



## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Совершенствование рабочего процесса строительного робота-манипулятора» содержит 88 страниц текстового документа, 37 иллюстрации, 1 приложение и 17 использованных источников.

СТРОИТЕЛЬНЫЙ РОБОТ-МАНИПУЛЯТОР, РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС, КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ, КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ, СЕРВОДВИГАТЕЛЬ.

Объектом исследования является рабочий процесс строительного робота-манипулятора. Цель работы заключается в разработке компьютерной модели строительного робота-манипулятора.

В результате были поставлены и решены следующие задачи:

- Обзор конструкций строительных роботов и научных публикаций.
- Теоретическое описание рабочего процесса строительного робота манипулятора (СРМ).
- Разработка имитационной модели рабочего процесса СРМ. Компьютерное моделирование.
- Компьютерный эксперимент.
- Обобщение результатов исследовательской работы. Разработка рекомендаций по совершенствованию рабочего процесса робота-манипулятора.



источников.....

Приложение А. Модель системы управления приводом захватного устройства строительного робота. Международная конференция 85 «Перспектив Свободный-2020».

## ВВЕДЕНИЕ

На многих российских и международных конференциях отмечалось, что в настоящее время значительный интерес в плане научных исследований и практического применения представляют роботы. Это вызвано тем, что развитие новых технологий обуславливает возможность применения роботов в широком диапазоне задач. Скорость внедрение промышленных роботов манипуляторов на отечественные предприятия значительно отстает от зарубежных. Ведь в подавляющем большинстве случаев владельцы заводов обходятся ручным трудом, исходя из экономических соображений. Однако, уже каждый понимает, что ручное производство не способно составить конкуренцию высокотехнологическому и изначально не способно конкурировать на современном развивающемся рынке.

Такой низкий показатель связан с тем, что в России весьма слабо проинформированы в области возможностей роботов. Ведь, так или иначе, приобретение промышленного робота влечет за собой сокращение рабочих и кардинальные изменения в технологическом процессе. Сегодня на промышленных предприятиях крайне востребованы автоматизированные системы, которые помогают наладить производственную работу и в то же время минимизировать отрицательное воздействие на работников.

Все многообразие строительных манипуляторов и роботов, представленных сейчас на рынке, в зависимости от назначения, технологической и структурной особенности можно разделить на несколько групп.

Первую группу составляют манипуляторы, роботы для выполнения монтажных работ. В состав этой группы включаются манипуляторы и роботы для монтажа элементов зданий, перегородок, монтажа оборудования и строительных лесов.

Вторую группу образуют строительные манипуляторы и роботы для бетонных работ. Эта группа подразделяется на три подгруппы: манипуляторы и

роботы для укладки и уплотнения бетонной смеси, средства роботизации арматурных работ на объекте, манипуляционное оборудование для монтажа и демонтажа строительных опалубок.

Большую группу строительных манипуляторов и роботов составляют средства роботизации отделочных работ. В состав этой группы включаются манипуляторы и роботы для выполнения малярных, штукатурных, облицовочных работ, нанесения изоляционных мастик на кровли, а также для устройства монолитных полов.

Четвертая группа – это манипуляторы и роботы для производства земляных работ. В эту группу входят многофункциональное манипуляционное оборудование, предназначенное для устройства котлованов, засыпки и уплотнения грунта, прокладки коммуникаций.

В пятую группу входят манипуляторы и роботы для погрузочно-разгрузочных работ. В составе этой группы манипуляторы и роботы различной грузоподъемности для погрузки и разгрузки строительных конструкций и элементов, контейнеров и пакетов, а также мелкоштучных грузов. Такие манипуляторы могут устанавливаться на транспортных средствах, самоходных шасси.

Используя опыт внедрения манипуляторов и промышленных роботов в стройиндустрии, анализируя технологические особенности производства в этой отрасли, а также учитывая большой опыт роботизации в промышленности, можно сформулировать следующие основные задачи роботизации технологических процессов на строительных предприятиях:

- разработка методик анализа технологии производства строительных изделий и материалов, проведение на их основе обследования предприятий и составление типовых комплексных научно обоснованных планов роботизации отдельных видов технологических процессов;
- определение приоритетных технологических операций и внедрение на них выпускаемых промышленностью манипуляторов и роботов;

- разработка специальных и специализированных манипуляторов, роботов для стройиндустрии;
- проведение работ по унификации и типизации средств робототехники для предприятий стройиндустрии;
- разработка технологической оснастки для роботизации производственных операций;
- проведение работ по совершенствованию технологических процессов и отдельных его операций с учетом требований автоматизации и роботизации для эффективного их внедрения;
- создание и внедрение роботизированных комплексов, участков и линий, разработка типовых компоновочных схем для различных производственных процессов;
- подготовка производств к внедрению гибких технологий и создание на их основе гибких производственных систем (линий, участков и цехов);
- решение технических и организационных вопросов эксплуатации средств робототехники на предприятиях отрасли

Уникальное сочетание компактности и мощности роботов находит свое применение в наиболее тяжелых условиях и труднодоступных местах на стройплощадке, при этом, роботизация даёт значительное сокращение сроков строительства. Не секрет, что появление на свет подобной техники связано, прежде всего, с желанием строителей сократить сроки работ и повысить прибыль. Повышается и безопасность работ. Стоит отметить и такое преимущество роботов и манипуляторов, как бесшумность, экологичность. Поэтому подобная технология весьма уместна в ситуациях, потенциально опасных для здоровья рабочего персонала.

**Цель работы:** разработка компьютерной модели строительного робота-манипулятора.

**Задачи:**

1. Обзор конструкций строительных роботов и научных публикаций.

2. Теоретическое описание рабочего процесса строительного робота манипулятора (СРМ).

3. Разработка имитационной модели рабочего процесса СРМ. Компьютерное моделирование.

4. Компьютерный эксперимент.

5. Обобщение результатов исследовательской работы. Разработка рекомендаций по совершенствованию рабочего процесса робота-манипулятора.

**Объект исследования** – рабочий процесс строительного робота-манипулятора.

**Предмет исследования** – зависимости динамического процесса манипулятора.

В результате анализа информационных источников из сети интернет, журнальных научных публикаций получены данные о современном состоянии роботизации в строительстве. В Российской Федерации строительная отрасль не проявляет активный интерес к использованию в технологических процессах высокоэффективных роботизированных комплексов.

С середины 80-х годов прошлого века задачи роботизации и автоматизации строительных работ становятся в центре внимания ученых и специалистов научно-исследовательских и строительных организаций. Среди них ведущую роль занимают ЦНИИОМТП, ВНИИстройдормаш, МИСИ, ЮРГТУ (НИИ), Спецжелезобетонстрой, Мюнхенский технологический университет. Существенный вклад в решение задач роботизации строительных операций внесли ученые Евдокимов В.А., Вильман О.А., Воробьев В.А., Паршин Д.Я., Загороднюк В.Т., Булгаков А.Г., Максимычев О.И., Френкель Г.Ю., Ткачев С.М., Гудиков Г.Г., Бок Т. и др. [1–8].

Несмотря на широкий спектр научных и проектных разработок в области строительной робототехники уровень автоматизации и роботизации строительных операций остается достаточно низким. Это связано с необходимостью систематизации выполненных исследований и разработок,



проведения комплексных научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок.

Значительные масштабы строительной отрасли, ее зависимость от ручного труда создают явный экономический потенциал для автоматизации и роботизации строительных процессов.

## 1. Обзор роботизации в строительстве

В соответствии с Государственным стандартом ГОСТ 25686-85 «Манипуляторы, автооператоры и промышленные роботы. Термины и определения», **промышленный робот** - это автоматическая машина, стационарная или подвижная, состоящая из исполнительного устройства в виде манипулятора, имеющего несколько степеней подвижности, и перепрограммируемого устройства программного управления для выполнения в производственном процессе двигательных и управляющих функций.

Кроме официально принятого, сложилось и часто используется в практике более краткое определение:

**промышленный робот** - перепрограммируемый автоматический манипулятор промышленного применения.

Под перепрограммируемостью, в соответствии со стандартом, понимается свойство промышленного робота заменять управляющую программу автоматически или при помощи человека-оператора.

К перепрограммированию относится изменение последовательности и (или) величин перемещений по степени подвижности и управляющих функций с помощью средств управления на пульте устройства управления.

Устройство и конструктивное исполнение современных промышленных роботов весьма многообразны и диктуются значительным числом объективных факторов:

- назначение,
- вид обслуживаемого технологического оборудования,
- условия эксплуатации и технические требования и др.

### 1.1 Общее устройство промышленных роботов

В соответствии с вышеприведенным определением промышленный робот в целом состоит из

- исполнительного устройства (манипулятора) и
- устройства программного управления.

**Манипулятор** промышленного робота предназначен для выполнения всех его двигательных функций и представляет собой многозвенный механизм с разомкнутой кинематической цепью, оснащенный приводами и рабочим органом, а также в общем случае - устройством передвижения.

Конструктивно манипулятор состоит из следующих компонентов:

- опорные (несущие) конструкции,
- манипуляционная система,
- рабочие органы,
- привода и устройства передвижения.

**Устройство управления** промышленного робота служит для формирования и выдачи управляющих воздействий манипулятору в соответствии с управляющей программой и состоит из

- собственно, системы управления,
- информационно-измерительной системы с устройствами обратной связи и
- системы связи.

**Опорные, или несущие, конструкции** предназначены для размещения всех устройств и агрегатов промышленного робота, а также обеспечения необходимой прочности и жесткости манипулятора. Опорные конструкции по своему исполнению весьма многообразны и могут выполняться в виде оснований, корпусов, стоек, колонн, металлоконструкций, рам тележек, порталов и т. п.

**Манипуляционная система** служит для переноса и ориентации рабочего органа или объекта манипулирования к заданной точке рабочей зоны и структурно представляет собой обычно многозвенный пространственный механизм с разомкнутой кинематической цепью.

**Рабочий орган манипулятора** промышленного робота, предназначенный для непосредственного воздействия на объект

манипулирования при выполнении технологических операций или вспомогательных переходов, представляет собой захватное устройство или рабочий инструмент.

**Привод** необходим для преобразования подводимой энергии в механическое движение исполнительных звеньев манипулятора в соответствии с командными сигналами, поступающими от системы управления, и в общем виде содержит

- энергоустановку,
- двигатели и
- передаточные механизмы.

**Устройство передвижения** предназначено для перемещения манипулятора или промышленного робота в целом в необходимое место рабочего пространства и конструктивно состоит из

- ходовой части и
- приводных устройств.

**Система программного управления (СПУ)** служит для непосредственного формирования и выдачи управляющих сигналов и конструктивно состоит из:

- пульта управления,
- запоминающего устройства,
- вычислительного устройства,
- блоков управления приводами манипулятора и технологического оборудования.

**Информационно-измерительная система**, предназначенная для сбора и первичной обработки информации для системы управления о состоянии элементов и механизмов промышленного робота и внешней среды, конструктивно входит в состав устройства управления промышленного робота и включает в себя устройства обратной связи и сравнения сигналов, а также датчики обратной связи.

**Система связи** предназначена для обеспечения обмена информацией между роботом и оператором или другими роботами и технологическими устройствами с целью формулировки заданий, контроля за функционированием систем самого робота и технологического оборудования, диагностики неисправностей, регламентной проверки и т. п.

## **1.2 Классификация промышленных роботов**

Классифицирование промышленных роботов может осуществляться по самым различным признакам:

- области применения,
- производственно-технологическим особенностям,
- специализации,
- виду базовой системы координат,
- грузоподъемности,
- величинам линейных перемещений,
- объему рабочей зоны,
- классу точности,
- возможности передвижения (мобильности),
- типу привода,
- способу установки на рабочем месте,
- типу системы управления,
- способу программирования и др.

### **По области применения**

Сварочные, окрасочные, сборочные и контрольно-измерительные.

### **По производственно-технологическим признакам**

Технические, подъемно-транспортные (вспомогательные) и универсальные промышленные роботы,

### **По специализации**

Специальные, специализированные и универсальные (многоцелевые).

### **По уровню вводимой информации и способу обучения**

Промышленные роботы можно разделить на **четыре** основные категории. При этом каждой категории роботов присущ определенный уровень вводимой информации, необходимой и достаточной для полноценного функционирования в заданных технологических условиях, а также органически связанный с этим способом его обучения (или программирования). По тому, какую информацию достаточно получить роботу для выполнения заданной работы и как при этом "обучить" его новым операциям, можно судить о его технологических возможностях и степени автономности.

**а) Неперепрограммируемые (необучаемые) промышленные роботы** с жестким циклом операций снабжены заранее подготовленной достаточно простой программой, повторяющей одну и ту же заданную последовательность операций независимо от изменяющихся условий и не поддающейся изменению простыми средствами.

Состав и последовательность действий робота задаются априорно для каждой технологической операции в соответствии с предварительной информацией об организации производственного процесса. Внесение корректив в первоначальную последовательность действий, обусловленных произошедшими изменениями в организации технологического процесса, требует длительного времени и чрезмерных материальных и трудовых затрат, а потому нецелесообразно.

**б) Жестко программируемые (переобучаемые) промышленные роботы** с изменяемым циклом операций содержат полный набор информации, не изменяющийся в процессе самой работы, но поддающийся корректировке путем "переобучения" при изменении (переналадке) технологического процесса. Для этого предусматриваются специальные средства и методы (замена либо изменение программы), позволяющие легко и быстро изменять состав и последовательность действий робота при изменении внешних условий, а также при переходе от одной технологической операции на иную. Набор

программ, записанных в устройство управления, позволяет легко настраивать робот на изготовление требуемого изделия.

И все же это промышленные роботы **первого** поколения, не имеющие сенсорного обеспечения и не способные корректировать свои действия в самом процессе функционирования в зависимости от изменяющихся условий.

**в) Перепрограммируемые (обучаемые) промышленные роботы** с изменяемым циклом операций наряду с полным набором программной информации имеют сенсорное обеспечение и обратные связи. Благодаря этому становится возможным корректировать программные действия соответственно изменению параметров технологического процесса.

Алгоритмическое и программное обеспечение таких промышленных роботов позволяет системе управления на основе сигналов обратных связей формировать законы управления манипулятором с учетом фактической обстановки, т.е. обучаться в процессе взаимодействия с объектами производства (адаптироваться) к изменяющимся условиям.

"Начальное" обучение таких роботов осуществляется обычно по первому рабочему циклу, для чего перед началом работы человек-оператор в режиме обучения вручную проводит захватное устройство робота по рабочей траектории. При этом в запоминающее устройство системы управления роботом автоматически записываются координаты узловых точек рабочей траектории, а также некоторая информация о состоянии робототехнической системы в процессе выполнения технологической операции. Затем система управления роботом переводится в рабочий режим, а записанная в память информация, преобразованная в командные сигналы, подается на приводы исполнительной системы, и манипулятор выполняет заданные состав и последовательность действий. Такие промышленные роботы обычно относятся ко второму поколению.

**г) Гибкопрограммируемые (самообучаемые) промышленные роботы** с элементами искусственного интеллекта кроме развитой сенсорной системы в виде искусственных органов зрения, слуха, осязания и других, должны

обладать мощной информационно-управляющей системой и совершенным алгоритмическим и программным обеспечением. В результате эти роботы способны распознавать образы и ситуации, моделировать окружающую среду, планировать поведение и, самообучаясь в процессе функционирования, формировать состав и последовательность своих действий на основе поставленной цели и информации об окружающей среде в условиях неорганизованного рабочего пространства.

Это роботы третьего поколения, которые найдут применение в самых сложных технологических процессах сборки, монтажа, контрольно-измерительных и специальных технологиях

### **По виду базовой системы координат**

Можно выделить пять основных разновидностей промышленных роботов. Но прежде чем рассмотреть конкретные разновидности, следует привести несколько пояснений.

Компоновка и конструктивное исполнение робота прежде всего зависят от того, какие движения и в какой последовательности должен выполнять манипулятор при функционировании.

Для переноса объекта манипулирования без его ориентации (в любое место рабочей зоны) необходимо и достаточно наделить манипулятор тремя степенями подвижности, каждая из которых может быть, как поступательной, так и вращательной. Эти степени подвижности, называемые переносными, или региональными, определяют систему координат, в которых осуществляются основные движения исполнительного устройства робота по переносу объекта.

В зависимости от характера каждой из переносимых степеней подвижности (поступательной или вращательной), их последовательности и взаимной ориентации в пространстве формируется та или иная базовая система координат манипулятора со своими особенностями и формой пространственной фигуры, описываемой рабочим органом ПР.



Таким образом, вид базовой системы координат манипулятора ПР определяет его конструктивное исполнение, уровень сложности системы управления и трудности программирования исполнительных движений.

а. Промышленный робот, действующий **в прямоугольной, или декартовой, системе координат** (рисунок 1), имеет три поступательных базовых степени подвижности с взаимно перпендикулярными направлениями перемещений. Этот тип робота состоит из рамы в виде балочной, мостовой или портальной конструкции, перемещающейся поступательно, поперечной тележки или каретки, относительно которой в вертикальном направлении перемещается "рука" манипулятора в виде стойки или колонны. Форма образующейся пространственной фигуры, описываемой рабочим органом, так называемой рабочей зоны, представляет собой прямоугольный параллелепипед.

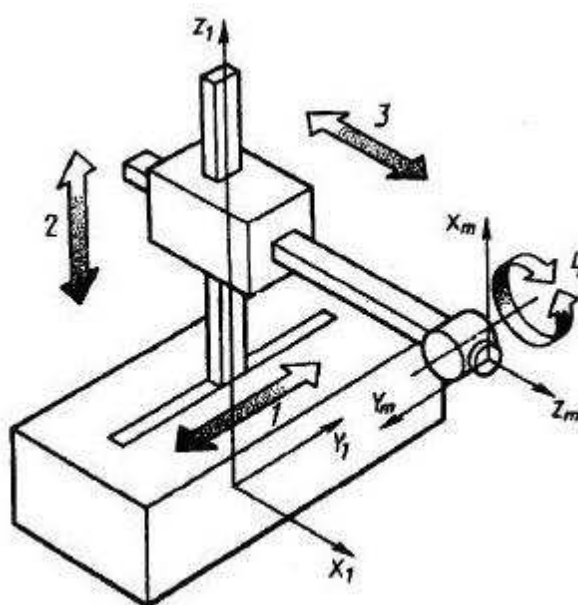


Рисунок 1.1 – Робот, работающий в прямоугольной системе координат

Механические свойства прямоугольной системы манипулятора (удобство обслуживания рабочей зоны, достаточно высокая жесткость) позволяют применять такие роботы в стесненных условиях, подвешивая их над обслу-

живаемым оборудованием, а также там, где требуется высокая точность, например, на сборочных операциях.

Однако, несмотря на сравнительную простоту построения манипулятора и программирования, промышленные роботы такой конструкции используются сравнительно редко. Недостатками являются чрезмерное увеличение габаритных размеров устройства при сравнительно небольшом объеме рабочей зоны и удлинение продолжительности заданной циклограммы процесса. Чаще всего такие роботы выполняются в виде каретки, подвешенной на направляющих под или над обслуживаемым оборудованием, либо в виде порталной конструкции.

б. Промышленный робот, действующий в **цилиндрической системе координат** (рисунок 2), имеет одну вращательную и две поступательные базовые степени подвижности с взаимно перпендикулярными направлениями перемещений. Манипулятор такого робота состоит из поворотной колонны, или стойки, перемещающейся по ней в вертикальном направлении каретки, относительно которой поступательно движется "рука" манипулятора. Форма образующейся рабочей зоны представляет собой неполный цилиндр.

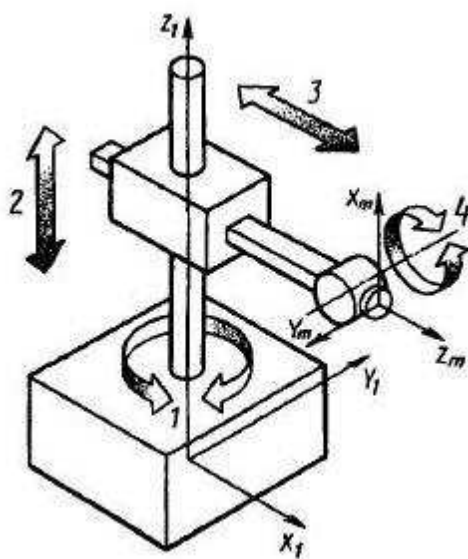


Рисунок 1.2 – Робот, работающий в цилиндрической системе координат

Благодаря удобству конструктивного построения и программирования, такая конфигурация манипулятора получила широкое распространение. Она обеспечивает обслуживание большого объема рабочего пространства, а наличие двух переносных поступательных перемещений наряду с вращательным облегчает планировку и компоновку рабочих мест и оборудования, создание робототехнических комплексов. К недостатку следует отнести затруднительность обслуживания объектов, расположенных на малой высоте.

