобразовательный механизм; ИО – исполнительный орган [80].

Недостатком указанной схемы с ведущим и ведомыми электродвигателями (рисунок 1.31) является ускорения ведомых электроприводов при нарушении механических связей между электродвигателями.

Такой недостаток устраняется в других схемах управления взаимосвязанным электроприводом (рисунки 1.32, 1.33), где управление каждым электродвигателем осуществляется по структуре управления ведущим приводом.

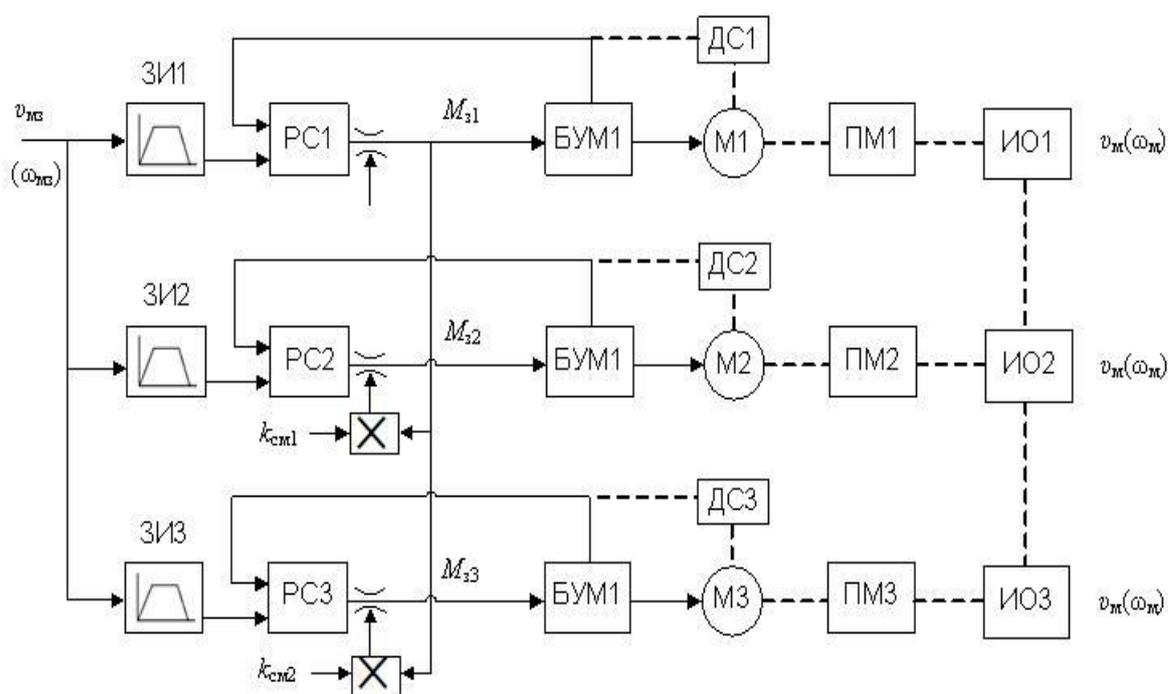
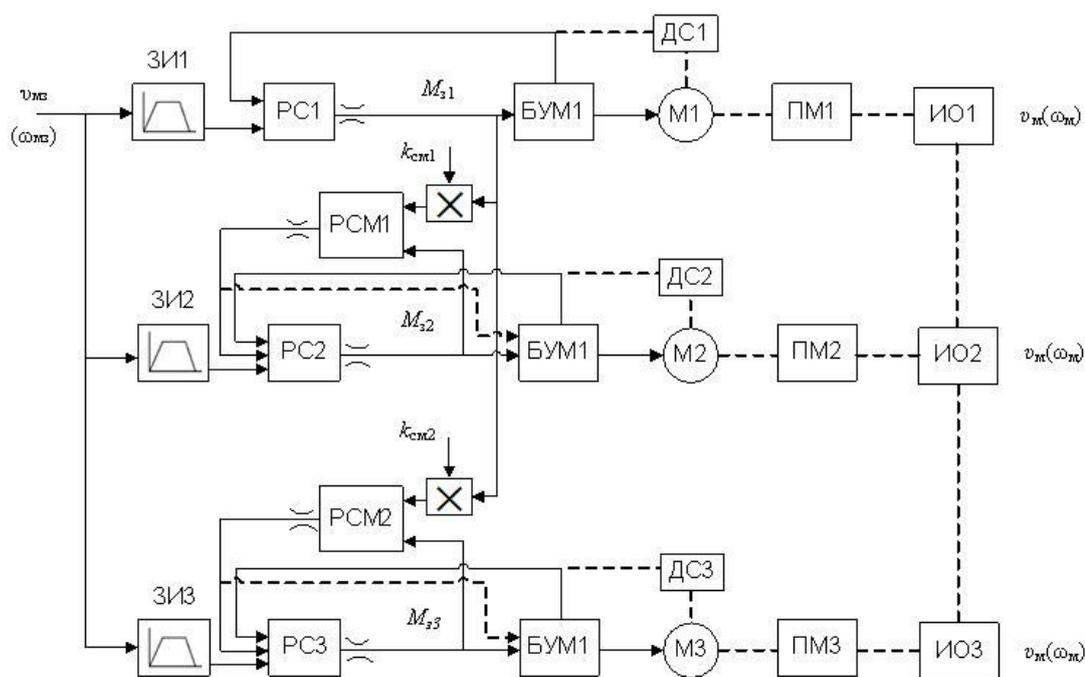


Рисунок 1.32 – Схема управления распределением совместной нагрузки во взаимосвязанном электроприводе по структуре управления ведущим приводом: РС – регулятор скорости; ДС – датчик скорости; ЗИ – задатчик интенсивности; БУМ – блок управления моментом; РСМ – регуляторы соотношения моментов; ПМ – преобразовательный механизм; ИО – исполнительный орган [80].



в)

Рисунок 1.33 - Схемы управления распределением совместной нагрузки во взаимосвязанном электроприводе: РС – регулятор скорости; ДС – датчик скорости; ЗИ – задатчик интенсивности; БУМ – блок управления моментом; РСМ – регуляторы соотношения моментов; ПМ – преобразовательный механизм; ИО – исполнительный орган [80].

В [79] показано, что при согласованности скоростей идеального холостого хода электродвигателей ω_{0j} и привода $\omega_{0\Sigma}$ ($\omega_{01} = \omega_{02} = \omega_{0j} = \omega_{0\Sigma}$), распределение нагрузок во взаимосвязанном электроприводе не зависит от характера их изменения, и пропорционально жесткостям механических характеристик β_j :

$$M_j / M_\Sigma = \beta_j / \beta_\Sigma. \quad (1.8)$$

При отсутствии согласования скоростей холостого хода, выравнивание лишь жесткостей механических характеристик электродвигателей не приводит к пропорциональному распределению нагрузок:

$$\frac{M_j}{M_\Sigma} = \frac{P_j^{НОМ} (\omega_{0j} - \omega_j)}{P_\Sigma^{НОМ} (\omega_{0\Sigma} - \omega_j)}. \quad (1.9)$$

Пропорциональность распределения крутящих моментов изменяется при изменении угловой скорости ω_j электродвигателя. При этом относительное изменение нагрузки на привод составляет [79]:

$$\delta M = \left(\frac{(\omega_{0j} - \omega_j) \beta_j}{\alpha_j M_c} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (1.10)$$

где α_j – коэффициент кратности нагрузок j -го электродвигателя.

Интересная задача подъема груза двумя кранами рассмотрена в [82]. Механическая система кранов, закрепленных на мостах, и одновременно поднимающих общий груз, представлена системой с демпфирующими элементами (рисунок 1.34а). Изменение сил натяжения канатов при моделировании совместного подъема груза массой 20 т представлено на рисунке 1.34б.

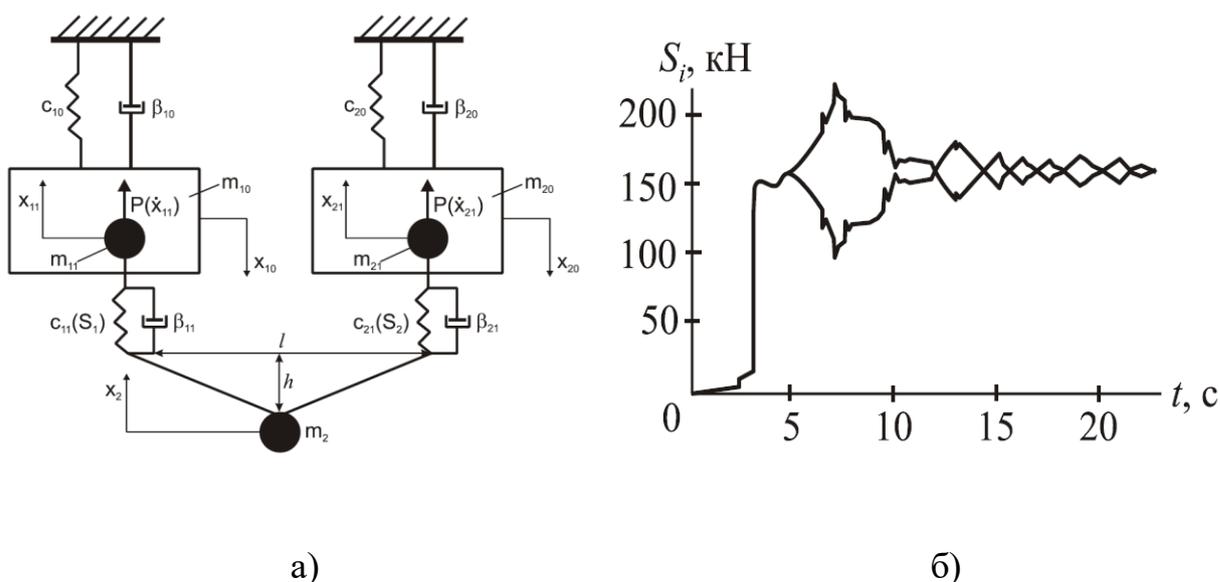


Рисунок 1.34 – Моделирование совместного подъема груза массой 20 т двумя кранами: а) – расчетная схема; б) – изменение сил натяжения канатов.

1.7 Заключение по первой главе

Особенностью современных мобильных робототехнических комплексов является применение нескольких двигателей в качестве тяговых механизмов, обеспечивающих движение. Согласованная работа таких механизмов обеспечивается применением различных устройств и систем управления. При этом общее тяговое усилие, развиваемое роботом, распределяется между различными двигателями, а также между приводами в составе каждого двигателя в случае применения многоприводного двигателя. В зависимости от типа используемого двигателя существуют различные способы и критерии такого распределения совместной тяговой нагрузки.

Особенностью машин с двигателями шагающего типа является ярко выраженный переменный характер нагрузки, действующей в таком двигателе, – нормальной реакции опорной поверхности, которая нестационарна ввиду чередования фазы опоры и фазы переноса двигателя.

Из проведенного анализа на основе работ Охоцимского Д.Е., Голубева Ю.Ф., Шнейдера А.Ю., Д.М. Гориневского, Н.В. Умнова, В.В. Лапшина, Е.С. Брискина, В.В. Жоги, В.В. Чернышева, А.В. Малолетова и др. установлено, что ранее решалась задача распределения вертикальных и касательных составляющих опорных реакций шагающих машин. Основой решения являются задаваемое программное движение робота и некоторые дополнительные условия, например, принцип совместности деформаций, минимум суммы квадратов величин опорных реакций, равенство касательных реакций и др. Однако конкретные закономерности управления приводами в зависимости от нагрузки на двигатели, определяемой, в частности, походкой, а также зависимости программного распределения моментов между приводами, не сформулированы.

Следовательно, возникает актуальная задача синтеза метода управления оптимальным распределением общей тяговой нагрузки между взаимосвязанными электроприводами двигателей мобильного робота, дискретно взаимодействующих с опорной поверхностью.

ГЛАВА 2. Метод оптимизации распределения тяговой нагрузки во взаимосвязанном электроприводе движителей мобильного робота, дискретно взаимодействующих с опорной поверхностью

В данной главе рассматривается математическая модель поступательного движения твердого тела под действием избыточного числа движителей, а также синтез критерия оптимального распределения общей тяговой нагрузки между такими движителями.

2.1 Математическая модель взаимосвязанного электропривода движителей мобильного робота

Математическая модель, описывающая процесс прямолинейного движения мобильного робота с движителями, дискретно взаимодействующими с опорной поверхностью, включает в себя дифференциальные уравнения поступательного движения робота, а также уравнения вращательного движения роторов приводных двигателей.

Движение мобильного робота массой m может быть описано уравнением вида:

$$m\ddot{x} = \sum_{j=1}^N F_j - Q, \quad (2.1)$$

где N – количество движителей; F_j – силы, приложенные к опорным элементам движителей.

В общем случае дифференциальное уравнение движения ротора j -го электродвигателя, приводящего в движение маховики движителя, имеет вид:

$$J\ddot{\phi}_j = M_j^{\partial\delta} - M_j^{comp}, \quad (2.2)$$

где J – приведенный момент инерции вращающихся частей движителя; $M_{дв}$, $M_{сопр}$ – момент, развиваемый двигателем, и момент сопротивления, обусловленный преодолением полезных сил сопротивления и силами трения; φ – угол поворота ротора двигателя.

В пределах эксплуатационных скоростей зависимость момента, развиваемого электроприводами, от управляющего воздействия $U(t)$ и угловой скорости, может быть представлена линейной функцией вида:

$$M_j^{дв} = M_j^{дв}(U_j, \dot{\varphi}_j) = kU_j - \mu\dot{\varphi}_j, \quad (2.3)$$

где k, μ – характеристики электропривода:

$$k = \frac{C_m \Phi}{R_j}, \quad \mu = \frac{(C_m \Phi)^2}{R_j}, \quad (2.4)$$

где C_m – конструктивная постоянная приводного электродвигателя движителя; Φ – магнитный поток возбуждения; R_j – сопротивление обмотки якоря.

В отсутствие проскальзывания опорного элемента движителя на опорной поверхности, между перемещением корпуса мобильного робота x и углом поворота φ_j ротора j -го движителя имеет место связь:

$$\varphi_j = \varphi_j(x). \quad (2.5)$$

Тогда уравнение силового привода движителя имеет вид:

$$J_j \frac{\partial \varphi_j}{\partial x} \ddot{x} + J_j \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial x^2} \dot{x}^2 = k_j U_j - \mu_j \frac{\partial \varphi_j}{\partial x} \dot{x} - M_j^{сопр}. \quad (2.6)$$

2.2 Синтез критерия оптимального распределения тяговой нагрузки во взаимосвязанном электроприводе движителей мобильного робота.

При применении аналогичных приводов, $J_j = J$, $k_j = k$, $\mu_j = \mu$. Однако функция $\varphi_j = \varphi_j(t)$ будет различной для j -го движителя в силу ее зависимости от установленной или самоустанавливающейся походки мобильного робота.

Ввиду этого для установления программного движения

$$x = x(t), \varphi_j = \varphi_j(t) \quad (2.7)$$

на электроприводы движителя должны подаваться управляющие воздействия U_j в зависимости от требуемого тягового усилия, развиваемого соответствующим движителем, т.е. от момента сопротивления, приложенного к валу j -го движителя.

Тогда рассматриваемая задача сводится к синтезу и распределению управляющих воздействий $U_j(t)$ при поступательном движении мобильного робота с постоянной скоростью, обеспечивающих минимум функционала

$$I = \sum_{j=1}^N \int_0^{\tau} i_j^2(t) dt \rightarrow \min. \quad (2.8)$$

где N – количество движителей; τ – одинаковый для всех движителей период одного цикла, включающего фазу его взаимодействия с опорной поверхностью и фазу переноса, i – ток, потребляемый j -м электроприводом:

$$i_j = \frac{U_j - C_m \Phi \dot{\varphi}_j}{R_j} = \frac{U_j}{R_j} - k_j \dot{\varphi}_j. \quad (2.9)$$

Физический смысл критерия (2.8), например, для двигателей постоянного тока соответствует уровню тепловых потерь в электроприводе.

Решение поставленной задачи основывается на совместном решении дифференциальных уравнений поступательного движения мобильного робота (2.1), уравнений вращательного движения роторов двигателей всех приводов (N штук) и введенных соотношений χ_j между движущими силами F_j , приложенным к опорным элементам движителей. Эти силы являются источником момента сопротивления, действующего на силовой привод j -го движителя

$$F_j = \chi_j Q, \quad M_j^{comp} = F_j \frac{\delta x}{\delta \varphi_j}. \quad (2.10)$$

Введенные соотношения χ_j , характеризующие распределение усилий между движителями в опорной фазе, могут зависеть от координаты x и скорости центра масс робота, и подлежат определению из условия минимума (2.8).

Момент сопротивления на валах электроприводов с учетом (2.10) может быть представлен в виде:

$$M_j^{comp} = \chi_j(x) \lambda_j(x) Q, \quad (2.11)$$

где

$$\lambda_j(x) = \partial x / \partial \varphi_j \quad (2.12)$$

– передаточные функции механизмов движителей, зависящие от кинематической схемы движителя и походки мобильного робота.

Искомые управляющие воздействия j -го привода, для электродвигателей постоянного тока – напряжения, подводимые к якорю, – определяются выражением

$$U_j = \frac{1}{k_j} \left[J \cdot r_j(x) \cdot \ddot{x} + J \cdot p_j(x) \cdot \dot{x}^2 + \mu \cdot r_j(x) \cdot \dot{x} + \chi_j(x) \cdot \lambda_j(x) \cdot Q \right], \quad (2.13)$$

где

$$r_j(x) = \frac{\partial \varphi_j}{\partial x}, \quad p_j(x) = \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial x^2}. \quad (2.14)$$

На функции $\chi_j(x, \dot{x})$ накладывается связь вида

$$\sum_{j=1}^N \chi_j(x) = 1; \quad (2.15)$$

$$\int_0^{\tau} \sum_{j=1}^N \chi_j(x) dt = \tau. \quad (2.16)$$

В этом случае, подынтегральная функция, обеспечивающая минимум критерия I (2.8), принимает вид

$$\Phi = i_j^2 + v \sum_{j=1}^N \chi_j(x) = \left(\frac{U_j}{R_j} - k \cdot r_j(x) \dot{x} \right)^2 + v \sum_{j=1}^N \chi_j(x), \quad (2.17)$$

где v – постоянный множитель Лагранжа.

Для поиска минимума функционала (2.8) составляются уравнения Эйлера-Пуассона

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \chi_j} = 0, \quad j = 1 \dots N, \quad (2.18)$$

из которых определяются функции $\chi_j(x, \dot{x})$, характеризующие распределение управляющих воздействий по приводам:

$$\chi_j(Vt) = - \frac{vk_j^2 + 2Jp_j(x)\dot{x}^2\lambda_j(x)Q + 2\mu_j r_j(x)\dot{x}\lambda_j(x)Q}{2\lambda_j^2(x)Q^2}, \quad (2.19)$$

Особенностью данной зависимости является то, что распределение управляющих воздействий на каждый привод определяется пройденным путем робота в пределах цикла (фаза опоры и фаза переноса), скоростью движения V , и силой сопротивления движению Q . Неопределенный множитель v определяется из уравнения (2.15).

2.3 Анализ устойчивости движения мобильного робота, осуществляемого в соответствии с разработанным критерием распределения тяговой нагрузки.

В процессе движения рассматриваемого мобильного робота, при перестановке опорных элементов движителей, соотношение тяговых усилий, развиваемых движителями χ_j , определяется задаваемым характером движения, «походкой», конструктивными особенностями и т.д.. Поэтому такое соотношение усилий $\chi_j = T_j/T_1$ имеет характер зависимости от времени:

$$\chi_j = \chi_j(t)., \quad (2.20)$$

Здесь T_j – тяговое усилие в j -м движителе, T_1 – усилие в условно «базовом» первом движителе.

В те моменты времени, когда первый движитель находится в переносе, в качестве «базового» следует принять любой другой. В общем случае, для мобильных роботов, движители которых дискретно взаимодействуют с опорной поверхностью, задаваемое отношение $\chi_j(t)$ имеет кусочно-непрерывный характер.

Поэтому ставится задача обеспечить задаваемое устойчивое поступательное с постоянной скоростью движение мобильного робота при синтезированных в соответствии с разработанным критерием распределения нагрузки соотношениях между усилиями χ_j , развиваемыми приводами, дискретно изменяющимися в течение времени. Основной проблемой здесь является уменьшение времени переходного процесса Δt , влияющего на скорость движения мобильного робота, а также на плавность его передвижения. Задача системы управления при этом сводится к поиску законов управления и параметров движителей, которые обеспечат устойчивость программных режимов работы движителей мобильного робота.

Для этого составляются уравнения в вариациях исследуемого процесса движения, анализируемого до начала переноса или установки на грунт следующего движителя.

Если учесть в (2.4) все зависимости ϕ_j из (2.6), то уравнение в вариациях при выборе программного движения

$$\dot{x} = V \quad (2.21)$$

и соответствующему ему (2.8) будут иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} M\delta\ddot{x} + \frac{\partial Q}{\partial \dot{x}}\delta\dot{x} - \sum_{j=1}^{2N} T_j \frac{\partial \lambda}{\partial x} \delta x - \sum_{j=1}^{2N} \lambda_j(x) \delta T_j = 0; \\ J_j \frac{\partial \phi_j}{\partial x} \delta\dot{x} + \left[2J_j \frac{\partial^2 \phi_j}{\partial x^2} \dot{x} + \mu \frac{\partial \phi_j}{\partial x} \right] \delta\dot{x} + \left[2J_j \frac{\partial^3 \phi_j}{\partial x^3} \dot{x}^2 + \mu \frac{\partial^2 \phi_j}{\partial x^2} \right] \delta x + \sum_{j=1}^{2N} R_j \delta T_j = 0. \end{array} \right. \quad (2.22)$$

Линеаризованную систему уравнений на промежутке от начала или завершения этапа переноса очередного движителя, характеризуемого координатой x_n , до начала или завершения такого же этапа следующего, характеризуемого координатой x_k , можно представить в форме $(2N+1)$ линейных дифференциальных уравнений в вариациях в форме:

$$a_n \delta\ddot{x} + b_n \delta\dot{x} + c_n \delta x + \sum_{j=1}^{2N} e_{nj} \delta T_j = 0, \quad n = 1 \dots (2N+1), \quad (2.23)$$

где для $n = 1$:

$$a_1 = M; \quad (2.24)$$

$$b_1 = \frac{\partial Q}{\partial \dot{x}} = \xi; \quad (2.25)$$

$$c_1 = \frac{1}{x_k - x_n} \int_{x_n}^{x_k} \sum_{j=1}^{2N} T_j(x) \frac{\partial \lambda_j}{\partial x} dx; \quad (2.26)$$

$$e_{1j} = \frac{1}{x_k - x_n} \int_{x_n}^{x_k} \lambda_j(x) dx \quad (2.27)$$

а для $n > 1$:

$$a_n = \frac{1}{x_k - x_n} \int_{x_n}^{x_k} J_n \frac{\partial \phi_n}{\partial x} dx; \quad (2.28)$$

$$b_n = \frac{1}{x_k - x_n} \int_{x_n}^{x_k} \left[2J_n \frac{\partial^2 \varphi_n}{\partial x^2} \dot{x} + \mu \frac{\partial \varphi_n}{\partial x} \right] dx; \quad (2.29)$$

$$c_n = \frac{1}{x_k - x_n} \int_{x_n}^{x_k} \left[J_n \frac{\partial^3 \varphi_n}{\partial x^3} \dot{x}^2 + \mu \frac{\partial^2 \varphi_n}{\partial x^2} \right] dx; \quad (2.30)$$

$$e_{nj} = R_j; \quad (2.31)$$

В выражениях (2.24)-(2.27) и (2.28)-(2.31) ξ - коэффициент вязкого сопротивления движению мобильного робота в среде, R_j - радиус j -го маховика.

Таким образом, $(2N+1)$ уравнений в вариациях содержат $(2N+1)$ переменных δx и δT_j , $j = 1, 2 \dots 2N$.

Характеристическое уравнение, соответствующее дифференциальному уравнению (2.23) имеет вид:

$$\begin{vmatrix} a_1 \beta^2 + b_1 \beta + c_1 & e_{11} & e_{12} & \dots & e_{12N} \\ a_2 \beta^2 + b_2 \beta + c_2 & R_1 & R_2 & \dots & R_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{2N+1} \beta^2 + b_{2N+1} \beta + c_N & R_1 & R_2 & \dots & R_{2N} \end{vmatrix} = 0; \quad (2.32)$$

Для того чтобы решение дифференциальных уравнений было устойчивым необходимо, чтобы вещественные части всех корней характеристических уравнений β были отрицательны (корни характеристического уравнения располагались в левой части комплексной плоскости):

$$\operatorname{Re} \beta < 0. \quad (2.33)$$

2.4 Заключение по второй главе

На основе дифференциальных уравнений вращательного движения роторов электродвигателей постоянного тока разработана математическая модель взаимосвязанного электропривода движителей мобильного робота, дискретно взаимодействующих с опорной поверхностью.

Для оптимального распределения совместной тяги между несколькими движителями такого мобильного робота разработан метод и предложен критерий на основе поиска экстремума (минимума) целевого функционала – функции уровня суммарных тепловых потерь во взаимосвязанном электроприводе постоянного тока.

Особенностью метода является введение коэффициентов, учитывающих распределение нагрузки между несколькими движителями, а также введение ограничений, накладываемых на поиск экстремума целевого функционала.

**ГЛАВА 3. Математическое моделирование системы управления
взаимосвязанным электроприводом двигателей мобильного робота,
дискретно взаимодействующих с опорной поверхностью.**

В данной главе представлены результаты математического моделирования поступательного с постоянной скоростью движения твердого тела под действием взаимосвязанного электропривода, управляемого в соответствии с разработанным критерием оптимального распределения общей тяговой нагрузки между двигателями.

Рассматривается механическая система, состоящая из твердого тела 1, перемещающегося по прямолинейной вертикальной направляющей 2 за счет изменения длины двух тросов 3, одним концом закрепленных в точках 4, и плоскости, проходящей через направляющую 2, а другим – на маховиках роторов радиуса R двигателей 5, установленных на твердом теле (рис. 3.1).

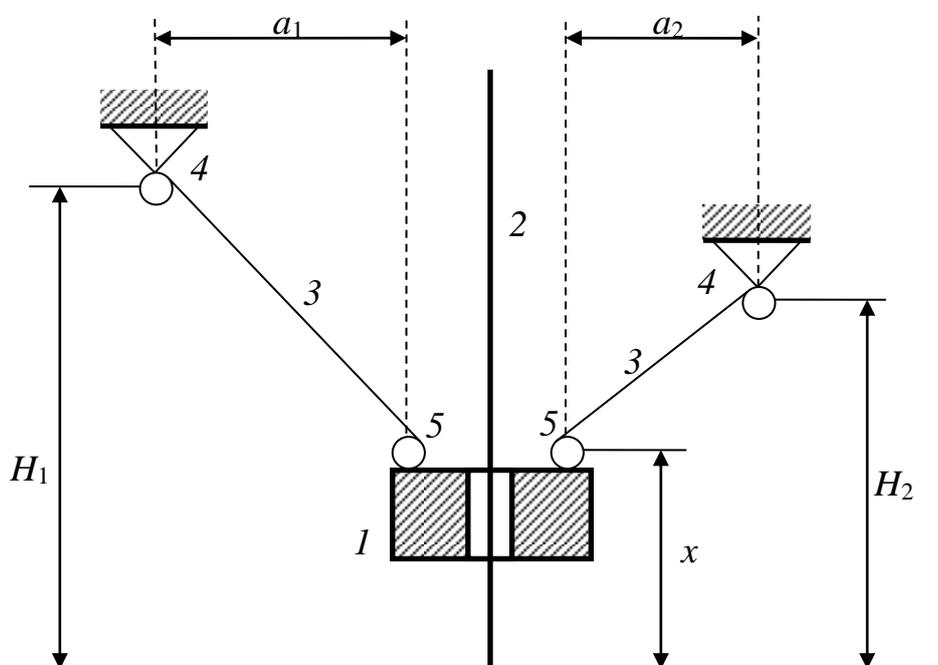


Рисунок 3.1 – Расчетная схема механической системы.

Рассматриваемая расчетная схема позволяет моделировать поступательное перемещение мобильного робота с двигателями, дискретно взаимодействующими с опорной поверхностью (в фазе опоры) [9], где опорным элементам соответствуют неподвижные точки 4. Их различные положения относительно твердого тела 1 (a_1, a_2, H_1, H_2) объясняются различными «походками» [15] – последовательностью подъема и опускания опорных элементов двигателей.

3.1 Моделирование программного управления распределением нагрузки между якорно-тросовыми двигателями

В том случае, когда соотношение усилий в тросах определено программно, значения коэффициентов χ_j определены априорно. Тогда для определения сил натяжения необходимо решить систему уравнений, состоящую из уравнения

$$m\ddot{x} = T_1 \cos \alpha_1 + T_2 \cos \alpha_2 - mg, \quad (3.1)$$

и дополнительно введенного уравнения

$$\Psi(T_1, T_2) = 0. \quad (3.2)$$

В этих уравнениях закон движения $x(t)$ задается, а значения углов α_1 и α_2 определяются как функции времени из уравнений:

$$\sin \alpha_j = \frac{h_j}{l_j}, \quad (j = 1, 2); \quad (3.3)$$

$$l_j = \sqrt{(l_0 \cos \alpha_{j0} - x)^2 + h_j^2}. \quad (3.4)$$

Если в качестве приводов маховиков используются одинаковые двигатели постоянного тока, то в соответствии с уравнением механической

характеристики (для двигателей с независимым возбуждением) имеет место связь:

$$\dot{\phi}_j = \omega_\partial = \frac{1}{C}U_j - \frac{R_{я}}{C^2}M_j. \quad (3.5)$$

Моменты M_j ($j = 1, 2$) на валу этих двигателей удобно представить в следующей форме:

$$M_j = kU_j - \mu\dot{\phi}_j, \quad (3.6)$$

где

$$k = \frac{C}{R_{я}}; \quad (3.7)$$

$$\mu = \frac{C^2}{R_{я}}; \quad (3.8)$$

$$C = \frac{U_{ном} - I_{ном}R_{я}}{\omega_{ном}}. \quad (3.9)$$

Выражения (3.7)-(3.9) представляют собой известные характеристики двигателя, а U_j – напряжение, подводимое к обмотке якоря двигателя j -го двигателя.

