

**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)**

Направление	13.04.02 - Электроэнергетика и электротехника
Профиль	140452.68 - Автоматизированные электро-механические комплексы и системы
Факультет	ЭА
Кафедра	РАПС

К защите допустить

Зав. кафедрой

М.П. Белов

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
МАГИСТРА**

**Тема: РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ РОБО-
ТА С МНОЖЕСТВОМ СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ**

Студент		<hr/>	С.Е. Жуков
		<i>подпись</i>	
Руководитель		<hr/>	М.П. Белов
	<i>к.т.н, доцент</i>	<i>подпись</i>	
Консультант		<hr/>	А.Н. Иванов
по БЖД	<i>к.т.н, доцент</i>	<i>подпись</i>	
Консультант		<hr/>	Л.П.Козлова
по нормоконтролю	<i>к.т.н, доцент</i>	<i>подпись</i>	

Санкт-Петербург

2017

ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

Утверждаю
Зав. кафедрой РАПС
_____ М.П. Белов
«__» _____ 2017 г.

Студент С.Е. Жуков Группа 1403

Тема работы: Разработка системы управления движения робота с множеством степеней свободы

Место выполнения ВКР: СПбГЭТУ “ЛЭТИ”

Исходные данные (технические требования): технологические параметры антропоморфного робота

Содержание ВКР:

Анализ существующих методов управления движением, применяемых к антропоморфным роботам, расчет и выбор оборудования, моделирование системы и анализ полученных результатов

Перечень отчетных материалов: пояснительная записка, иллюстративный материал

Дополнительные разделы: Специальные вопросы обеспечения безопасности

Дата выдачи задания
«__» _____ 2017 г.

Дата представления ВКР к защите
«__» _____ 2017 г.

Студент	_____	С.Е. Жуков
Руководитель	_____	М.П. Белов

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН ВЫПОЛНЕНИЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Утверждаю

Зав. кафедрой РАПС

М.П. Белов

« » 2017 г.

Студент С.Е. Жуков

Група 1403

Тема работы: Разработка системы управления движения робота с множеством степеней свободы

№ п/п	Наименование работ	Срок выполнения
1	Обзор литературы по теме работы	01.09 – 20.09
2	Общие положения о системах управления антропоморфных роботов	21.09 – 01.11
3	Анализ методов управления	02.11 – 10.02
4	Выбор оборудования и моделирование	11.02 – 01.04
5	Оформление пояснительной записки	02.04 – 19.04
6	Оформление иллюстративного материала	20.04 – 05.05

Студент

С.Е. Жуков

Руководитель

кандидат технических наук, доцент

М.П. Белов

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка 71 страница, 45 рисунков, 4 таблицы, 32 источника.

АНТРОПОМОРФНЫЙ РОБОТ, СЕРВОПРИВОД, УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТА, МОДЕЛИРОВАНИЕ, СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Объектом исследования данной работы является антропоморфный робот с множеством степеней свободы.

Цель работы – разработка системы управления движения робота с множеством степеней свободы.

В процессе работы был выполнен анализ, расчет и выбор подходящего метода управления. Было проведено моделирование системы управления, проведен анализ полученных результатов.

В части по безопасности жизнедеятельности были разобраны специальные вопросы функциональной безопасной и систем безопасности человека.

ABSTRACT

Explanatory note 71 pages, 45 figures, 4 tables, 32 sources.

**ANTHROPOMORPHIC ROBOT, SERVO DRIVER, MOTION CONTROL
ROBOT, MODELING, CONTROL SYSTEM**

The object of this study is an anthropomorphic robot with many degrees of freedom.

The purpose of the work is the development of a control system for the movement of a robot with a multitude of degrees of freedom.

In the process of work, the analysis, calculation and selection of the appropriate control method were carried out. The control system was simulated and the results obtained were analyzed.

In the part on safety of vital activity, special questions of functional safe and human security systems were disassembled.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
1 Общие положения о системах управления антропоморфных роботов	11
1.1 Анализ существующих решений создания роботов.....	11
1.2 Система управления роботом как объект исследования.....	23
1.3 Определение задачи	25
1.4 Моделирование.....	35
2 Анализ функциональной схемы управления.....	42
2.1 Общие сведения.....	42
2.1 Разработка функциональной схемы	43
2.1 Описание управляющего контроллера	43
2.2 Описание главного микроконтроллера семейства ARM7	45
3 Управление серводвигателями с помощью микроконтроллеров.....	47
3.1 Принцип работы программы управления двигателем.	49
3.2 Методы управления сервоприводами с микроконтроллерами	52
3.10 Моделирование антропоморфного робота в среде V-REP	56
5 Специальные вопросы обеспечения безопасности.....	60
5.1 Функциональная безопасность	60
4.2 Безопасность для человека.....	62
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	68
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	69

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

КПД – коэффициент полезного действия

ДШР – двуногий шагающий робот

ПДУ – пульт дистанционного управления

ШИМ – широтно-импульсная модуляция

МК - микроконтроллер

ВВЕДЕНИЕ

Первое применение фразы «робот» относилось к антропоморфным устройствам, предназначенным для помощи человеку в различных работах. Роботами стали называть фактически все автоматические устройства, предназначенные для выполнения производственных и других операций, которые обычно делаются людьми. Активное становление роботов началось после завершения Второй мировой войны, это было связано с активным развитием атомной промышленности. Одним из первых роботов был манипулятор (Master-slave Manipulators, MSM) Model-1, который обладал функцией копирования действий человека. Манипулятор представили Комитету по атомной энергетике 1949 г., он был призван защитить персонал радиоактивными препаратами. К современным роботам в наше время выдвигают следующие требования: самостоятельное устройство, выполняющее определенную работу автоматически. К таким роботам можно отнести аппарат «Луноход-1», во главе с Г.Н. Бабакиным - главным инженером Научно-производственного объединения им. С.А. Лавочкина. «Луноход-1» одним из первых в истории роботов, работавший на поверхности луны (1970).