в. Промышленный робот, действующий в **сферической, или полярной,** системе координат (рисунок 3), имеет две вращательные взаимно перпендикулярные и поступательную степени подвижности. Такой тип робота состоит из вращающейся колонны, или основания, поворотной (качающейся) каретки и перемещающейся в ней поступательно "руки". Форма образующейся рабочей зоны представляет собой неполный шар, ограниченный сферическими и плоскими поверхностями.

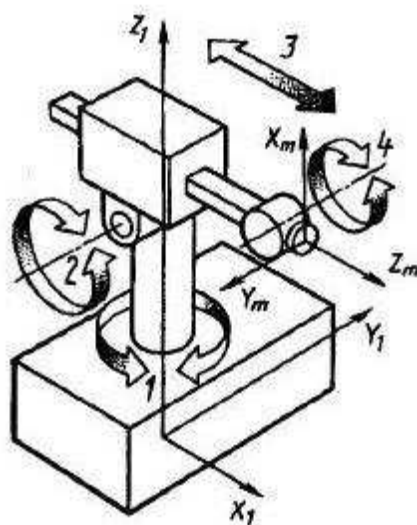


Рисунок 1.3 – Робот, работающий в полярной системе координат

Такая конфигурация манипулятора несколько громоздка и требует для своего управления более сложную систему. Однако благодаря высокой универсальности, возможности обслуживания большего объема рабочего пространства, чем манипуляторы, работающие в прямоугольной и цилиндрической системах координат, такие промышленные роботы получили широкое распространение.

г. Промышленный робот, действующий **в угловой, или ангулярной**, сферической системе координат (рисунок 4), имеет три вращательных базовых степени подвижности. Такая конфигурация манипулятора, называемая еще **сложной сферической**, или **антропоморфной**, состоит из звеньев, способных поворачиваться подобно руке человека: к вращающемуся "туловищу" в виде корпуса, или колонны, шарнирно прикрепляется "плечо", к которому, в свою очередь, - "локоть". Форма образующейся рабочей зоны представляет собой сложную шаровую поверхность, ограниченную сферическими и цилиндрическими плоскостями.

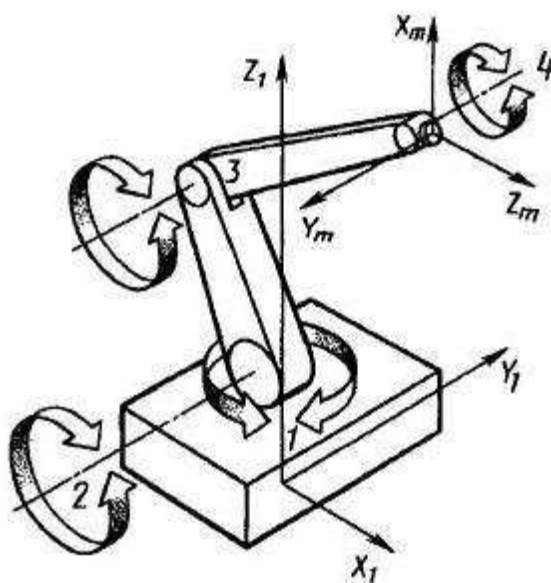


Рисунок 1.4 – Робот с шарнирной (антропоморфной) рукой

Антропоморфная система довольно сложна и громоздка для реализации и программирования, требует для своего управления более сложные устройства, а в связи с пониженной жесткостью нужны специальные меры для повышения точности манипулирования. В то же время она отличается высокой универсальностью, а обладая наибольшим объемом обслуживаемой рабочей зоны, хорошо komponуется в цехе, позволяет минимизировать размеры производственных площадей, необходимых для размещения роботов. При оснащении дополнительными шарнирами она приобретает повышенные гибкость и маневренность, что особенно важно для окрасочных и сварочных работ.

д. Промышленный робот, действующий **в ангулярной цилиндрической**, или сложной цилиндрической (рисунок 5), системе координат, имеет две вращательные в горизонтальной плоскости степени подвижности и перпендикулярную в нем - поступательную, т.е. направленную вертикально. Манипулятор такого робота состоит из вращающейся колонны, или корпуса, присоединенного к нему и поворачивающегося в той же горизонтальной плоскости звена, на конце которого в направляющей перемещается вертикально "рука".

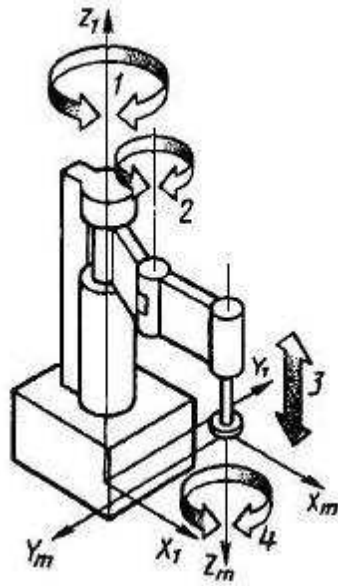


Рисунок 1.5 – Робот, действующий в ангулярной цилиндрической, или сложной цилиндрической, системе координат.

## 2 Теоретические исследования

Конструкции роботов, используемых в технологических процессах различных отраслей народного хозяйства с точки зрения динамических процессов, представляет собой систему твердых тел (масс), соединенных упругими, диссипативными и функциональными связями, находящуюся под действием движущих сил и сил сопротивления от взаимодействия с внешней средой. Учет динамического поведения машины при оценке качества ее работы в настоящее время приобретает все большее значение, что связано со сложностью и интенсификацией режимов работы современных технических объектов.

Предметом динамики строительных роботов является изучение движений упругих звеньев реальных механизмов с гидро-, пневмо- и электроустройствами. Детали реальных машин-роботов или звенья реальных механизмов представляют собой физические тела с присущей им способностью деформироваться под действием сил, поэтому при движении машины или ее элементов эти деформации вызывают дополнительные перемещения, часто имеющие колебательный характер и накладывающиеся на основное движение.

В разделе работы решается задача исследования динамики строительного робота. В результате динамических расчетов определяются исходные данные для последующих расчетов прочности, производительности, долговечности машин и мощности привода. Динамические системы при исследовании представляются как физический объект или его элементы.

Выбор динамической модели строительного робота процесс многоступенчатый. При проведении предварительных расчетов используется модель с жесткими звеньями. С ее помощью решаются кинематические задачи, определяются движущие силы, необходимые для осуществления требуемых движений, оцениваются реакции в кинематических парах. Более сложные модели учитывают обычно податливость звеньев передаточных механизмов, а исполнительный механизм считается жестким. Эти модели позволяют

определить отклонение истинных законов движения исполнительных звеньев от заданных (программных), уточнить динамические нагрузки, действующие на элементы передаточных механизмов. Наиболее сложными являются модели, учитывающие податливость звеньев исполнительного механизма робота.

Динамические процессы в конструкции можно описать дифференциальными уравнениями (ДУ), выведенными с использованием различных принципов механики. Затем, используя аналогию между реальными процессами и соответствующими им математическими (т.е. формализованными) схемами, изучение реальной МС можно свести к решению чисто математической задачи. Однако часто оказывается полезной и аналитическая постановка задачи, основанная на построении некоей упрощенной модели исследуемого процесса, которая допускает аналитическое решение для каких-то частных случаев. Анализ решения такой модели позволяет выявить основные закономерности и не всегда очевидные взаимосвязи между отдельными параметрами системы, а также сравнить численные расчеты, выполненные на ЭВМ, с результатами аналитического решения, и тем самым оценить, насколько точен метод расчета.

При решении первой задачи динамики для роботов предполагается, что законы движения всех звеньев робота известны, и они совпадают с программными законами движения, требующимися для выполнения того или иного рабочего процесса. Целью динамического расчета на этом этапе является определение движущих сил и моментов, необходимых для выполнения программного движения, а также определении возникающих при этом движения динамических нагрузок в кинематических парах (силовой или кинетостатический расчет). Определив движущие силы и моменты, можно выбрать двигатели, способные обеспечить осуществление всей совокупности программных движений робота, или оценить пригодность предварительно выбранных двигателей. Определив динамические нагрузки, можно оценить прочность, надежность и жесткость системы. Вторая задача динамики для



роботов будет заключаться в определении динамических ошибок - отклонений реальных законов движения от программных.

## **2.1 Последовательность решения задач динамики механических систем.**

Обычно придерживаются следующей последовательности решения задач с использованием ДУ движения:

1) выбирают способ изображения расчетной схемы. При использовании ДУ движения чаще всего прибегают к условной форме изображения расчетных схем в виде эквивалентных схем. В этом случае, с учетом условий задачи, определяют сначала приведенные значения параметров (масс, моментов инерции, сил, моментов инерции сил, жесткостей и т.п.), после чего в характерном для эквивалентных схем виде изображают расчетную схему, отмечая на ней все задаваемые силы, приведенные к соответствующим точкам;

2) составляют ДУ движения на основе принципа Даламбера или уравнений Лагранжа.

3) полученные ДУ движения, если их можно решить аналитически приводят к виду, удобному для интегрирования; в противном случае их приводят к нормальной форме Коши для последующего решения на ЭВМ; решают уравнения при заданных начальных условиях;

4) по результатам решения ДУ определяют искомые величины (т.е. зависимости от времени перемещений, скоростей, ускорений элементов МС, давления, тока, напряжения и других величин).

## **2.2 Составление эквивалентных схем механических систем.**

В подавляющем большинстве случаев кинематическая схема машины-робота оказывается слишком сложной и приводит к не менее сложному расчету. Это заставляет упрощать исходные схемы путем исключения из них

определенного числа масс и звеньев, их соединяющих, сокращения числа сил, нагружающих данный объект, и замены действительных масс объекта некоторыми условными (приведенными) массами, связанными между собой звеньями, также имеющими некоторую условную жесткость. Полученные таким образом схемы обычно называют эквивалентными, т.к. результаты расчета по ним должны мало отличаться (быть эквивалентными) от результатов, которые могли бы быть получены без упрощений. Однако, чтобы результаты расчета по эквивалентной схеме мало отличались от действительных, необходимо правильно построить эквивалентную схему и рассчитать значения приведенных параметров. Построение эквивалентной схемы сводится к определению приведенных моментов инерции, приведенных масс и жесткостей участков между этими массами. Расчетные схемы динамических систем отличаются от расчетных схем статических систем обычно лишь тем, что к задаваемым силам добавляется сила инерции.

### 2.3 Составление уравнений динамики механической системы

ДУ движения МС можно составить на основе принципа Даламбера или уравнений Лагранжа. Принцип Даламбера для системы. Если к каждой точке МС, находящейся под действием заданных сил и реакций связей, приложить еще силу инерции этой точки, то уравнениям динамики можно придать форму уравнений статики, т.е. записать их в виде:

$$\bar{P}_k + \bar{F}_k + \bar{F}_{ku} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (2.1)$$

где  $P_k$  - заданная сила, приложенная к  $k$ -ой точке МС;  $F_k$  - реакция связей, приложенная к той же точке;  $F_{ku}$  - сила инерции этой точки, равная по модулю произведению массы этой точки на ее ускорение и направленная противоположно этому ускорению. Для использования принципа Даламбера необходимо знать значение и направление всех сил, действующих на систему,

всех ускорений масс системы, а также значения и направления реакций связей. При применении принципа Даламбера задачу решают в такой последовательности:

- 1) выбирают систему отсчета и обобщенные координаты, соответствующие исследуемым перемещениям системы;
- 2) на эквивалентной схеме отмечают заданные силы и моменты, силы реакций, соответствующие неидеальным связям;
- 3) отбросив связи, налагаемые на систему, заменяют их силами реакций связей, типа сил упругости или моментов от сил;

К силам, изображенным на схеме добавляют силы инерции (при вращательном движении – моменты от сил инерции), равные произведению массы (момента инерции) на ускорение по принятым обобщенным перемещениям; ускорения записывают в дифференциальной форме как вторые производные обобщенных координат по времени; по построенной таким образом схеме в соответствии с (1) составляют дифференциальные уравнения движения.

Уравнения Лагранжа второго рода имеют вид:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_1} + \frac{\partial A_p}{\partial q_1} = Q_1 \quad (q=1, 2, \dots, n) \quad (2.2)$$

где  $E_k$  – кинетическая энергия МС;  $E_p$  – потенциальная энергия МС;  $q_1, \dot{q}_1, Q_1$  – соответственно обобщенные координата, скорость и сила,  $n$  – число обобщенных координат.

Эти уравнения представляют собой систему  $n$  обыкновенных уравнений второго порядка с  $n$  неизвестными функциями времени  $q_1, \dots, q_n$ . Чтобы для данной МС составить уравнения Лагранжа, надо:

- 1) установить число степеней свободы системы и выбрать обобщенные координаты;

2) изобразить МС в произвольном положении и показать на рисунке все действующие силы (активные силы и силы трения, если они совершают работу);

3) вычислить обобщенные силы. Для определения обобщенной силы  $Q$ , необходимо определить работу всех активных сил на возможном перемещении системы, соответствующем изменению обобщенной координаты  $q$ , на малую величину  $\delta q_1$ ;

4) определить потенциальную энергию системы;

5) вычислить кинетическую энергию системы в ее абсолютном движении и выразить эту энергию через обобщенные координаты и обобщенные скорости;

6) найти соответствующие частные производные и подставить все вычисленные величины в уравнение (2.2).

Интегрируя полученные уравнения можно найти закон движения системы в виде  $q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)$ . Если же задан закон движения, то уравнения (2) позволяют определить действующие силы. Уравнения Лагранжа применимы только для МС с идеальными связями, где силы трения не учитываются, если учет сил трения необходим, то эти силы рассматривают как активные или выделяют соответствующие механизмы из манипуляционной системы и рассматривают их особо. Таким образом, используя принцип Даламбера или уравнения Лагранжа, получаем систему линейных или нелинейных ДУ, описывающих движение рассматриваемой механической системы.

## 2.4 Численное интегрирование дифференциальных уравнений

Решение полученных ДУ позволяет сделать анализ влияния параметров системы на динамические процессы в ней, определить рациональные значения параметров МС. Но не все ДУ можно решить в аналитической форме, т.е. найти выражение, являющееся решением уравнения. В таких случаях ДУ численно интегрируют.

Метод численного интегрирования ДУ первого порядка вида  $q'=f(t,q)$  с начальными условиями  $t_0, q(t_0)=q_0$  основан на разложении решения в ряд Тейлора в  $\Delta t$  окрестности точки  $t_0$ :

$$q(t_0 + \Delta t) = q(t_0) + \Delta t \dot{q}(t_0) + \frac{\Delta t^2}{2!} \ddot{q}(t_0) + \dots \quad (2.3)$$

Задача численного решения ДУ первого порядка ставится следующим образом – требуется найти значения функции  $q=f(t)$ , удовлетворяющие выражению (3) и начальному условию  $q(t_0)=q_0$  на некотором отрезке  $[t_0, t_k]$  с шагом  $\Delta t$ .

Интегрирование по методу Эйлера. Простейшим из численных методов интегрирования ДУ является метод Эйлера. Обычно он применяется для прикидочных расчетов, но идеи, положенные в его основу, являются исходными для широкого класса численных методов. При отбрасывании всех членов ряда Тейлора (3), содержащих производные второго и высших порядков, получим:

$$q(t_0 + \Delta t) = q(t_0) + \Delta t f(t_0, q_0) \quad (2.4)$$

где  $f(t_0, q_0)$  – правая часть дифференциального уравнения  $\dot{q}=f(t,q)$ .

Пользуясь значением  $q_1$  из разложения  $q(t)$  в  $\Delta t$  окрестности точки  $t_1=t_0+\Delta t$ , получим:

$$q_2 = q(t_0 + 2\Delta t) = q_1 + \Delta t f(t_1, q_1).$$

Таким образом, окончательно имеем:

$$q_{n+1} = q_n + \Delta t f(t_n, q_n).$$

При достаточно малой величине  $\Delta t$  метод Эйлера может дать решение с большей точностью. Недостатком метода Эйлера является замедление вычисления при выборе малой величины шага  $\Delta t$  для обеспечения высокой точности.

Интегрирование по методу Рунге - Кутта. Это наиболее распространенный метод численного интегрирования дифференциальных уравнений. Вместо первой производной  $\Delta t f(t,q)$ , используемой в формуле Эйлера, вычисляется усредненная первая производная  $f_1$ . Точность метода Рунге - Кутта оценивается величиной  $\Delta t^5$  (при  $\Delta t \ll 1$ ), что достигается за счет специального подбора координат четырех точек, в которых вычисляется первая производная  $f(t,q)$ .

Для ДУ первого порядка вида  $q' = f(t,q)$  обычно известны значения  $t_n, q_n$ , которые, являются или начальными значениями, или получены в процессе предыдущих вычислений.

Для вычисления значения функции  $q_{n+1} = q(t_{n+1}) = q_n + \Delta q_n$  по методу Рунге-Кутта выполняется следующая последовательность операций:

1) вычисляют коэффициенты:

$$\begin{cases} k_1 = \Delta t f(t_n, q_n) \\ k_2 = \Delta t f(t_n + \Delta t / 2, q_n + k_1 / 2) \\ k_3 = \Delta t f(t_n + \Delta t / 2, q_n + k_2 / 2) \\ k_4 = \Delta t f(t_n + \Delta t, q_n + k_3) \end{cases} \quad (2.5)$$

2) находят приращения функции:

$$\Delta q_n = (k_1 + 2 k_2 + 2 k_3 + k_4) / 6 \quad (2.6)$$

3) вычисляют функцию:

$$q_{n+1} = q_n + \Delta q_n \quad (2.7)$$

При интегрировании численными методами ДУ высших порядков и систем ДУ на ЭВМ уравнения представляют в нормальной форме Коши (делают замену переменных и каждое уравнение разрешают относительно входящей в него производной первого порядка).

## **2.5 Уравнения динамики механизма подъёма робота мостового типа**

Для повышения эффективности работы в строительстве большое значение имеет применение роботов и манипуляторов в технологии транспортных процессов, в особенности на погрузочно-разгрузочных и складских работах. Известно, что целью каждой погрузочно-разгрузочной операции является ее возможно быстрое выполнение с оптимальным эффектом.

В настоящее время специальные машины и устройства, применяемые для погрузочно-разгрузочных работ, снабжены практически всеми элементами, характерными для роботов, такими, например, как гидропривод, электропривод, электроника, система управления, а в некоторых случаях и ЭВМ. Эти устройства, такие как грузоподъемные краны мостового типа, вилочные погрузчики, перегрузчики контейнеров, ковшовые погрузчики, опрокидывающие устройства, краны-штабелеры можно отнести в категорию простых или примитивных роботов. Иногда такие устройства объединяются в технологическом процессе и работают по определенной программе. Отсюда возникает вопрос: можно ли при помощи этих, часто высокопроизводительных и прогрессивных устройств, еще более «роботизировать» процесс погрузки и выгрузки?

Опыт создания роботов второго и третьего поколений позволяет ответить положительно. Основным требованием конструктивной модернизации обычных кранов мостового типа, с целью переоборудования их в погрузочно-

разгрузочных роботов, является переход на жесткий подвес груза. Ведь по существу краны с жестким подвесом груза являются кранами-манипуляторами, а оснащение их современными системами автоматического управления и сенсорными устройствами позволяет использовать эти краны в полностью автоматизированных робототехнических комплексах. Подобные устройства способны автономно перегружать и транспортировать грузы, уложенные в поддоны, контейнеры, в специальную тару или сформированные в пакеты. На рисунок 2 показана схема робота мостового типа, а на рисунок 3 его кинематическая схема.

При проектировании грузоподъемного механизма необходимо, в первую очередь, оценить максимальные нагрузки в элементах механизма, привода, металлоконструкции моста. Составление динамической модели механизма подъема начинается с анализа распределения масс конструкции и выделения наиболее деформируемых элементов, обеспечивающих относительное смещение сосредоточенных масс.