Математическое моделирование проводилось для проектируемого экспериментального макета со следующими параметрами:

- расстояния от электродвигателей до оси перемещения груза $H_1 = H_2 = 16$ см;
- начальные длины тросов $l_{10} = 45$ см, $l_{20} = 34$ см;
- радиус маховиков электродвигателей $R = 27$ мм;
- масса груза $m = 240$ г;
- приведенный момент инерции $J = 2,52 \cdot 10^{-5}$ кг·м².

В случае применения одинаковых двигателей постоянного тока, для моделирования были взяты данные редукторного электродвигателя

ZGA37RG 24V со следующими характеристиками: $U_{\text{ном}} = 24 \text{ В}$, $P_{\text{ном}} = 2 \text{ Вт}$, $\eta_{\text{ном}} = 0,9$. Тогда $C = 0,073$; $k = 5,6 \cdot 10^{-3}$; $\mu = 4,06 \cdot 10^{-4}$.

Характерные зависимости изучаемого движения представлены на рисунках 3.2 – 3.7.

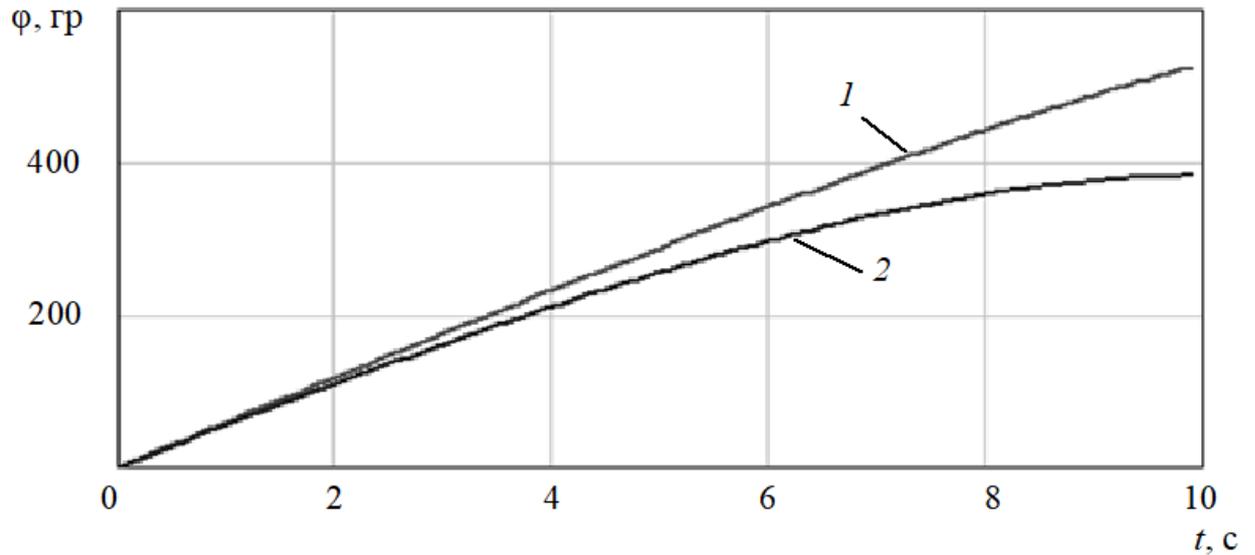


Рисунок 3.2 - Изменение углов поворота маховиков электродвигателей при программно заданном движении груза: 1 – для электродвигателя 1; 2 – для электродвигателя 2.

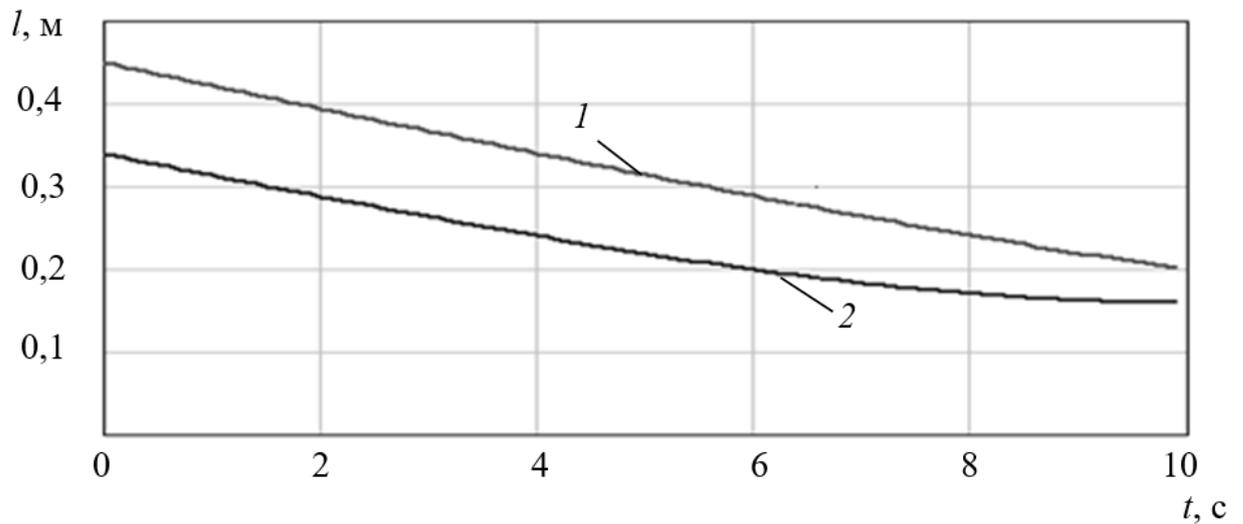


Рисунок 3.3 - Изменение длин тросов при программно заданном движении груза: 1 – для электродвигателя 1; 2 – для электродвигателя 2.

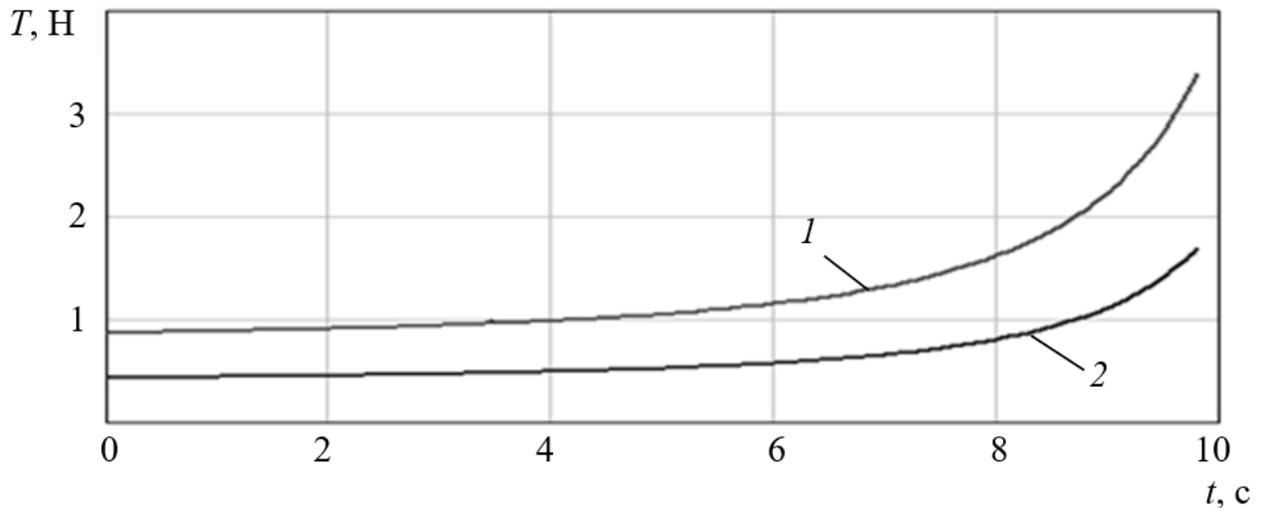


Рисунок 3.4 – Изменение усилий в тросах при программно заданном движении груза: 1 – для электродвигателя 1; 2 – для электродвигателя 2.

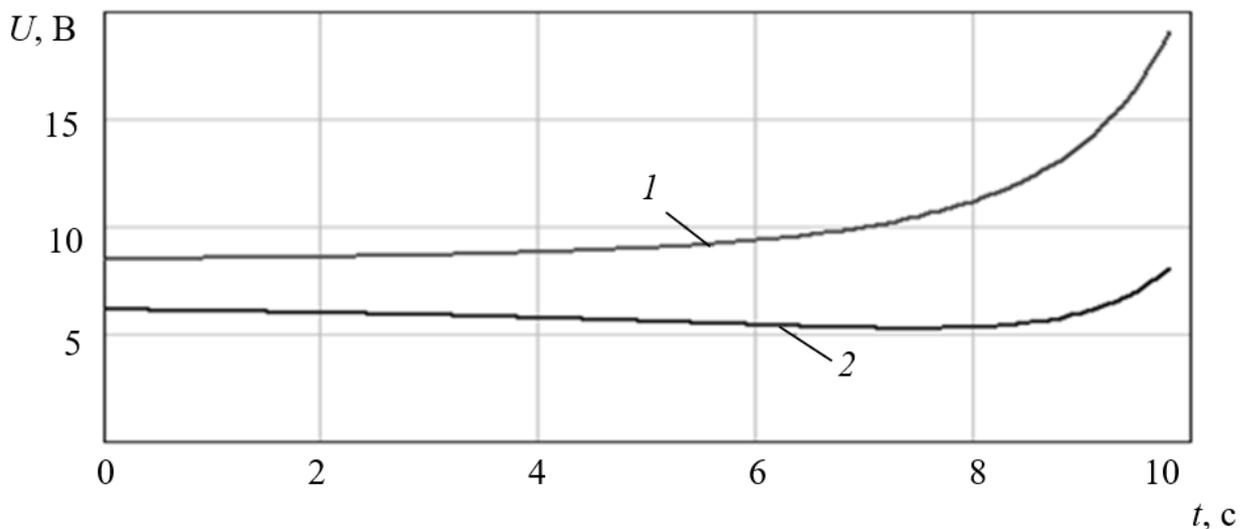


Рисунок 3.5 – Изменение напряжений в обмотках якоря для электродвигателей постоянного тока при программно заданном движении груза: 1 – для электродвигателя 1; 2 – для электродвигателя 2.

В соответствии с полученными графиками прослеживается пропорциональная зависимость усилий в тросах якоря управляющего воздействия - от поданного напряжения на обмотки якоря двигателей постоянного тока. В данном случае это объясняется связью усилий в тросах с

моментами на маховиках, определяемыми, в свою очередь, напряжением на обмотках двигателя.

В случае применения шаговых двигателей управляющим воздействием является частота коммутации обмоток. Угловое положение ротора каждого из двигателей определяется числом поданных импульсов n для коммутации его обмоток:

$$\varphi_j(n) = \frac{360}{N_{ш/об}} \cdot n, \quad (3.10)$$

где $N_{ш/об}$ – количество шагов шагового двигателя за один оборот.

Тогда закон вращательного движения маховиков будет зависеть от частоты коммутации обмоток p (частоты шагов) каждого шагового двигателя:

$$\varphi_j(t) = \frac{360}{N} \cdot \frac{n}{t} = \frac{360}{N} p, \quad (3.11)$$

откуда

$$p(\omega) = \frac{\omega N}{360}. \quad (3.12)$$

В случае использования шаговых двигателей, управление осуществляется именно скоростью вращения ротора (а не моментом на нем как в случае применения двигателей постоянного тока) путем изменения частоты коммутации обмоток p_j , а получаемые моменты M_j при известных силах T_1 и T_2 , требуют лишь проверки на реализуемость:

$$M_j \leq [M], \quad (3.13)$$

где $[M]$ – максимальный момент удержания шагового двигателя.

В развернутом виде (3.13) имеет вид:

$$J \left[\frac{\partial \varphi}{\partial p_j^2} \dot{p}_j^2 + \frac{\partial \varphi_j}{\partial p_j} \ddot{p}_j \right] + T_j R \leq [M]. \quad (3.13)$$

При применении шаговых двигателей, для моделирования были взяты данные шагового двигателя 28BJY-48-5V с редуктором.

Функция (3.12) в этом случае имеет вид:

$$p(\omega) = \frac{4096}{360} \omega. \quad (3.14)$$

В качестве программного движения рассматривается движение с постоянной скоростью:

$$x(t) = v_0 t. \quad (3.15)$$

В случае применения шаговых двигателей управляющим воздействием является частота коммутации обмоток. Полученное изменение ее значений представлено на рисунке 3.6.

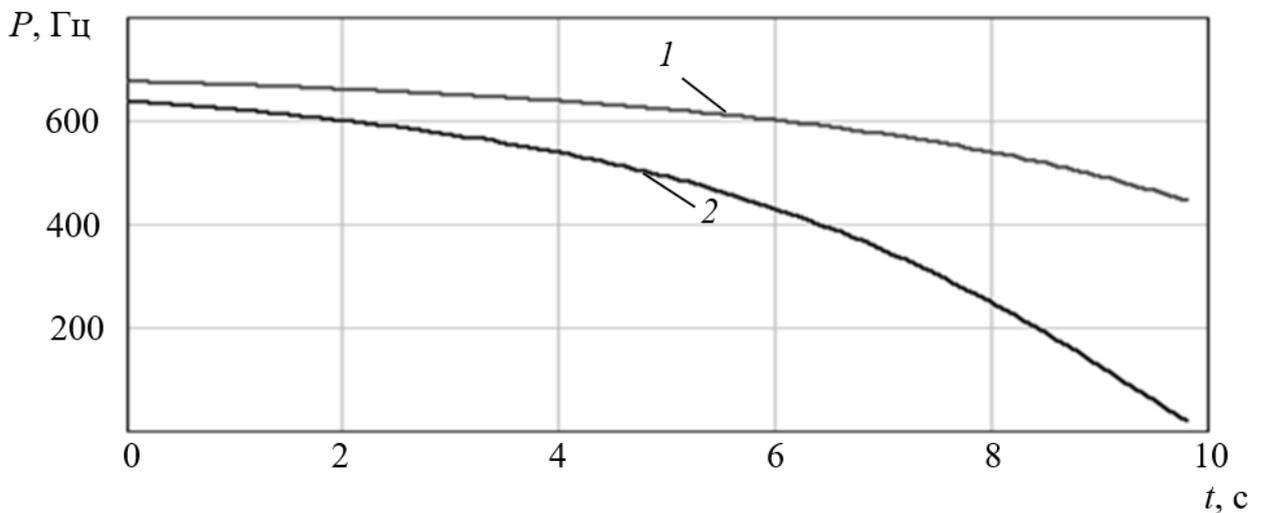


Рис. 3.6 - Изменение частоты коммутации обмоток шаговых двигателей: 1 – для электродвигателя 1; 2 – для электродвигателя 2.

3.2 Моделирование управления распределением нагрузки в соответствии с разработанным критерием оптимальности

В случае движения мобильного робота с двумя двигателями, дискретно взаимодействующими с опорной поверхностью, для определения подаваемых напряжений U_1, U_2 в соответствии с критерием (2.8), необходимо определить функции $\lambda_1(x), \lambda_2(x), r_1(x), r_2(x), p_1(x), p_2(x)$ (2.12), (2.14).

При малых перемещениях x и движении с постоянной скоростью V имеют место уравнения:

$$r_j(x) = r_j(Vt) = \frac{(H_j - Vt)l_{j0}}{R(l_{j0}^2 - H_j Vt)}; \quad (3.16)$$

$$\lambda_j(x) = \frac{1}{r_j(x)} = \frac{1}{r_j(Vt)} = \frac{R(l_{j0}^2 - H_j Vt)}{(H_j - Vt)l_{j0}}; \quad (3.17)$$

$$p_j(x) = p_j(Vt) = \frac{l_{j0}(H_j^2 - V^2 t^2)}{(l_{j0}^2 - H_j Vt)^2}. \quad (3.18)$$

Тогда для неопределенного множителя имеет место уравнение:

$$v = - \frac{2Q^2 \tau + Q \sum_{j=1}^N [Jp_j(Vt)r_j(Vt)V^2 + \mu r_j^3(Vt)] dt}{\sum_{j=1}^N \int_0^\tau r_j^2(Vt) dt}, \quad (3.19)$$

а распределение усилий χ_j осуществляется в соответствии с законом:

$$\chi_j = - \frac{v + Jp_j(t)\lambda_j(t)V^2Q + \mu r_j(t)VQ}{2\lambda_j^2(t)Q^2}, \quad j = 1, 2. \quad (3.20)$$

Определение программного управления изменением напряжения, подаваемого на обмотку якорей двигателей, осуществляется в соответствии с (2.15).

Модельная задача решалась при следующих общих для всех случаев параметрах:

- масса груза $m = 0,5$ кг;
- радиус маховиков $R = 27$ мм;
- приведенный момент инерции маховиков $J = 1,822 \cdot 10^{-4}$ кг·м²;
- сила сопротивления движению $Q = 4,9$ Н;
- номинальное напряжение двигателя постоянного тока $U_{\text{ном}} = 24$ В;
- номинальная скорость двигателя постоянного тока $\omega_{\text{ном}} = 315$ рад/с;
- сопротивление цепи якоря электродвигателей $R_{\text{я}} = 12$ Ом.

Моделирование проводилось дискретно с шагом $dx = 0,001$ м до значения $x_{\text{end}} = 0,2$ м. График распределения усилий для случая, когда параметры H_1 и H_2 , a_1 и a_2 симметричны, при постоянной скорости поступательного движения $V = 0,005$ м/с представлен на рисунке.

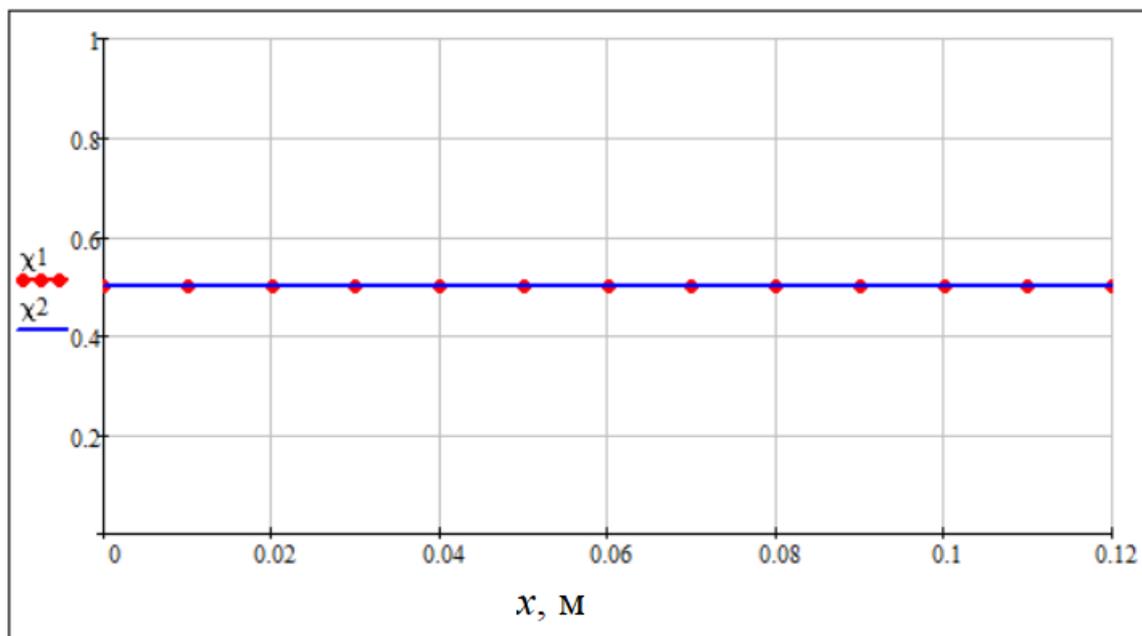


Рис. 3.7 – Распределение усилий между двумя электроприводами при симметричных геометрических параметрах.

В данном случае моделирование проводилось при следующих геометрических параметрах расчетной схемы: $H_1 = H_2 = 0,3$ м; $a_1 = a_2 = 0,25$ м.

Из рисунка 3.7 видно, что распределение усилий, характеризуемое коэффициентами χ_1, χ_2 , между электроприводами осуществляется в равной степени. При симметричных геометрических параметрах это очевидно. При этом сумма коэффициентов ($\chi_1 + \chi_2$) остается постоянной и равной 1.

График напряжения в обмотках якоря электродвигателя представлен на рисунке 3.8.

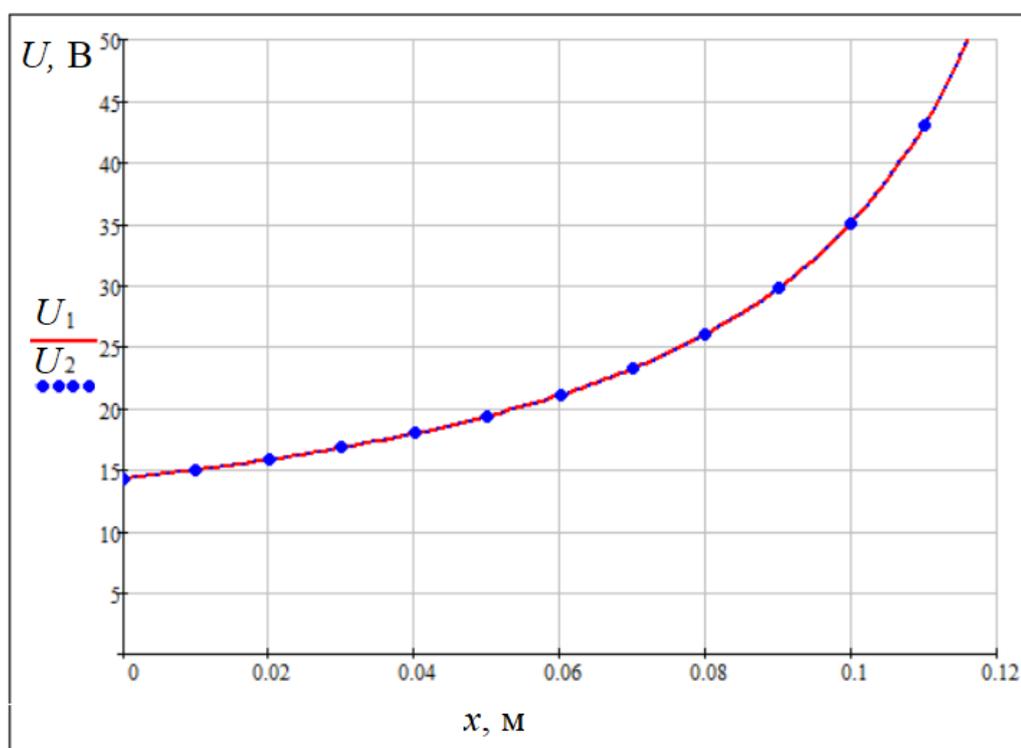


Рис. 3.8 – Напряжения в обмотках якоря электродвигателей при симметричном распределении усилий.

При этом, минимуму функции (2.8) (рисунок 3.9)

$$\min [I(\chi_1, \chi_2, x)] = \min \left[\sum_{j=1}^M i_{1j}^2(\chi_1, x) + i_{2j}^2(\chi_2, x) \right], \quad (3.21)$$

для любых значений перемещения $x = [0 \dots x_{end}]$, в координатах (χ_1, χ_2) соответствуют значения $\chi_1 = \chi_2 = 0,5$.

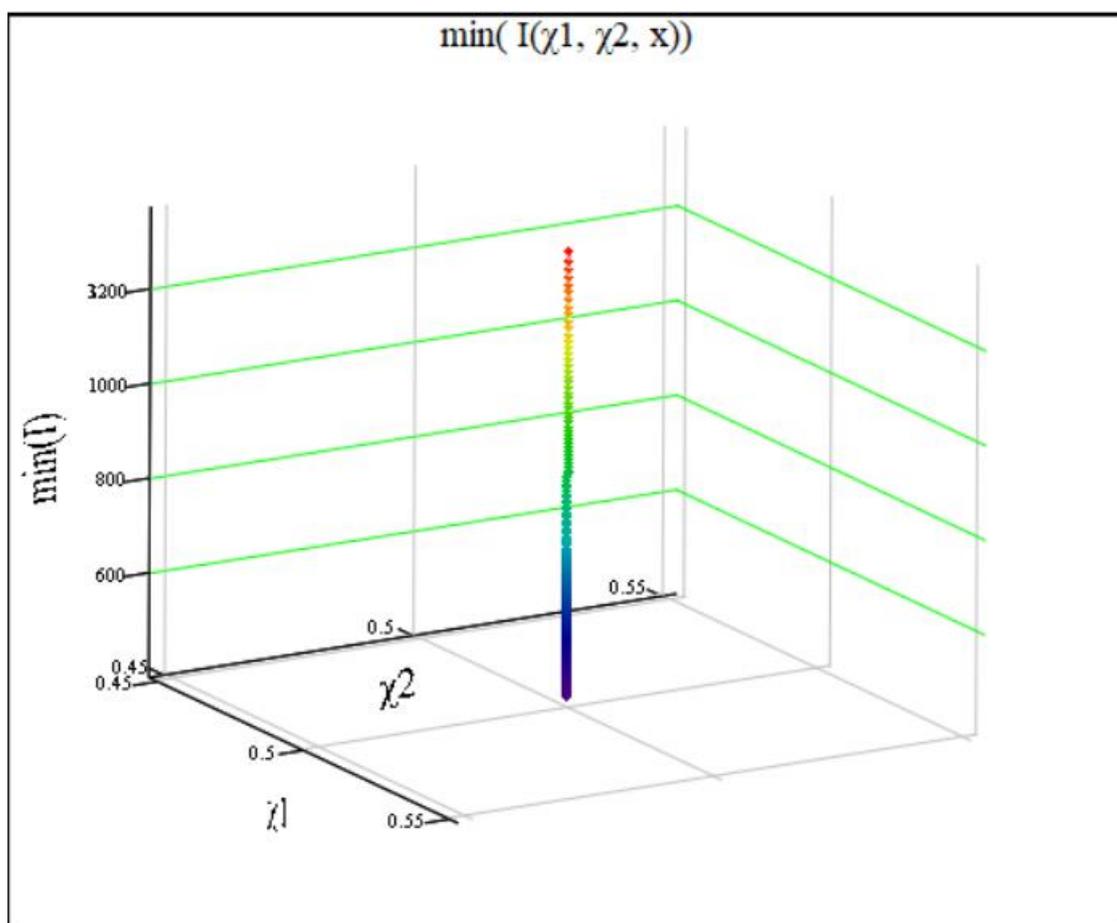


Рис. 3.9 – График минимума функции $I(\chi_1, \chi_2)$ при симметричных геометрических параметрах расчетной схемы для перемещения $x = [0 \dots x_{end}]$.

При этом оптимальность распределения усилий между двумя электродвигателями, представленная значениями коэффициентов χ_1, χ_2 , подтверждается минимумом (3.21). На рисунке 3.10 представлено изменение функции (2.8) для конкретного значения $x = 0,2$ м.

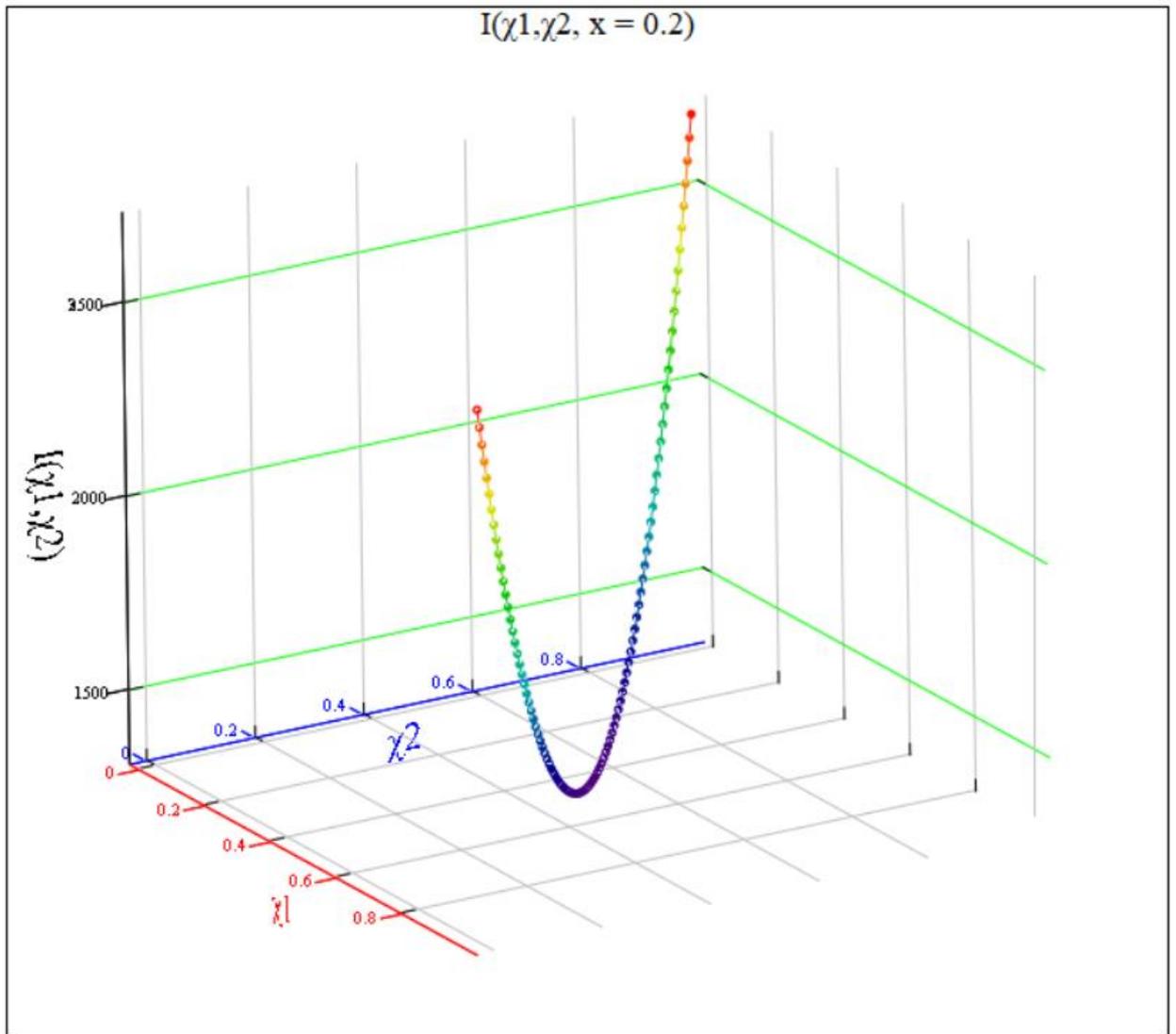


Рис. 3.10 – Изменение функции $I(\chi_1, \chi_2)$ для точки $x = 0,2$ м при симметричных геометрических параметрах расчетной схемы.