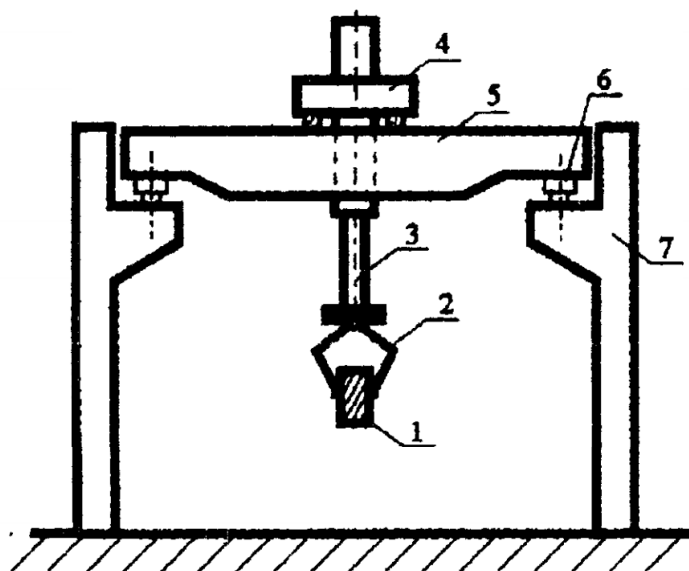


Рисунок 2.1 – Схема робота мостового типа. 1 – груз, 2 – захват, 3 – механизм подъема, 4 – механизм поперечного перемещения, 5 – мост, 6 – механизм продольного перемещения, 7 – опора



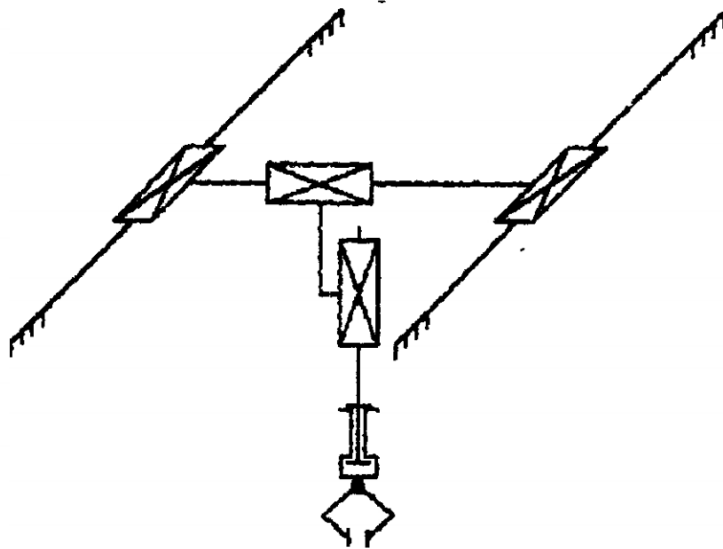


Рисунок 2.2 – Кинематическая схема робота мостового типа

Одномассовая модель. Один из вариантов динамической модели механизма подъема робота показан на рисунок 4. Рассматривается движение груза массой  $M$  на упругой связи с приведенной жесткостью  $c$ , определяемой жесткостью несущей конструкции моста и механизма подъема робота.

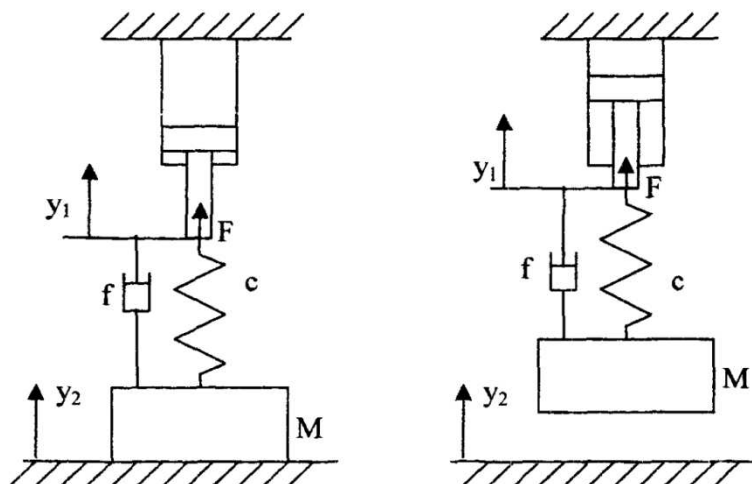


Рисунок 2.3 – Одномассовая модель механизма подъема робота мостового типа

В цилиндр механизма подъема подается сжатый воздух или рабочая жидкость под давлением с постоянной производительностью

$Q = \text{const}$ , м<sup>3</sup>/с. При этом верхняя точка упругой связи движется со скоростью  $y' = \text{const}$ . Очевидно, что подъем груза следует исследовать для двух этапов движения:

1 этап - груз покоится на основании, а в подъемном механизме усилие возрастает от нуля до тех пор, пока не станет равным весу груза;

2 этап - груз отрывается от основания и движется.

Первый этап. Движение верхней точки упругой связи описывается следующими зависимостями:

$$y_1 = V_1 t \quad (2.8)$$

$$\dot{y}_1 = V_1 = Q / S = \text{const} \quad (2.9)$$

где  $S$  – полезная площадь цилиндра механизма подъема, м<sup>2</sup>. Пока груз покоится на основании, усилие механизма подъема определяется зависимостью:

$$F = c y_1 = c V_1 t$$

Первый этап заканчивается, когда  $F = Mg$ , где  $g$  – ускорение свободного падения. Отсюда находим время первого этапа:

$$t_1 = MgS / (cQ) \quad (2.9)$$

Второй этап ( $t > t_i$ ). Груз отрывается от основания и совершает колебания как механическая система с двумя степенями свободы (обобщенные координаты  $y_1$  и  $y_2$ ). Уравнения движения такой системы можно вывести, используя уравнения Лагранжа II рода. Кинетическая и потенциальная энергия рассматриваемой механической системы (рисунок 4 б) соответственно равны:

$$T = \frac{M \dot{y}_2^2}{2},$$

$$\Pi = \frac{c(y_1 - y_2)^2}{2} + Mgy_2.$$

Тогда для первой степени подвижности  $y_1$  (перемещение верхней точки механизма подъема) имеем:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_1} \right) = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y_1} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial y_1} = c(y_1 - y_2).$$

Обобщенная сила:

$$Q_{y_1} = F.$$

Таким образом, на основании (2) при  $t \geq t_1$ , усилие в механизме подъема:

$$F = c(y_1 - y_2). \quad (2.10)$$

Для второй степени подвижности  $y_2$  (перемещение груза) получаем:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_2} \right) = M \cdot \ddot{y}_2, \quad \frac{\partial T}{\partial y_2} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial y_2} = M \cdot g - c \cdot (y_1 - y_2).$$

Обобщенная сила в этом случае:

$$Q_{y_2} = f(\dot{y}_1 - \dot{y}_2),$$

где  $f$  – коэффициент относительного демпфирования, кг/с.

Подставляя полученные результаты в уравнение (2.2), получаем уравнение движения груза в виде:

$$M\ddot{y}_2 + Mg - c(y_1 - y_2) = f(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) \quad (2.11)$$

Учитывая, что  $\dot{y}_1 = v_1 = Q/S = \text{const}$  и  $y_1 = v_1 t = (Q/S)t$ , после преобразования (2.11) получим:

$$\ddot{y}_2 = \frac{c}{M} \left( \frac{Q \cdot t}{S} - y_2 \right) + \frac{f}{M} \left( \frac{Q}{S} - \dot{y}_2 \right) - g \quad (2.12)$$

Для приведения уравнения (2.12) к нормальной форме Коши делаем замену переменной  $\dot{y}_2 = V_2$ . Тогда:

$$\begin{cases} \dot{y}_2 = V_2 \\ \dot{V}_2 = \frac{c}{M} \left( \frac{Q t}{S} - y_2 \right) + \frac{f}{M} \left( \frac{Q}{S} - V_2 \right) - g \end{cases} \quad (2.13)$$

Начальные условия для рассматриваемого случая:

$$t_0 = t_1, \quad y_2(t_0) = 0, \quad v_2(t_0) = 0$$

При численном интегрировании уравнений следует иметь в виду, что груз не может опуститься ниже основания, т.е. при движении груза должно соблюдаться неравенство  $y_2 \geq 0$ .

Двухмассовая модель. Если необходимо определить характер изменения и значения усилий, действующих на механизм подъёма и элементы конструкции моста робота, следует рассматривать задачу колебаний груза с учетом податливости массы металлоконструкции моста и механизма подъёма.

Динамическая модель робота для рассматриваемой задачи может быть представлена в виде, показанном на рисунок 5. Следует иметь в виду, что для

рассматриваемой МС жесткость моста робота  $c_2$  будет зависеть от положения тележки механизма поперечного перемещения.

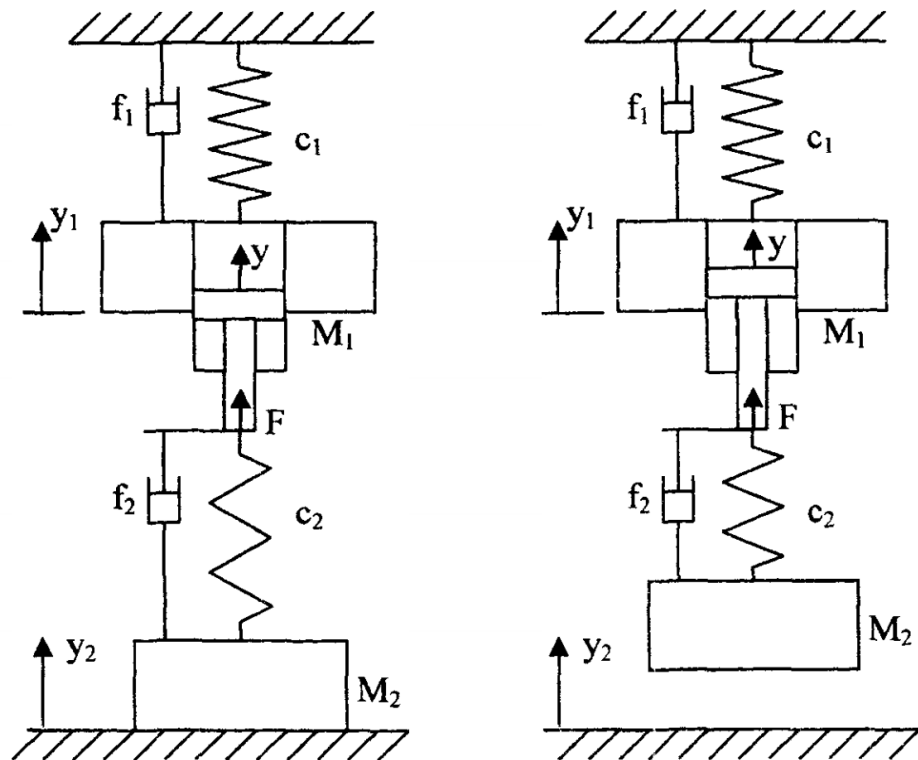


Рисунок 2.4 – Двухмассовая модель робота мостового типа

Движение системы также как при исследовании одномассовой модели рассматривается в два этапа. Первый этап. Верхняя точка упругой связи  $cg$  (в нашем случае поршень цилиндра) перемещается по закону  $y = V \cdot t = (Q / S) \cdot t$ . При этом нагружается механизм подъёма и мост, вследствие чего масса моста  $M1$  опускается, а груз остаётся в покое, т.е. имеем систему с двумя степенями подвижности (две обобщенные координаты  $y$  и  $y_1$ ).

$$T = \frac{M_1 \dot{y}_1^2}{2},$$

$$\Pi = \frac{c_1 y_1^2}{2} + M_1 g y_1 + c_2 \frac{(y + y_1)^2}{2}.$$

Для обобщенной координаты  $y$  (перемещение верхней точки механизма подъема):

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial y} = c_2(y + y_1), \quad Q_y = F - f_2(\dot{y} + \dot{y}_1).$$

На основании (2.2) получаем:

$$c_2(y + y_1) = F - f_2(\dot{y} + \dot{y}_1)$$

Преобразуя это выражение, получаем усилие в механизме подъема:

$$F = c_2 \left( \frac{Q}{S} t + y_1 \right) + f_2(\dot{y} + \dot{y}_1) \quad (2.14)$$

Для обобщенной координаты  $y_1$  (перемещение моста):

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_1} \right) = M_1 \ddot{y}_1, \quad \frac{\partial T}{\partial y_1} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial y_1} = c_2 y_1 + M_1 g + c_2(y + y_1), \quad Q_{y_1} = f_1 \dot{y}_1 - f_2(\dot{y} + \dot{y}_1)$$

Подставляя в (2.2) получаем:

$$M_1 \ddot{y}_1 + c_1 y_1 + M_1 g + c_2(\dot{y} + \dot{y}_1) = -f_1 \dot{y}_1 - f_2(\dot{y} + \dot{y}_1) \quad (2.15)$$

Преобразуя (2.15), получим уравнение движения рассматриваемой системы на первом этапе:

$$\ddot{y}_1 = -\frac{c_1}{M_1} y_1 - g - \frac{c_2}{M_1} \left( \frac{M_1 g}{c_1} + \frac{Q}{S} y + y_1 \right) - \frac{f_1}{M_1} \dot{y}_1 - \frac{f_2}{M_1} (\dot{y} + \dot{y}_1) \quad (2.16)$$

С целью приведения уравнения (16) к нормальному виду Коши принимаем  $\dot{y}_1 = V_1$ . Тогда, математическая модель, описывающая движение механической системы, рисунок 4 а, запишется в виде:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = V_1 \\ \dot{V}_1 = -\frac{c_1}{M_1} y_1 - g - \frac{c_2}{M_1} \left( \frac{Q}{S} y + y_1 \right) - \frac{f_2}{M_1} \left( \frac{Q}{S} + V_1 \right) - \frac{f_1}{M_1} V_1 \end{cases} \quad (2.17)$$

Уравнения (2.17) решаются при следующих начальных условиях:

$$t_0 = 0; y_0(t_0) = -\frac{M_1 g}{c_1}; V_1(t_0) = \dot{y}_1(t_0) = 0 \quad (2.17)$$

Здесь  $M_1 g / c_1$  – начальная деформация моста от силы  $M_1 g$ .

Первый этап заканчивается в момент времени  $t_1$ , когда усилие в механизме подъема  $F$ , вычисляемое по формуле (14), достигнет веса груза, т.е. когда  $F = M_2 \times g$ . Второй этап. ( $F > M_2 \times g, t > t_1$ ). На этом этапе груз и мост робота совершают колебания как механическая система с тремя степенями свободы (обобщенные координаты  $y, y_1, y_2$ ), для которой кинетическая и потенциальная энергии:

$$T = \frac{M_1 \cdot \dot{y}_1^2}{2} + \frac{M_1 \cdot \dot{y}_2^2}{2}$$

$$П = \frac{c_1 \cdot y_1^2}{2} + M_1 \cdot g \cdot y_1 + M_2 \cdot g \cdot y_2 + \frac{c_2 \cdot (y + y_1 - y_2)^2}{2}$$

Для координаты  $y$  (перемещение верхней точки механизма подъема):

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial П}{\partial y} = c_2 (y + y_1 - y_2), \quad Q_y = F - f_2 (\dot{y} + \dot{y}_1)$$

Подставляя в (2.2), находим усилие в механизме подъема:

$$F = c_2 (y + y_1 - y_2) + f_2 (\dot{y} + \dot{y}_1) = c_2 ((Q/S) \cdot t + y_1 - y_2) + f_2 (\dot{y} + \dot{y}_1) \quad (2.19)$$

Для координаты  $y_1$  (перемещение моста):

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_1} \right) = M_1 \ddot{y}_1, \quad \frac{\partial T}{\partial y_1} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial y_1} = c_1 y_1 + M_1 g + c_2 (y + y_1 - y_2),$$

$$Q_{y_1} = -f_1 \dot{y}_1 - f_2 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2)$$

где  $f_1$  и  $f_2$  соответственно коэффициенты относительного демпфирования в металлоконструкции моста в механизме подъема, кг/с. На основании (2) получаем уравнение движения массы моста робота:

$$M_1 \ddot{y}_1 + c_1 y_1 + M_1 g + c_2 (y + y_1 - y_2) = -f_1 \dot{y}_1 - f_2 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) \quad (2.20)$$

Для координаты  $y_2$  (перемещение груза):

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_2} \right) = M_2 \cdot \ddot{y}_2; \quad \frac{\partial T}{\partial y_2} = 0; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial y_2} = M_2 \cdot g - c_2 (y + y_1 - y_2); \quad Q_{y_2} = -f_2 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2).$$

Используя (2.2), записываем уравнение движения груза:

$$M_2 \cdot \ddot{y}_2 + M_2 \cdot g + c_2 (y + y_1 - y_2) = -f_2 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) \quad (2.21)$$

Таким образом, математическая модель движения груза и моста робота имеет вид:



$$\begin{cases} M_1 \cdot \ddot{y}_1 + c_1 \cdot y_1 + M_1 \cdot g + c_2 \cdot (y + y_1 - y_2) + f_1 \cdot \dot{y}_1 + f_2 \cdot (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = 0 \\ M_2 \cdot \ddot{y}_2 + M_2 \cdot g - c_2 \cdot (y + y_1 - y_2) + f_2 \cdot (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = 0 \end{cases} \quad (2.22)$$

Для решения на ПЭВМ приводим систему уравнений (2.22) к нормальному виду. С этой целью принимаем:

$$y_1 = V_1; \quad y_2 = V_2.$$

Тогда получим систему из четырех ДУ:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = V_1 \\ \dot{V}_1 = \frac{c_1}{M_1} y_1 - g - \frac{c_2}{M_1} \left( \frac{Q}{S} t + y_1 - y_2 \right) - \frac{f_1}{M_1} V_1 - \frac{f_2}{M_1} (V_1 - V_2) \\ \dot{y}_2 = V_2 \\ \dot{V}_1 = \frac{c_2}{M_2} \left( \frac{Q}{S} t + y_1 - y_2 \right) - g - \frac{f_2}{M_2} (V_1 - V_2) \end{cases} \quad (2.23)$$

Начальные условия для решения данной системы уравнений следующие:

$$t_0 = t_1, \quad y_1(t_0) = y_1(t_1), \quad y_2(t_0) = 0, \quad V_1(t_0) = V_1(t_1), \quad V_2(t_0) = 0 \quad (2.24)$$

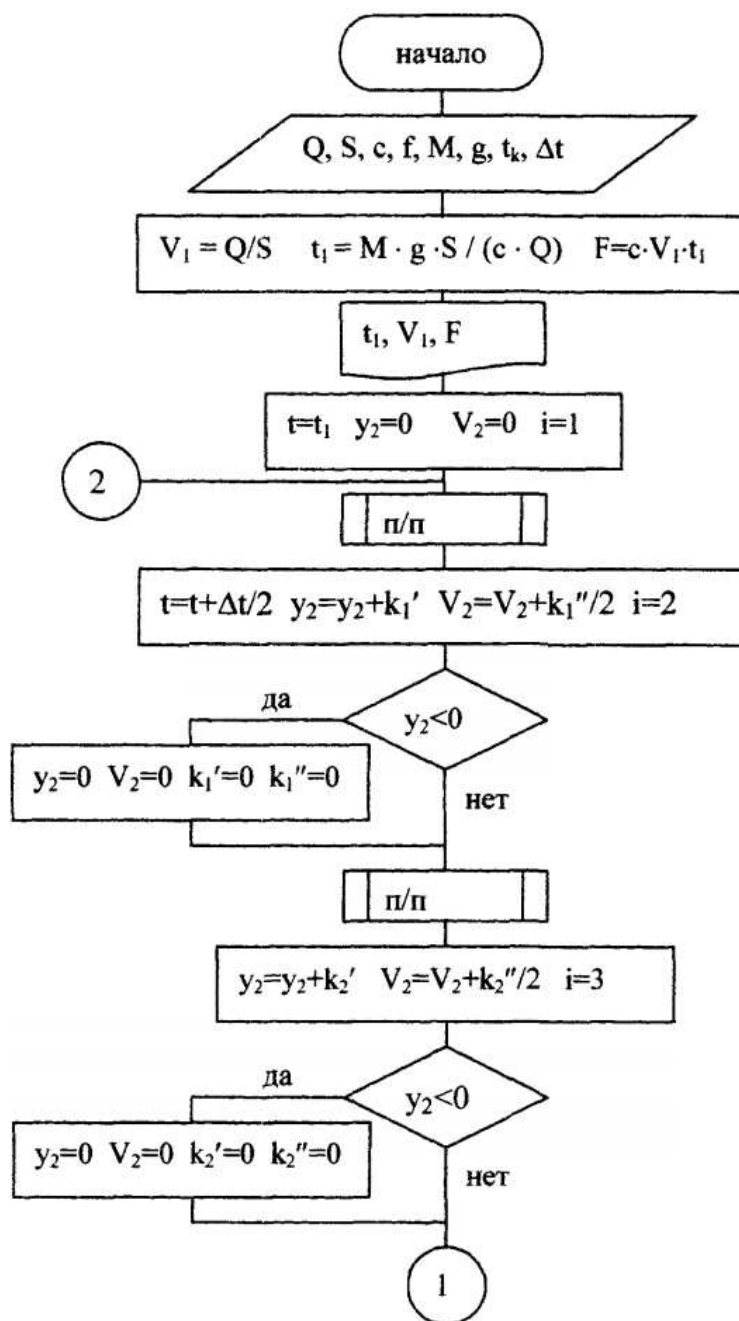
## 2.6 Решение системы дифференциальных уравнений с помощью ЭВМ

Для решения уравнений движения МС можно использовать один из языков программирования высокого уровня или какую-либо программу, имеющую встроенные функции для решения ДУ.

При использовании языков программирования высокого уровня, скорее всего придется самостоятельно программировать интегрирование уравнений (вычисление искомой функции на каждом шаге) по выбранному методу

(Эйлера, Рунге-Кутта и т.п.). Использование программ (например, Mathcad или MatLAB), имеющих встроенные функции для решения ДУ, позволяет не программировать пошаговое интегрирование уравнений.

Задачу исследования динамики механической системы можно решить в среде Excel, используя для ввода значений параметров и построения графиков среду Excel, а для выполнения повторяющихся вычислений (интегрирование по методу Рунге-Кутта) написать макрос на VBA. Программа решения ДУ методом Рунге-Кутта может иметь различную структуру: можно последовательно вычислять коэффициенты (4) и считать приращение (5) функции на каждом шаге интегрирования, можно организовать расчет коэффициентов в виде подпрограммы, функции или в цикле. Блок-схема одного из вариантов алгоритма интегрирования системы ДУ (13), описывающих одномассовую модель робота мостового типа, представлена на рисунк. 6. В данной блок-схема для вычисления коэффициентов по формулам (4) используется подпрограмма. Физические величины обозначены в блок-схеме теми же буквами, что и в тексте методических указаний. При написании текста программы, естественно, необходимо использовать идентификаторы для обозначения величин.



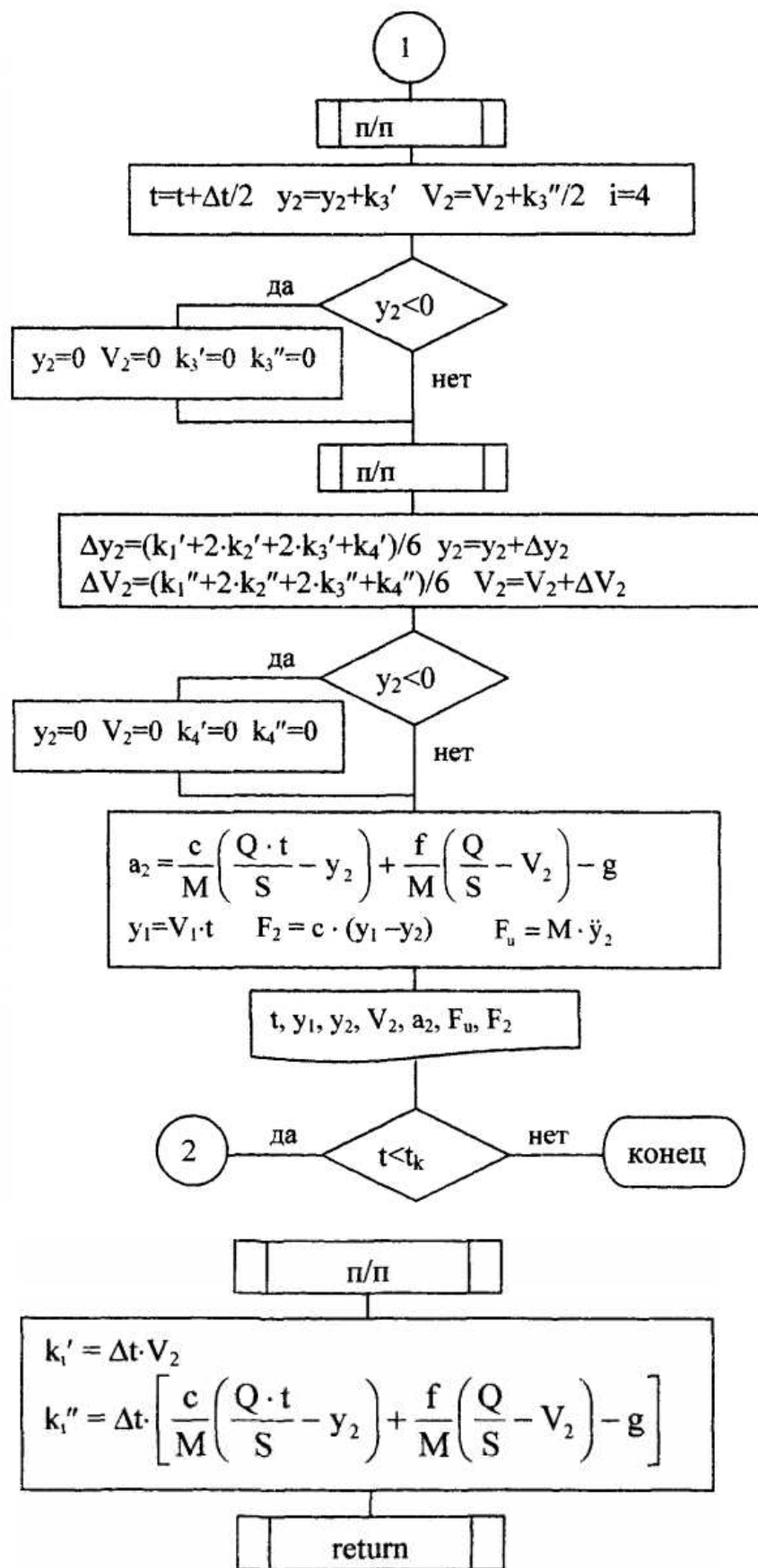


Рисунок 2.5 – Блок-схема программы интегрирования ДУ

По приведенному в блок-схема алгоритму можно составить программу на каком-либо языке программирования, например, Pascal, Turbo Basic, Visual Basic, Visual Basic for Applications.

При использовании среды программ Mathcad или MatLAB для решения системы (13) можно воспользоваться встроенными функциями решения ДУ методом Рунге-Кутты. При написании программ в среде Mathcad и MatLAB следует помнить, что прописные и строчные буквы в именах переменных различаются компилятором программы. Результаты расчета переходных процессов для первого и второго этапов движения должны быть соединены на одном графике.

## 2.7 Выбор решателя ОДУ в MATLAB

Данный раздел посвящен описанию возможностей, предоставляемых MATLAB, для численного решения задач Коши и краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений произвольного порядка и систем, включая краевые задачи с неизвестными параметрами и вырождающимися коэффициентами. Рассматривается также решение дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом. Для решения этих задач предназначены специальные функции MATLAB в вычислительной математике их называют решатели. MATLAB имеет достаточно большой набор решателей, основанных на различных численных методах.

Для решения задачи Коши в MATLAB существует семь решателей.

В достаточно общем случае вызов решателя для решения задачи Коши производится следующим образом:

$$[T, Y] = \text{solver}(\text{odefun}, \text{interval}, Y_0, \text{options})$$

где **odefun** – функция для вычисления вектор-функции правой части системы уравнений, **interval** – массив из двух чисел, задающий промежуток для решения

уравнения,  $Y_0$  - заданный вектор начальных значений искомой вектор-функции, options – структура для управления параметрами и ходом вычислительного процесса. Солвер возвращает массив t с координатами узлов сетки, в которых найдено решение, и матрицу решений Y, каждый столбец которой является значением компоненты вектор-функции решения в узлах сетки.

Таблица 2.1 – Решатели дифференциальных уравнений

ode45	Одношаговые явные методы Рунге-Кутты 4-го и 5-го порядка. Это классический метод, рекомендуемый для начальной пробы решения. Во многих случаях он дает хорошие результаты
ode23	Одношаговые явные методы Рунге-Кутты 2-го и 4-го порядка. При умеренной жесткости системы ОДУ и низких требованиях к точности этот метод может дать выигрыш в скорости решения
ode113	Многошаговый метод Адамса-Башворта-Мултона переменного порядка. Это адаптивный метод, который может обеспечить высокую точность решения
ode23tb	Неявный метод Рунге-Кутты в начале решения и метод, использующий формулы обратного дифференцирования 2-го порядка в последующем
ode15s	Многошаговый метод переменного порядка (от 1 до 5, по умолчанию 5), использующий формулы численного дифференцирования. Это адаптивный метод, его стоит применять, если решатель ode45 не обеспечивает решения
ode23s	Одношаговый метод, использующий модифицированную формулу Розенброка 2-го порядка. Может обеспечить высокую скорость вычислений при низкой точности решения жесткой системы дифференциальных уравнений
ode23t	Метод трапеций с интерполяцией. Этот метод дает хорошие результаты при решении задач, описывающих колебательные

Схема решения таких задач в **MATLAB** состоит из нижеследующих этапов.

1 Приведение дифференциального уравнения к системе дифференциальных уравнений первого порядка (если изначально задана система, то в этом нет необходимости).

2 Написание специальной функции для системы уравнений.

3 Вызов подходящего решателя.

4 Визуализация результата.

При выборе решателя для решения задачи необходимо учитывать свойства системы дифференциальных уравнений, иначе можно получить неточный результат или затратить слишком много времени на решение.

Выбор решателя для решения задачи Коши. В данном разделе описана стратегия применения решателей **MATLAB** для решения обыкновенных дифференциальных уравнений или систем с начальными условиями.

Очень часто решатель **ode45** даст вполне хорошие результаты, им стоит воспользоваться в первую очередь. Он основан на формулах Рунге-Кутты четвертого и пятого порядка точности. Решатель **ode23** также основан на формулах Рунге-Кутты, но уже более низкого порядка точности. Имеет смысл применять **ode23** в задачах, содержащих небольшую жесткость, когда требуется получить решение с невысокой степенью точности. Если же требуется получить решение нежесткой задачи с высокой точностью, то наилучший результат даст **ode113**, основанный на методе переменного порядка Адамса-Бэшфорта-Милтона. Решатель **ode113** оказывается особенно эффективным для нежестких систем дифференциальных уравнений, правые части которых вычисляются по сложным формулам. Все решатели пытаются найти решение с относительной точностью  $10^{-3}$  и абсолютной  $10^{-6}$ . Хорошим тестом качества приближенного решения является увеличение точности вычислений (задание точности вычисления и ряда других параметров описано в следующем разделе).

Если все попытки применения **ode45**, **ode23s**, **ode113** не приводят к успеху, то возможно, что решаемая система является жесткой. Для решения жестких систем подходит решатель **ode15s**, основанный на многошаговом методе Гира, который допускает изменение порядка. Если требуется решить жесткую задачу с невысокой точностью, то хороший результат может дать решатель **ode23s**, реализующий одношаговый метод Розенброка второго порядка.

Простейшее использование вышеперечисленных решателей производится так же, как и **ode113**. При решении практических задач важно контролировать вычисления. Все решатели допускают задание ряда параметров, позволяющих повысить эффективность вычисления в зависимости от решаемой задачи. В частности, при решении жестких задач задание якобиана системы позволяет увеличить быстродействие вычислений. Одной из важнейших характеристик приближенного решения является его точность.

Далее приведен листинг программы, написанной в среде MatLAB, расчета переходных процессов в механической системе строительного моста мостового типа при использовании одномассовой модели (рисунок. 4). На рисунок. 8 представлены графики переходного процесса. По оси абсцисс на графиках отложено время, по оси ординат искомые величины. Внешний вид графиков (толщина, цвет и тип кривых) не заданы в тексте программы, а отредактированы после выполнения расчета.

Ниже приведен текст программы решение уравнений динамики одномассовой модели строительного моста в среде MATLAB и подпрограммы, описания системы ДУ.

```
%Динамика работа мостового типа
```

```
global Q S M c f g
```

```
Q=0.00011; S=0.00025;
```

```
M=12000; c=50000000;
```

```
f=250000; g=9.8;
```



```

%Расчет первого этапа
t1=M*g*S/(c*Q);
F=M*g;
T1=zeros(1,1);
Y1=zeros(1,2);
%Расчет второго этапа
%Начальные условия (вектор-строка)
yn=[0 0];
%Интервал интегрирования
int=t1:0.005:0.5;
%Вызов решателя ODE
[T2, Y2]=ode113(@resh,int,yn);
%Расчет ускорения и сил
T=cat(1,T1,T2);
Y=cat(1,Y1,Y2);
k=size(T,1);
F=zeros(k,1);
a=zeros(k,1);
Fd=zeros(k,1);
for i=1:k
F(i,1)=c*(Q/S*T(i)-Y(i,1));
a(i,1)=c/M*(Q*T(i)/S-Y(i,1))+f/M*(Q/S-Y(i,2))-g;
Fd(i,1)=M*a(i);
end
%Вывод графика
figure(1)
plot(T,Y(:,1)*1000,T,Y(:,2)*1000,T,a(:,1),T,Fd(:,1)/1000,T,F(:,1)/1000)
legend('y, мм','v, мм/с','a, м/с2','Fd, кН','F, кН')
title('Динамика работа мостового типа')
xlabel('t, с')

```

```
grid on
```

```
%Подпрограмма описания системы ДУ
```

```
function dy=resh(t, y)
```

```
global Q S M c f g
```

```
dy=zeros(2,1);
```

```
dy=[y(2);c/M*(Q*t/S-y(1))+f/M*(Q/S-y(2))-g];
```

```
end
```

Имитационная модель, полученная в среде Simulink, рисунок 7.

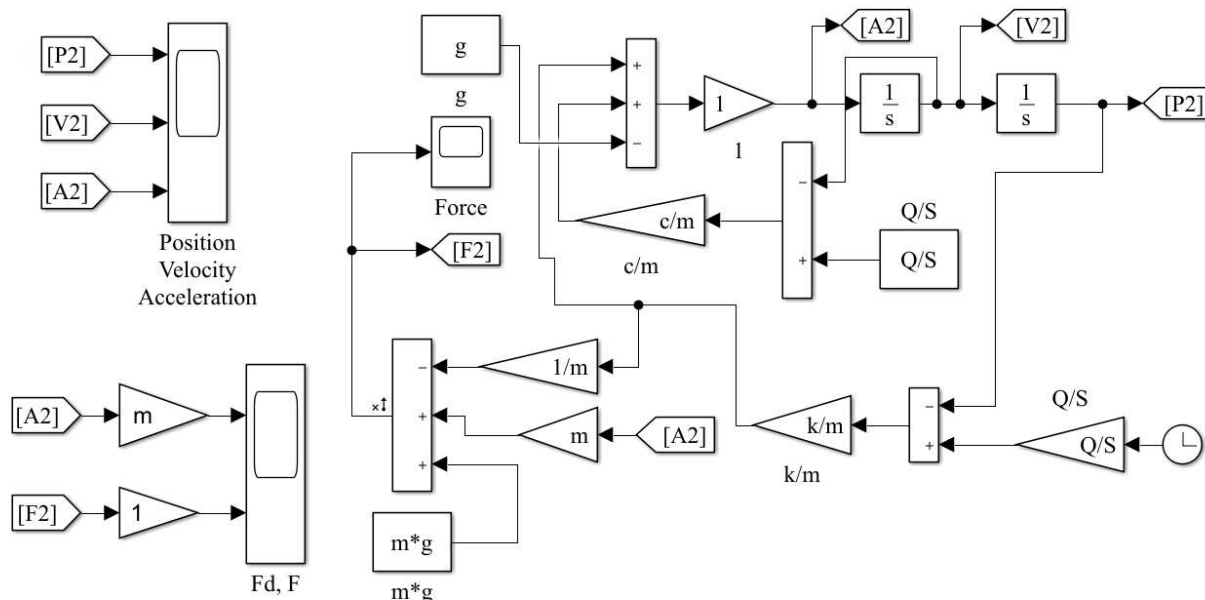


Рисунок 2.6 – Имитационная модель динамики строительного робота на языке Simulink

На рисунках 8, 9, 10 представлены графики, которые получены при различных значениях расхода и размера гидропривода, изменении значения массы груза.

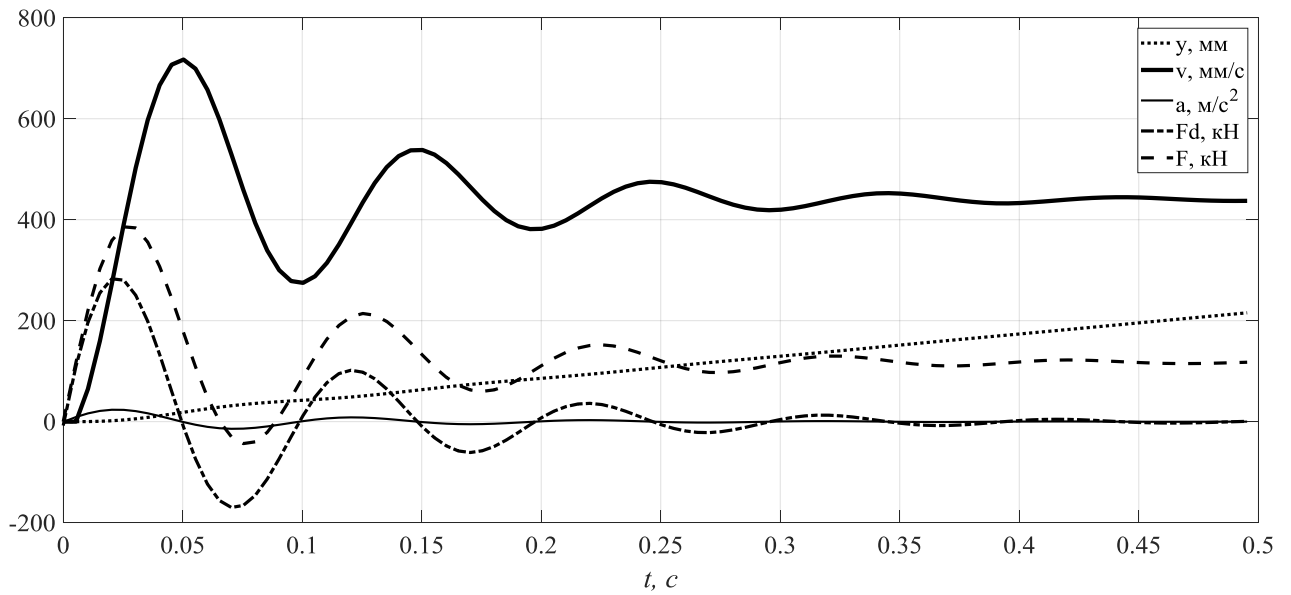


Рисунок 2.7 – Графики переходного процесса ( $Q=0,00011 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $S=0,00025 \text{ м}^2$ ;  $M=12 \cdot 10^3 \text{ кг}$ ;  $c=5 \cdot 10^7 \text{ Н/м}$ ;  $f=25 \cdot 10^4 \text{ Н с/м}$ )

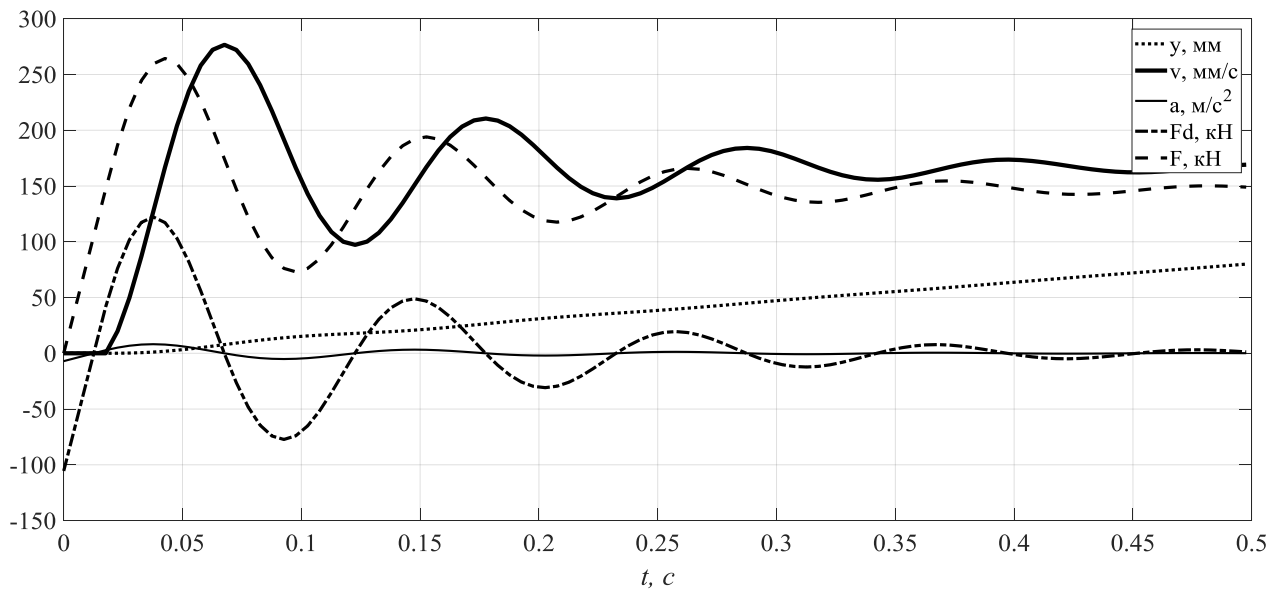


Рисунок 2.8 – Графики переходного процесса ( $Q=0,002 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $S=0,0012 \text{ м}^2$ ;  $M=15 \cdot 10^3 \text{ кг}$ ;  $c=5 \cdot 10^7 \text{ Н/м}$ ;  $f=25 \cdot 10^4 \text{ Н с/м}$ )