Другая ситуация складывается, если геометрические параметры расчетной схемы несимметричны. Возьмем при моделировании следующие геометрические соотношения (рисунок 3.1): $H_1 = 0,4$ м; $H_2 = 0,3$ м; $a_1 = a_2 = 0,25$. При этом скорость поступательного движения постоянна и составляет также $v = 0,005$ м/с, конечная координата перемещения – также $x_{end} = 0,2$ м.

Результаты распределения усилий между двумя электродвигателями, отраженные изменениями коэффициентов χ_1 , χ_2 , представлены на рисунке 3.11.

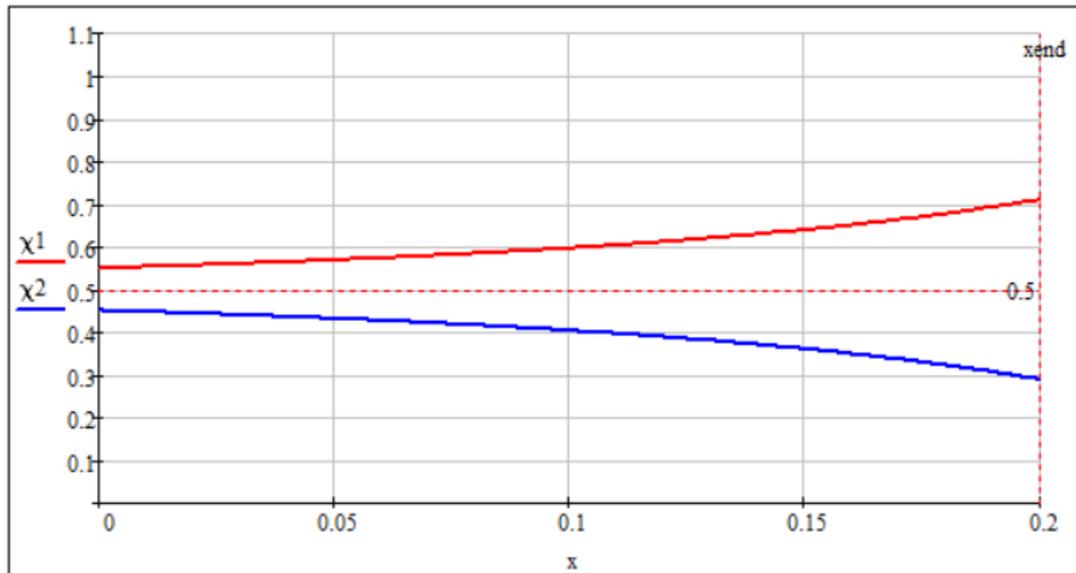


Рис. 3.11 – Распределение усилий между двумя электроприводами при симметричных геометрических параметрах ($H_1 \neq H_2$).

Изменение функции (3.21) на протяжении всего перемещения $x = [0 \dots x_{end}]$ представлено на рисунке 3.12.

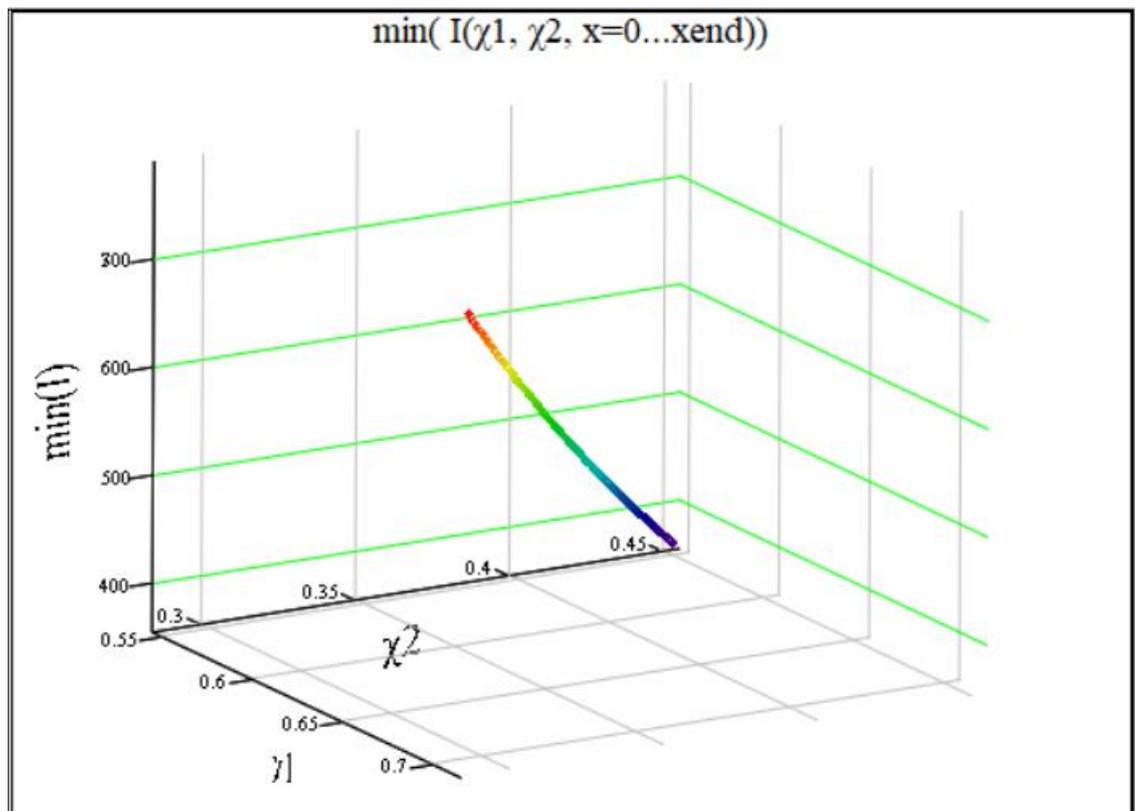


Рис. 3.12 – График минимума функции $I(\chi_1, \chi_2)$ при несимметричных геометрических параметрах расчетной схемы для перемещения $x = [0 \dots x_{end}]$.

При этом оптимальность распределения усилий между двумя электродвигателями, представленная значениями коэффициентов χ_1 , χ_2 , подтверждается минимумом (3.21). На рисунке 3.13 представлено изменение функции (2.8) для конкретного значения $x = 0,2$ м при несимметричных геометрических параметрах расчетной схемы.

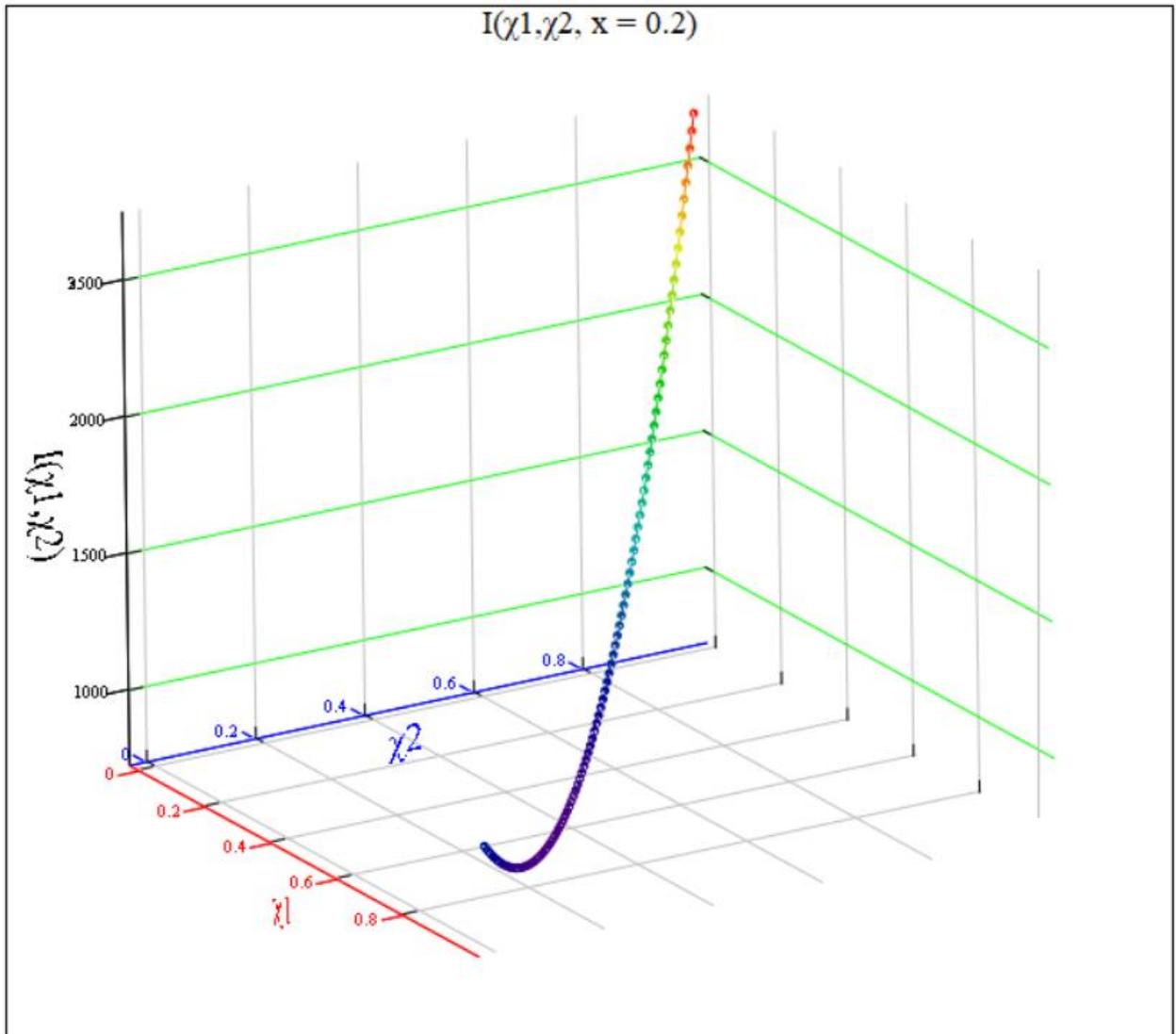


Рис. 3.13 – Изменение функции $I(\chi_1, \chi_2)$ для точки $x = 0,2$ м при несимметричных геометрических параметрах расчетной схемы ($H_1 \neq H_2$).

Из рисунка 3.14 видно, что при данных несимметричных соотношениях расчетной схемы, для конкретной точки перемещения $x = 0,2$, минимум целевого критерия (2.8) достигается при распределении усилий между двумя

электроприводами при отличных от случая симметричных параметров значениях коэффициентов χ_1 и χ_2 : $\chi_1 = 0,711$; $\chi_2 = 0,289$. При этом условие (2.13) выполнено (рисунок 3.14).

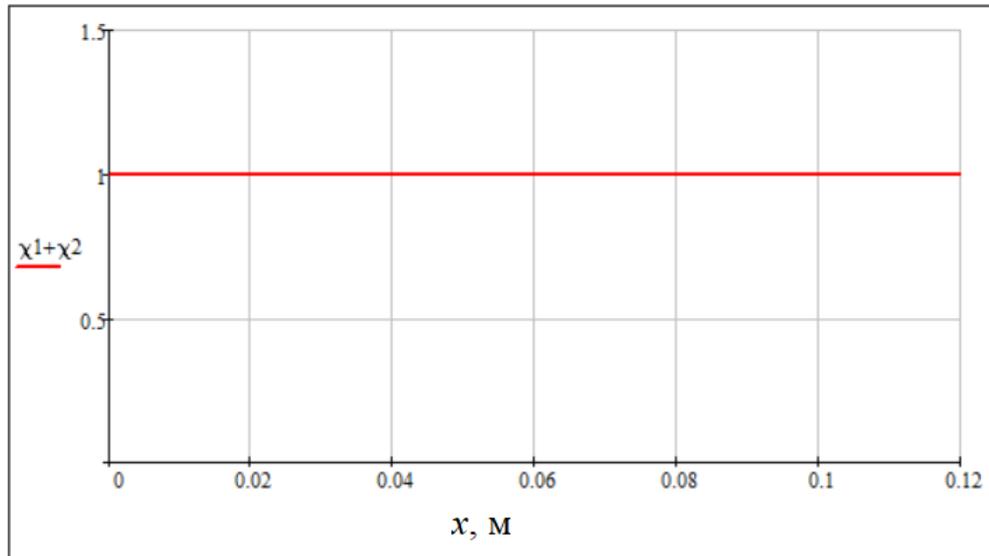


Рис. 3.14 – Распределение усилий между двумя электроприводами при несимметричных геометрических параметрах ($H_1 \neq H_2$).

Изменение управляющих напряжений для электродвигателей в соответствии с (2.13) и распределении усилий в соответствии с рисунком 3.11, представлено на рисунке 3.15.

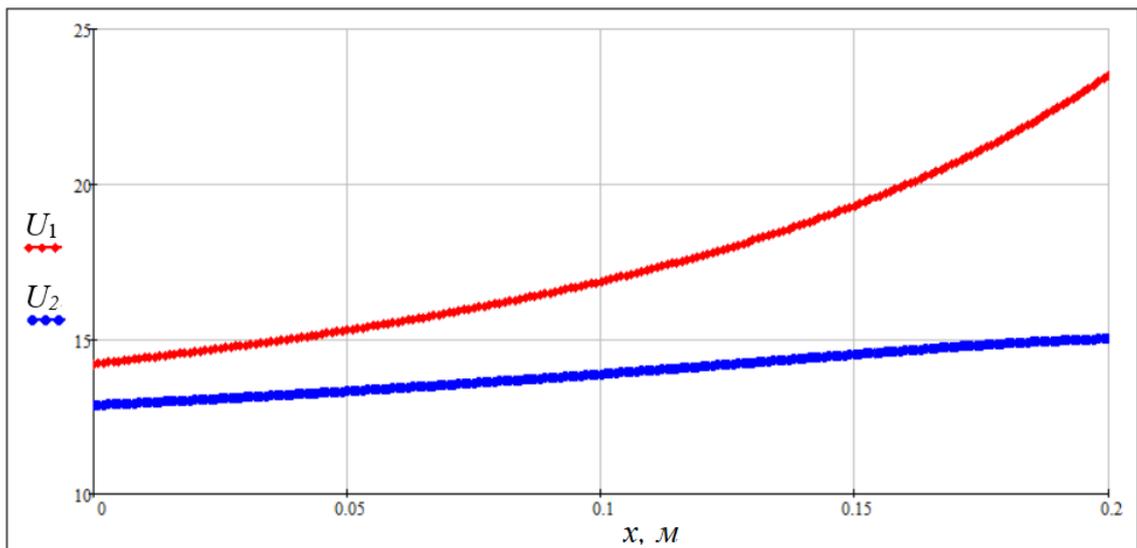


Рис. 3.15 – Управляющие воздействия (напряжения в обмотках якоря) электродвигателей при несимметричном распределении усилий ($H_1 \neq H_2$).

При рассмотрении расчетной схемы с несимметричными соотношениями – в данном случае при разных высотах маховиков $H_1 \neq H_2$ – интересна точка перемещения – критическая точка перемещения $x_{кр}$, близкая к предельной высоте: $x_{кр} \rightarrow \min(H_1, H_2)$.

Так, для при модельных значениях $H_1 = 0,4$ м, $H_2 = 0,3$ м, изменение функции целевого критерия (2.8) для точки $x = 0,299$ представлено на рисунке 3.16.

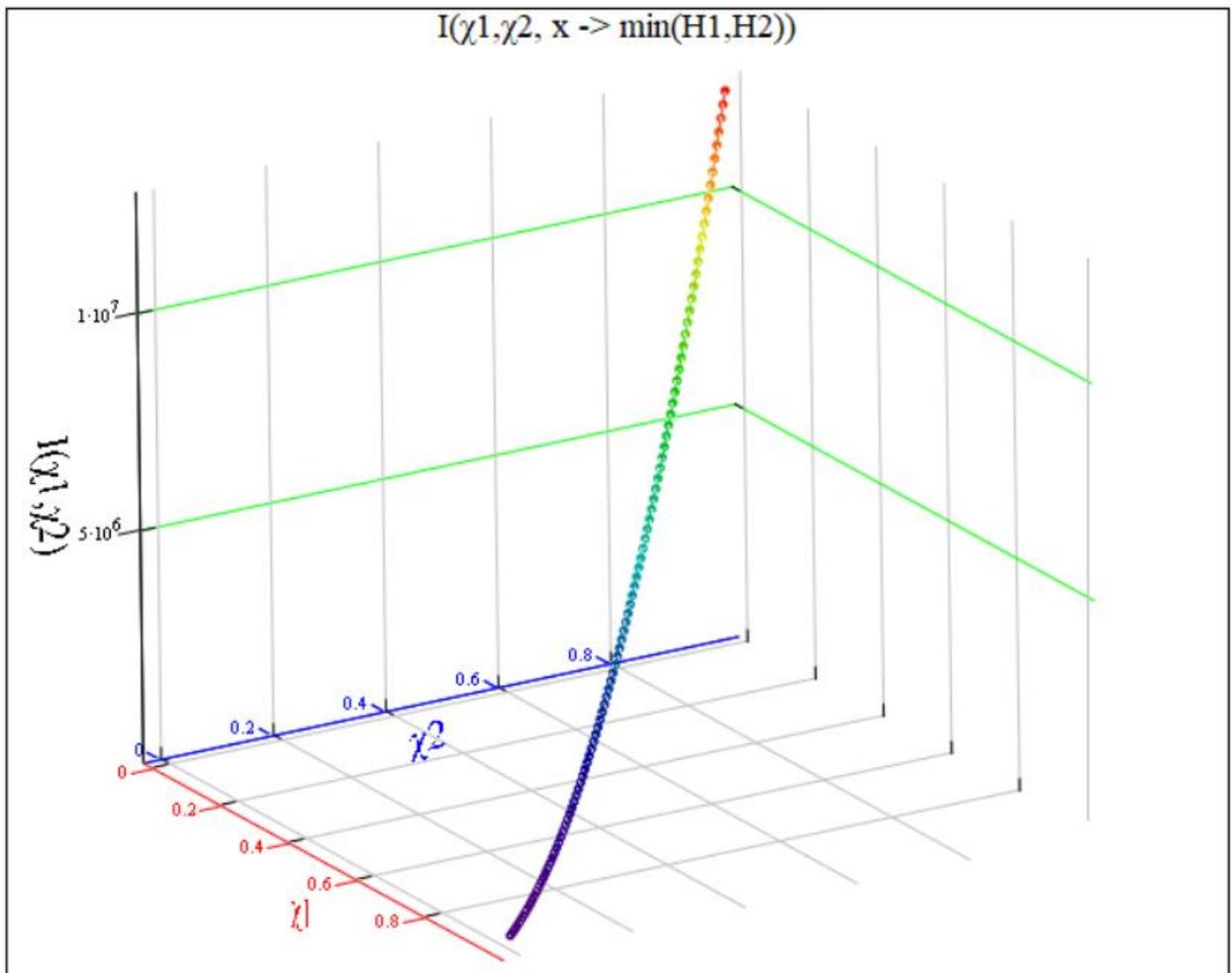


Рис. 3.16 – Изменение функции $I(\chi_1, \chi_2)$ для точки $x \rightarrow \min(H_1, H_2)$ при несимметричных геометрических параметрах расчетной схемы ($H_1 \neq H_2$).

При данных модельных значений ($H_1 = 0,4$) > ($H_2 = 0,3$ м), критическая точка перемещения $x_{кр} \rightarrow \min(0,4; 0,3) \rightarrow 0,3$ м. При этом из рисунка 3.17 видно, что в такой точке практически вся общая нагрузка распределяется на

двигатель 1, установленный на высоте H_1 в обеспечение минимума тепловых потерь (в обеспечение целевого критерия (2.8)).

Изменение управляющих напряжений для электродвигателей для такого критического режима представлено на рисунке 3.17.

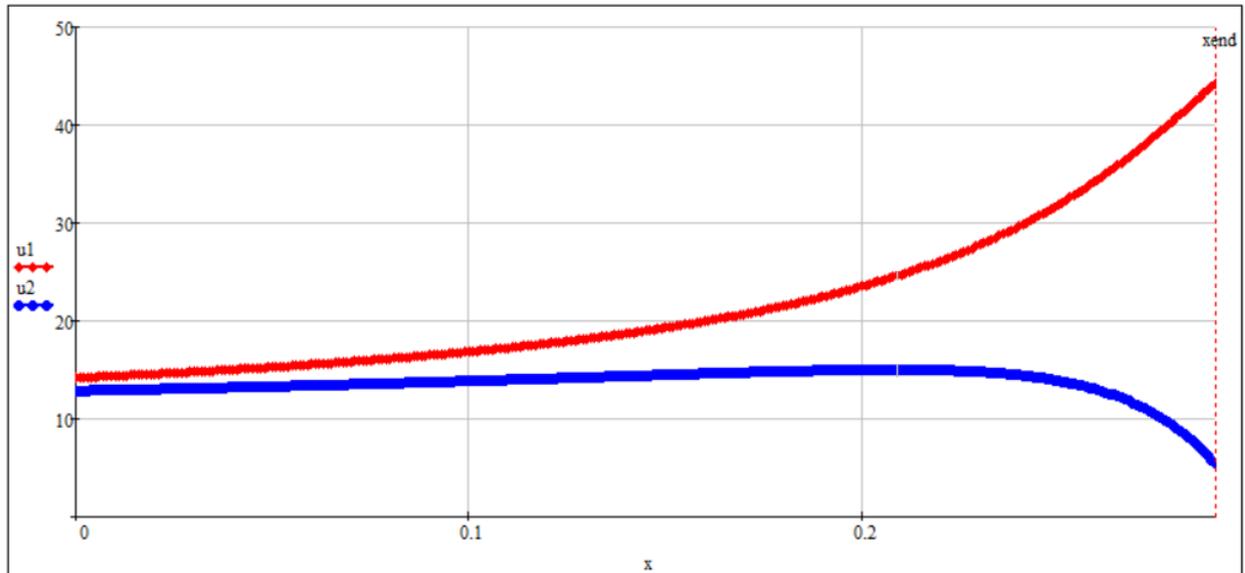


Рис. 3.17 – Напряжения в обмотках якоря электродвигателей при перемещении до критической точки $x = 0 \dots x_{кр}$ при несимметричных геометрических параметрах расчетной схемы ($H_1 \neq H_2$).

В соответствии с рисунком 3.13, Значение функции $I(\chi_1, \chi_2)$ для конкретной точки $x = 0,2$, при одинаковом распределении усилий составляет $I(\chi_1=\chi_2 = 0,5) = 3700$. При оптимальном распределении усилий в соответствии с (2.8), $I_{opt}(\chi_1^{opt}, \chi_2^{opt}) = 290$.

Тогда выигрыш по суммарным тепловым потерям в электроприводах составит $\delta = 290/3700 = 7,8\%$.

3.3 Анализ устойчивости при модельном движении мобильного робота в соответствии с разработанным критерием

Для устойчивости решения дифференциальных уравнений (2.24) необходимо, чтобы вещественные части всех корней характеристического уравнения (2.25) были отрицательными.

Для рассматриваемой модельной задачи при равенстве радиусов маховиков $R_1 = R_2$ и использовании одинаковых ДПТ характеристическое уравнение имеет вид:

$$(a_2 - a_3)\beta^2 + (b_2 - b_3)\beta + (c_2 - c_3) = 0, \quad (3.22)$$

где β – корни характеристического уравнения.

В соответствии с критерием Рауса – Гурвица [93], [94] для обеспечения устойчивости требуется, чтобы выполнялись неравенства:

$$B = b_2 - b_3 < 0 \quad (3.23)$$

$$C = c_2 - c_3 < 0$$

Коэффициенты a_2 , a_3 , b_2 , b_3 , c_2 , c_3 для двух движителей определяются выражениями:

$$a_2 = \frac{1}{x_k - x_n} \int_{x_n}^{x_k} J_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} dx; \quad (3.24)$$

$$a_3 = \frac{1}{x_k - x_n} \int_{x_n}^{x_k} J_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} dx; \quad (3.25)$$

$$b_2 = \frac{1}{x_k - x_n} \int_{x_n}^{x_k} \left[2J_1 \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x^2} \dot{x} + \mu \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \right] dx; \quad (3.26)$$

$$b_3 = \frac{1}{x_k - x_H} \int_{x_H}^{x_k} \left[2J_2 \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial x^2} \dot{x} + \mu \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \right] dx; \quad (3.27)$$

$$c_2 = \frac{1}{x_k - x_H} \int_{x_H}^{x_k} \left[J_1 \frac{\partial^3 \varphi_1}{\partial x^3} \dot{x}^2 + \mu \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x^2} \right] dx; \quad (3.28)$$

$$c_3 = \frac{1}{x_k - x_H} \int_{x_H}^{x_k} \left[J_2 \frac{\partial^3 \varphi_2}{\partial x^3} \dot{x}^2 + \mu \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial x^2} \right] dx; \quad (3.29)$$

Для рассматриваемой модельной задачи с заданными параметрами (масса твердого тела $m = 0,5$ кг, масса маховиков и их радиусы соответственно $0,24$ кг, $R = 0,015$ м, постоянная электродвигателя $\mu = 0,014$ Н·м/с, геометрические размеры $H_2 = 0,3$ м и $a_1 = a_2 = 0,19$ м) зависимыми от варьируемых параметров $0 < H_1 < H_2$; $0 < V < V_0$ ($V_0 = 0,08$ м/с) в соответствии с (2.28)-(2.31) являются следующие коэффициенты:

$$a_2 = f(H_1), \quad a_3 = const; \quad (3.30)$$

$$b_2 = f(H_1, V), \quad b_3 = f(V); \quad (3.31)$$

$$c_2 = f(H_1, V), \quad c_3 = f(V). \quad (3.32)$$

При этом знаки коэффициентов A и B характеристического уравнения (3.22) оказываются отрицательными при любых значениях варьируемых параметров (рисунок 3.18, 3.19):

$$A(H_1) = a_2 - a_3 < 0; \quad (3.33)$$

$$B(H_1, V) = b_2 - b_3 < 0. \quad (3.34)$$

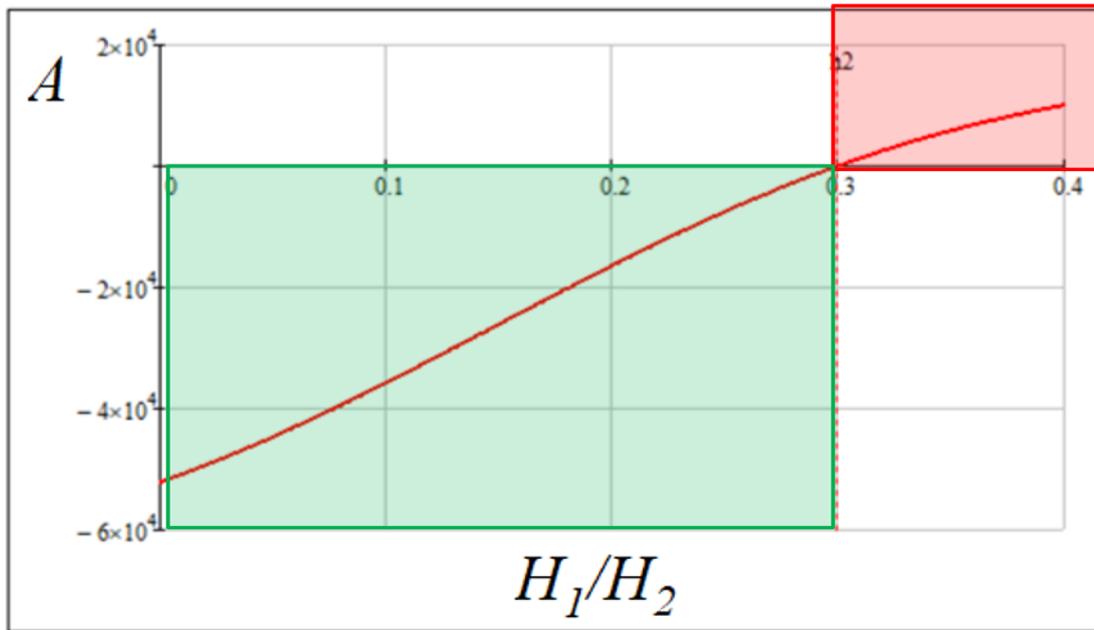


Рисунок 3.18 – Изменение коэффициента A характеристического уравнения при варьировании параметра H_1 для конечной точки перемещения $x_k = 0,3$ м.

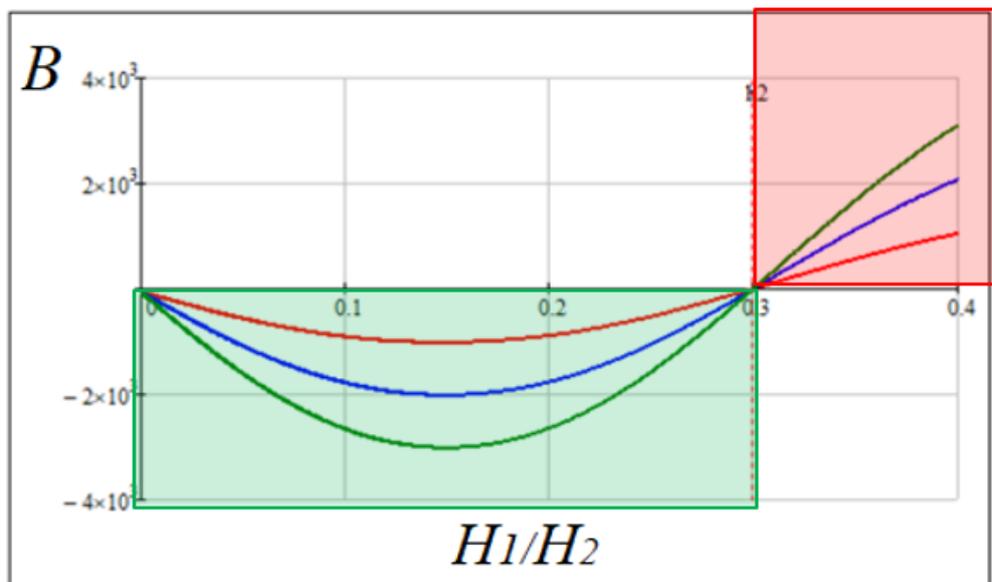


Рисунок 3.19 – Изменение коэффициента $B(H_1, v)$ характеристического уравнения при варьировании параметра H_1 и скорости перемещения V для конечной точки перемещения $x_k = 0,3$ м.