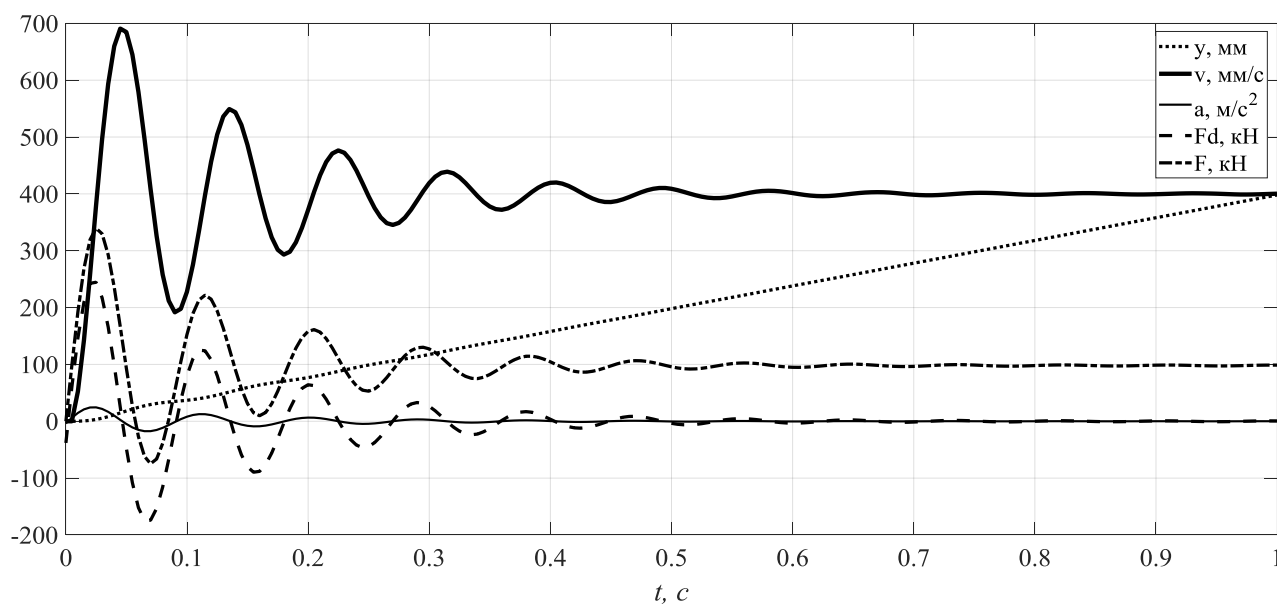


Рисунок 2.9 – Графики переходного процесса ( $Q=0,00011 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $S=0,00025 \text{ м}^2$ ;  
 $M=10 \cdot 10^3 \text{ кг}$ ;  $c=5 \cdot 10^7 \text{ Н/м}$ ;  $f=15 \cdot 10^4 \text{ Н с/м}$ )

Из полученных графиков можно оценить влияние параметров привода на динамику процесса подъема. При увеличении расхода и размера гидропривода динамика переходного процесса уменьшается.

### **3 Синтез системы управления захватным устройством**

Исполнительные подсистемы роботов состоят из механической части и приводов. Механическая система манипулятора – это кинематическая цепь, состоящая из подвижных звеньев с угловым или поступательным перемещением, которая заканчивается рабочим органом в виде захватного устройства или какого-нибудь инструмента.

Приводные устройства соединены с кинематическими звеньями манипулятора и осуществляют эти перемещения под управлением программы. Для контроля движения используются соединенные с кинематическими звеньями манипулятора датчики. Привод робота является составной частью его манипулятора. Он предназначен для преобразования подводимой энергии в энергию движения исполнительных звеньев манипуляционной системы и устройств передвижения робота в соответствии с сигналами, поступающими от системы управления.

Элементы привода в составе манипулятора могут быть охвачены как внутренними, так и внешними обратными связями, при наличии которых привод становится следящим, что позволяет строить робот с элементами адаптации. Привод в значительной степени определяет структуру, параметры и технологические возможности манипулятора и робота в целом.

Основными параметрами привода робота являются: мощность; скорость; быстродействие; точность отработки командного сигнала.

Большое распространение в роботах получили электрические приводы благодаря достоинствам:

- доступность энергоносителя;
- простота монтажа и наладки, а также обслуживания при эксплуатации;
- высокие показатели надежности;
- высокий КПД;
- низкий уровень шума при работе.

#### **3.1 Математическое описание модели двигателя постоянного тока.**

В системах привода роботов имеют большое распространение двигатели постоянного тока с независимым возбуждением или магнитоэлектрические. Управление этими двигателями, осуществляется по цепи якоря. Электромагнитные и электромеханические процессы в двигателе постоянного тока с независимым возбуждением могут быть описаны следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}
 u_{\text{я}} &= R_{\text{я}} \left( T_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + i_{\text{я}} \right) + e_{\text{я}} \\
 J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_{\text{H}} \\
 \omega_m &= \frac{d\theta_m}{dt} \\
 e_{\text{я}} &= k_E \omega_m, M = k_M i_{\text{я}}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

В уравнениях (3.1)  $u_{\text{я}}, i_{\text{я}}, e_{\text{я}}$  – напряжение, ток и противо-ЭДС якоря,  $L_{\text{я}}, R_{\text{я}}, T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$  – индуктивность, сопротивление и электромагнитная постоянная времени якоря,  $\omega_m, M, M_{\text{H}}, \theta_m$  – механическая угловая скорость, электромагнитный момент, момент нагрузки и механический угол поворота вала,  $J$  – момент инерции ротора, коэффициенты  $k_E, k_M$  являются конструктивными постоянными.

Параметры двигателя, входящие в уравнения (3.1) рассчитываются на основе паспортных данных, помещенных в справочных материалах. В таблице 3.1 приведены параметры малоинерционных двигателей постоянного тока с электромагнитным возбуждением, разработанные для робототехнических комплексов.

Таблица 3.1 – Параметры малоинерционных двигателей постоянного тока с электромагнитным возбуждением

$P_H, \text{кВт}$	$U_{\text{я}} = U_B, \text{В}$	$n_H, 1/\text{мин}$	$I_{\text{я}}, \text{А}$	$R_{\text{я}}, \text{Ом}$	$R_B, \text{Ом}$	$J, \text{кгм}^2$
0.12	110	3000	1.53	1.48	642	0.06
0.2	110	3000	2.46	0.762	560	0.08
0.25	110	3000	3.05	0.945	827	0.14
0.37	110	3000	4.4	0.546	934	0.16
0.45	110	3000	5.6	0.585	400	0.36
1.0	110	3000	9.96	0.561	500	0.8

В таблице 3.1 введены следующие обозначения:  $P_H$  – номинальная мощность двигателя, кВт;  $U_{\text{я}}$  – номинальное напряжение питания якоря, В;  $U_B$  – номинальное напряжение возбуждения, В;  $I_{\text{я}}$  – номинальный ток якоря, А;  $n_H$  – номинальная скорость вращения якоря, 1/мин;  $R_{\text{я}}$  – сопротивление обмотки якоря, Ом;  $R_B$  – сопротивление обмотки возбуждения, Ом.

Номинальный момент двигателя в (Н м), номинальный ток возбуждения в (А), конструктивные постоянные и индуктивность якоря рассчитываются из уравнений:

$$\begin{aligned}
 M_H &= \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{30 \cdot P_H}{\pi \cdot n_H} \\
 I_B &= \frac{U_B}{R_B} \\
 k_M &= \frac{M_H}{I_{\text{я}}} \\
 k_E &= \frac{30(U_{\text{я}} - R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}})}{\pi \cdot n_H} \\
 L_{\text{я}} &\approx \frac{30 U_{\text{я}} \cdot c_X}{\pi n_H \cdot I_{\text{я}}}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

где  $c_X = 0.3-0.4$  – эмпирический коэффициент.

Передаточные функции скоростной части ДПТ по управляющему и возмущающему воздействиям могут быть представлены соответственно выражениями

$$W(s) = \frac{\omega_m(s)}{u_{Я}(s)} = \frac{1/k_E}{\frac{T_{Я}}{K_1 K_2 k_E} s^2 + \frac{1}{K_1 K_2 k_E} s + 1} \quad (3.3)$$

$$W'(s) = \frac{\omega_m(s)}{M_H(s)} = -\frac{(T_{Я}s + 1) \cdot k_M}{k_E \left( \frac{T_{Я}}{K_1 K_2 k_E} s^2 + \frac{1}{K_1 K_2 k_E} s + 1 \right)} \quad (3.4)$$

В выражениях (3.3), (3.4) введены обозначения:

$$K_1 = \frac{1}{R_{Я}}, \quad K_2 = \frac{k_M}{J}. \quad (3.5)$$

Корни характеристического уравнения определяются выражением

$$s_{1,2} = -\frac{1}{2T_{Я}} \pm \frac{1}{2T_{Я}} \sqrt{1 - 4T_{Я}K_1K_2k_E} \quad (3.6)$$

В зависимости от соотношения параметров  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $T_{Я}$  и  $k_E$  корни характеристического уравнения могут быть либо вещественными либо комплексно-сопряженными. При выполнении условия  $4T_{Я}K_1K_2k_E \leq 1$  корни характеристического уравнения являются вещественными, эквивалентная передаточная функция ДПТ по управляющему воздействию может быть представлена в виде двух последовательно включенных аperiodических звеньев первого порядка с постоянными времени  $T_1$ ,  $T_2$  и коэффициентом передачи  $1/k_E$



$$W(s) = \frac{x(s)}{u_{\text{я}}(s)} = \frac{1/k_E}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \quad (3.7)$$

где  $T_1 = -1/s_1$ ;  $T_2 = -1/s_2$

В качестве исходной информации рассмотрим двигатель мощностью 0.45 кВт (таблица 3.1) параметры структурной схемы, рассчитанные по выражениям (3.2), представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. – Параметры системы электрического привода робота

$K_1, 1/\text{Ом}$	$K_2, 1/\text{Амс}^2$	$k_M, \text{Нм/А}$	$k_E, \text{Вс}$	$T_{\text{я}}, \text{с}$	$T_1, \text{с}$	$T_2, \text{с}$
1.72	0.72	0.26	0.34	0.043	0.044	2.15

В соответствии с уравнением (3.1) с применением программы Simulink получена имитационная модель электрического двигателя, рисунок 3.1.

Для получения динамических характеристик использован пакет расширения программы Simulink – Control System с его графическим интерфейсом. Эталонным (задающим) входным сигналом является напряжение 1 В. Динамические характеристики по управлению и по возмущению показаны на рисунках 3.2 и 3.3.

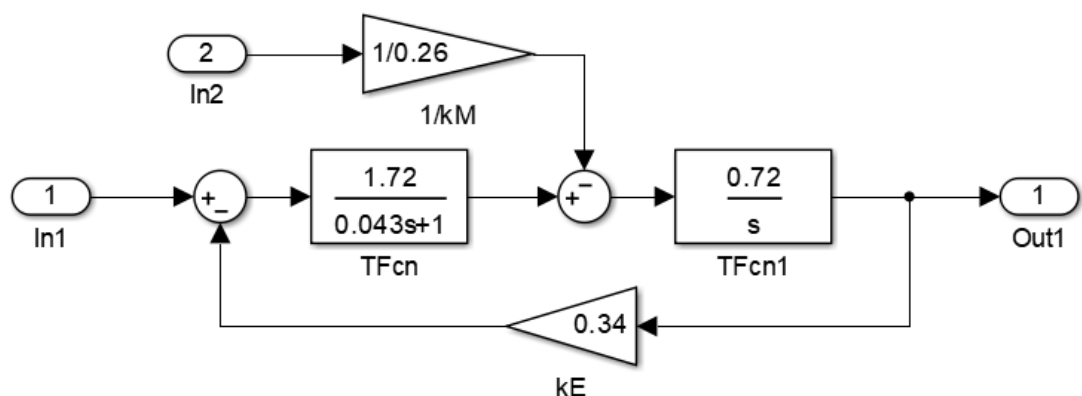


Рисунок 3.1 – Модель двигателя постоянного тока

Из графиков динамических характеристик (рисунки 3.2, 3.3) видно, что по управлению и возмущению ДПТ с данными параметрами системы представляет собой апериодическое звено. Коэффициент передачи по возмущению более чем в 2 раза больше, чем по управлению.

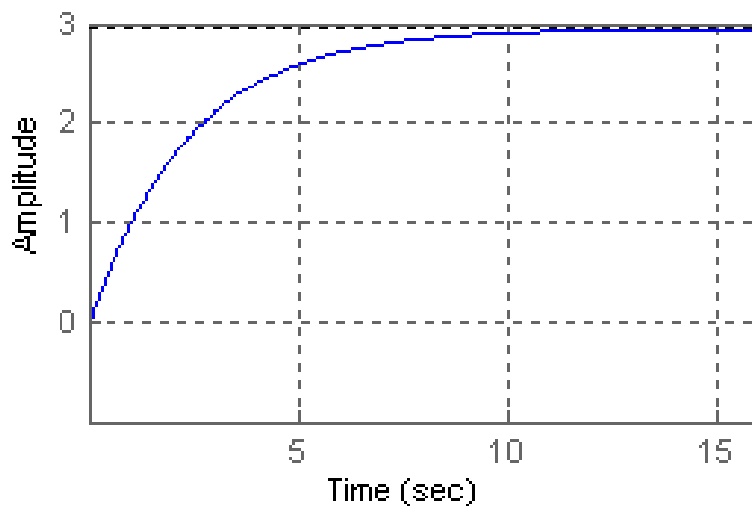


Рисунок 3.2 – Динамическая характеристика ДПТ по управлению

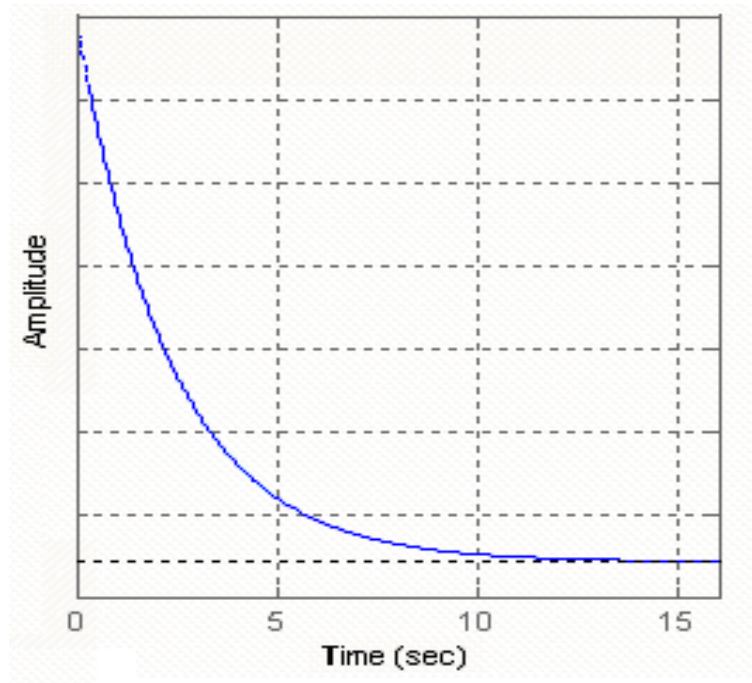


Рисунок 3.3 – Динамическая характеристика ДПТ по возмущению

Для обеспечения требуемых свойств динамической системы объекта управления необходимо проектирование (синтез) регулятора, структура и параметры которого зависят от параметров двигателя постоянного тока и требований к контуру скорости.

Синтез (проектирование) регулятора в следящей робототехнической системе.

Математическое описание привода звена захватного устройства робота мостового типа имеет следующий вид [ ]

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + C_1 \omega_m + C_2 \sin \theta_m = k_M i_{\text{я}}, \quad (3.8)$$

где  $J$  – суммарный момент инерции якоря и механического звена робота,  $i_{\text{я}}$  – ток якоря,  $\theta_m = \int \omega_m dt$  – угол поворота звена робота. Ток якоря ДПТ находится из уравнения

$$T_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + i_{\text{я}} + \frac{k_E}{R_{\text{я}}} \omega_m = \frac{u_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}. \quad (3.9)$$

По уравнениям (3.8) и (3.9) построена модель объекта управления, состоящая из двигателя мощностью 0.45 кВт и звена робота, рисунок 3.4.

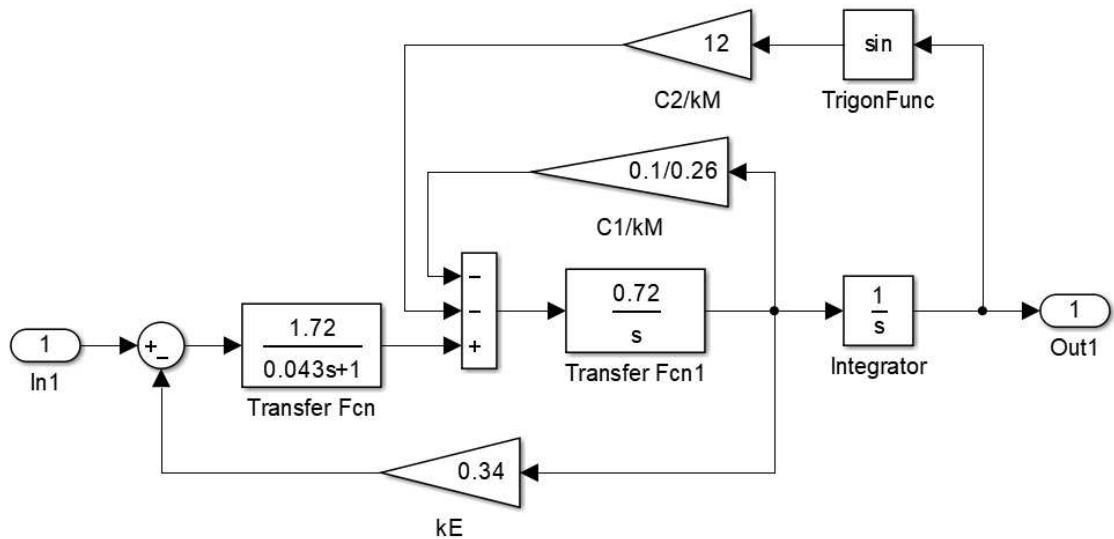


Рисунок 3.4 – Модель привода звена робота

Переходной процесс в системе при  $C_1 = 0.1, C_2 = 3.2$  и малых углах поворота звена робота представлен на рисунке 3.5.

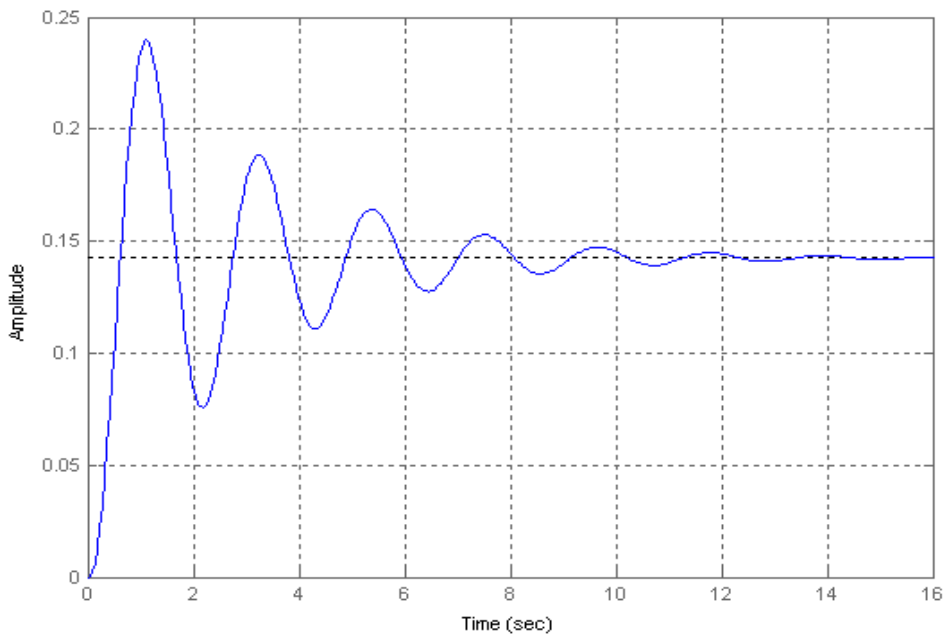


Рисунок 3.5 – Переходной процесс в приводе звена робота по управлению

Приведенный случай показывает, что двигатель с учетом нагрузки на его валу может стать колебательным динамическим звеном.

Требуется проектирование регулятора системы управления приводом.

Проектирование регулятора в следящей робототехнической системе.

Для этого случая реализуется ограничитель диапазона для тока с использованием в контуре тока ДПТ релейного регулятора. При этом контур тока считается безинерционным, а силовой регулятор – источником тока. Тогда звено робота вместе с ДПТ описывается уравнением (3.8), из которого определим передаточную функцию

$$W_{об}(s) = \frac{k_M}{C_2} \cdot \frac{1}{T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot s + 1}, \quad (3.10)$$

где  $T^2 = \frac{J}{C_2}$ ,  $2\xi T = \frac{C_1}{C_2}$ , при заданных значениях  $C_1 = 0.1$ ,  $C_2 = 3.2$  параметры звена робота равны:  $T = 0.33$ ,  $\xi = 0.047$ , т.е. привод робота представляет собой колебательное звено.

Для такой системы используется ПИД-регулятор с реальным дифференцирующим звеном, параметры такого регулятора при настройке системы на оптимум по модулю находятся из уравнений:

$$T_D < 2 \cdot \xi \cdot T, \quad k_{II} = \frac{C_2}{2 \cdot T_D \cdot k_{oc} \cdot k_M} \quad (3.11)$$
$$\frac{k_D + T_D \cdot k_{II}}{k_{II}} = T^2, \quad \frac{k_{II} + T_D \cdot k_{II}}{k_{II}} = 2 \cdot \xi \cdot T$$

Модель звена робота представлена на рисунке 3.6.

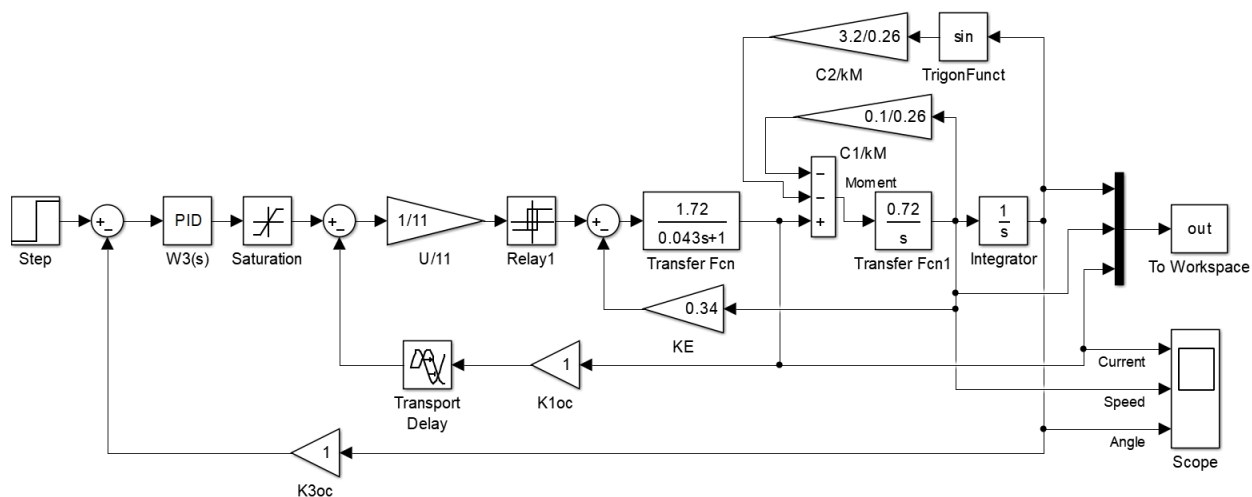


Рисунок 3.6 – Модель двухконтурной робототехнической системы

Динамические характеристики замкнутой системы при  $T_D = 0.01c$ ,  $k_{II} = 19.25$ ,  $k_{III} = 615$ ,  $k_D = 69.5$  показаны на рисунке 3.7.

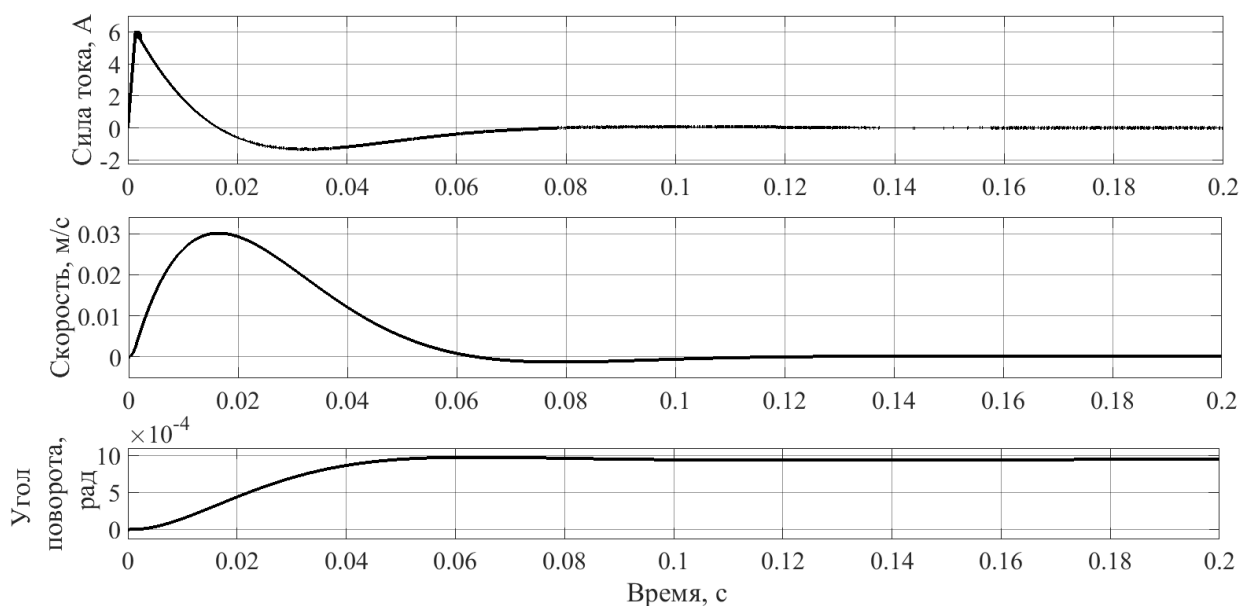


Рисунок 3.7 – Переходные процессы в двухконтурной робототехнической системе

Из кривых (рисунок 3.7) видно, что в такой системе колебаний выходной координаты (угла) не наблюдается. Поэтому такой переходной процесс можно считать удовлетворительным для проектирования.

Для исследования динамики системы получена имитационная модель экспериментального стенда звена робота, рисунок 3.8. Моделируется изменение входного сигнала в диапазоне от 0,001 до 0,003.

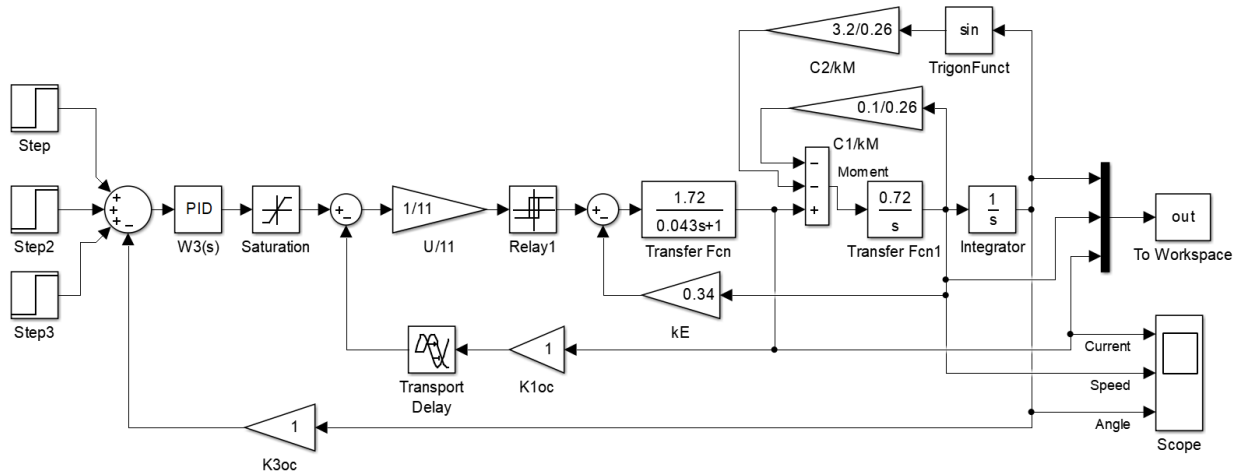


Рисунок 3.8 – Модель экспериментального стенда двухконтурной робототехнической системы

Динамические характеристики модели экспериментального стенда показаны на рисунке 3.9.

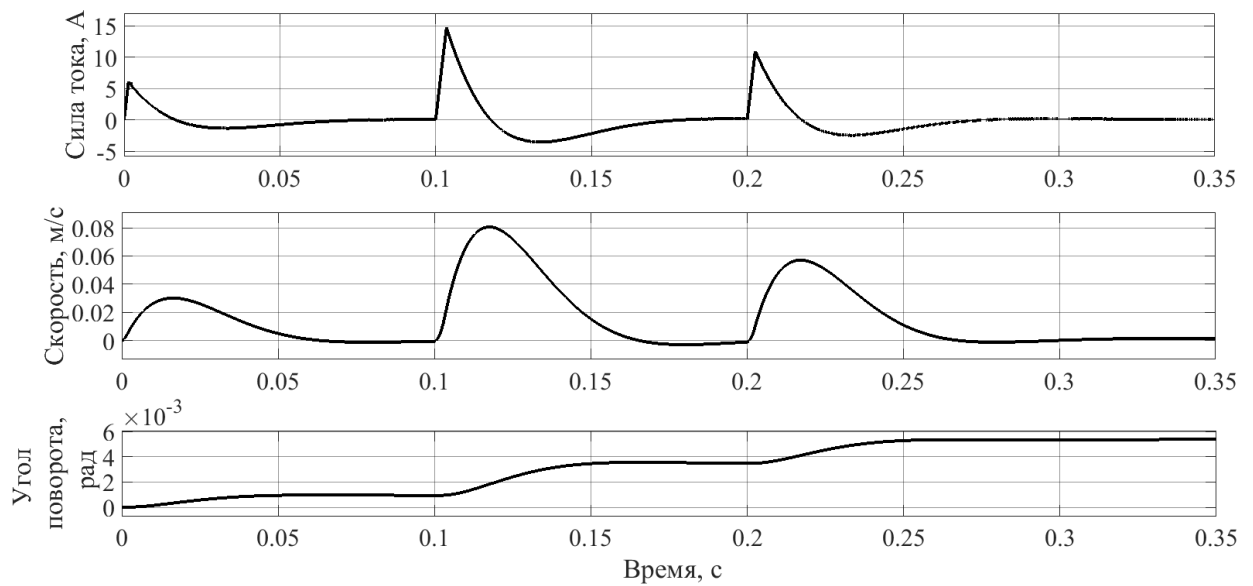


Рисунок 3.9 – Переходные процессы при изменении режимов работы в двухконтурной робототехнической системе

Из кривых (рисунок 3.9), при различных режимах работы системы, видно, что в такой системе при небольших и больших входных сигналах (при выходе системы в насыщение) колебаний выходной координаты (угла) не наблюдается. Поэтому такой переходной процесс может удовлетворить проектировщика.



#### 4 Реализация системы управления приводом захватного устройства на базе Arduino

В разделе магистерской диссертации рассматривается реализация системы управления приводом захватного устройства на базе аппаратно-программного комплекса Arduino. В состав экспериментального стенда входят:

захватное устройство, рисунок 4.1;

серводвигатель, рисунок 4.2;

контроллер Arduino Uno, рисунок 4.3.

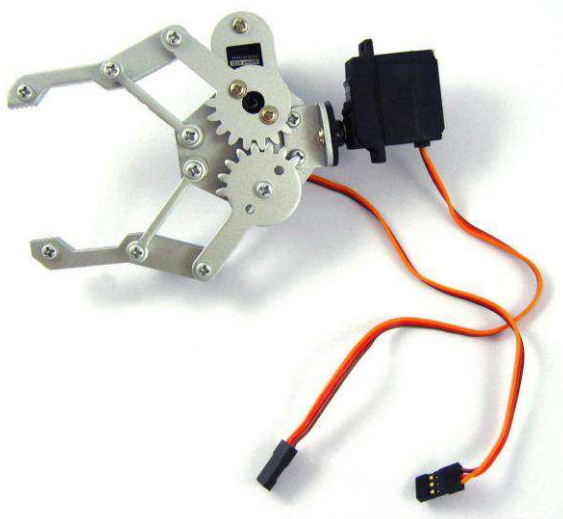


Рисунок 4.1 – Модель захватного устройства с серводвигателем



Рисунок 4.2 – Модель серводвигателя

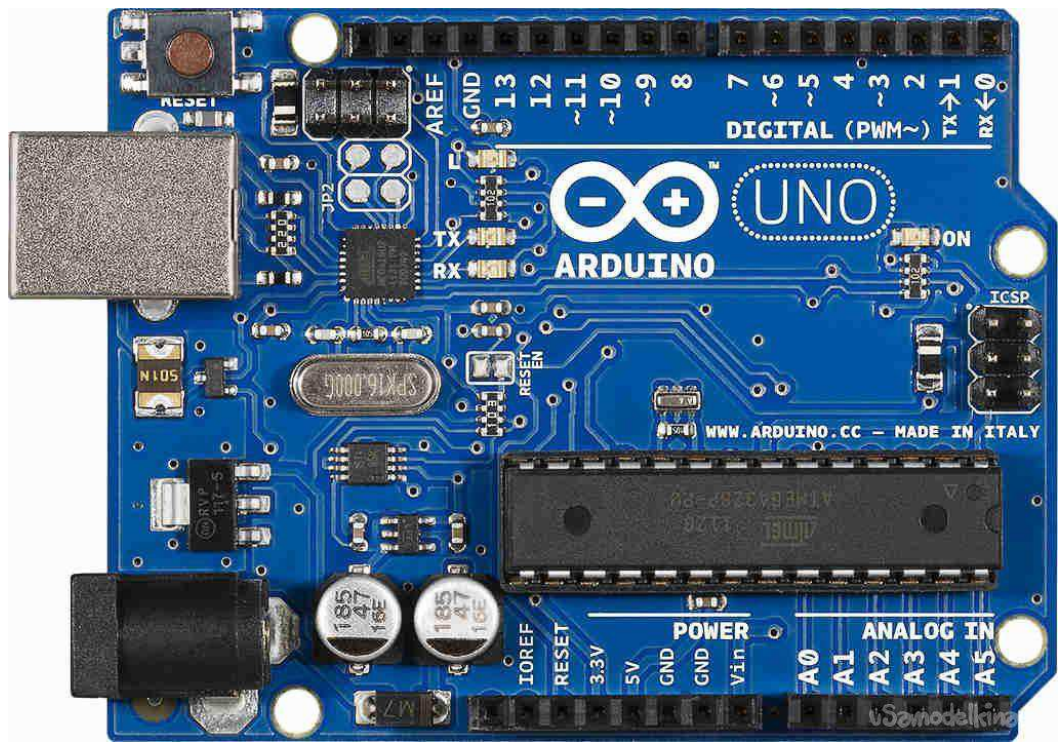


Рисунок 4.3 – Общий вид лицевой части контроллера Arduino UNO R3

### **Серводвигатель**

Сервопривод Ардуино (англ. – arduino servo) устройство с электрическим мотором, которое можно повернуть на определенный угол и оставить в этом положении на определенное время.

Сервомоторы Ардуино – устройства, которые могут поворачиваться в указанное положение и могут применяться в разных технических устройствах. Массово применяются в робототехнике. У сервопривода есть выходной вал, который может поворачиваться на 180 градусов. Используя Arduino можно задать сервомотору определенное положение в которое он перейдет.

Конструкция серводвигателя представлена на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 – Устройство сервопривода

Сервопривод состоит из датчика (скорости, положения и т.п.), блока управления приводом механической системы и электронной схемы. Редукторы выполняют из металла, карбона или пластика. Сервомотор имеет встроенный потенциометр, который соединен с выходным валом. Поворотом вала, сервопривод меняет значение напряжения на потенциометре (см. рисунок 4.4). Плата анализирует напряжение входного сигнала и сравнивает его с напряжением на потенциометре, исходя из полученной разницы, мотор будет вращаться до тех пор, пока не выровняет напряжение на выходе и на потенциометре.

Сервоприводы Arduino – это мехатронные устройства. Используя только один входной пин, они получают значения для позиционирования от микроконтроллера и переходят в это положение. На рисунке 4.4 сервопривод имеет электрический двигатель и цепь обратной связи, которая гарантирует, что вал сервопривода достигнет желаемого положения.

На входе серводвигатели получают сигнал «прямоугольная волна». Каждый цикл в сигнале длится 20 миллисекунд, и большая часть времени в значении LOW. В начале каждого цикла значение сигнала становится HIGH на

время от 1 до 2 миллисекунд. При 1 миллисекунде она составляет 0 градусов, а при 2 миллисекундах – 180 градусов, а в промежутке значение от 0 до 180, рисунок 4.5.

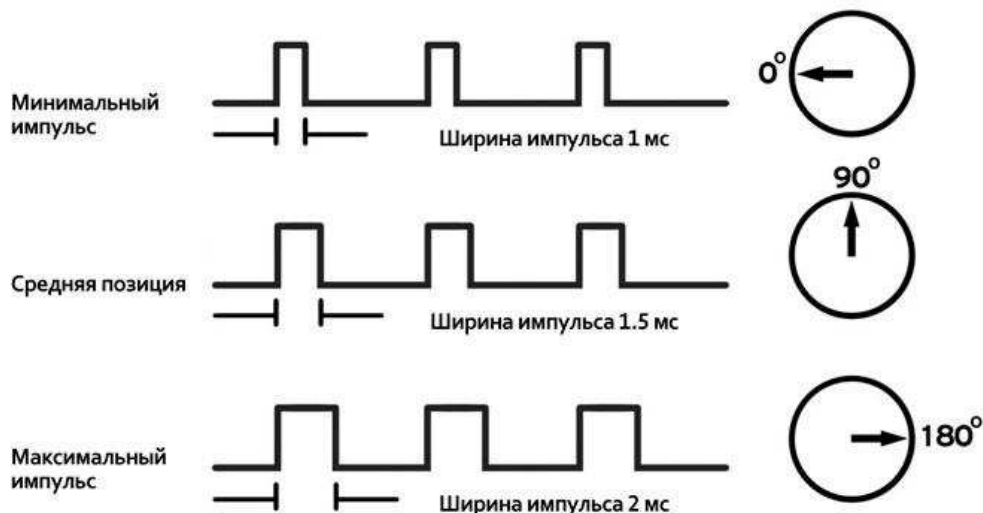


Рисунок 4.5 – Сигналы на входе сервопривода

### Контроллер Arduino UNO R3.

Arduino – торговая марка аппаратно-программных средств для построения несложных систем автоматического управления и робототехники. В работе используется модель современной платы Arduino UNO R3, выполненная на базе микроконтроллера ATmega328. Внешний вид контроллера приведен на рисунке 4.3.