Таким образом, области устойчивости зависят от знака коэффициента C характеристического уравнения. На графике (рисунок 3.20) представлена

зависимость $C = C(H_1, V)$ при различных значениях V . Устойчивым решениям соответствуют зоны, в которых $C(H_1, V) < 0$.

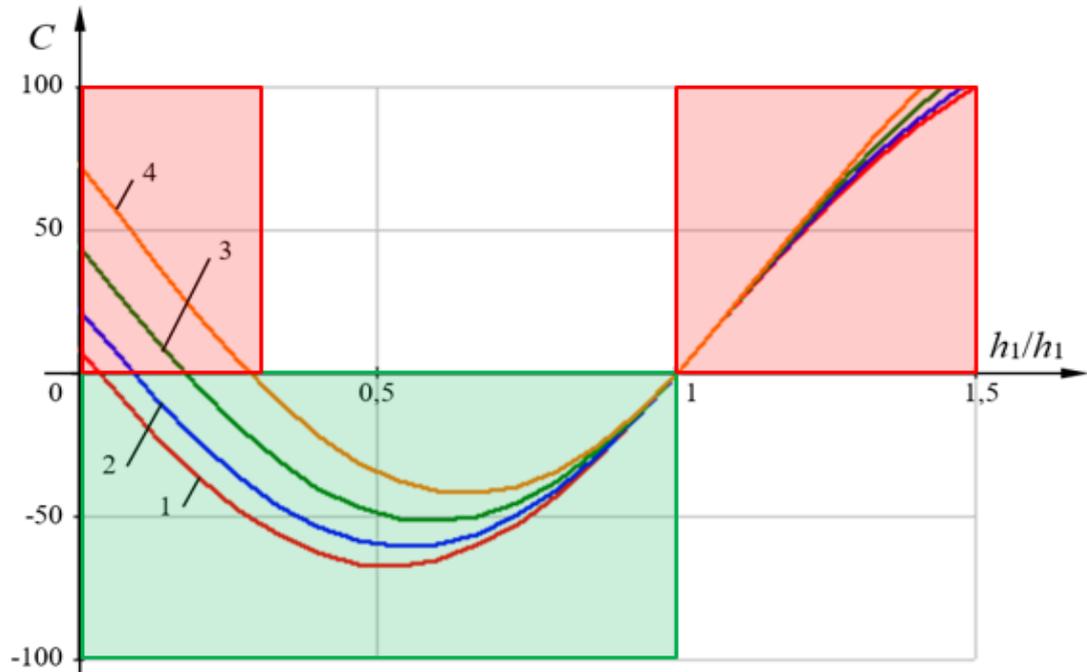


Рисунок 3.20 – Изменение коэффициента $C(H_1, V)$ характеристического уравнения при варьировании параметра H_1 и скорости перемещения V :

$$1 - V = 0,3 V_0; 2 - V = 0,5 V_0; 3 - V = 0,7 V_0; 4 - V = 0,9 V_0.$$

3.5 Заключение по третьей главе

При рассмотрении модельной задачи поступательного движения мобильного робота с постоянной скоростью под действием двух движителей, дискретно взаимодействующих с опорной поверхностью, в соответствии с разработанной математической моделью получены следующие программные зависимости:

- усилий, развиваемых движителями;
- моментов на маховиках электроприводов;
- управляющих воздействий для взаимосвязанного электропривода (постоянного тока) движителей.

На основе предложенного критерия оптимального распределения совместной тяги между несколькими движителями получены временные зависимости коэффициентов для каждого движителя, учитывающих такое распределение, а также временные зависимости управляющих воздействий – напряжений для электродвигателей постоянного тока.

На основе решения задачи оптимизации получены значения целевого функционала распределения нагрузки между движителями при заданном перемещении с постоянной поступательной скоростью. Доказана оптимальность распределения тяговых усилий между движителями путем соответствия значений коэффициентов распределения точке минимума целевого функционала оптимизации. Показано, что выигрыш в суммарных тепловых потерях во взаимосвязанном электроприводе за один цикл составил около 7-8%.

ГЛАВА 4. Стендовое моделирование и экспериментальные исследования

В данной главе представлены разработанный стенд исследования системы управления якорно-тросовым движителем, методика проведения экспериментов, а также их результаты.

4.1. Разработка экспериментального стенда

Для проверки математической модели, представленной в главе 2, и проверки результатов математического моделирования был разработан экспериментальный стенд (рис. 4.1).

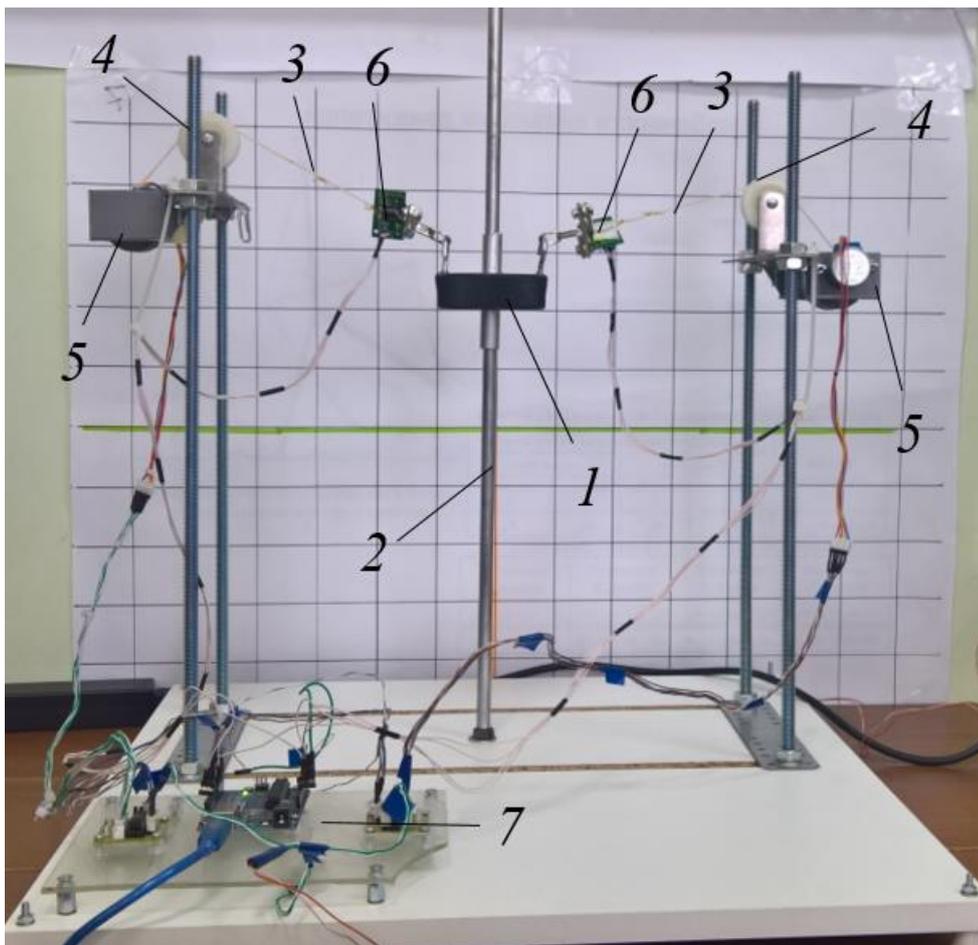


Рисунок 4.1 – Экспериментальный стенд: 1 – груз; 2 – направляющая; 3 – тросы; 4 – маховики; 5 – электроприводы; 6 – датчики усилий (тензометрические датчики); 7 – плата управления с микроконтроллером.

Экспериментальный стенд (рис. 4.1) включает в себя:

- груз, прямолинейно перемещающийся по направляющей;
- маховики;
- тросы от маховиков к грузу;
- электроприводы (на основе шаговых двигателей или двигателей постоянного тока) с драйверами;
- тензометрические датчики усилий;
- плату управления.

Экспериментальный стенд позволяет проводить моделирование поступательного перемещения груза, имитирующего перемещение робота-понтон с якорно-тросовыми движителями. Для моделирования особенности якорно-тросовых движителей (особенностей, характерных для всех шагающеподобных движителей) – переменного характера нагрузки в движителях в цикловом процессе движения опорного элемента «опора-перенос-опора», – перемещение груза, обеспечиваемое двумя электроприводами, может осуществляться с разными угловыми скоростями вращения маховиков.

Структурная схема экспериментального стенда представлена на рисунке 4.2

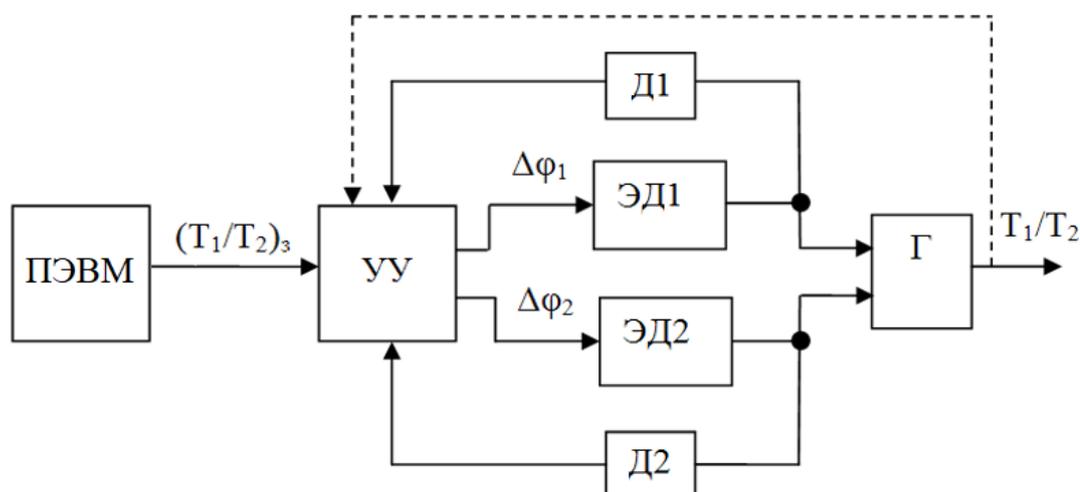


Рисунок 4.2 – Структурная схема экспериментального стенда:

УУ – устройство управления; ЭД1, ЭД2 – электродвигатели с драйверами управления; Д1, Д2 – датчики усилий; Г – груз (нагрузка).

Функция перемещения груза $x(t)$ или функция изменения скорости прямолинейного перемещения груза $v(t)$ задается с управляющей программы ПЭВМ. С ПЭВМ также задается функция изменения соотношения усилий в тросах станда $(T_1/T_2)_3$, в общем случае – в виде функции времени или перемещения $f_{T_1/T_2}(v, t)$. Управляющее устройство (микроконтроллер) по обратной связи на основании считываемых реальных значений датчиков усилий (T_1/T_2) в тросах обеспечивает заданное распределение усилий $(T_1/T_2)_3$, и, при необходимости, производит коррекцию угловых скоростей вращения того или иного маховика в соответствии с условием обеспечения устойчивости движения (отсутствия дерганий и колебаний груза), либо в соответствии с каким-либо другим критерием (например, обеспечения оптимального энергопотребления).

Конструкция станда позволяет также исследовать якорно-тросовый движитель в отдельности моделированием заданной траектории его свободного переноса (при отсутствии направляющей), или его переноса через препятствие известной высоты.

Экспериментальный стенд может работать в одном из следующих режимов, характеризующемся своими

- 1) автоматический режим прямолинейного движения груза по направляющей;
- 2) автоматический режим движения груза без направляющей;
- 3) ручной режим управления совместным подъемом обоими электроприводами груза;
- 4) ручной режим независимого управления каждым электроприводом.

Автоматический режим прямолинейного движения груза по направляющей имитирует прямолинейное движение робота-понтон с якорно-тросовыми движителями, и предназначен для исследования закономерностей такого движения. Движение груза осуществляется автоматически в соответствии с априорно заданными функциями $x(t)$ ($v(t)$) и $(T_1/T_2)_3$.

Автоматический режим движения груза без направляющей имитирует работу одного якорно-тросового движителя, обеспечивая перемещение груза по заданной траектории с выдерживанием априорно заданных функций $x(t)$ ($v(t)$) и $(T_1/T_2)_z$, и предназначен для исследования работы электроприводов при движении якоря.

Ручной режим управления совместным подъемом обоими электроприводами груза обеспечивает движение груза по командам с окна программы управления, и предназначен для отладки.

Ручной режим независимого управления каждым электроприводом позволяет задавать вручную усилия в тросах подбором разности угловых скоростей электроприводов и предназначен для отладки.

В качестве управляющего устройства выбран микроконтроллер ATMEGA328 на плате ARDUINO UNO R3. Технические характеристики контроллера представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Технические характеристики контроллера ARDUINO UNO R3.

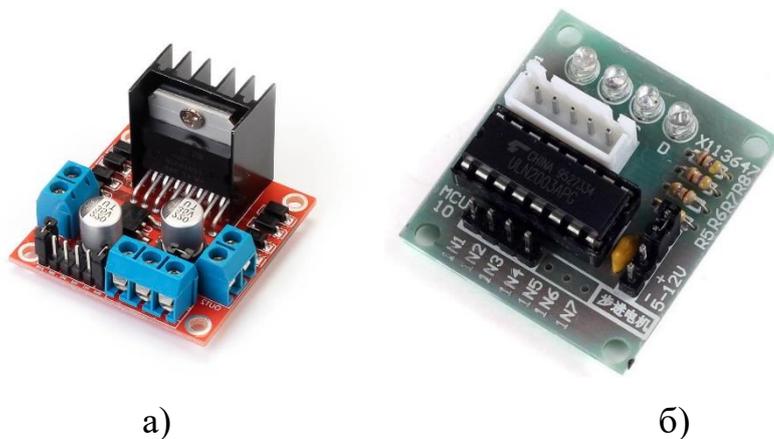
Параметр	Значение
Микроконтроллер	ATmega328
Тактовая частота	16 МГц
Память FLASH (память программ)	32 кб
Память RAM (ОЗУ)	2 кб
Память EEPROM	1кб
Количество таймеров	3
Цифровые входы/выходы (GPIO)	14
Аналоговые входы	6
Интерфейсы	USB, I2C, SPI
Входное напряжение питания	6-20 В, DC
Рабочее напряжение питания	5 В, DC

Внешний вид платы ARDUINO UNO R3 представлен на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 - Внешний вид платы ARDUINO UNO R3.

В качестве электроприводов могут быть использованы шаговые двигатели или двигатели постоянного тока. Для управления двигателями постоянного тока применены драйверы L298N. Данный драйвер предназначен для управления скоростью вращения двух электродвигателей постоянного тока методом изменения подаваемого напряжения с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ), либо одного шагового электродвигателя. При этом для управления двумя шаговыми двигателями применены драйверы ULN2003, представляющие собой транзисторные ключи на сборках Дарлингтона. Внешний вид драйверов представлен на рисунке 4.4.



а)

б)

Рисунок 4.4 – Внешний вид драйверов L298N (а) и ULN2003 (б).

Технические характеристики драйверов представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Технические характеристики драйвера ULN2003.

Параметр	Драйвер L298N	Драйвер ULN2003
Напряжение питания логики, В	5	5 В
Напряжение питания электродвигателей, В	5...35	до 50
Максимальная мощность, Вт	20	8
Размеры, мм	44×43×30	28×28×20

В качестве двигателей постоянного тока выбраны электродвигатели с редуктором ZHENGKE ZS-RI (A4060). При испытаниях с шаговым двигателем применялся шаговый двигатель 24BJY48. Внешний вид электродвигателей представлен на рисунке 4.5.

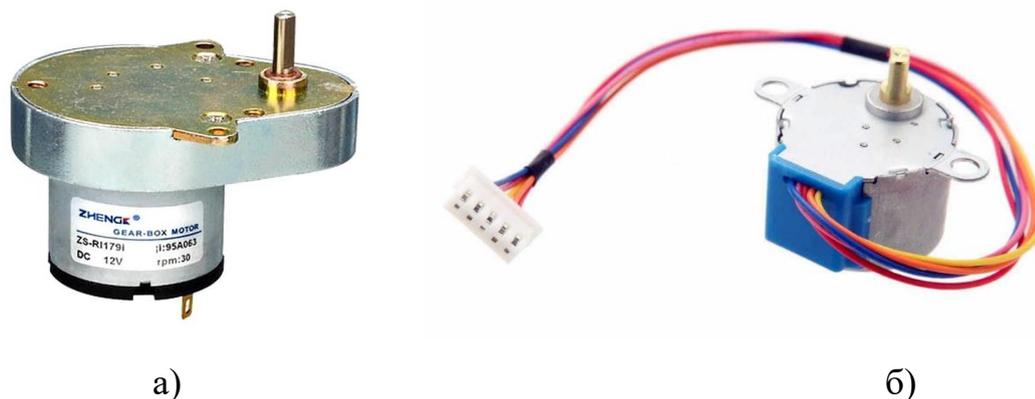


Рисунок 4.5 - Внешний вид электродвигателей ZHENGKE ZS-RI (а) и 24BJY48 (б).

Шаговый двигатель 24BJY48 – униполярный шаговый двигатель с 4 фазами и количеством шагов ротора на оборот 64 шт. Двигатель позволяет реализовывать следующие режимы вращения ротора: полношаговый, полушаговый, микрошаговый. Угол поворота за один шаг в микрошаговом режиме составляет 5,625 град.

Технические характеристики электродвигателей представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Технические характеристики электродвигателей ZHENGKE ZS-RI и 24BJY48.

Параметр	ZHENGKE ZS-RI	24BJY48
Номинальное напряжение питания, В	12	5
Номинальная скорость, об/мин	7000	15
Передаточное число редуктора	1/224	1/63,684
Номинальный крутящий момент, кгс·см	5	0,450

Для контроля усилий в тросах экспериментального стенда встроены тензометрические датчики с модулем преобразователя АЦП НХ711. Внешний вид модуля АЦП представлен на рисунке 4.6.

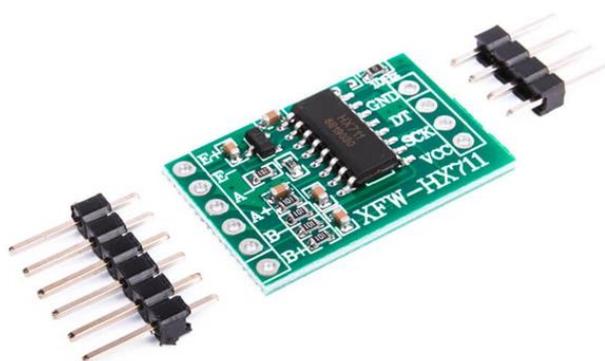


Рисунок 4.6 - Внешний вид модуля АЦП НХ711.

4.2. Разработка программного обеспечения экспериментального стенда

Программное обеспечение экспериментального стенда включает в себя:

- программное обеспечение компьютера управления (ПО ПК);
- программное обеспечение управляющего микроконтроллера (ПО МК).

Данные программные обеспечения являются составной частью экспериментального стенда и включают в себя распределенные функции управления им, при этом такое распределение может быть изменено в зависимости от решаемых задач. Взаимодействие ПО ПК и ПО МК осуществляется по совместному протоколу обмена данными двусторонней направленности.

ПО ПК предназначено для взаимодействия с оператором, и обеспечивает следующие функции:

- ввод требуемых законов движения груза ($v(t)$, $x(t)$, $(T_1/T_2)_3$), а также команд управления («Пуск», «Стоп» и т.д.);
- расчет в соответствии с синтезированным критерием требуемых усилий в тросах стенда, а также расчет других параметров;
- синтез на основе заданных законов движения груза управляющих команд для микроконтроллера;
- индикацию состояния электроприводов стенда;
- построение графиков движения груза, изменения усилий в тросах, а также подводимой к каждому электроприводу мощности;
- архивацию рассчитанных и измеренных параметров стенда;
- ручное управление электроприводами.

Окно управляющей программы включает (рис. 4.7):

- блок задания законов движения груза;
- блок задания законов распределения усилий в тросах;
- блок ручного управления электроприводами;

- окно графиков измеренных усилий или напряжений в каждом из электроприводов;
- окно графика относительного распределения усилий в тросах;
- блок установки соединения с микроконтроллером;
- интерфейсные меню.

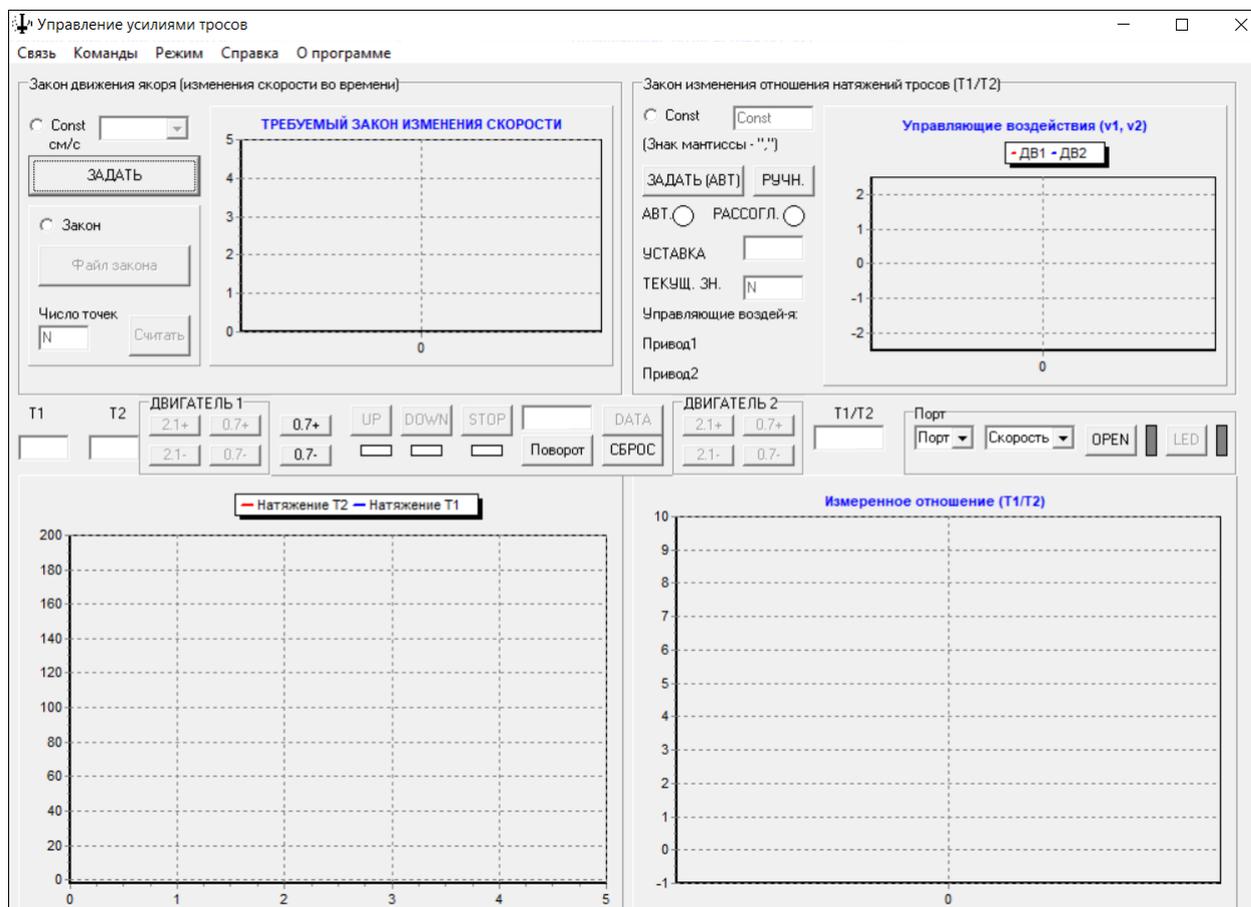


Рисунок 4.7 - Интерфейс управляющей программы (ПО ПК) экспериментального стенда.

Алгоритм работы ПО ПК включает в себя операции по вводу информации, расчету требуемых зависимостей усилий и управляющих напряжений, приему и передаче информации в порт обмена данными с микроконтроллером стенда, индикации режимов работы стенда и построению графиков.

При этом возможны несколько вариантов работы алгоритма управления экспериментальным стендом: 1) программное управление; 2)

следящее управление по значениям усилий; 3) следящее управление по значениям напряжений; 4) комбинированное управление.

Алгоритм программного управления экспериментальным стендом (без обратных связей) представлен на рисунке 4.8.

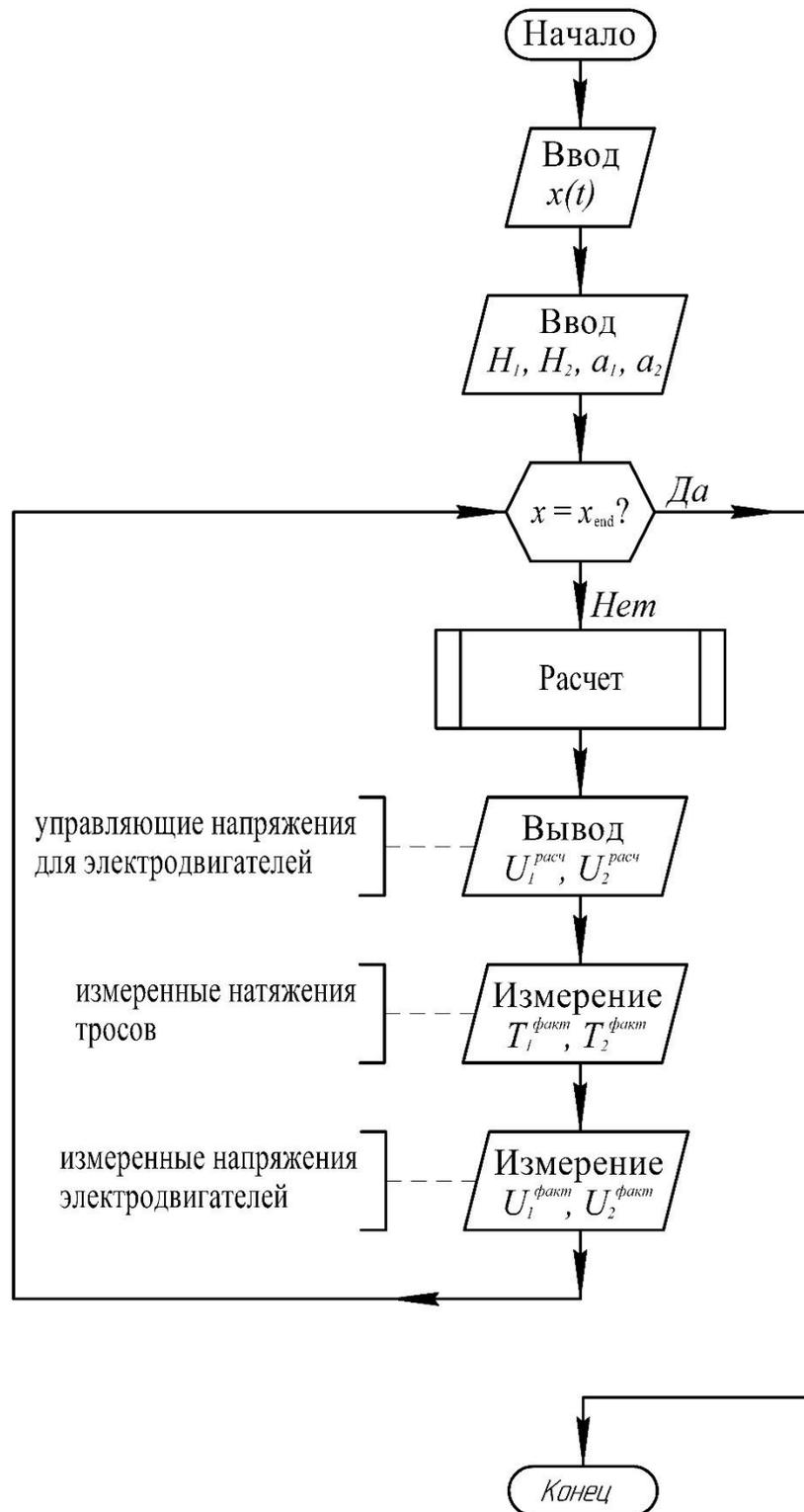


Рисунок 4.8 – Алгоритм программного управления экспериментальным стендом (без обратных связей).

При программном управлении (рисунок 4.8) задается требуемый закон движения груза $x(t)$, вводятся геометрические параметры стенда (которые могут быть изменены в конструкции): H_1 , H_2 , a_1 , a_2 , а также другие необходимые данные (масса груза, радиусы маховиков и др.).

Далее начинается расчет временных зависимостей:

- коэффициентов распределения тяговых усилий между электродвигателями на основе разработанной математической модели и предложенного критерия;
- моментов на маховиках электроприводов;
- усилий в тросах;
- требуемых управляющих напряжений для электродвигателей $U_{1,2}^{расч}$.

После расчета в порт связи с микроконтроллером передаются значения - требуемых управляющих напряжений для электродвигателей. Параллельно из порта считываются значения измеренных (фактических) значений напряжений $U_{1,2}^{факт}$ и усилий в тросах $T_{1,2}^{факт}$ для построения графиков.

Данная последовательность программных операций повторяется циклично на каждой итерации текущего перемещения пока не будет пройден весь заданный путь. Шаг итерации Δx может быть также программно задан. Контроля фактического перемещения аппаратными средствами в данной версии экспериментального стенда не реализовано – расчет текущего перемещения осуществляется программно по значениям таймера системного времени.

Такой алгоритм хоть и требует меньше вычислительных ресурсов, обладает рядом недостатков: фактические значения управляющих напряжений и тяговых усилий в тросах лишь контролируются программой и не используются для расчета мгновенных параметров движения.

Такого недостатка лишены алгоритмы с обратными связями (рисунок 4.9, 4.10). При этом обратная связь может в данной конструктивной реализации стенда возможна по величинам напряжений или усилий в тросах.

Алгоритм следящего управления экспериментальным стендом с обратной связью по напряжению представлен на рисунке 4.9.