Кроме этой платы Arduino выпускает несколько разновидностей плат для конкретных проектов автоматизации. Выбор конкретной модели контроллера выполняется с учетом решаемых задач, доступности, стоимости, и других критериев, по которым Arduino UNO R3 превосходит другие варианты.

Arduino Uno контроллер построен на ATmega328. Платформа имеет 14 цифровых вход/выходов (6 из которых могут использоваться как выходы ШИМ), 6 аналоговых входов, кварцевый генератор 16 МГц, разъем USB, силовой разъем, разъем ICSP и кнопку перезагрузки. Для работы необходимо

подключить платформу к компьютеру посредством кабеля USB, либо подать питание при помощи адаптера AC/DC или батареи.

Таблица 4.1 – Характеристики Arduino Uno

Показатель	Характеристика
Микроконтроллер	ATmega328
Рабочее напряжение	5 В
Входное напряжение (рекомендуемое)	7-12 В
Входное напряжение (предельное)	6-20 В
Цифровые Входы/Выходы	14 (6 из которых могут использоваться как выходы ШИМ)
Аналоговые входы	6
Постоянный ток через вход/выход	40 мА
Постоянный ток для вывода 3.3 В	50 мА
Флеш-память	32 Кб (ATmega328) из которых 0.5 Кб используются для загрузчика
ОЗУ	2 Кб (ATmega328)
EEPROM	1 Кб (ATmega328)
Тактовая частота	16 МГц

Arduino Uno может получать питание через подключение USB или от внешнего источника питания. Источник питания выбирается автоматически.

Внешнее питание (не USB) может подаваться через преобразователь напряжения AC/DC (блок питания) или аккумуляторной батареей. Преобразователь напряжения подключается посредством разъема 2.1 мм с центральным положительным полюсом. Провода от батареи подключаются к выводам Gnd и Vin разъема питания.

Платформа может работать при внешнем питании от 6 В до 20 В. При напряжении питания ниже 7 В, вывод 5V может выдавать менее 5 В, при этом платформа может работать нестабильно. При использовании напряжения выше

12 В регулятор напряжения может перегреться и повредить плату. Рекомендуемый диапазон от 7 В до 12 В.

### **Выводы питания**

VIN. Вход используется для подачи питания от внешнего источника (в отсутствие 5 В от разъема USB или другого регулируемого источника питания). Подача напряжения питания происходит через данный вывод.

5V. Регулируемый источник напряжения, используемый для питания микроконтроллера и компонентов на плате. Питание может подаваться от вывода VIN через регулятор напряжения, или от разъема USB, или другого регулируемого источника напряжения 5 В.

3V3. Напряжение на выводе 3.3 В генерируемое встроенным регулятором на плате. Максимальное потребление тока 50 мА.

GND. Выводы заземления.

### **Память**

Микроконтроллер ATmega328 располагает 32 КБ флэш памяти, из которых 0.5 КБ используется для хранения загрузчика, а также 2 КБ ОЗУ (SRAM) и 1 Кб EEPROM.

### **Программирование**

Платформа программируется посредством ПО Arduino. Микроконтроллер ATmega328 поставляется с записанным загрузчиком, облегчающим запись новых программ без использования внешних программаторов. Связь осуществляется оригинальным протоколом STK500.

В основу языка программирования, используемого в проектах Arduino, положен C++ – один из самых широко используемых языков программирования, поддерживающий как работу с низкоуровневыми командами, так и построение сложных объектов [X<sup>1</sup>]. Программирование контроллеров Arduino удобно осуществлять в специальной среде Arduino IDE, поскольку в нее включен основной функционал для работы с ними.

---

<sup>1</sup> Момот М. В. Мобильные роботы на базе Arduino / М. В. Момот. – СПб.: БХВ-Петербург, 2017. – 288 с.

Arduino IDE можно скачать в Интернете по адресу основного сайта проекта: [www.arduino.cc/en/Main/Software](http://www.arduino.cc/en/Main/Software), программное обеспечение свободно распространяется.

До начала работы на компьютер необходимо установить программу Arduino IDE. Его надо запустить на выполнение с административными полномочиями, принять условия лицензии GNU LESSER GENERAL PUBLIC LICENSE и согласиться с предложенным вариантом установки. На все предупреждения Windows в процессе установки следует отвечать утвердительно (продолжать установку). Когда установщик предложит установить драйверы порта, также ответить утвердительно.

### Работы с Arduino IDE

Среда разработки имеет интуитивно понятный русскоязычный интерфейс. При запуске установленной Arduino IDE откроется окно (рисунок 4.6), в котором уже содержится заготовка программы. Она состоит из двух функций: `setup` и `loop`. Функция `setup` содержит команды, выполняемые один раз при включении Arduino, – это установка номеров портов ввода/вывода для управления мониторами и установки скорости обмена данными между Arduino и компьютером.



Рисунок 4.6 – Окно Arduino IDE



Функция loop выполняется бесконечное число раз – до тех пор, пока мы не отключим питание.

Подключение контроллера Arduino к компьютеру.

Программная среда позволяет в зависимости от типа контроллера Arduino использовать разные USB-кабели.

Контроллер Arduino UNO подключается к компьютеру через USB интерфейс и устанавливает связи между ним и оболочкой Arduino IDE. Для этого нужно задать номер порта, к которому подключен контроллер (рисунок 4.7).

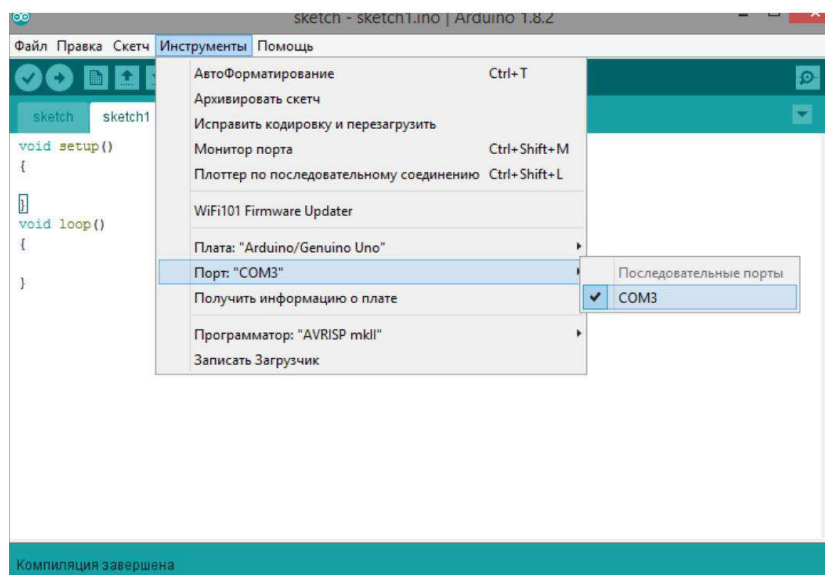


Рисунок 4.7 – Выбор нужного порта

Затем выбирают тип контроллера Arduino. На рисунке 4.8 показан выбор Arduino/Genuino Uno. Если контроллер выбран системой автоматически, необходимо проверить правильность этого выбора. Для некоторых контроллеров необходимо еще выбрать подвид микроконтроллера, на котором реализована плата Arduino.



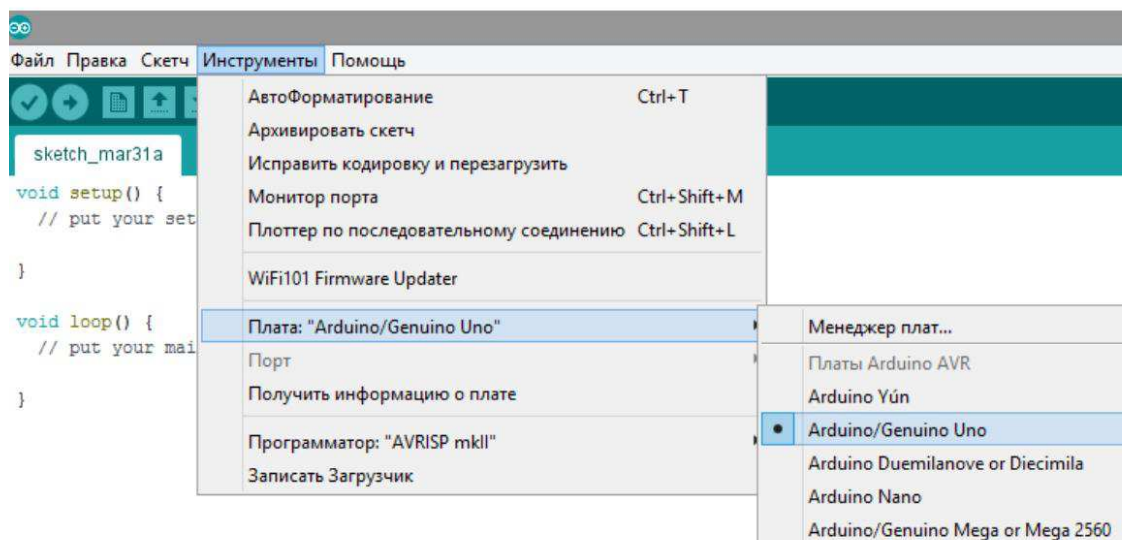


Рисунок 4.8 – Выбор типа контроллера Arduino

### Загрузка программы

Написанная программа в Arduino IDE загружается в контроллер нажатием кнопки со стрелкой вправо, рисунок 4.8. Оболочка проверит программу на наличие ошибок, а затем переведет ее в двоичный код данных и команд выбранного микроконтроллера и запишет в Arduino.

Если после появления слова Загрузка в нижней строке окна Arduino IDE замигали светодиоды TX и RX на плате Arduino, то загрузка программы в плату началась успешно.

### Функции

Функции являются поименованными блоками команд, которые по их имени можно вызвать из любого места программы. Функция — это блок кодов программы, у которых есть имя и ряд команд, которые запускаются при вызове функции. Например, функции `void setup` и `void loop` [X]. Существуют встроенные функции – они уже присутствуют в библиотеке функций Arduino IDE – и функции, созданные в рамках текущей программы. Также существуют библиотеки, которые можно подключать к текущей программе и пользоваться имеющимися в них функциями. Подключаются библиотеки из пункта оболочки **Скетч | Подключить библиотеку**. После подключения той или иной

библиотеки, можно использовать содержащиеся в ней готовые программные решения, написанные для различных устройств и датчиков.

### **Элементы объектно-ориентированного программирования**

Язык C++, составляющий основу для программирования в проекте Arduino, является объектно-ориентированным. Объекты – это сложные структуры, которые имеют оригинальное название, могут включать в себя как переменные, так и функции. Фактически, объекты созданы для удобного обращения к сложным структурам.

### **Реализация экспериментального стенда с серводвигателем**

Серводвигатель подключается программно. Сначала подключается библиотека (`#include <Servo.h>`), а затем создается объект `servomotor`.

Контакт серводвигатель должен быть физически подключен к порту Arduino UNO R3, и на мотор подано электропитание. Серводвигатель можно подключить непосредственно к плате (рисунок 4.9), или через макетную плату (рисунок 4.10).

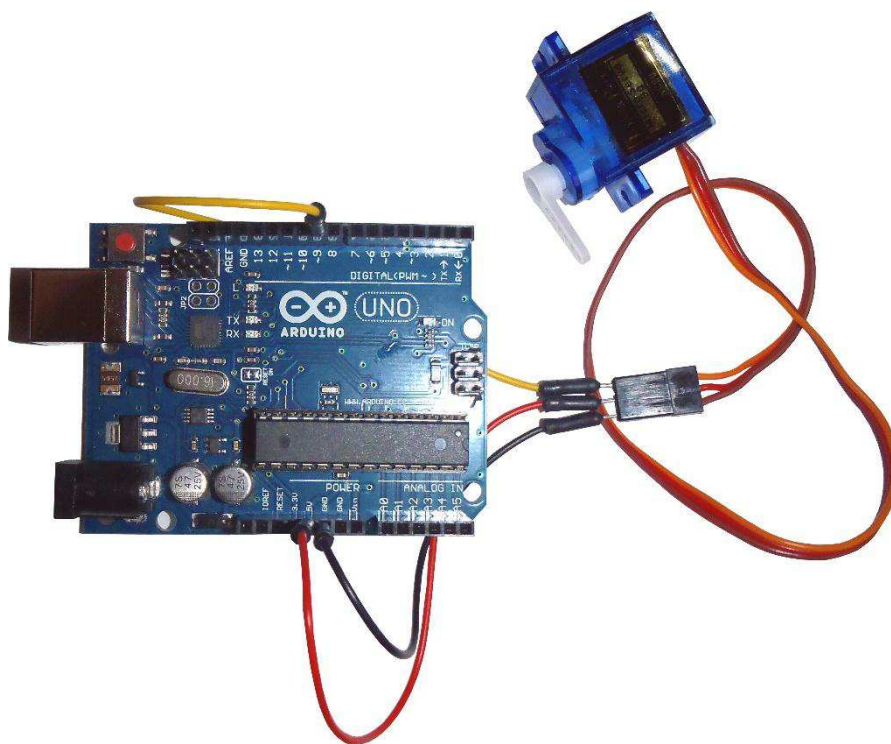


Рисунок 4.9 – Подключение серводвигателя к контроллеру Arduino

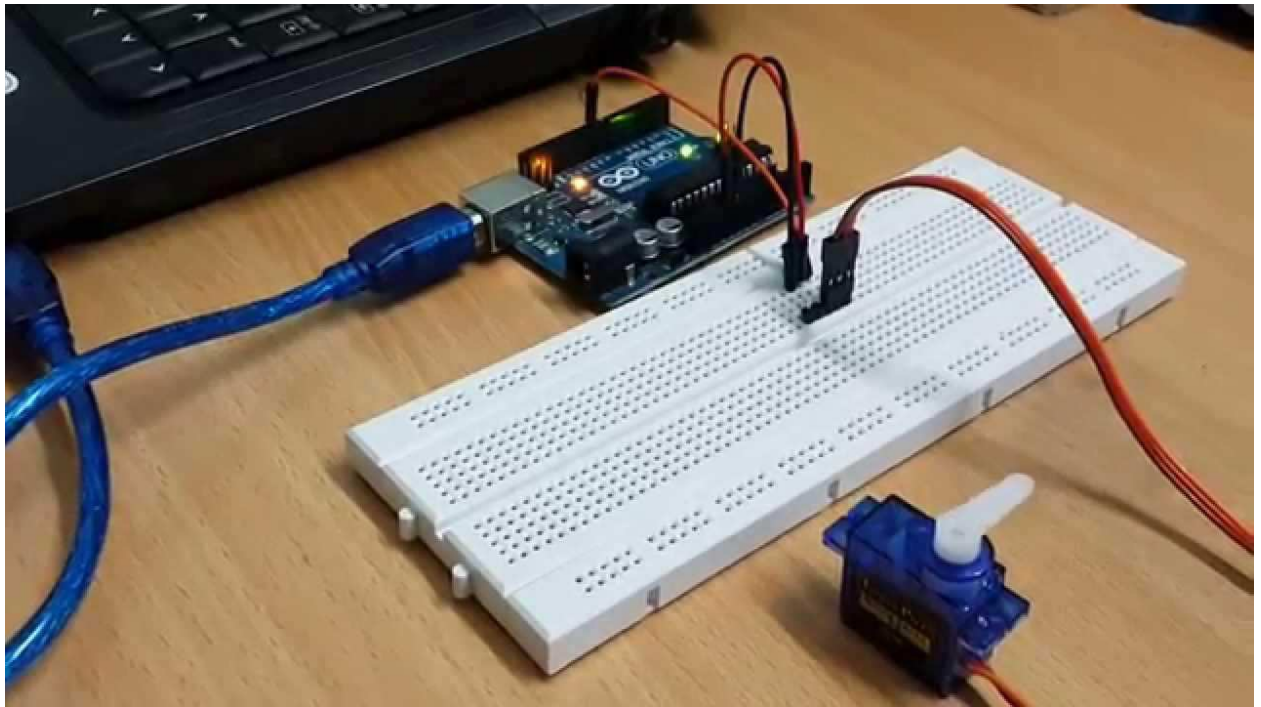


Рисунок 4.10 – Подключение серводвигателя к контроллеру Arduino через макетную плату

План физического эксперимента с сервоприводом и программная реализация – вариант 1:

```
#include <Servo.h> // Подключаем дополнительную библиотеку
Servo servo1; // Объект управления сервоприводом
void setup()
{
  servo1.attach(9); // Назначается пин 9 для подключения серводвигателя
}
void loop()
{
  int position;
  servo1.write(90); // Команда серве повернуться на позицию 90 градусов
  delay(1000); // Пауза 1 мкс, чтобы дать время повернуться
  servo1.write(180); // Команда серве повернуться на позицию 180 градусов
```

```

delay(1000);      // Пауза 1 мкс
servo1.write(0);  // Команда серве повернуться на позицию 0 градусов
delay(1000);      // Пауза 1 мкс
// Формируется команда сервоприводу повернуться на позицию 180 градусов,
// с шагом в два градуса:
for(position = 0; position < 180; position += 2)
{
  servo1.write(position); // Команда перемещения на следующую позицию
  delay(20);              // Короткая пауза
}
// Формируется команда сервоприводу повернуться на позицию 0 градусов,
// с шагом в 1 градус:
for(position = 180; position >= 0; position -= 1)
{
  servo1.write(position); // Команда сервоприводу переместиться на
// следующую позицию
  delay(20);              // Короткая пауза
}
}

```

План физического эксперимента с сервоприводом и программная реализация – вариант 2:

```

int servopin=9;// select digital pin 9 for servomotor signal line
int myangle;// initialize angle variable
int pulsewidth;// initialize width variable
int val;
void servopulse(int servopin,int myangle)// define a servo pulse function
{
  pulsewidth=(myangle*11)+500;// convert angle to 500-2480 pulse width

```

```

digitalWrite(servopin,HIGH);// set the level of servo pin as “high”
delayMicroseconds(pulsewidth);// delay microsecond of pulse width
digitalWrite(servopin,LOW);// set the level of servo pin as “low”
delay(20-pulsewidth/1000);
}
void setup()
{
pinMode(servopin,OUTPUT);// set servo pin as “output”
Serial.begin(9600);// connect to serial port, set baud rate at “9600”
Serial.println("servo=o_seral_simple ready" );
}
void loop()// convert number 0 to 9 to corresponding 0-180 degree angle, LED blinks
corresponding number of time
{
val=Serial.read();// read serial port value
if(val>='0'&&val<='9')
{
val=val-'0';// convert characteristic quantity to numerical variable
val=val*(180/9);// convert number to angle
Serial.print("moving servo to ");
Serial.print(val,DEC);
Serial.println();
for(int i=0;i<=50;i++) // giving the servo time to rotate to commanded position
{
servopulse(servopin,val);// use the pulse function
}
}
}
}

```

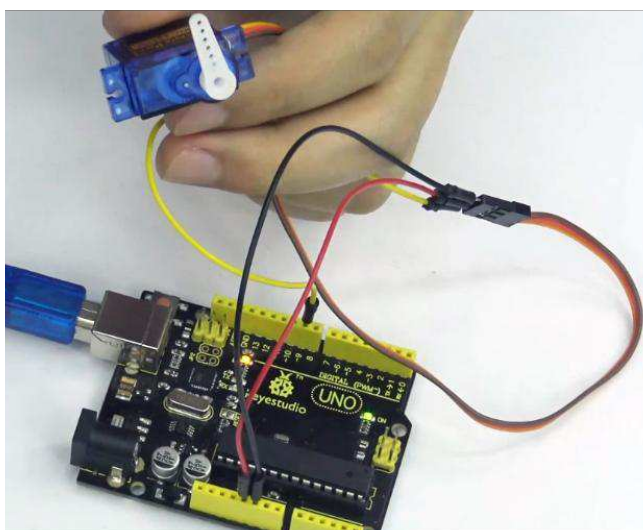


Рисунок 4.11 – Реализация варианта 2 эксперимента с серводвигателем

Результаты отработки рабочего процесса программного управления сервоприводом показан на рисунке 4.12.

```
servo=0_serai_simple ready
moving servo to 0
moving servo to 180
moving servo to 0
moving servo to 20
moving servo to 40
moving servo to 60
moving servo to 80
moving servo to 100
moving servo to 120
moving servo to 140
moving servo to 160
moving servo to 180
moving servo to 0
```

Рисунок 4.12 – Результаты рабочего процесса программного управления сервоприводом

## Запуск моделей Simulink на Arduino

Подключение Arduino к SIMULINK официальная страница:  
<http://www.mathworks.com/academia/arduino-software/arduino-simulink.html>

Требуются: MATLAB (R2010a или позже) Simulink.