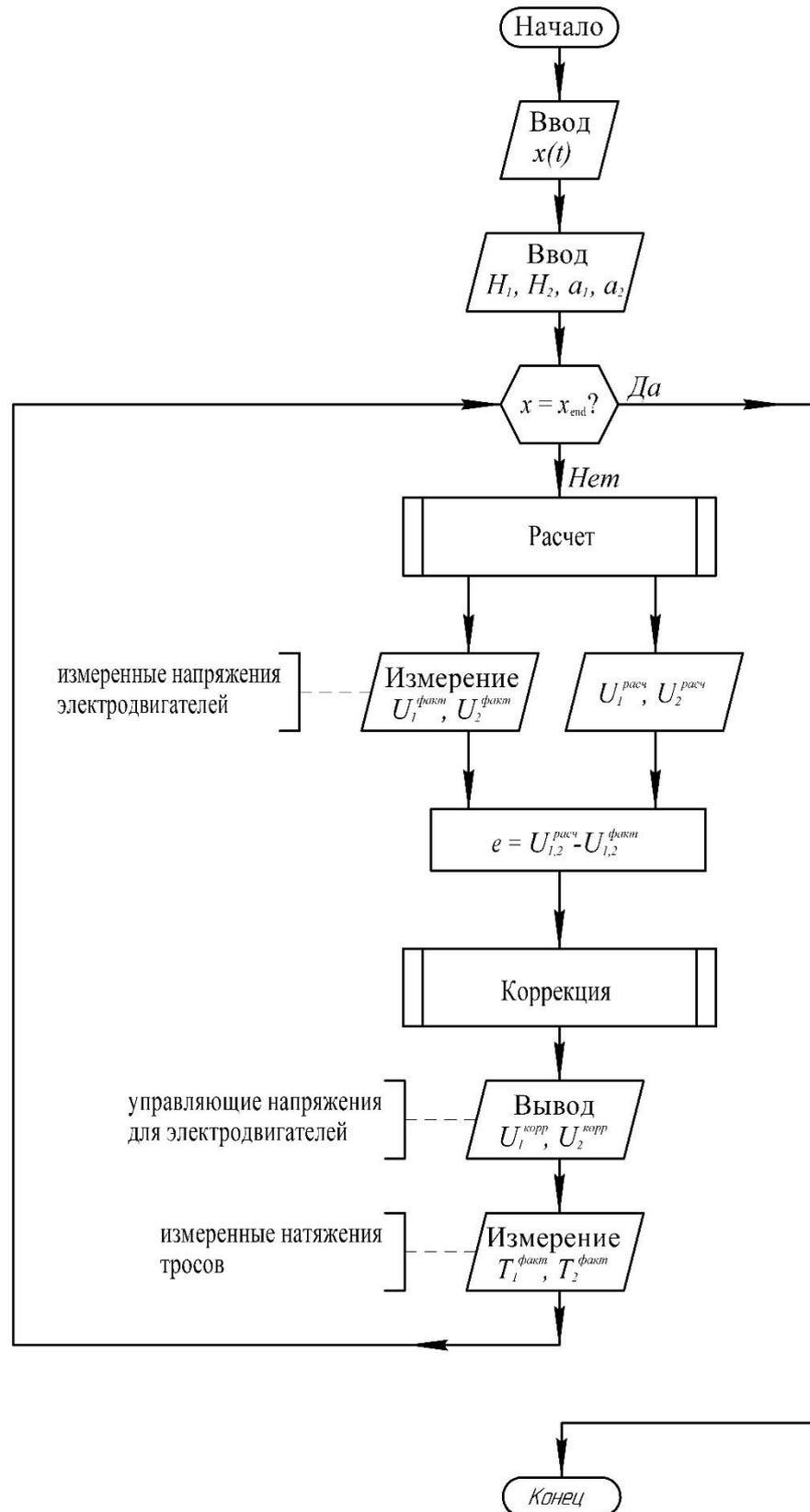


Рисунок 4.9 – Алгоритм следящего управления экспериментальным стендом с обратной связью по величине напряжения ЭД.

Алгоритм следящего управления экспериментальным стендом с обратной связью по усилиям в тросах представлен на рисунке 4.10.

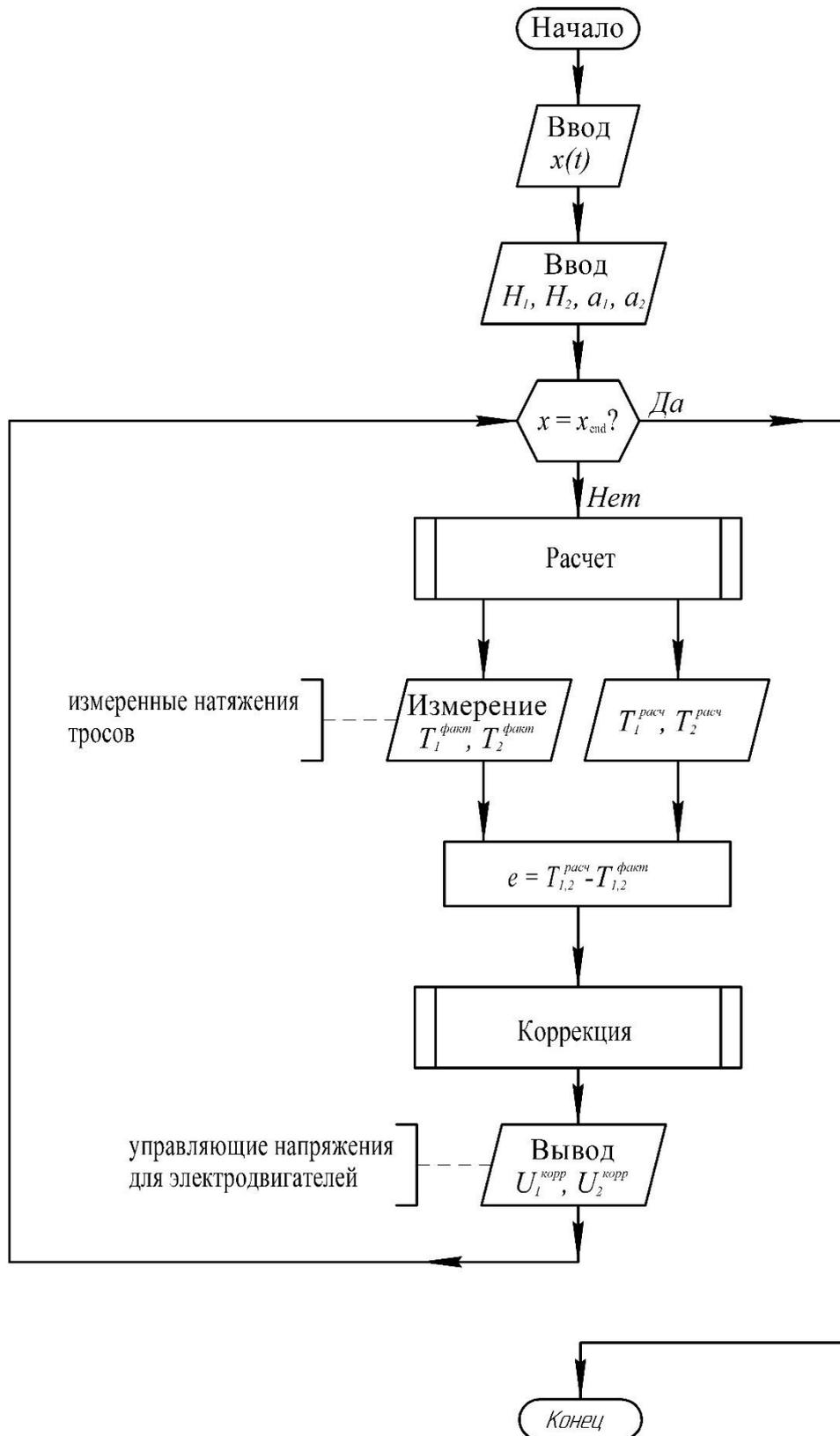


Рисунок 4.10 – Алгоритм следящего управления экспериментальным стендом с обратной связью по величине тяговых усилий.

Алгоритмы управления экспериментальным стендом с обратными связями также предполагает первоначальный ввод исходных данных и дальнейший расчет временных зависимостей коэффициентов распределения тяговых усилий между электродвигателями на основе разработанной математической модели и предложенного критерия, моментов на маховиках электроприводов, усилий в тросах, требуемых управляющих напряжений для электродвигателей $U_{1,2}^{расч}$.

Одновременно измеряются фактические значения подаваемых управляющих напряжений $U_{1,2}^{факт}$ либо тяговых усилий в тросах $T_{1,2}^{факт}$. Эти фактические измеренные значения в отличие от алгоритма программного управления не только контролируются, но и используются для вычисления ошибки управления $e(t)$.

Далее, если значение ошибки управления не нулевое (или превышает заданную погрешность), происходит коррекция управляющих воздействий. Такая коррекция предполагает применение автоматического регулятора, например, ПИ-регулятора для приведения управляющих напряжений к расчетным и устранения ошибки регулирования. Применение такого регулятора с расчетом его настроек показано в [95].

Выбор алгоритма управления определяется исследовательской задачей. Ввиду того что скорость перемещения груза известна и задается априорно, для управления стендом подходит и алгоритм программного управления. Однако показано [89]-[91], что применение принципов следящего управления позволяет получить более точные и близкие значения регулируемой величины по отношению к заданным.

4.3 Методика проведения экспериментальных исследований

Для проверки адекватности разработанной математической модели и предложенного критерия оптимального распределения тяговых усилий необходимо проведение экспериментальных исследований, которые включают следующие задачи:

- определение соответствия фактических измеренных усилий и напряжений расчетным при программном управлении;
- определение соответствия фактических измеренных усилий и напряжений расчетным при следящем управлении с обратной связью по управляющим напряжениям;
- определение соответствия фактических измеренных усилий и напряжений расчетным при следящем управлении с обратной связью по усилиям натяжения в тросах;
- определение качества переходных процессов во взаимосвязанном электроприводе.

Данные задачи должны быть исследованы при различных геометрических параметрах схемы стенда – при изменении величин H_1 , H_2 , a_1 , a_2 (рисунок 3.1):

- $H_1 = H_2$; $a_1 = a_2$;
- $H_1 > H_2$; $a_1 = a_2$;
- $H_1 > H_2$; $a_1 > a_2$;
- $H_1 > H_2$; $a_1 < a_2$.

Указанные исследования должны быть выполнены при постоянной массе груза ($m = 0,5$ кг) для различных величин скоростей его поступательного перемещения $v(t) = 0,05 \dots 1$ см/с. При этом скорость поступательного движения груза должна оставаться постоянной.

4.4 Результаты экспериментальных исследований

В соответствии с представленной методикой были проведены экспериментальные исследования. Расчетные и экспериментальные зависимости управляющих напряжений и тяговых усилий при программном управлении представлены на рисунках 4.11, 4.12.

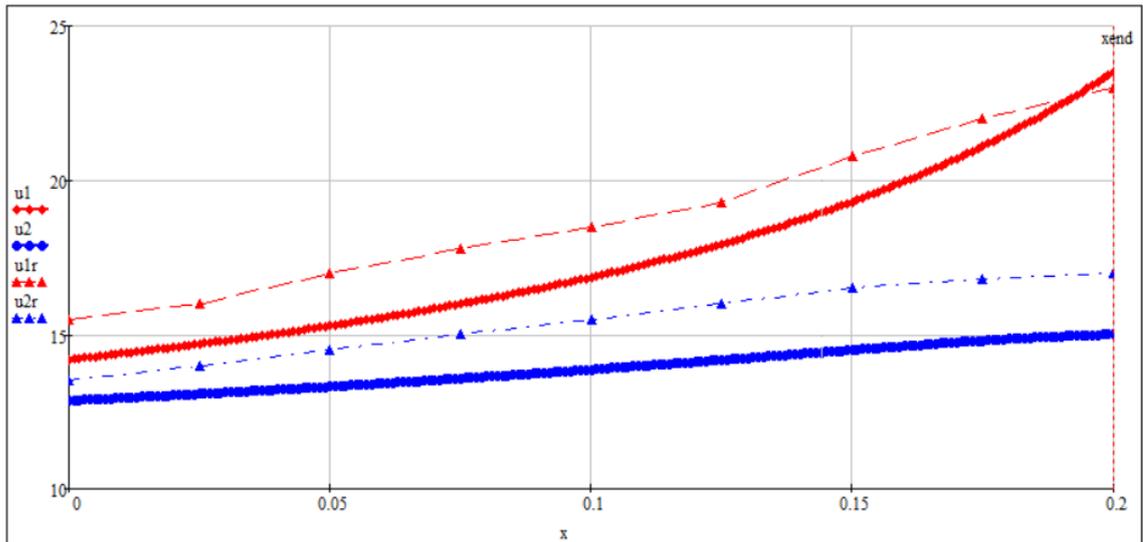


Рисунок 4.11 – Сравнение расчетных (u_1 , u_2) и экспериментальных (u_{1r} , u_{2r}) значений управляющих напряжений при программном управлении.

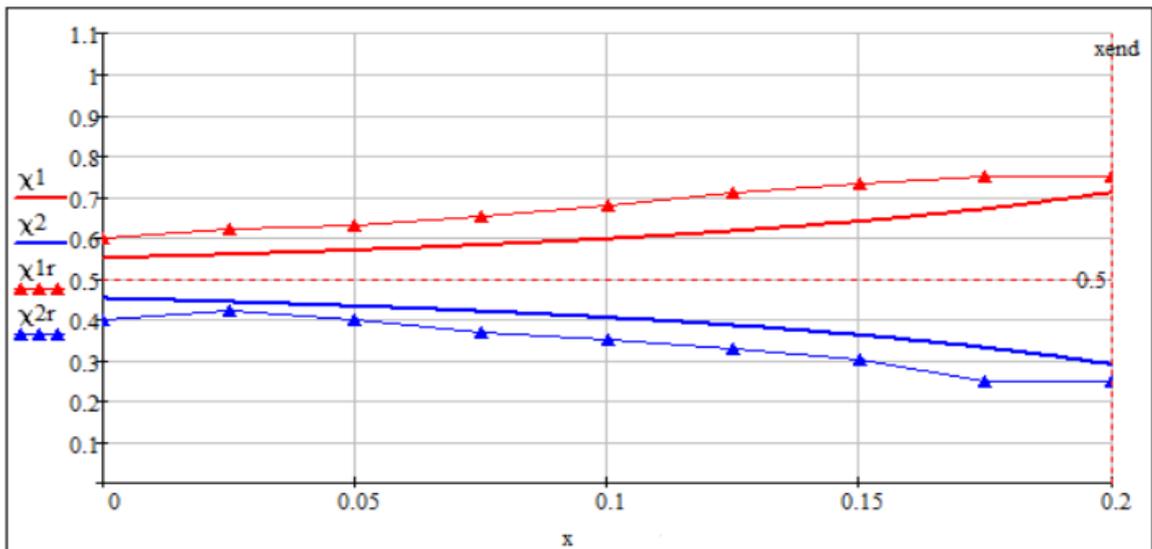


Рисунок 4.12 – Сравнение расчетных (χ_1 , χ_2) и экспериментальных (χ_{1r} , χ_{2r}) значений коэффициентов распределения усилий в тросах при программном управлении.

Расчетные и экспериментальные зависимости управляющих напряжений и тяговых усилий при следящем управлении с обратной связью по управляющему напряжению представлены на рисунках 4.13, 4.14.

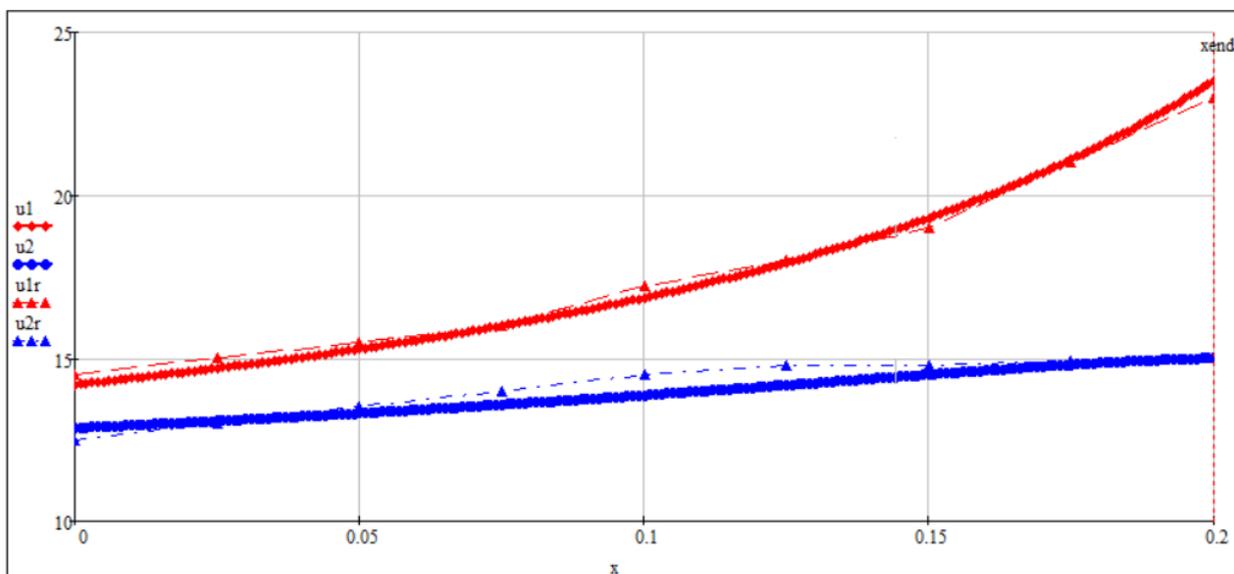


Рисунок 4.13 – Сравнение расчетных (u_1 , u_2) и экспериментальных (u_{1r} , u_{2r}) значений управляющих напряжений при следящем управлении с обратной связью по управляющему напряжению.

В соответствии с рисунками 4.11, 4.12, программные режимы управления обеспечивают достаточно грубое управление с высокой ошибкой: отклонение экспериментальных значений напряжений от расчетных составило 10...20%, а коэффициентов распределения нагрузки χ_1 , χ_2 – около 20...30%.

Лучшие результаты получаются при реализации системы управления с обратной связью по величине управляющего напряжения (рис. 4.13) – в этом случае отклонение экспериментальных значений управляющих напряжений от расчетных составило около 7...10 %.

Расчетные и экспериментальные зависимости управляющих напряжений и тяговых усилий при следящем управлении с обратной связью по усилиям тросах представлены на рисунках 4.14, 4.15.

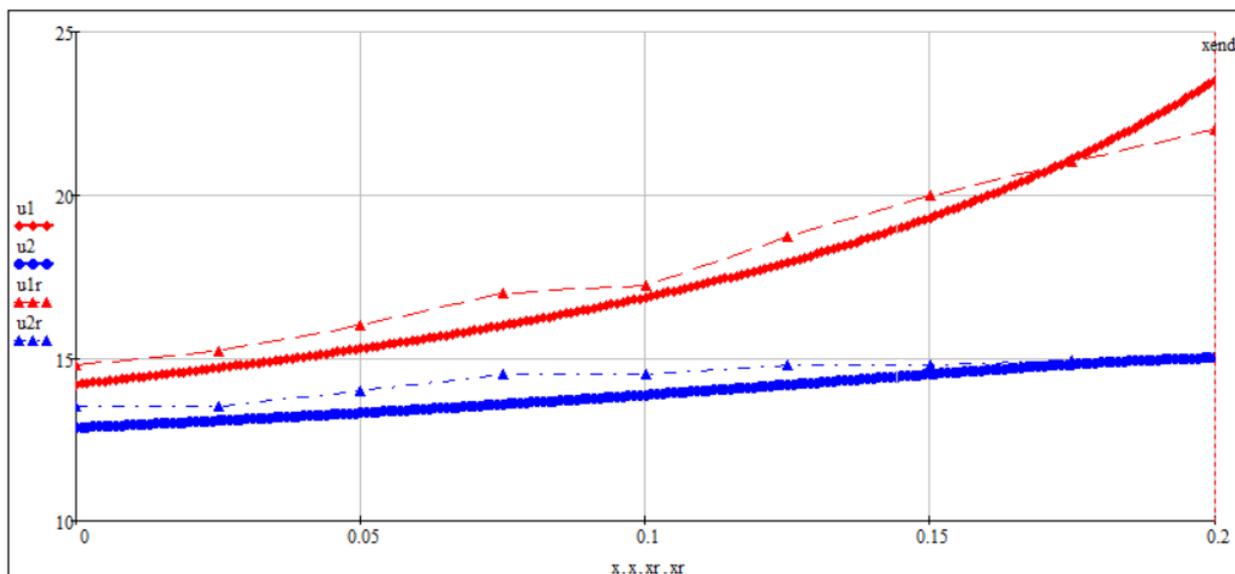


Рисунок 4.14 – Сравнение расчетных (u_1 , u_2) и экспериментальных (u_{1r} , u_{2r}) значений управляющих напряжений при следящем управлении с обратной связью по усилиям в тросах.

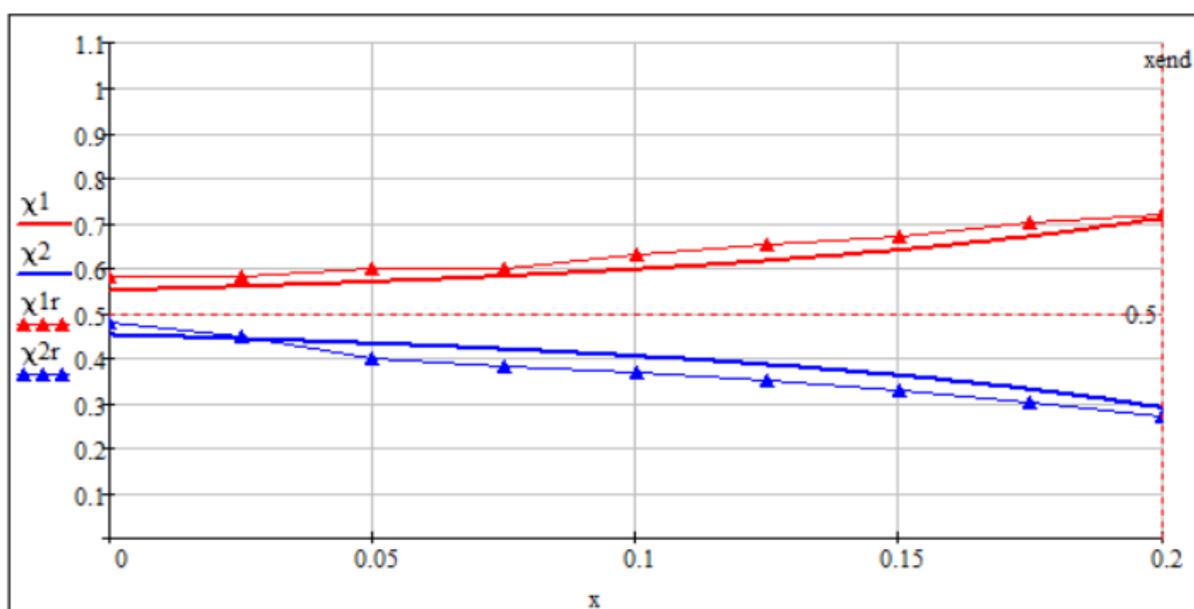


Рисунок 4.15 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений тяговых усилий при следящем управлении с обратной связью по усилиям в тросах.

Переходные процессы изменения тяговых усилий в тросах представлены на рисунках 4.16, 4.17.

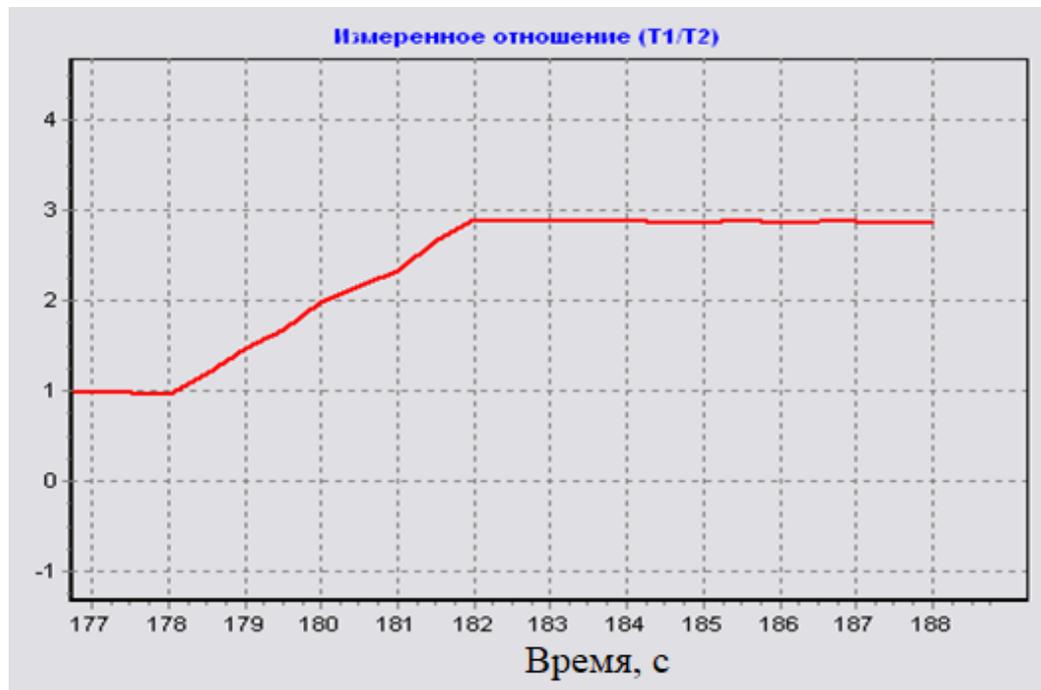


Рисунок 4.16 – Переходные процессы изменения соотношений тяговых усилий в тросах.



Рисунок 4.17 – Переходные процессы изменения соотношений тяговых усилий в тросах.

4.5 Заключение по четвертой главе

Для проверки полученных аналитических зависимостей, а также для исследования режимов работы взаимосвязанного электропривода двигателей мобильного робота, дискретно взаимодействующего с опорной поверхностью, разработан экспериментальный стенд на основе взаимосвязанного электропривода постоянного тока. Разработаны его аппаратная часть с микроконтроллером и программная часть, включающая программное обеспечение для микроконтроллера и ЭВМ управления. Программное обеспечение ЭВМ управления оснащено удобным интерфейсом для взаимодействия с человеком, и позволяет вести наблюдение и запись величин усилий в тросах и напряжений управления для электроприводов.

Разработаны и программно реализованы:

- алгоритм программного управления (без применения обратных связей);
- алгоритмы следящего управления с обратными связями по величине управляющего напряжения и по величинам натяжения тросов.

Экспериментально исследованы режимы работы взаимосвязанного электропривода постоянного тока в соответствии с разработанной математической моделью, а также распределение тяговых усилий в нем.

Заключение

Работа посвящена исследованию и разработке метода управления распределением тяговых усилий между несколькими движителями мобильного робота, дискретно взаимодействующими с опорной поверхностью.

В результате проведения исследования:

2) разработана математическая модель работы взаимосвязанного электропривода постоянного тока;

3) предложен критерий оптимального распределения тяговых усилий между движителями шагающеподобного робота на основе требований минимума суммарных тепловых потерь во взаимосвязанном электроприводе;

4) установлены закономерности изменения подаваемых на электроприводы управляющих воздействий в соответствии с предложенным критерием оптимального распределения тяговых усилий между движителями;

5) проанализированы условия обеспечения устойчивости программных режимов работы движителей шагающеподобного робота;

6) экспериментально подтверждена адекватность разработанной математической модели и оптимальность распределения тяговых усилий между движителями экспериментального стенда.

На основе анализа основных закономерностей движения роботов и взаимодействия их движителей с опорной поверхностью **доказано**, что существует такое распределение управляющих напряжений, подаваемых на обмотку электродвигателей, которое обеспечивает минимум уровня тепловых потерь, зависящее нелинейно от скорости движения робота, передаточных функций первого порядка механизма движителя и силы сопротивления движению.

Показано, что распределение уровня управляющих воздействий не является постоянным для конкретного движителя, а зависит от скорости движения, силы сопротивления, определяемой физико-механическими свойствами опорной поверхности и походки робота.

В качестве интегрального критерия эффективности I **предложено** использовать величину определенного интеграла за промежуток времени, равному периоду движения движителя от суммы квадратов токов i , протекающих в цепях электроприводов всех движителей $I = \sum \int_0^{\tau} i^2 dt$, зависящих от «походки» робота.

Установлено, что при применении якорно-тросовых движителей, разработанный метод распределения управляющих напряжений, подаваемых на обмотки тяговых электродвигателей, может позволить снизить уровень тепловых потерь по сравнению с равномерным распределением до 7-8%.

На основе исследования динамики поступательного движения робота как твердого тела с якорно-тросовыми движителями и минимумом тепловых потерь в приводных двигателях **сделан вывод**, что движение устойчиво по Ляпунову при соотношениях между скоростью движения, длиной тросов и величиной шага, удовлетворяющих критериям устойчивости Гурвица.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fabrice Le Bars, Elba Antonio, Jorge Cervantes, Carlos De La Cruz and Luc Jaulin. Estimating the Trajectory of Low-Cost Autonomous Robots Using Interval Analysis: Application to the euRathlon Competition. *Ocean Engineering & Oceanography*, vol. 10. Marine Robotics and Applications.
2. Jin-Ho Kim, Tae-Kyeong Yeu, Suk-Min Yoon, Hyung-Woo Kim, Jong-Su Choi, Cheon-Hong Min and Sup Hong. Electric-Electronic System of Pilot Mining Robot, MineRo-II // *Proceedings of the Tenth ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium Szczecin, Poland, September 22-26, 2013.* – P. 269-273.
3. Yoo, S.Y., Jun, B.H., Shim, H. Design of static gait algorithm for hexapod subsea walking robot: Crabster, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers* – September 2014, Vol. 38, Issue 9, pp. 989-997.
4. В. А. Гой, В.В. Костенко. Регулирование плавучести и дифферента автономного подводного робота. *Подводные исследования и робототехника*, 2016, № 1(21).
5. В.В. Арыканцев, В.В. Чернышев. МАК-1 – подводный шагающий робот. *Робототехника и техническая кибернетика*, 2015, № 2(7), стр. 45-50.
6. Verichev S., Laurens de Jonge, Wiebe B., Rodney N. Deep mining: from exploration to exploitation, *Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of International Conference, VNII Okeangeologia. Saint Petersburg, 2014*, pp. 126-138.
7. В.А. Серов, И.В. Ковшов, С.А. Устинов. Задачи технологических роботизированных шагающих платформ при освоении подводных (подледных) месторождений полезных ископаемых. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2017, № 9 (194), стр. 181-192.
8. Marshall J. A., Bonchis A., Nebot E., Scheduling S. *Robotics in mining //Springer handbook of robotics. Springer, Cham, 2016; 1549–1576. doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_59.*

9. Применение роботизированных платформ с якорно-тросовыми двигателями при глушении подводных аварийных скважин / В.А. Серов, И.В. Ковшов, С.А. Устинов, В.Н. Платонов, Е.С. Брискин // Сборник тезисов 31-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» (г. Санкт-Петербург, 28-29 сентября 2020 г.) / Гос. научный центр РФ «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский ин-т робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК) [и др.]. – Санкт-Петербург, 2020. – С. 169-170.

10. Брискин Е.С., Калинин Я.В., Мирошкина М.В. О динамике переноса шагающих двигателей подводных мобильных роботов. Известия ЮФУ. Технические науки, № 7(2019). С. 71 – 82.

11. Определение усилий в двигателях якорно-тросового типа / Е. С. Брискин, И. С. Пеньшин, Л. Д. Смирная, Н. Г. Шаронов // Известия ВолгГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. – Волгоград, 2017. № 14 (209). С. 87-90.

12. Пеньшин, И.С. О принципах движения роботизированных систем с двигателями якорно-тросового типа / И.С. Пеньшин, Л.Д. Смирная, Е.С. Брискин // Прогресс транспортных средств и систем – 2018 : материалы междунар. науч.-практ. конф. (г. Волгоград, 9-11 октября 2018 г.) / редкол.: И. А. Каляев, Ф. Л. Черноусько, В. М. Приходько [и др.] ; ВолгГТУ, РФФИ, «ФНПЦ «Титан–Баррикады». – Волгоград, 2018. – С. 163.

13. Динамика и управление движением шагающих машин с цикловыми двигателями: монография / Под ред. Е. С. Брискина. — М.: Машиностроение, 2009. — 191 с.

14. Артоболевский И. И. Механизмы П.Л. Чебышева / И. И. Артоболевский, Н. И. Левитский // Научное наследие П. Л. Чебышева. Выпуск II: Теория механизмов. — М. — Л.: Издательство АН СССР, 1945. — 192 с.

15. Брискин Е. С. Цикловые механизмы шагания с пассивно управляемой стопой / Е. С. Брискин., В. В. Чернышев // Теория механизмов и машин. — 2004. — №. 1. — С.80-88.

16. Брискин Е. С. Синтез циклового шагающего механизма с направляющей и критерии его оценки / Е. С. Брискин, А. В. Леонард, А. В. Малолетов // Теория механизмов и машин. — 2011. — №. 1. — С.14-24.

17. Малолетов А. В. Динамика и оптимизация структуры, параметров и алгоритмов управления движением шагающих машин со сдвоенными шагающими движителями: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.02.01 / Малолетов Александр Васильевич; Волгоград. ВолгГТУ, 2015. — 316 с.

18. Устинов С.А. Динамика и управление приводами адаптации к опорной поверхности шагающего робота с ортогональными движителями: дис. ... канд. тех. наук: 05.02.05 / Устинов Сергей Анатольевич; Волгоград. ВолгГТУ, 2016. — 150 с.

19. Павловский В.Е. О разработках шагающих машин // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2013. № 101. 32 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-101>.

20. Брискин Е.С., Калинин Я.В., Малолетов А.В., Шурыгин В.А. Об оценке эффективности шагающих роботов на основе многокритериальной оптимизации их параметров и алгоритмов движения. Известия РАН. Теория и системы управления. № 2, 2017. стр. 168-176.

21. Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф. Механика и управление автоматического шагающего аппарата. — М.: Наука, 1984.

22. Бессонов А. П. К вопросу о систематике походок шагающих машин / А. П. Бессонов, Н. В. Умнов. // Машиноведение — 1975. — № 6. — С.23-30.

23. Мобильный шагающий робот легкого класса / В.В. Жога, А. Е. Гаврилов, В. А. Шурыгин, А. С. Даншин, Д. В. Голубев // Современное машиностроение. Наука и образование. — 2013. — № 3. — С.718-724.

24. Черноусько Ф. Л. Проблемы управления и оптимизации движений / Ф. Л. Черноусько, Н. Н. Болотник, В. Г. Градецкий // II Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. — 2014. — С. 67-78.

25. Bares J. Ambler: An autonomous rover for planetary exploration / J. Bares [et al.] // Computer. — 1989. — no 6. — pp.18-26.

26. Брискин Е. С. Тяговая динамика шагающих машин с ортогональными двигателями / Е. С. Брискин, В. М. Соболев. // Проблемы машиностроения и надёжности машин. — 1990. — №3. — С.28-34.

27. Брискин Е. С. О влиянии нормальных вибраций на тягово-цепные свойства шагающих машин / Е. С. Брискин, А. Е. Русаковский // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 1991. — № 7-9. — С.116-120.

28. Брискин Е. С. Моделирование динамики смены стоп шагающих машин / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев // Искусственный интеллект. — 2009. — № 3. — С.293-299.

29. Брискин Е.С. [и др.] Шагающая машина со спаренными ортогональными двигателями, ВолгГТУ, Волгоград, Отчет о научно-исследовательской работе по Государственному контракту № 02.740.11.0011 от 15 июня 2015г., № госрегистрации 01200960917. — 2015. — 142 с.

30. Sen Qian, Bin Zi, Wei-Wei Shang, Qing-Song Xu. A Review on Cable-driven Parallel Robots. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 31 (1):66, 12, 2018.

31. The International Journal of Robotics Research 27.9 (2008):1007-1026

32. Andreas Pot, Hendrik Mutherich, Werner Kraus, Valentin Schmidt, Philipp Miermeister and Alexander Wilhelm Verl. IPAnema: A family of Cable-Driven Parallel Robots for Industrial Applications.

33. Sen Qian, Kunlong Bao, Bin Zi and Ning wang. Kinematic Calibration of a Cable-Driven Parallel Robot for 3D Printing. Sensors, 2018, 18, 2898.

34. Tobias Bruckmann, Andreas Pott. Cable-Driven Parallel Robots. Mechanisms and Machine Science, vol.12. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013.
35. Bruckmann T., Pott A. Cable-driven parallel robots. Springer, 2013. 452 p. DOI 10.1007/978-3-642-31988-4.
36. Pott A., Bruckmann T. Cable-driven parallel robots. Springer, 2015. 324 p. DOI 10.1007/978-3-319-09489-2.
37. Gosselin C., Cardou P., Bruckmann T., Pott A. Cable-driven parallel robots. Springer, 2018. 416 p. DOI 10.1007/978-3-319-61431-1.
38. Nguyen D. Q., Gouttefarde M., Company O., Pierrot F. On the analysis of largedimension reconfigurable suspended cable-driven parallel robots // Robotics and Automation (ICRA), IEEE International Conference on IEEE, 2014. P. 5728-5735.
39. Usher K., Winstanley G., Carnie R. Air vehicle simulator: an application for a cable array robot // Robotics and Automation, ICRA. Proceedings of the IEEE International Conference on IEEE, 2005. P. 2241-2246.
40. Gagliardini L., Caro S., Gouttefarde M., Wenger P., Girin A. A reconfigurable cabledriven parallel robot for sandblasting and painting of large structures // Cable-Driven Parallel Robots: Springer, 2015. P. 275-291.
41. Izard J.-B., Dubor A., Hervé P.-E., Cabay E., Culla D., Rodriguez M., Barrado M. On the Improvements of a Cable-Driven Parallel Robot for Achieving Additive Manufacturing for Construction // Cable-Driven Parallel Robots: Springer, 2018. P. 353-363.
42. Фадеев М.Ю., Малолетов А.В. Управление параллельным четырехросовым роботом с помощью обратной кинематической модели. В сборнике: XXX Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2018) Сборник трудов конференции. 2019. С. 696-699.

43. Н.Г. Шаронов, М.И. Ефимов. О перемещении роботов по вертикальной шероховатой поверхности с помощью тросовых движителей. Известия Волгоградского государственного технического университета, № 3 (226), 2019. С. 51-54.

44. Ляхов Д.Г. Современные задачи подводной робототехники [The challenges of underwater robotics]. Подводные исследования и робототехника [Underwater Researches and Robotics], № 1, 2012. С 15-23.

45. В.Ф. Васильев. Водометные движители Учебное пособие Москва 2007 УДК 629.014.17:629.035 ББК 39.336 // Васильев В.Ф. Водометные движители: Учебное пособие/ МАДИ (ГТУ). – М., 2006. – 45 с.

46. Басин А.М. Некоторые вопросы теории водометных движителей / Труды Академии речного транспорта, 1953, вып. 2.

47. Л.В. Кисилев, А.В. Медведев. О некоторых особенностях динамики автономного подводного робота при управлении эквидистантным движением вблизи дна. Гироскопия и навигация, № 1 (104), том 27, 2019. С. 94-105.

48. В.В. Костенко, А.Ю. Толстоногов. Управление глубиной погружения необитаемого подводного аппарата, оснащенного системой регулирования плавучести. Подводные исследования и робототехника, 2019, № 1 (27), стр. 4-11.

49. Hong S., Kim H.W., Choi J.S. Transient Dynamic Analysis of Tracked Vehicles on Extremely Soft Cohesive soil, The 5th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, 2002, pp. 100-107.

50. Брискин Е.С., Чернышев В.В., Малолетов А.В., Шаронов Н.Г. Сравнительный анализ колесных, гусеничных и шагающих машин. Робототехника и техническая кибернетика, 2013, № 1(1), стр. 6-14.

51. Pavlovsky, V.E., Platonov, A.K. Cross-Country Capabilities of a Walking Robot, Geometrical, Kinematical and Dynamic Investigation, Theory and Practice of Robots and Manipulators, Romansy 13: Proc. of the 13-th CISM-IFTOMM Symposium, Zakopane, Poland, 2000, pp. 131-138.

52. Шагающая машина "Восьминог" / Е.С. Брискин, В. В. Чернышев, А.В. Малолетов, В. Жога, Н.Г. Шаронов, К. В. Шаров, Н. Е. Фролова, Д. Н. Покровский // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2004 - №5. - С. 48-49.

53. Чернышев В.В. Опыт использования шагающей машины для ликвидации аварийного разлива нефти // Безопасность жизнедеятельности, 2003, №5, С. 28–30.

54. Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V et al. On ground and profile practicability of multi-legged walking machines, Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001: Proc. of the 4-th Int. Conf. Karlsruhe, Germany, 2001, pp. 1005-1012.

55. Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V., Zhoga V.V. The Investigation of Walking Machines with Movers on the Basis of Cycle Mechanisms of Walking, The 2009 IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation: conf. proceedings. China, 2009, pp. 3631-3636.

56. Chernyshev V.V., Gavrilov A.E. Traction properties of walking machines on underwater soils with a low bearing ability, Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of Int. Conf./ VNIIOkeangeologia. St. Petersburg, 2014, pp. 21-24.

57. G. Picardi, M. Chellapurath, S. Lacoponi, S. Stefanni, C. Laschi, M.Calisti. Bioinspired underwater legged robot for seabed exploration with low environmental disturbance. Science Robotics, 2020: Vol. 5, Issue 42, eaaz1012.

58. Технология применения подводных шагающих роботизированных платформ при освоении подводных (подлёдных) месторождений углеводородов / В.А. Шурыгин, В.А. Серов, И.В. Ковшов, С.А. Устинов // Седьмая всероссийская научно-техническая конференция «Технические проблемы освоения мирового океана» (2-6 октября 2017 г.) : матер. конф. / ФАНО Российской Федерации, РФФИ (грант № 17-08-20517), ФГБУН «Ин-т проблем морских технологий Дальневосточного отделения РАН (ИПМТ ДВО РАН)». - Владивосток, 2017. - С. 43-47.

59. Технологические роботизированные платформы – инструмент освоения Арктического шельфа / В.А. Шурыгин, В.А. Серов, И.В. Ковшов, С.А. Устинов // Прогресс транспортных средств и систем – 2018 : материалы междунар. науч.-практ. конф. (г. Волгоград, 9-11 октября 2018 г.) / редкол.: И. А. Каляев, Ф. Л. Черноусько, В. М. Приходько [и др.] ; ВолгГТУ, РФФИ, «ФНПЦ «Титан–Баррикады». - Волгоград, 2018. - С. 25-27.

60. Андреев, А. Ф. Дифференциалы колесных машин / А. Ф. Андреев, В. В. Ванцевич, А. Х. Лефаров; Под общ. ред. А. Ф. Лефарова. – М.: Машиностроение, 1987. – 174 с.: ил.

61. Анчуков В.В., Имитационное моделирование системы автоматического управления блокировками дифференциалов грузовых автомобилей. / В. В. Анчуков, А.С. Алюков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2018. – Т. 18, № 3. С.68 – 79.

62. Yu, Z., Deng, Y., Xiong, L., Study of Stability Control for Electric Vehicles with Active Control Differential. SAE Technical Paper 2013-01-0715, 2013. DOI: 10.4271/2013-01-0715.

63. Кычев В.Н. Эффективность использования полноприводных автопоездов в сложных дорожных условиях / В.Н. Кычев, А.В. Келлер, Р.Ф. Кунаккильдин // Грузовик &, № 3, 2005. С. 24-28.

64. Кунаккильдин Р.Ф. Улучшение функционирования полноприводных автопоездов путем рационального распределения энергии между движителями: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.03 / Кунаккильдин Ринат Фаткулович; Челябинск. ЮУрГУ, 2005. – 129 с.

65. Келлер А.В. Методологические принципы оптимизации распределения мощности между движителями колесных машин. Вестник ЮУрГУ, № 11, 2006. С. 96-101.

66. Ушнурцев С.В., Келлер А.В., Усиков В.Ю. Метод комбинированного распределения мощности между ведущими колесами автомобильного базового шасси с прогнозированием возмущений. Омский научный вестник, № 3 (113), 2012. С. 180-183.

67. Котович С.В. Движители специальных транспортных средств. Часть I: Учебное пособие / МАДИ (ГТУ). – М., 2008 – 161 с.
68. Мальцева, О. П. М21 Системы управления электроприводов.: учебное пособие. – 2013 – 478с.
69. Гаврилов, С. В., Занг Д. Т., Тхань Н. Д. Управление электроприводом на основе бесколлекторного двигателя с постоянными //Известия Санкт - Петербургского государств. электротехнического университета ЛЭТИ. – 2016 – Т. 8 – С. 53-62.
70. Jianwen Shao «Direct Back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives» 2012– 309с.
71. Корнилов В.А., Молодяков Д.С., Синявская Ю.А. Система управления мультикоптером.Труды МАИ, № 62, 2012. С. 1-8.
72. Остославский И.В., Стражева И.В. Динамика полета. М.: Изд-во Машиностроение, 1969 -376с.
73. Ситников Д.В., Бурьян Ю.А., Русских Г.С. Система управления движением мультикоптера. Авиационная и ракетно-космическая техника, №5 (36), 2012. С. 33-37.
74. Костенко В.В., Толстоногов А.Ю. Задача декомпозиции управления движением АНПА с учетом изменяющихся ограничений маршевых двигателей. Известия ЮФУ. Технические науки, № 1 (203), 2019. С.210 – 222.
75. Егоров В.Ф., Егоров С.В. Управление распределением нагрузок цикловых механизмов с электрическим приводом. Известия Томского политехнического университета, том. 316, № 4, 2010. С. 160-164.
76. Морозов А.В. Координированное управление многодвигательной гребной электрической установкой: дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03 / Морозов Антон Владимирович; Санкт-Петербург. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. – 141 с.
77. Самохвалов, Д.В. Электропривод с синхронным двигателем. – Lambert Academic Publishing 2012 – 200с.

78. Ещин Е.К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов. Моделирование и управление. – Кемерово: Кузбасский гос. техн. ун-т, 2003. – 247 с.

79. Егоров С.В., Егоров В.Ф. Распределение нагрузок в многодвигательных электроприводах. Электротехнические комплексы и системы, С.96-99.

80. Новиков В.А., Тризна И.Д. Управление соотношениями моментов механически взаимосвязанных электроприводов. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», № 9, 2009. С. 60-68.

81. Брейдо И.В., Гурушкин А.В. Распределение нагрузок в электромеханических системах с многодвигательным частотно-управляемым электроприводом. Труды университета, №2, 2009. С. 72-75.

82. Гаисяров В.Р. Способ согласования нагрузок электроприводов горизонтальных валков клетки толстолистового прокатного стана

83. Гончаров К.А., Сидоров Н.В. Методика динамического анализа совместного подъема груза двумя грузоподъемными кранами. Вестник Брянского государственного технического университета, № 2 (42), 2014. С. 14 – 18.

84. Брискин Е.С. О математическом моделировании управления движением твёрдого тела с избыточным числом тросовых движителей / Е.С. Брискин, В.Н. Платонов // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2019. - Т. 20, № 7. - С. 422-427.

85. Platonov, V.N., Briskin, E.S., Sharonov, N.G. On the features of the progressive movement of the solid body, controlled by two propulsion devices. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 489(1), 012058.

86. Platonov, V.N., Briskin, E.S., Sharonov, N.G. Dynamics of the accessible solid body's movement controlled by two drives with rectreline movement of it's mass center. IOP Conference Series: Materials Science and Engineeringt, 2020, 747(1).

87.

88. А.Я. Архангельский. Программирование в С++ Builder 6. – М.: «Издательство БИНОМ», 2003 г. – 1152 с.: ил.
89. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. Учебник. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 396 с., ил.
90. Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического управления: Учеб. пособие. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. — 364 с. — (Серия «Учебники НГТУ»).
91. Фомин В. И. Адаптивное управление динамическими объектами / В. И. Фомин, А. Л. Фрадков, В. А. Якубович. — М.: Наука, 1981. — 286 с.
92. Воротников С. А. Информационные устройства робототехнических систем / С. А. Воротников. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. — 384 с.
93. Routh E. J. A treatise on stability of a given state of motion. London: McMillan, 1877 108 pp.
94. Четаев Н.Г. Устойчивость движения. Работы по аналитической механике. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 535 с.
95. Платонов, В.Н. Идентификация якорно-тросового движителя в замкнутой системе управления его электроприводами с расчётом настроек ПИ-регулятора / В.Н. Платонов // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. - Волгоград, 2020. - № 1 (236). - С. 70-73.
96. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arduino.ru>.
97. Брискин Е.С. Основы проектирования и расчета шагающих машин с цикловыми движителями: монография / Е.С. Брискин [и др]; под ред. Е.С. Брискина; Федеральное агентство по образованию, Волгоградский гос. технический ун-т. – Москва: Машиностроение-1, 2006. – 163 с.: ил., табл.; 20 см.
98. Шнейдер А.Ю., Гориневский Д.М. Управление опорными реакциями шагающего аппарата при движении по грунтам с различными несущими свойствами // Препринт институт проблем передачи информации. 1986. № . 72 с.

99. Коловский М.З. Динамика машин. Учебное пособие. Л.: ЛПИ имени М.И. Калинина. 1980. – 80 с.

100. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. – М.: Наука, 1969 – 424 с.

101. Жога В.В. Система показателей качества шагающих транспортных машин // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 1997. – № 5. – С. 52-54.

102. Nonami K. et al. Hydraulically Actuated Hexapod Robots: Design, Implementation and Control, Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering 66, Springer Japan 2014. – 277 p.

103. Накано Э. Введение в робототехнику. – М.: Мир, 1988. – 334 с.

Приложение А

Листинг алгоритма моделирования программного управления распределением нагрузки между якорно-тросовыми движителями.

$$\begin{array}{lll} h1 := 0.42 & h2 := 0.3 & m := 0.24 \\ a1 := 0.16 & a2 := 0.16 & R := \frac{29 \cdot 10^{-3}}{2} \quad g := 9.8 \quad J := \frac{m \cdot R^2}{2} = 2.523 \times 10^{-5} \end{array}$$

$$v := 0.03 \quad x_end := 0.3 \quad t_end := \frac{x_end}{v} = 10 \quad \Delta t := 0.01$$

$$x_end := \begin{cases} x_end & \text{if } x_end \leq \min(h1, h2) \\ x_end \leftarrow \min(h1, h2) & \text{if } x_end > \min(h1, h2) \end{cases}$$

$$N := \frac{t_end}{\Delta t} = 1000$$

$$l10 := \sqrt{h1^2 + a1^2} = 0.449$$

$$l20 := \sqrt{h2^2 + a2^2} = 0.34$$

$$cs10 := \sqrt{1 - \left(\frac{a1}{l10}\right)^2} = 0.934$$

$$cs20 := \sqrt{1 - \left(\frac{a2}{l20}\right)^2} = 0.882$$

Заданное поступательное перемещение

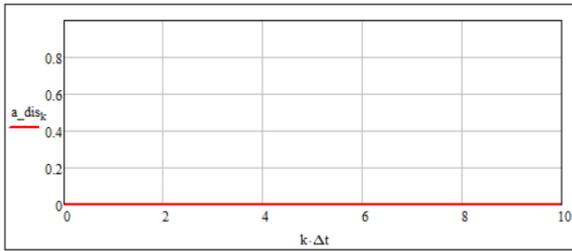
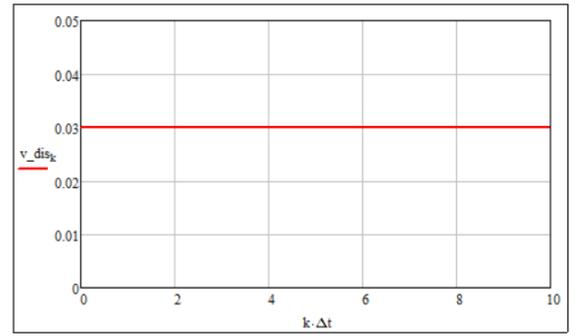
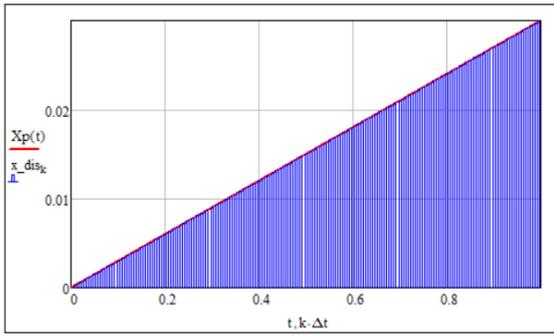
$$Xp(t) := vt \quad Xp(t) := \begin{cases} \left(\frac{0.0165t^2}{2}\right) & \text{if } 0 \leq t < 2 \\ 0.033t - 0.033 & \text{if } t \geq 2 \end{cases}$$

Дискретизация заданного поступательного движения

$$x_dis := \begin{cases} \text{for } k \in 0..N-1 \\ x_dis_k \leftarrow Xp(\Delta t \cdot k) \\ x_dis \end{cases} \quad v_dis := \begin{cases} \text{for } k \in 0..N-2 \\ v_k \leftarrow \frac{x_dis_{k+1} - x_dis_k}{\Delta t} \\ v \end{cases}$$

$$a_dis := \begin{cases} \text{for } k \in 1..N-2 \\ a_k \leftarrow \frac{x_dis_{k-1} - 2 \cdot x_dis_k + x_dis_{k+1}}{\Delta t^2} \\ a_k \leftarrow 0 \text{ if } a_k \leq 1 \cdot 10^{-9} \\ a \end{cases}$$

Приложение А. Продолжение.



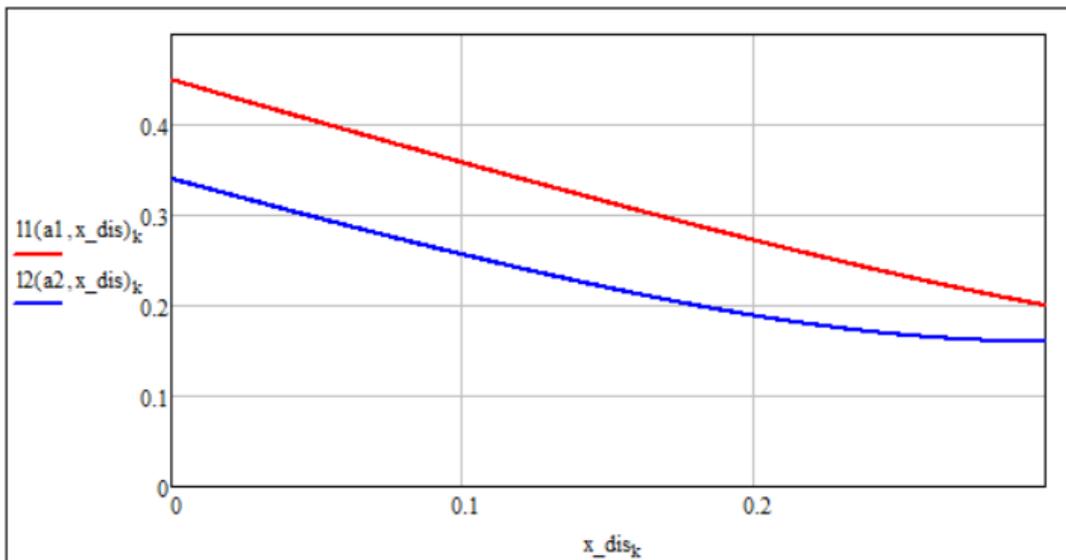
Изменение длин тросов

$$l1(a, x) := \begin{cases} l1_0 \leftarrow 110 \\ cs1_0 \leftarrow cs10 \\ \text{for } k \in 1..N - 1 \\ l1_k \leftarrow \sqrt{(l1_0 \cdot cs1_0 - x_k)^2 + a^2} \\ l1 \end{cases}$$

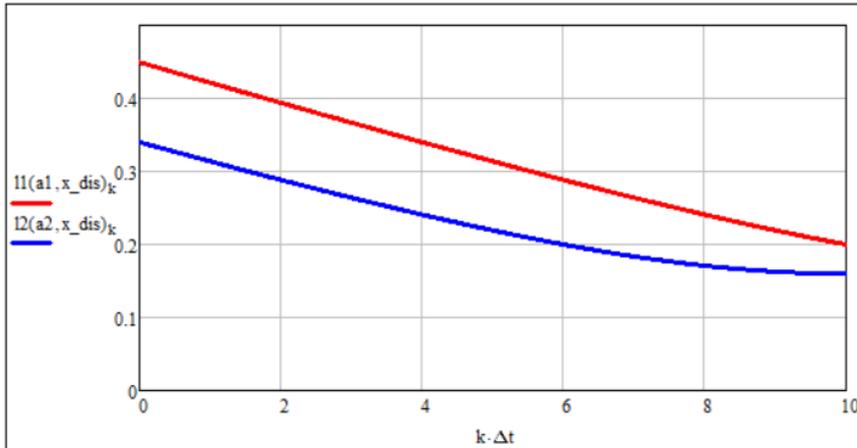
$$l2(a, x) := \begin{cases} l2_0 \leftarrow 120 \\ cs2_0 \leftarrow cs20 \\ \text{for } k \in 1..N - 1 \\ l2_k \leftarrow \sqrt{(l2_0 \cdot cs2_0 - x_k)^2 + a^2} \\ l2 \end{cases}$$

110 = 0.449

120 = 0.34



Приложение А. Продолжение.



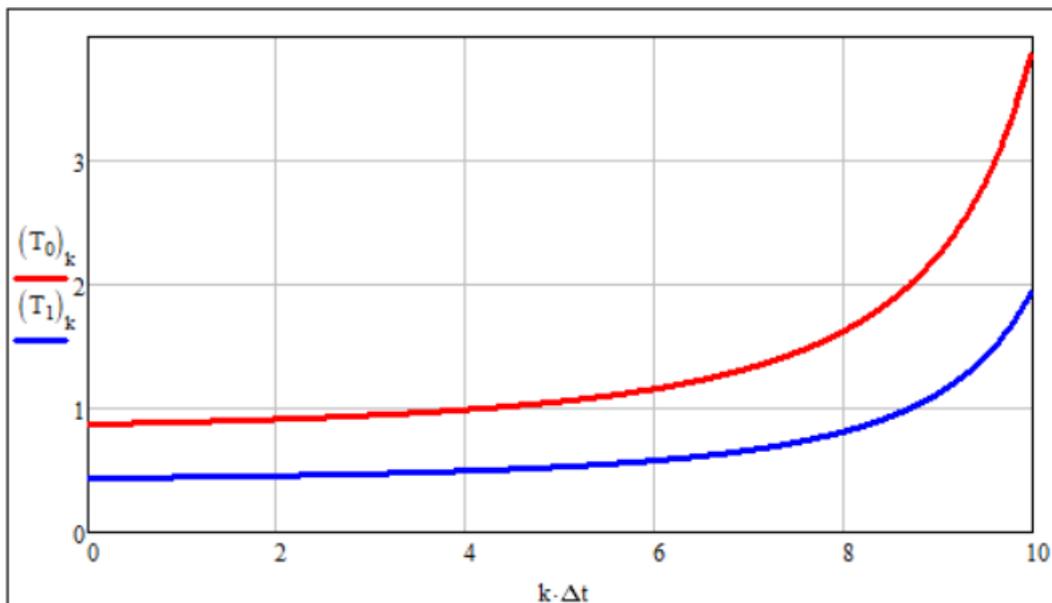
Усилия в тросах (программно заданное)

Tensuin forces ratio:
p := 2

```

T :=
for k ∈ 0..N - 2
  cs1 ← √(1 - (a1 / l1(a1, x_dis)_k)²)
  cs2 ← √(1 - (a2 / l2(a2, x_dis)_k)²)
  T1_k ← (m·g + m·a_dis_k) / (cs1 + p·cs2)
  T2_k ← T1_k / p
  (T1)
  (T2)

```



Приложение А. Продолжение.