Скачивается пакет Simulink Support Package for Arduino  
<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30277> и распаковывается его на диске компьютера, например в **c:\arduino\_simulink**. Также скачивается среда Arduino IDE и распаковывается, к примеру, в **c:\ArduinoTarget**.

Выполняются команды для добавления путей:

```
>> cd c:\arduino_simulink
>>
addpath(fullfile(pwd,'arduino'),fullfile(pwd,'blocks'),fullfile(pwd,'demos'))
>> savepath.
```

Далее, обновляются кастомизации:

```
>> sl_refresh_customizations.
```

Подключается плата Arduino к компьютеру. Прошивается. Указывается путь к среде Arduino:

```
>>arduino.Prefs.setArduinoPath('c:\ArduinoTarget')
```

Определяется текущая платформа командой

```
>> arduino.Prefs.setBoard('mega')
```

Список всех доступных платформ выводится командой

```
>> arduino.Prefs.setBoard
```

Specify one of the following board labels:

'uno' (Arduino Uno)

'atmega328' (Arduino Duemilanove or Nano w/ ATmega328)

'diecimila' (Arduino Diecimila, Duemilanove, or Nano w/ ATmega168)  
'mega2560' (Arduino Mega 2560)  
'mega' (Arduino Mega (ATmega1280))  
'mini' (Arduino Mini)  
'fio' (Arduino Fio)  
'bt328' (Arduino BT w/ ATmega328)  
'bt' (Arduino BT w/ ATmega168)  
'lilypad328' (LilyPad Arduino w/ ATmega328)  
'lilypad' (LilyPad Arduino w/ ATmega168)  
'pro5v328' (Arduino Pro or Pro Mini (5V, 16 MHz) w/ ATmega328)  
'pro5v' (Arduino Pro or Pro Mini (5V, 16 MHz) w/ ATmega168)  
'pro328' (Arduino Pro or Pro Mini (3.3V, 8 MHz) w/ ATmega328)  
'pro' (Arduino Pro or Pro Mini (3.3V, 8 MHz) w/ ATmega168)  
'atmega168' (Arduino NG or older w/ ATmega168)  
'atmega8' (Arduino NG or older w/ Atmega8)

Проверяются доступные порты:

```
>> comPorts=arduino.Prefs.searchForComPort
```

```
comPorts =
```

```
'COM3'
```

И подключаемся к нему:

```
>> arduino.Prefs.setComPort('COM3');
```

Библиотека блоков Simulink инсталлированная с официального сайта показана на рисунке 4.13.



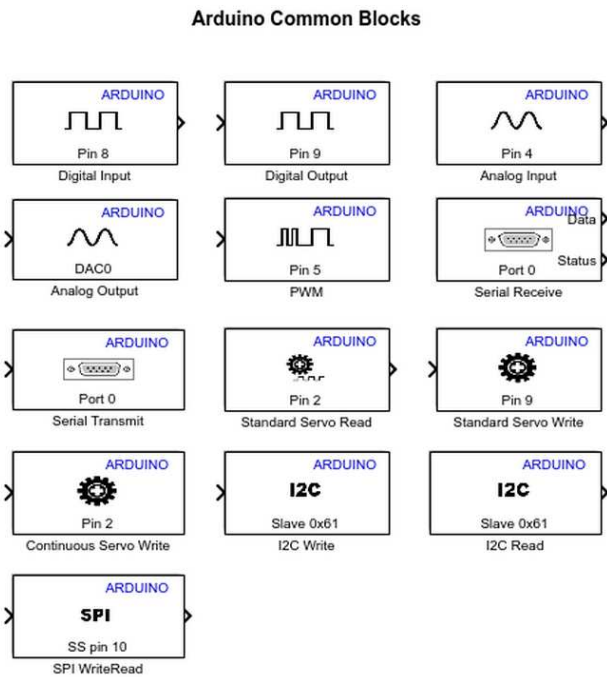


Рисунок 4.13 – Блоки Simulink/Arduino

Запуск проекта Simulink Servo Control системы управления сервоприводом показан на рисунке 4.14<sup>2</sup>:

>> **arduino\_servocontrol\_sweep**

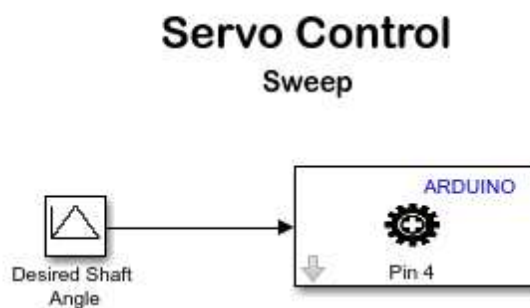


Рисунок 4.14 – Имитационная модель управления сервоприводом на языке Simulink

Достоинством использования MATLAB/Simulink и Arduino является моделей с реальными стендами<sup>3</sup>.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача моделирование рабочих процессов строительного робота, путем исследования и разработки математической и имитационной модели, применения программного обеспечения блочного моделирования.

В работе получены следующие основные результаты:

- Обзор конструкций строительных роботов и научных публикаций.
- Теоретическое описание рабочего процесса строительного робота манипулятора (СРМ).
- Разработка имитационной модели рабочего процесса СРМ. Компьютерное моделирование.
- Компьютерный эксперимент.
- Обобщение результатов исследовательской работы. Разработка рекомендаций по совершенствованию рабочего процесса робота-манипулятора.

## Список публикаций В.В. Никитина

1. Никитин В.В. Модель системы управления приводом захватного устройства строительного робота // XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектив-2020», посвященная Году памяти и славы (75-летию Победы в Великой Отечественной войне 1941-1945 годов) в формате онлайн 23.05.2020 г. Секция: Строительные материалы и инновационные технологии строительства. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020.

2. Моделирование объекта киберфизической системы для укладки и уплотнения асфальтобетонных смесей / А.П. Прокопьев, Ж.И. Набижанов, Р.Т. Емельянов, **В.В. Никитин** // Математические методы в технологиях и технике, 2021. (ISSN 2712-8873; eLIBRARY ID: 76086; DOI 10.52348).

3. Управление процессом уплотнения асфальтобетонных покрытий укладчиком с применением нечеткой логики / А.П. Прокопьев, Ж.И. Набижанов, Р.Т. Емельянов, В.И. Иванчура, **В.В. Никитин** // Математические методы в технологиях и технике, 2021. (ISSN 2712-8873; eLIBRARY ID: 76086; DOI 10.52348).

4. Интеллектуальное управление уплотнением дорожных материалов вибрационными катками / А.П. Прокопьев, Ж.И. Набижанов, Р.Т. Емельянов, **В.В. Никитин** // Математические методы в технологиях и технике, 2021. (ISSN 2712-8873; eLIBRARY ID: 76086; DOI 10.52348).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский. Управление электроприводами. Ленинград, Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1982.
2. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. Санкт-Петербург, Энергоатомиздат, 1992.
3. Булгаков, А.Г. Автоматизация и роботизация строительства : учебное пособие / А.Г. Булгаков, В.А. Воробьев, С.И. Евтушенко, Д.Я. Паршин. – 2-е изд. – Москва : РИОР : ИНФРА-М, 2013.
4. Галдин, Н.С. Теория и проектирование гидропривода [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н.С. Галдин, И.А. Семенова. – Омск : СибАДИ, 2016.
5. Евтюков, С.А. Построение математических моделей и систем автоматизированного проектирования подъемно-транспортных и строительно-дорожных машин [Электронный ресурс]: учебное пособие / Евтюков С.А., Овчаров А.А., Замараев И.В. – Электрон. текстовые данные. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2011. – ЭБС «IPRbooks».
6. Евтюков, С.А. Построение механореологических моделей процессов взаимодействия рабочих органов строительно-дорожных машин со средой [Электронный ресурс]: учебное пособие / Евтюков С.А., Овчаров А.А., Замараев И.В. – Электрон. текстовые данные. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2011.
7. Емельянов, С.Г. Роботизация и автоматизация строительных процессов / С.Г. Емельянов, А.Г. Булгаков, Л.М. Червяков и др.; Минобрнауки России, Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск : ЮЗГУ, 2014.
8. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода. Учебное пособие для ВУЗов. Москва, Изд. МЭИ, 2003.

9. Илюхин, А.В. Математическое описание объектов автоматизации строительного производства: учебное пособие / А.В. Илюхин, А.М. Колбасин, В.И. Марсов. – Москва: МАДИ, 2016.
10. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода. Санкт-Петербург, ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, Санкт-Петербургское отделение, 1994.
11. Тихонов, А.Ф. Автоматизация строительных и дорожных машин [Электронный ресурс]: учебное пособие / А.Ф. Тихонов, С.Л. Демидов, А.Н. Дроздов. – Электрон. текстовые данные. – Москва: Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2013. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/23716>.
12. Фигаро Б.И., Павлячек Л.Б. Теория электропривода. Минск, ЗАО Техноперспектива, 2004.
13. Филипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. Москва. Лаборатория базовых знаний. 2001.
14. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями/ С.Г. Герман-Галкин, В.Д. Лебедев, Б.А. Марков, Н.И. Чичерин. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-е, 1986.
15. Черных И.В. SIMULINK среда создания инженерных приложений. Москва, ДИАЛОГ-МИФИ, 2004.
16. Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов. Учебное пособие для ВУЗов. Екатеринбург, Изд-во Урал.гос. проф.-пед.ун-та, 1997.
17. Щербаков, В.С. Теория автоматического управления. Линейные непрерывные системы: учебное пособие / В.С. Щербаков, И.В. Лазута. – Омск: СиБАДИ, 2013.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Международная конференция «Перспектив Свободный-2020»

Никитин В.В. Модель системы управления приводом захватного устройства строительного робота // XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектив Свободный-2020», посвященная Году памяти и славы (75-летию Победы в Великой Отечественной войне 1941-1945 годов) в формате онлайн 23.05.2020 г. Секция: Строительные материалы и инновационные технологии строительства. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020.

УДК 681.524

#### **МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ ЗАХВАТНОГО УСТРОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНОГО РОБОТА**

**В.В. Никитин<sup>4</sup>**

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент А.П. Прокопьев

*Сибирский федеральный университет*

Исполнительные подсистемы роботов состоят из механической части и приводов. Приводные устройства соединены с кинематическими звеньями манипулятора и осуществляют эти перемещения под управлением программы. Для контроля движения используются соединенные с кинематическими звеньями манипулятора датчики. Привод робота преобразует подводимую энергию в энергию движения исполнительных звеньев и устройств робота в соответствии с сигналами, поступающими от системы управления. Элементы привода могут быть охвачены как внутренними, так и внешними обратными связями [1, 2]. Основными параметрами привода робота являются: мощность; скорость; быстроедействие; точность отработки командного сигнала.

Цель работы – разработка компьютерной модели следящей системы управления приводом захватного механизма строительного робота (СР). Объект исследования – рабочий процесс привода (объекта управления) захватного механизма СР. Предмет исследования – зависимости динамических параметров рабочего процесса от режимов работы СР.

Для обеспечения требуемых свойств динамической системы объекта управления необходимо проектирование (синтез) регулятора, структура и

параметры которого зависят от параметров двигателя постоянного тока и требований к контуру скорости.

Синтез (проектирование) регулятора в следящей робототехнической системе. Математическое описание привода звена захватного устройства робота мостового типа имеет следующий вид [3]

$$J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + C_1 \cdot \omega_m + C_2 \cdot \sin\theta_m = k_M \cdot i_{\text{я}}, \quad (1)$$

где  $J$  – суммарный момент инерции якоря и механического звена робота,  $i_{\text{я}}$  – ток якоря,  $\theta_m = \int \omega_m dt$  – угол поворота звена робота. Ток якоря двигателя постоянного тока (ДПТ) находится из уравнения

$$T_{\text{я}} \cdot \frac{di_{\text{я}}}{dt} + i_{\text{я}} + \frac{k_E}{R_{\text{я}}} \cdot \omega_m = \frac{u_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}. \quad (2)$$

По уравнениям (1) и (2) построена модель объекта управления, состоящая из двигателя мощностью 0.45 кВт и звена робота, рисунок 1.

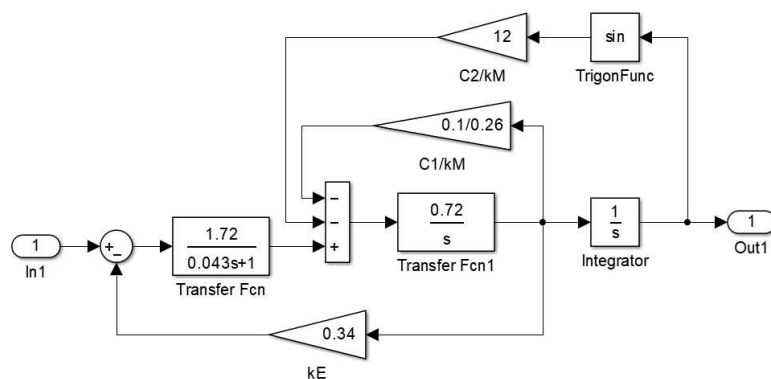


Рис. 1. Модель привода звена робота на языке программы Simulink

Предварительный анализ переходного процесса в приводе звена робота по управлению, при  $C_1 = 0.1, C_2 = 3.2$  и малых углах поворота звена робота, показывает, что двигатель с учетом нагрузки на его валу может стать колебательным динамическим звеном.

Требуется проектирование регулятора системы управления приводом в следящей робототехнической системе. Для этого случая реализуется ограничитель диапазона для тока с использованием в контуре тока ДПТ релейного регулятора. При этом контур тока считается безинерционным, а силовой регулятор – источником тока. Тогда звено робота вместе с ДПТ описывается уравнением (1), из которого определим передаточную функцию

$$W_{\text{об}}(s) = \frac{k_M}{C_2} \cdot \frac{1}{T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot s + 1},$$



где  $T^2 = \frac{J}{C_2}$ ,  $2 \cdot \xi \cdot T = \frac{C_1}{C_2}$ , при заданных значениях  $C_1 = 0,1$ ,  $C_2 = 3,2$  параметры звена робота равны:  $T = 0,33$ ,  $\xi = 0,047$ , т.е. привод робота представляет собой колебательное звено. Для такой системы используется ПИД-регулятор с реальным дифференцирующим звеном, параметры которого находятся из уравнений:

$$T_D < 2 \cdot \xi \cdot T; k_{И} = \frac{C_2}{2 \cdot T_D \cdot k_{oc} \cdot k_M}; \frac{k_D + T_D \cdot k_{П}}{k_{И}} = T^2; \frac{k_{П} + T_D \cdot k_{И}}{k_{И}} = 2 \cdot \xi \cdot T.$$

Модель компьютерного стенда двухконтурной робототехнической системы привода звена робота представлена на рисунке 2.

Получены динамические характеристики замкнутой системы при  $T_D = 0,01$ с,  $k_{П} = 19,25$ ,  $k_{И} = 615$ ,  $k_D = 69,5$ . В такой системе колебаний выходной координаты (угла) не наблюдается. Поэтому такой переходной процесс можно считать удовлетворительным для синтеза.

Выполнено моделирование изменения входного сигнала в диапазоне от 0,001 до 0,003.

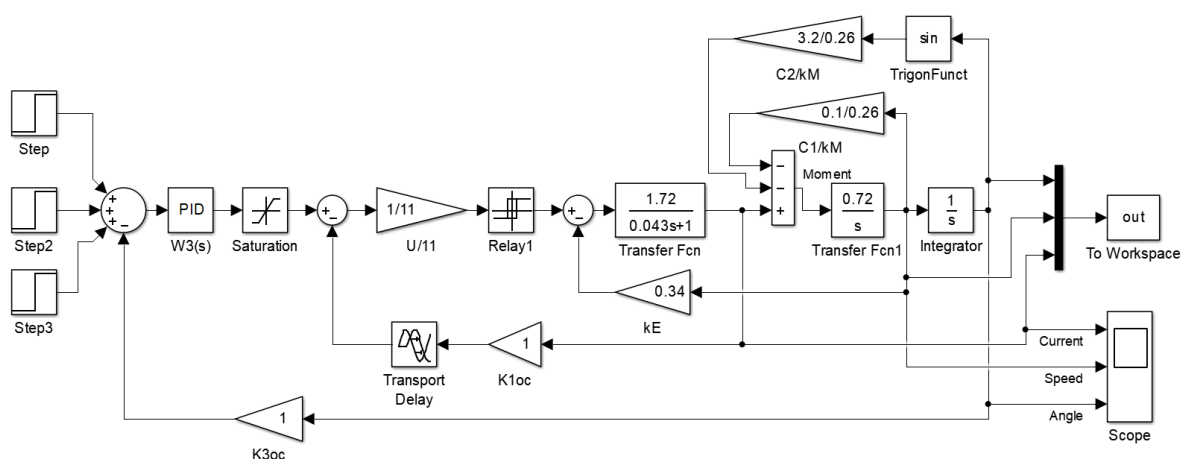


Рис. 2. Модель экспериментального стенда двухконтурной робототехнической системы

Из кривых (рисунок 3), при различных режимах работы системы, видно, что в такой системе при небольших и больших входных сигналах (при выходе системы в насыщение) колебаний выходной координаты (угла) не наблюдается. Поэтому такой переходной процесс может удовлетворить проектировщика.

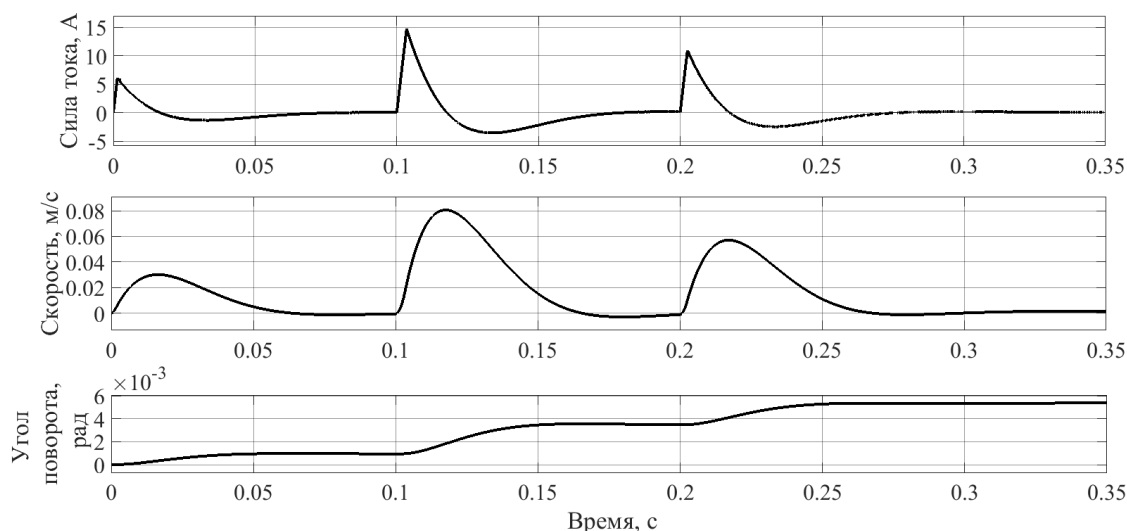


Рис. 3. Переходные процессы при изменении режимов работы в двухконтурной робототехнической системе

**Заключение.** Получена компьютерная модель системы управления приводом захвата строительного робота позволяющая исследовать динамику рабочего процесса. Выполнено моделирование процесса при различных параметрах СР и привода. Результаты исследования проверены на адекватность процесса.


### Список литературы

1. Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. 396 с.
2. Мусалимов В.М., Г.Б. Заморуев, И.И. Калапышина, А.Д. Перечесова, К.А. Нуждин. Моделирование мехатронных систем в среде MATLAB (Simulink / SimMechanics). СПб: НИУ ИТМО, 2013. 114 с.
3. Герман-Галкин. С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008. 368 с.

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерно-строительный институт  
Кафедра строительных материалов и технологий строительства

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой


 А. Г. Енджиевская  
подпись  
« 25 » 06 2021 г.


**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**


«Моделирование динамики системы управления строительным роботом»


08.04.01 «Строительство»

08.04.01.07 «Комплексная механизация и автоматизация строительства»

Научный руководитель  доц., канд. техн. наук А. П. Прокопьев  
подпись

Выпускник  ст. гр. СФ19-07М В. В. Никитин  
подпись

Рецензент  д-р техн. наук, проф. В. И. Иванчура  
подпись

Нормоконтролер  -доц., канд. техн. наук Е. С. Турышева  
подпись

Красноярск 2021