Приращение углов поворота маховиков

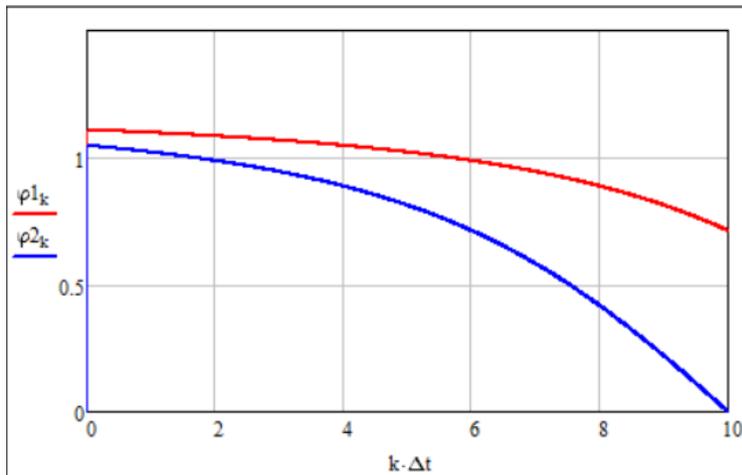
$$\varphi 1 := \begin{cases} \varphi 1_0 \leftarrow 0 \\ \text{for } k \in 1..N - 1 \\ \varphi 1_k \leftarrow \frac{(l1(a1, x_dis)_{k-1} - l1(a1, x_dis)_k) \cdot 180}{\pi \cdot R} \\ \varphi 1 \end{cases}$$

$$\varphi 2 := \begin{cases} \varphi 2_0 \leftarrow 0 \\ \text{for } k \in 1..N - 1 \\ \varphi 2_k \leftarrow \frac{(l2(a2, x_dis)_{k-1} - l2(a2, x_dis)_k) \cdot 180}{\pi \cdot R} \\ \varphi 2 \end{cases}$$

$$k := 0..N - 1$$

$$\text{rows}(\varphi 1) = 1000$$

$$N = 1000$$



Абсолютные углы поворота маховиков

$$\varphi 1_s := \begin{cases} \varphi 1_s_0 \leftarrow 0 \\ \text{sum1} \leftarrow 0 \\ z \leftarrow 0 \\ \text{for } k \in 0..N - 1 \\ \begin{cases} \varphi 1_s_z \leftarrow \text{sum1} + \varphi 1_k \\ z \leftarrow z + 1 \\ \text{sum1} \leftarrow \varphi 1_s_{z-1} \end{cases} \\ \begin{pmatrix} \varphi 1_s \\ z \end{pmatrix} \end{cases}$$

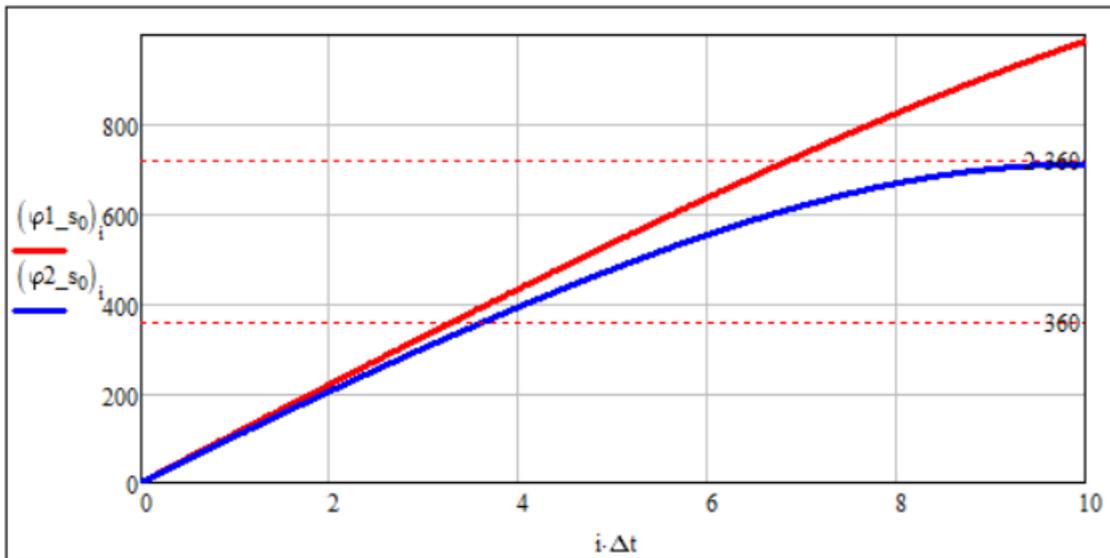
$$\varphi 2_s := \begin{cases} \varphi 2_s_0 \leftarrow 0 \\ \text{sum2} \leftarrow 0 \\ z \leftarrow 0 \\ \text{for } k \in 0..N - 1 \\ \begin{cases} \varphi 2_s_z \leftarrow \text{sum2} + \varphi 2_k \\ z \leftarrow z + 1 \\ \text{sum2} \leftarrow \varphi 2_s_{z-1} \end{cases} \\ \begin{pmatrix} \varphi 2_s \\ z \end{pmatrix} \end{cases}$$

$$i := 0.. \varphi 1_s_1$$

$$\varphi 1_s_1 = 1 \times 10^3$$

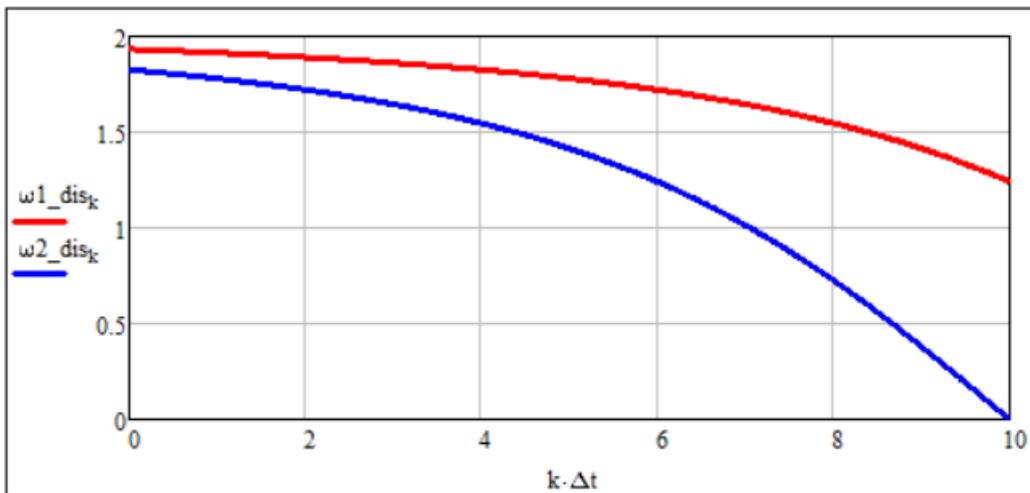
$$N = 1 \times 10^3$$

Приложение А. Продолжение.



$$\omega1_dis := \begin{cases} \text{for } k \in 0..N-2 \\ \omega1_k \leftarrow \frac{\pi}{180} \cdot \frac{(\varphi1_s0)_{k+1} - (\varphi1_s0)_k}{\Delta t} \\ \omega1 \end{cases}$$

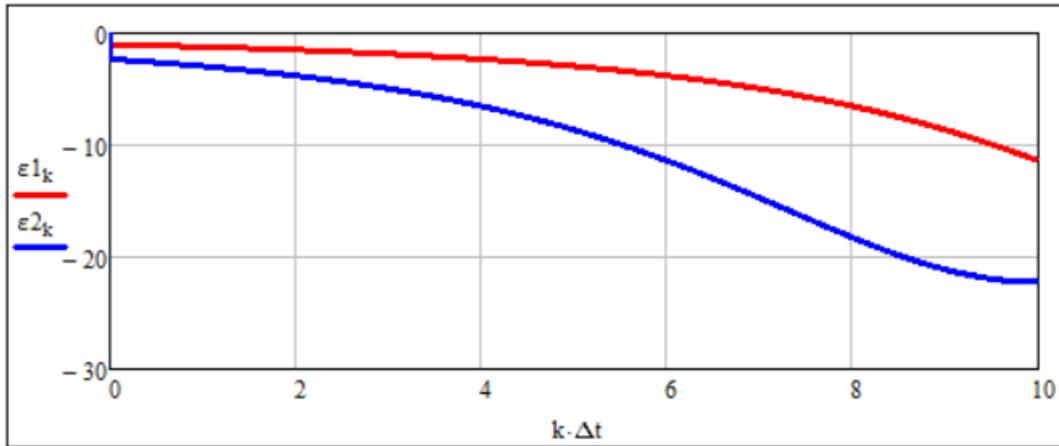
$$\omega2_dis := \begin{cases} \text{for } k \in 0..N-2 \\ \omega2_k \leftarrow \frac{\pi}{180} \cdot \frac{(\varphi2_s0)_{k+1} - (\varphi2_s0)_k}{\Delta t} \\ \omega2 \end{cases}$$



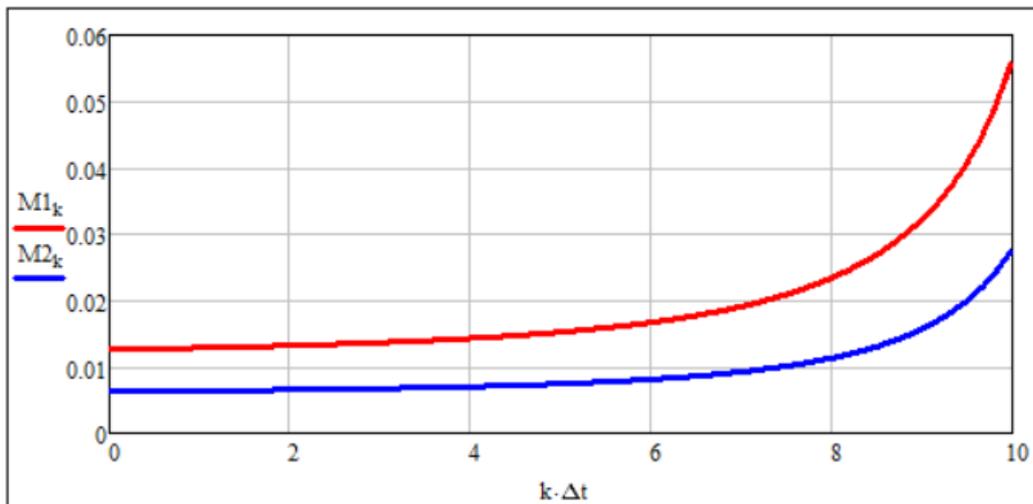
$$\varepsilon1 := \begin{cases} \text{for } k \in 1..N-2 \\ \varepsilon1_k \leftarrow \frac{(\varphi1_s0)_{k-1} - 2 \cdot (\varphi1_s0)_k + (\varphi1_s0)_{k+1}}{\Delta t^2} \\ \varepsilon1 \end{cases}$$

$$\varepsilon2 := \begin{cases} \text{for } k \in 1..N-2 \\ \varepsilon2_k \leftarrow \frac{(\varphi2_s0)_{k-1} - 2 \cdot (\varphi2_s0)_k + (\varphi2_s0)_{k+1}}{\Delta t^2} \\ \varepsilon2 \end{cases}$$

Приложение А. Продолжение.



$$M1 := \begin{cases} \text{for } k \in 0..N-2 \\ M1_k \leftarrow J \cdot \varepsilon1_k + (T_0)_k \cdot R \\ M1 \end{cases} \quad M2 := \begin{cases} \text{for } k \in 0..N-2 \\ M2_k \leftarrow J \cdot \varepsilon2_k + (T_1)_k \cdot R \\ M2 \end{cases}$$



Постоянные ДПТ НВ

$$P_{nom} := 2 \quad U_{nom} := 24 \quad n_{nom} := 3000 \quad \eta_{nom} := 0.9$$

$$I_{nom} := \frac{P_{nom}}{U_{nom} \cdot \eta_{nom}} = 0.093$$

$$\omega_{nom} := \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{nom}}{60} = 314.159$$

$$R_{ya} := 0.5 \cdot (1 - \eta_{nom}) \cdot \frac{U_{nom}}{I_{nom}} = 12.96$$

$$k_{Fnom} := \frac{U_{nom} - R_{ya} \cdot I_{nom}}{\omega_{nom}} = 0.073$$

$$\mu := \frac{k_{Fnom}^2}{R_{ya}} = 4.064 \times 10^{-4}$$

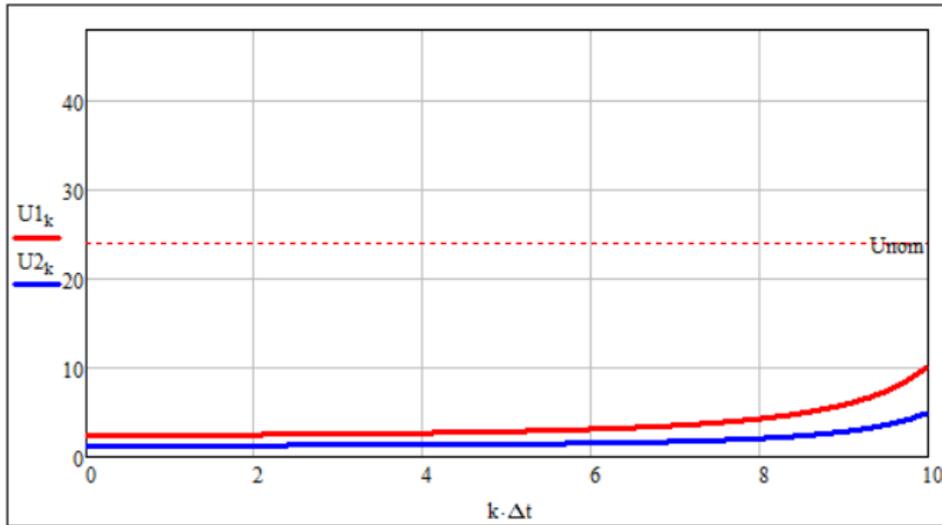
$$kk := \frac{k_{Fnom}}{R_{ya}} = 5.6 \times 10^{-3}$$

Приложение А. Продолжение.

Напряжение на обмотки якоря:

$$U1 := \begin{cases} \text{for } k \in 0..N-2 \\ u1_k \leftarrow \frac{M1_k}{kk} + \frac{\mu}{kk} \cdot \omega1_dis_k \\ u1 \end{cases}$$

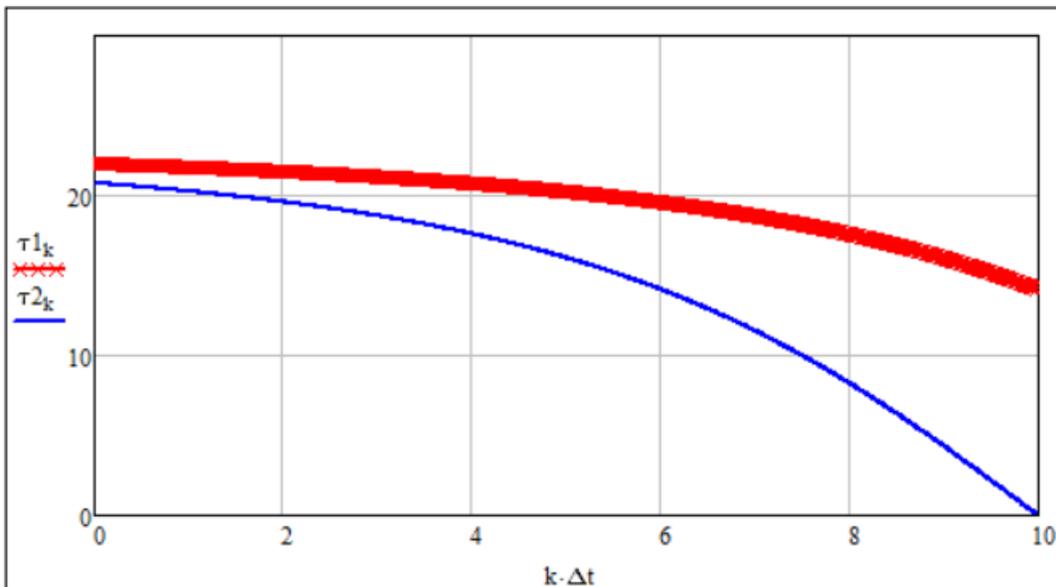
$$U2 := \begin{cases} \text{for } k \in 0..N-2 \\ u2_k \leftarrow \frac{M2_k}{kk} + \frac{\mu}{kk} \cdot \omega2_dis_k \\ u2 \end{cases}$$



Частота коммутации обмоток ШД (частота шагов)

$$\tau1 := \begin{cases} \text{for } k \in 0..N-2 \\ t1_k \leftarrow \frac{4096}{360} \cdot \omega1_dis_k \\ t1 \end{cases}$$

$$\tau2 := \begin{cases} \text{for } k \in 0..N-2 \\ t2_k \leftarrow \frac{4096}{360} \cdot \omega2_dis_k \\ t2 \end{cases}$$



Приложение Б.

Листинг программы анализа устойчивости

Масса пантона $M := 0.5$
 Масса маховика $m := 0.24$
 Радиус маховика $R := \frac{29 \cdot 10^{-3}}{2}$

Момент инерции маховиков $J := \frac{m \cdot R^2}{2} = 2.523 \times 10^{-5}$
 $g := 9.8$

Высота подъема $h1 := 0.4$
 Плечо1 $L1 := 0.19$
 Скорость перемещения $v0 := 0.008$

Высота подъема $h2 := 0.3$
 Плечо2 $L2 := 0.19$
 $\omega_m := \frac{v0}{R} = 0.552$

Начальная координата перемещения $xn := 0$
 Коэффициент вязкого трения

Конечная координата перемещения $xk := \min(h1, h2)$
 $\xi := 0.01$

Характеристики ДПТ:

Номинальное напряжение $Unom := 12$
 Момент инерции ротора двигателя $Jd := 3 \cdot 10^{-6}$

Номинальный ток якоря $Inom := 0.3$
 Коэффициент редукции: $id := 2000$

Номинальная скорость $\omega dnom := 100$

Сопротивление обмотки якоря $Rja := 1$

Постоянная ДПТ $\frac{cd}{\omega dnom} := \frac{Unom - Inom \cdot Rja}{\omega dnom} = 0.117$
 $Kd := \frac{cd}{Rja} = 0.117$
 $\mu := \frac{(cd)^2}{Rja} = 0.014$
 $(B^2) \cdot (c^2) / (Om \cdot \text{рад}^2)$

Приведенный к маховику момент инерции : $Jpr := J + Jd \cdot (id)^2 = 12$

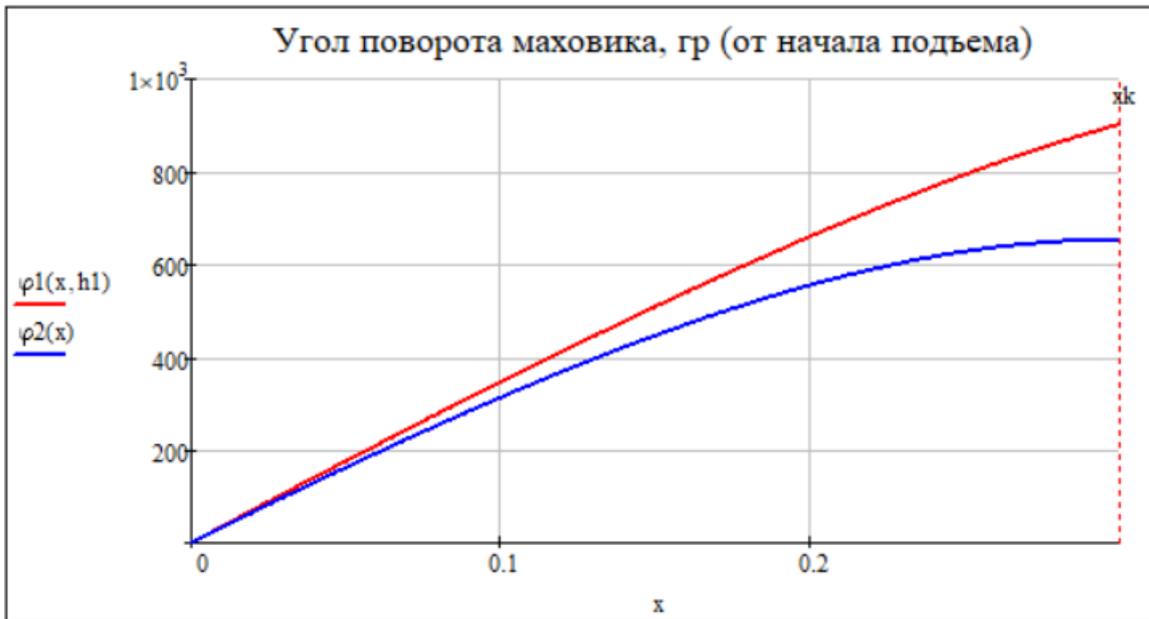
Число двигателей $N := 1$

Функции углов поворотов маховиков от линейного перемещения

$$\varphi1(x, hh1) := \frac{180}{\pi R} \cdot \left[\sqrt{L1^2 + hh1^2} - \sqrt{L1^2 + (hh1 - x)^2} \right]$$

$$\varphi2(x) := \frac{180}{\pi R} \cdot \left[\sqrt{L2^2 + h2^2} - \sqrt{(h2 - x)^2 + L2^2} \right]$$

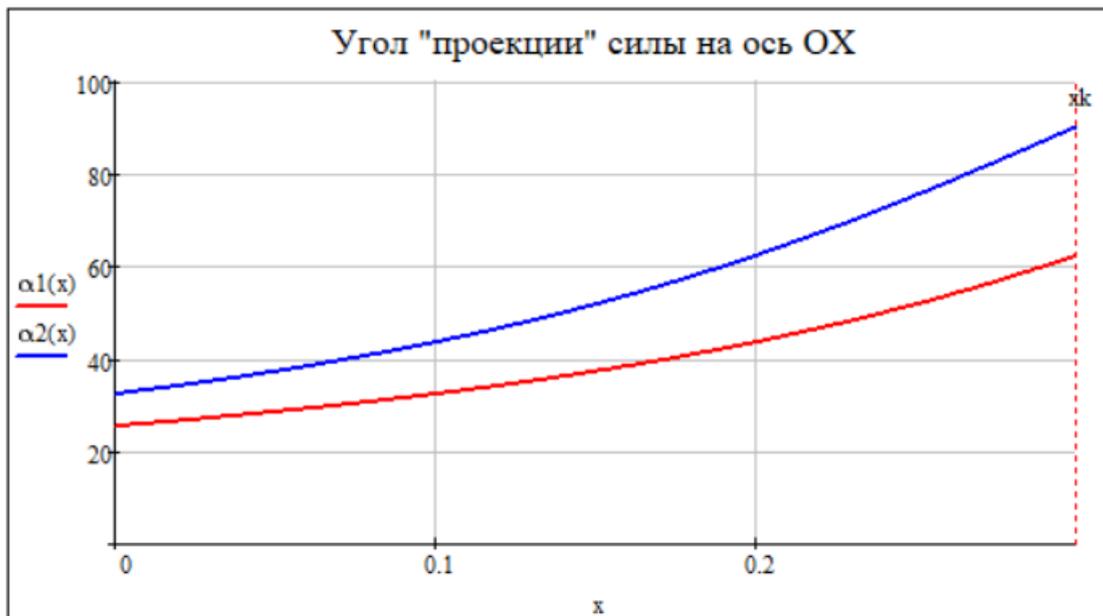
Приложение Б. Продолжение.



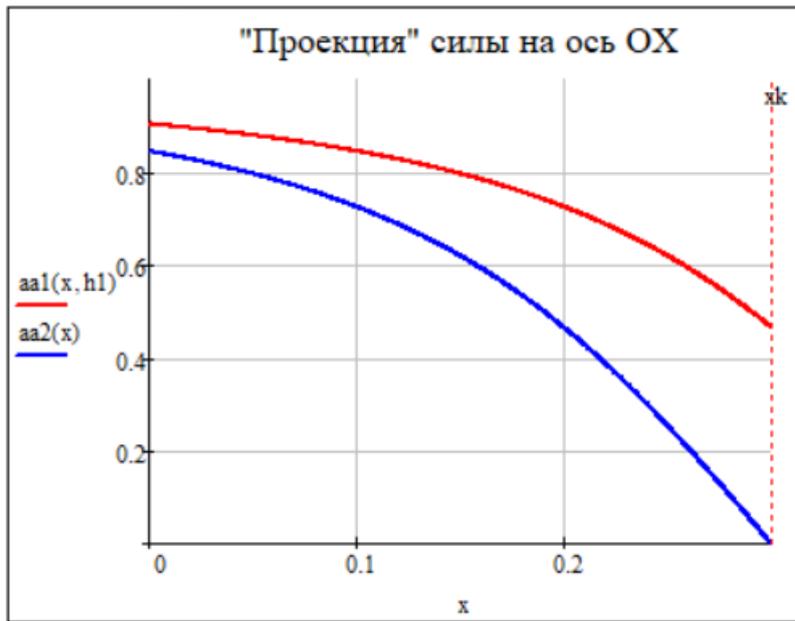
Функция коэффициента " проекции" силы на ось OX

$$\alpha_1(x) := \operatorname{atan}\left(\frac{L_1}{h_1 - x}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad \text{aa}_1(x, h_1) := \cos\left(\operatorname{atan}\left(\frac{L_1}{h_1 - x}\right)\right)$$

$$\alpha_2(x) := \operatorname{atan}\left(\frac{L_2}{h_2 - x}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad \text{aa}_2(x) := \cos\left(\operatorname{atan}\left(\frac{L_2}{h_2 - x}\right)\right)$$



Приложение Б. Продолжение.



Число дополнительных связей (вспомогательных уравнений) $\underline{K} := 2N - 1$

Матрица коэффициентов при силах в дополнительных уравнениях (размер: $2N-1$ строк, $2N$ столбцов)

$$B := (1 \quad -2) \quad (T1=2T2)$$

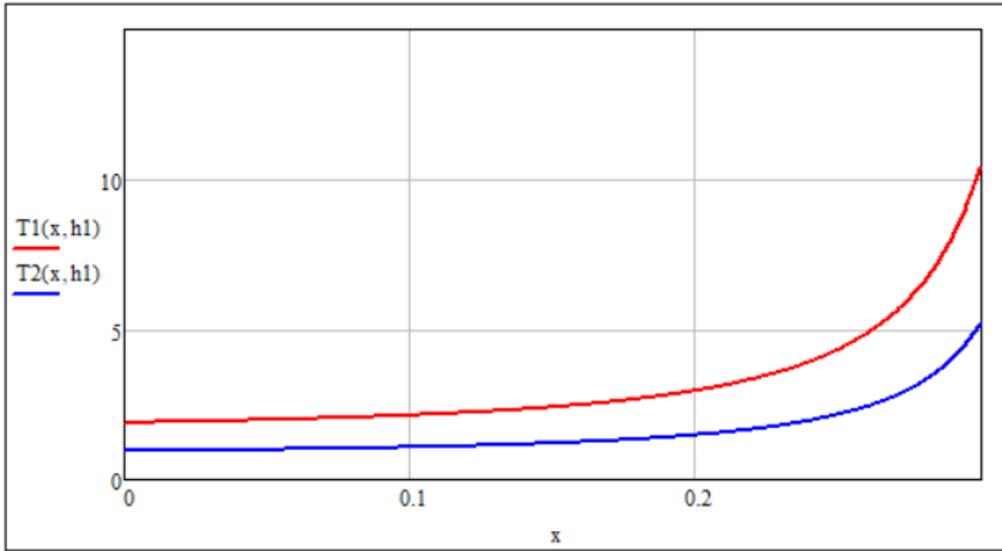
Матрица коэффициентов "связи" усилий в дополнительных уравнениях (размер: $2N-1$ строк, 1 столбец)

$$P := (0) \quad p := 2$$

Матрица значений сил (размер: $2N$ строк, 1 столбец)

$$T1(x, hh1) := \frac{M \cdot g}{aa1(x, hh1) + aa2(x) \cdot p} \quad T2(x, hh1) := \frac{M \cdot g}{aa1(x, hh1) + aa2(x) \cdot p}$$

Приложение Б. Продолжение.



$$\left\{ \begin{array}{l} M\delta\ddot{x} + \frac{\partial Q}{\partial \dot{x}} \delta\dot{x} - \sum_{i=1}^{2N} T_i \frac{\partial A}{\partial x} \delta x - \sum_{i=1}^{2N} A_i(x) \delta T_i = 0; \\ J_j \frac{\partial \varphi_j}{\partial x} \delta\ddot{x} + \left[2J_j \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial x^2} v_0 + \mu \frac{\partial \varphi_j}{\partial x} \right] \delta\dot{x} + \left[J_j \frac{\partial^3 \varphi_j}{\partial x^3} v_0^2 + \mu \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial x^2} \right] \delta x + \sum_{j=1}^{2N} P_j \delta T_j = 0. \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{c} \begin{array}{c} \xrightarrow{\hspace{10em}} \\ \text{2N+1} \\ \xleftarrow{\hspace{10em}} \end{array} \\ \begin{array}{c} \uparrow \\ \text{2N+1} \\ \downarrow \end{array} \end{array} \begin{array}{c|cccc} \delta\ddot{x} & \delta\dot{x} & \delta x & \delta T_1 & \dots & \delta T_j \\ \hline \text{тело} & a_1 + b_1 + c_1 & e_{11} & \dots & e_{1j} \\ \text{привод}_1 & a_2 + b_2 + c_2 & e_{21} & \dots & e_{2j}, \quad j=1 \dots 2N, \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & n=1 \dots (2N+1) \\ \text{привод}_{2N} & a_n + b_n + c_2 & e_{n1} & \dots & e_{nj} \end{array}$$

Матрица A коэффициентов dx''

$$a1 := M$$

$$a2(hh1) := \frac{1}{x_k - x_n} \int_{x_n}^{x_k} J_{pr} \left(\frac{d}{dx} \varphi_1(x, hh1) \right) dx$$

$$a3 := \frac{1}{x_k - x_n} \int_{x_n}^{x_k} J_{pr} \left(\frac{d}{dx} \varphi_2(x) \right) dx$$

Матрица B коэффициентов dx'

$$b1 := \xi$$

$$b2(hh1, vv) := \frac{2J_{pr} vv}{x_k - x_n} \int_{x_n}^{x_k} \left(\frac{d^2}{dx^2} \varphi_1(x, hh1) \right) dx + \frac{\mu}{x_k - x_n} \int_{x_n}^{x_k} \left(\frac{d}{dx} \varphi_1(x, hh1) \right) dx$$

$$b3(vv) := \frac{2J_{pr} vv}{x_k - x_n} \int_{x_n}^{x_k} \left(\frac{d^2}{dx^2} \varphi_2(x) \right) dx + \frac{\mu}{x_k - x_n} \int_{x_n}^{x_k} \left(\frac{d}{dx} \varphi_2(x) \right) dx$$

Приложение Б. Продолжение.

Матрица C коэффициентов dx

$$c1(hh1) := \frac{1}{xk - xn} \cdot \int_{xn}^{xk} \left[T1(x, hh1) \cdot \left(\frac{d}{dx} aa1(x, hh1) \right) + T2(x, hh1) \cdot \left(\frac{d}{dx} aa2(x) \right) \right] dx$$

$$c2(hh1, vv) := \frac{Jpr \cdot vv^2}{xk - xn} \cdot \int_{xn}^{xk} \left(\frac{d^3}{dx^3} \varphi1(x, hh1) \right) dx + \frac{\mu}{xk - xn} \cdot \int_{xn}^{xk} \left(\frac{d^2}{dx^2} \varphi1(x, hh1) \right) dx$$

$$c3(vv) := \frac{Jpr \cdot vv^2}{xk - xn} \cdot \int_{xn}^{xk} \left(\frac{d^3}{dx^3} \varphi2(x) \right) dx + \frac{\mu}{xk - xn} \cdot \int_{xn}^{xk} \left(\frac{d^2}{dx^2} \varphi2(x) \right) dx$$

$$Aa(hh1) := \begin{pmatrix} a1 \\ a2(hh1) \\ a3 \end{pmatrix}$$

$$Bb(hh1, vv) := \begin{pmatrix} b1 \\ b2(hh1, vv) \\ b3(vv) \end{pmatrix}$$

$$Cc(hh1, vv) := \begin{pmatrix} c1(hh1) \\ c2(hh1, vv) \\ c3(vv) \end{pmatrix}$$

$$E(hh1) := \begin{pmatrix} e11(hh1) & e12 \\ e21 & e22 \\ e31 & e32 \end{pmatrix}$$

Матрица E коэффициентов dTj

$$e11(hh1) := \frac{1}{xk - xn} \cdot \int_{xn}^{xk} (aa1(x, hh1)) dx$$

$$e12 := \frac{1}{xk - xn} \cdot \int_{xn}^{xk} (aa2(x)) dx$$

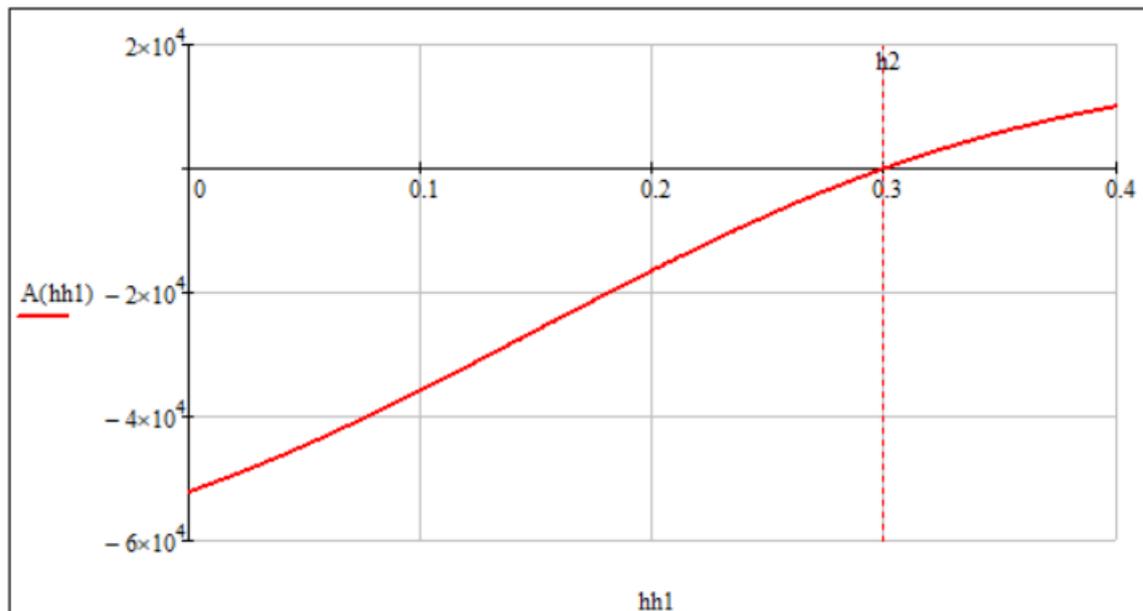
$$e21 := R \quad e22 := R \quad e31 := R \quad e32 := R$$

Коэффициенты характеристического уравнения:

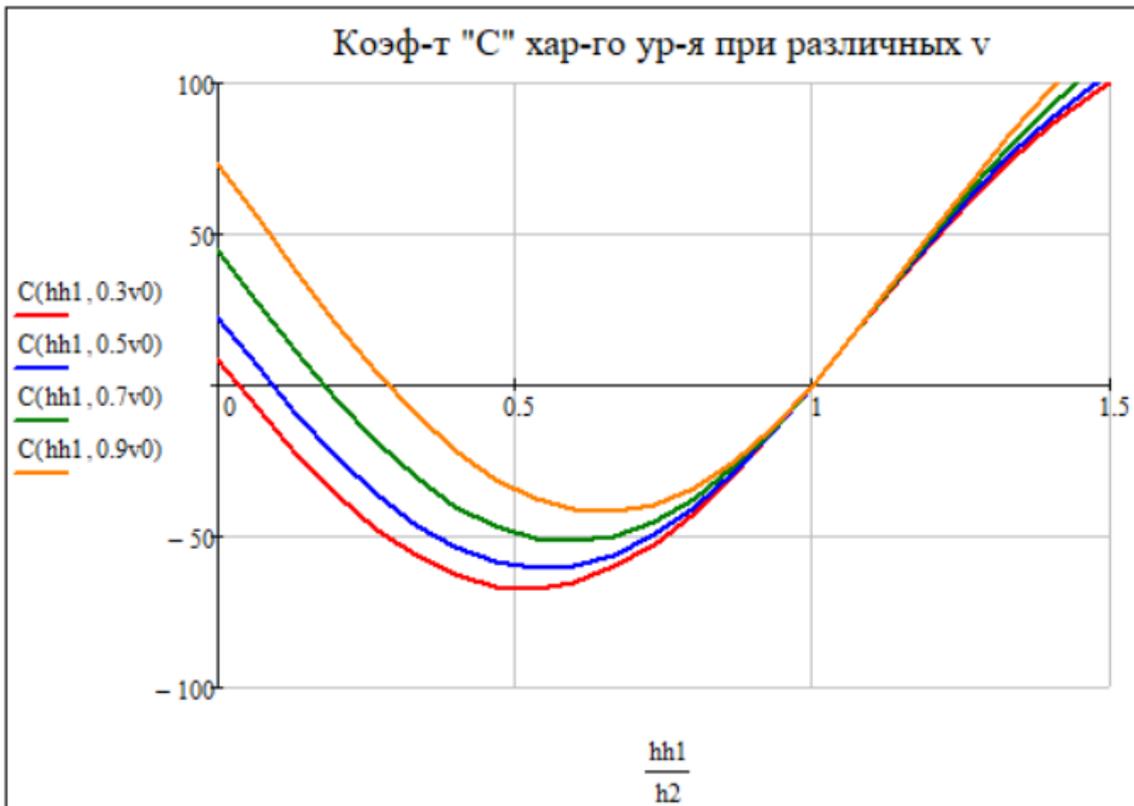
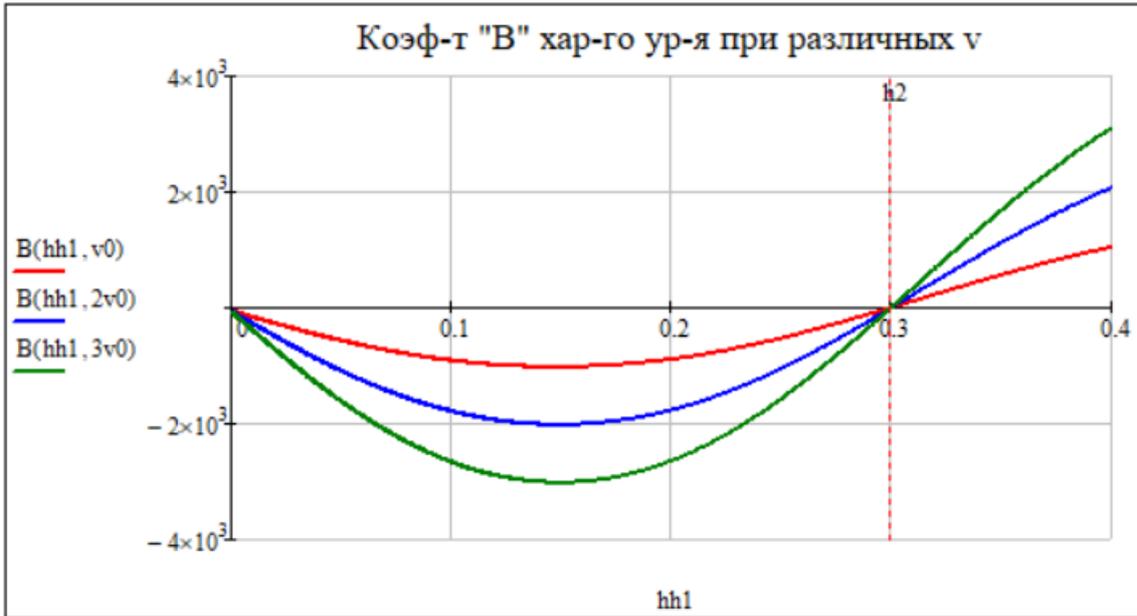
$$A(hh1) := a2(hh1) - a3$$

$$B(hh1, vv) := b2(hh1, vv) - b3(vv)$$

$$C(hh1, vv) := c2(hh1, vv) - c3(vv)$$



Приложение Б. Продолжение.



Приложение В

Листинг алгоритма моделирования управления распределением нагрузки между якорно-тросовыми движителями в соответствии с разработанным критерием оптимальности.

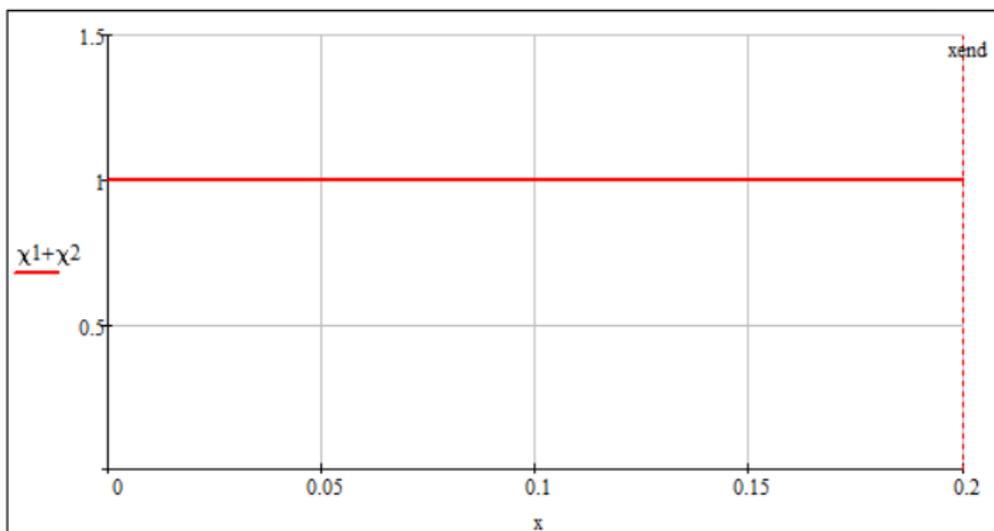
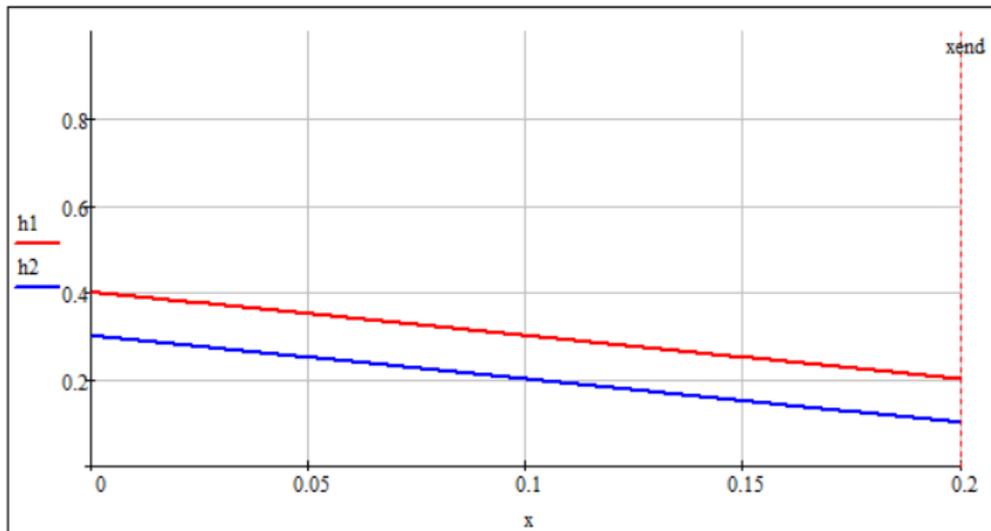
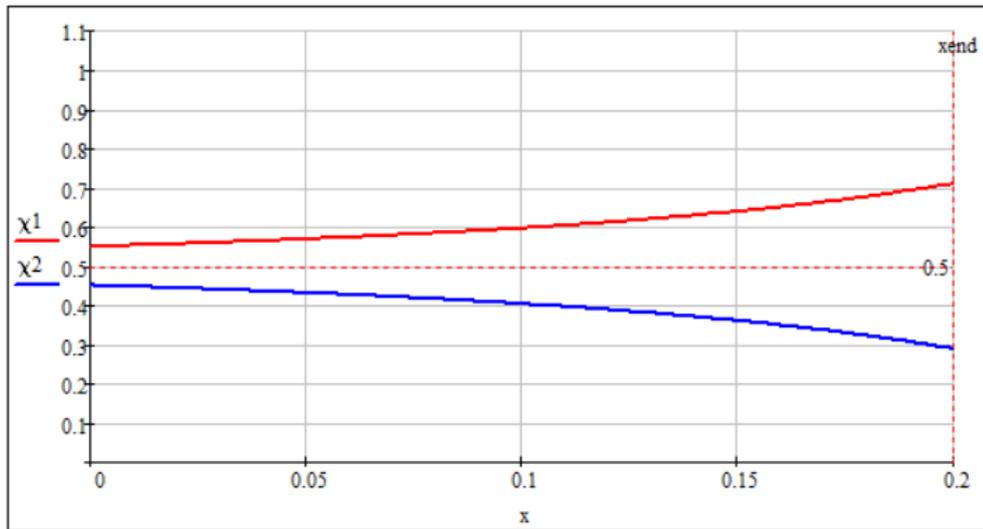
$$\begin{aligned}
 \underline{H1} &:= 0.4 & \underline{a1} &:= 0.25 & \underline{H2} &:= 0.3 & \underline{a2} &:= 0.25 & \underline{m} &:= 0.5 & \underline{R} &:= 0.027 \\
 \underline{J} &:= \frac{m \cdot R^2}{2} = 1.822 \times 10^{-4} & \underline{g} &:= 9.87 \\
 \underline{Inom} &:= \frac{2}{24} & \underline{Unom} &:= 24 & \underline{\omega nom} &:= 315 & \underline{Rja} &:= 12 & \underline{C} &:= \frac{\underline{Unom} - \underline{Inom} \cdot \underline{Rja}}{\underline{\omega nom}} \\
 \underline{\mu} &:= \frac{C^2}{\underline{Rja}} = 4.443 \times 10^{-4} & \underline{k} &:= \frac{C}{\underline{Rja}} = 6.085 \times 10^{-3} \\
 \underline{v} &:= 0.005 & \underline{x_end} &:= 0.2 & \underline{Q} &:= m \cdot g = 4.935 \\
 \underline{xmax} &:= \min(\underline{H1}, \underline{H2}) = 0.3 & \underline{dx} &:= 0.001 & \underline{x0} &:= 0 \\
 \underline{xend} &:= \begin{cases} \underline{x_end} & \text{if } \underline{x_end} \leq \underline{xmax} \\ \underline{x_end} \leftarrow \underline{xmax} - \underline{dx} & \text{if } \underline{x_end} > \underline{xmax} \end{cases} = 0.2 & \underline{nend} &:= \frac{\underline{xend}}{\underline{dx}} = 200 \\
 \underline{l10} &:= \sqrt{\underline{H1}^2 + \underline{a1}^2} = 0.472 & \underline{l20} &:= \sqrt{\underline{H2}^2 + \underline{a2}^2} = 0.391
 \end{aligned}$$

Приложение В. Продолжение.

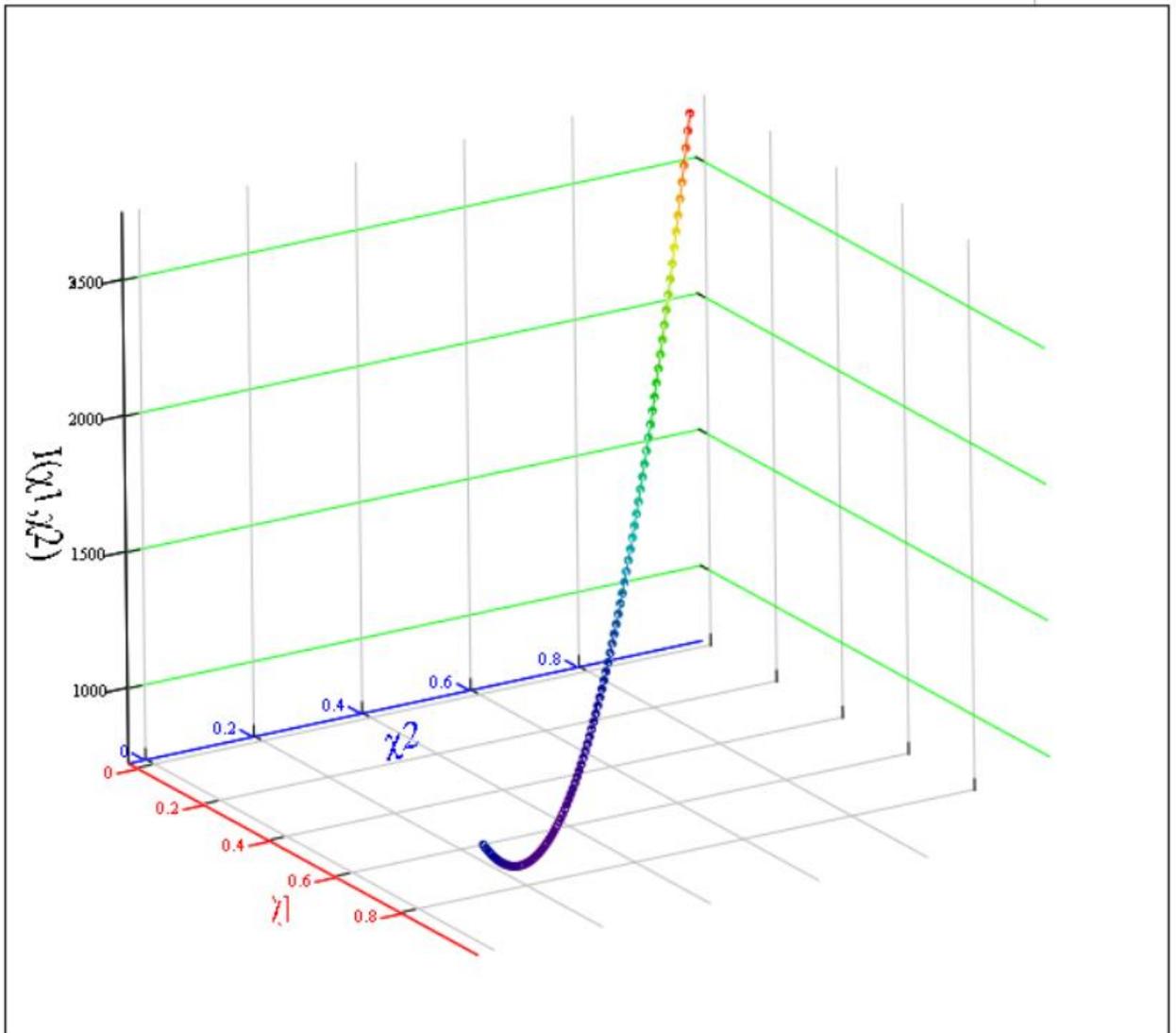
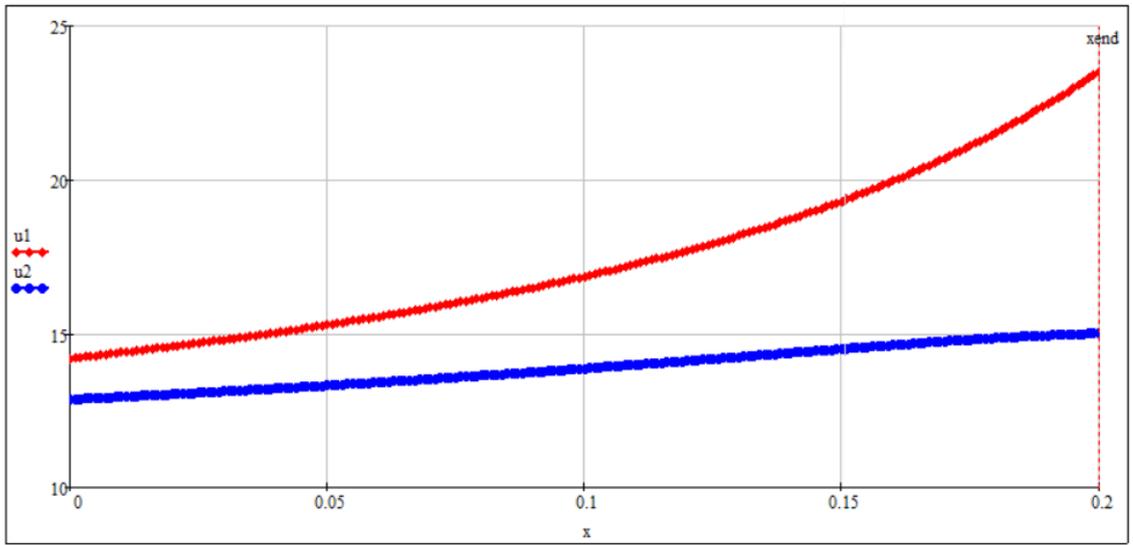
Расчет параметров для перемещения [X0...X_end]

x	
h1	
h2	
χ ¹	
χ ²	h10 ← H1
u1	h20 ← H2
u2	for i ∈ 0..nend
r1	x _i ← x0 + i dx
r2	l1 _i ← √[(H1 - x _i) ² + a1 ²]
	l2 _i ← √[(H2 - x _i) ² + a2 ²]
	h1 _i ← h10 - i dx
	h2 _i ← h20 - i dx
	r1 _i ← $\frac{(H1 - x_i) \cdot l10}{R \cdot (l10^2 - H1 \cdot x_i)}$
	r2 _i ← $\frac{(H2 - x_i) \cdot l20}{R \cdot (l20^2 - H2 \cdot x_i)}$
	P1 ← $\frac{l10 \cdot [H1^2 - (x_i)^2]}{(l10^2 - H1 \cdot x_i)^2}$
	P2 ← $\frac{l20 \cdot [H2^2 - (x_i)^2]}{(l20^2 - H2 \cdot x_i)^2}$
	λ _{1i} ← $\frac{1}{r1_i}$
	λ _{2i} ← $\frac{1}{r2_i}$
	ν ← $\frac{1 + \frac{J \cdot P1 \cdot v^2}{2 \cdot \lambda_{1i} \cdot Q} + \frac{\mu \cdot r1_i \cdot v}{2 \cdot (\lambda_{1i})^2 \cdot Q^2} + \frac{J \cdot P2 \cdot v^2}{2 \cdot \lambda_{2i} \cdot Q} + \frac{\mu \cdot r2_i \cdot v}{2 \cdot (\lambda_{2i})^2 \cdot Q^2}}{\left[\frac{k^2}{2 \cdot (\lambda_{1i})^2 \cdot Q^2} + \frac{k^2}{2 \cdot (\lambda_{2i})^2 \cdot Q^2} \right]}$
	χ _{1i} ← $\frac{\nu \cdot k^2 + J \cdot P1 \cdot \lambda_{1i} \cdot v^2 \cdot Q + \mu \cdot r1_i \cdot v}{2 \cdot (\lambda_{1i})^2 \cdot Q^2}$
	χ _{2i} ← $\frac{\nu \cdot k^2 + J \cdot P2 \cdot \lambda_{2i} \cdot v^2 \cdot Q + \mu \cdot r2_i \cdot v}{2 \cdot (\lambda_{2i})^2 \cdot Q^2}$
	u1 _i ← $\frac{1}{k} \cdot (J \cdot P1 \cdot v^2 + \mu \cdot r1_i \cdot v + \lambda_{1i} \cdot Q \cdot \chi_{1i})$
	u2 _i ← $\frac{1}{k} \cdot (J \cdot P2 \cdot v^2 + \mu \cdot r2_i \cdot v + \lambda_{2i} \cdot Q \cdot \chi_{2i})$
	break if [(χ _{1i} ≤ 3dx) ∨ (χ _{2i} ≤ 3dx) ∨ (h1 _i ≤ dx) ∨ (h2 _i ≤ dx)]
x	
h1	
h2	
χ ¹	
χ ²	
u1	
u2	
r1	
r2	

Приложение В. Продолжение.

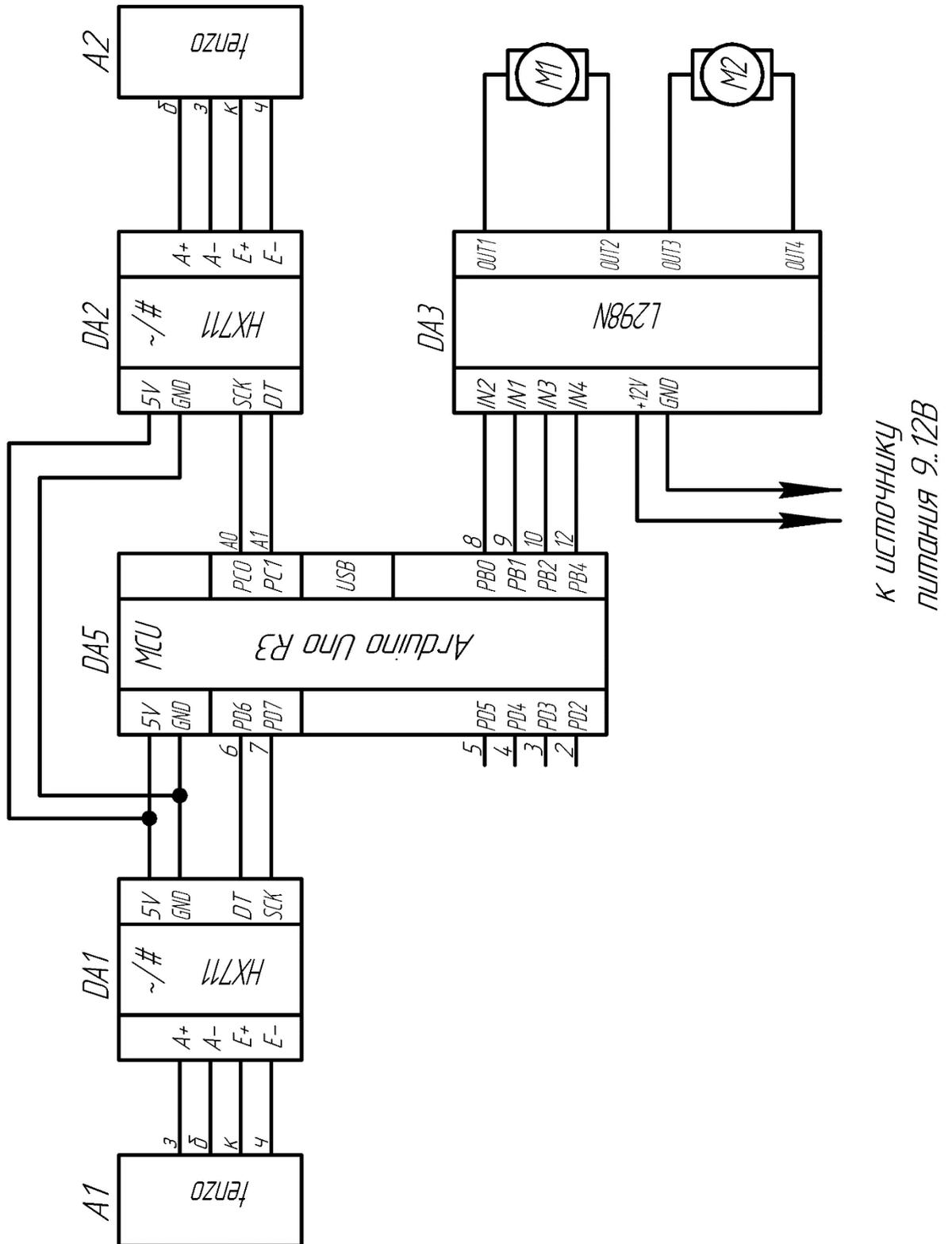


Приложение В. Продолжение.



Приложение Г.

Схема электрическая принципиальная экспериментального стенда



Приложение Д.

Основные публикации по теме исследования.

Статьи из списка ВАК:

1. Брискин, Е.С. О математическом моделировании управления движением твёрдого тела с избыточным числом тросовых движителей / Е.С. Брискин, В.Н. Платонов // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2019. — Т. 20, № 7. — С. 422-427.
2. Платонов, В.Н. Идентификация якорно-тросового движителя в замкнутой системе управления его электроприводами с расчётом настроек ПИ-регулятора / В.Н. Платонов // Известия ВолгГТУ. — Волгоград, 2020. — № 1 (236). — С. 70-73.
3. Платонов, В.Н. Об устойчивости движения мобильных роботов с тросовыми движителями / В.Н. Платонов // Известия ВолгГТУ. — Волгоград, 2020. — № 9 (244). — С. 72-76.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

1. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2021617112 от 11 мая 2021 г. Российская Федерация. Программное обеспечение для микроконтроллера системы управления стендом якорно-тросового движителя / Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов, Я.В. Калинин, В.Н. Платонов; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. - 2021.
2. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2021617113 от 11 мая 2021 г. Российская Федерация. Программное обеспечение для персонального компьютера системы управления стендом якорно-тросового движителя / Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов, Л.Д. Смирная, В.Н. Платонов; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. — 2021.

Публикации в SCOPUS:

1. Platonov, V.N., Briskin, E.S., Sharonov, N.G. Dynamics of the accessible solid body's movement controlled by two drives with rectreline movement of it's mass center. IOP Conference Series: Materials Science and Engineeringt, 2020, 747(1).
2. Platonov, V.N., Shaponov, N.G., Briskin, E.S. On the stability of mobile robots movement with cable propulsion devices. Robots in Human Life- Proceedings of the 23rd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, CLAWAR 2020, 2020, pp. 397–403.
3. Platonov, V.N., Briskin, E.S., Sharonov, N.G. On the features of the progressive movement of the solid body, controlled by two propulsion devices. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 489(1), 012058.