В настоящее время робототехника получила большое развитие в разных сферах деятельности, наибольшее распространение она получила в военной сфере и в производстве. Чаще всего роботов применяют в монотонных или опасных работах. Об этом свидетельствует постоянно появляющаяся информация о достижениях ведущих стран мира в разработке военных наземных, подводных роботов и беспилотных летательных аппаратов. В нынешнее время начинается эпоха развития антропоморфных шагающих двуногих роботов.

Человекоподобные двуногие шагающие роботы предназначены для работы в среде, приспособленной для людей (сооружения, которые проектировались под параметры и задачи людей; кабины управления уже созданных устройств). Двуногие шагающие роботы могут работать со всеми из существующих инструментов и устройств, применяя органы управления, приспособлен-

ные для человека. События на Атомной электростанции «Фукусима» показали необходимость в этих роботах для ликвидации последствий катастроф техногенного характера. В настоящее время Управлением перспективных исследовательских проектов Пентагона объявлен конкурс на проект робота, способного полностью исключить людей при работе в опасных зонах, в том числе при устранении аварий техногенного характера и стихийных бедствий. Требования к роботам: они должны уметь двигаться по неровной поверхности, подниматься по лестницам, пользоваться обычным и электрическим инструментом, управлять транспортными средствами.

1 Общие положения о системах управления антропоморфных роботов

1.1 Анализ существующих решений создания роботов

Впервые человекоподобный шагающий двуногий робот был представлен общественности в 1996 г. фирмой HONDA (рисунок 1) [1]. Автономный робот модели P2, способный передвигаться в режиме динамической ходьбы, подниматься и спускаться по лестницам, выполнять простейшие операции сборки. Однако история развития ДШР фирмы HONDA началась с робота модели E0, созданного в 1986 г. Он мог передвигаться в режиме статической ходьбы, выполняя один шаг за 5 с. В 1987 - 1991 гг. проводились исследования ходьбы людей и животных в целях синтезирования ходьбы робота с большими скоростями, а также формирования кинематической структуры его исполнительного механизма и расположения сочленений, обеспечивающих требуемую ходьбу робота.



Рисунок 1- Роботы фирмы HONDA моделей E0 (1986) (а), P2 (1996) (б)

Также в 1987 – 1991 годах были созданы роботы моделей E1-E3 для проведения экспериментальных исследований. Эти роботы могли передвигаться в режиме динамической ходьбы то есть с отрывом стопы от поверхности. Скорость движения роботов выросла до 3,5 км/ч. Модель E6 стала автономной,

стала работать без вмешательства человека. Система стабилизации реализованная на этой модели путем балансирования корпусом позволяла им перемещаться по лестницам и переступать через препятствия. Скорость передвижения увеличилась до 4,7 км/ч. С 1992 по 1997 г. были созданы человекоподобные роботы моделей P1 - P3 с корпусом и руками. На этих роботах отрабатывалась ходьба и работа в автономном режиме, согласовывались движения рук и ног при ходьбе. У робота модели P3 (1997) за счет децентрализации системы управления и применения новых материалов были уменьшены рост (до 1,6 м) и масса (до 130 кг). С 2000 г. стали изготавливать роботы серии ASIMO, у которых были улучшены ходьба, управление руками, техническое зрение.

Наибольших успехов в области создания шагающих роботов с робастной системой управления добились специалисты компании Boston Dynamics, возглавляемой М. Райбертом. Наиболее известные их работы - четырехногий робот BigDog и двуногий Petman. Управление ходьбой этих машин основано на принципах, открытых и исследованных на одноногом прыгающем роботе 3D_hopper (1983) (рисунок 2, а) [2]. После определения и обобщения информации о походке людей и котов, чтобы обнаружить законы симметрии, в 1984 г. был создан четырехногий робот, который бежит рысью (рисунок 2, б). С 1996 по 2000 г. команда Дж. Пратта («Лаборатория ног» Массачусетского технологического института) разработала плоскостный двуногий робот «Упругий фламинго» (рисунок 2, в). Этот робот с помощью управления по моментам в стопах мог ходить по заранее неизвестной ему опорной поверхности, имеющей подъемы и спуски.

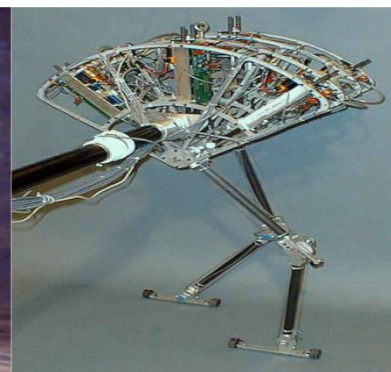
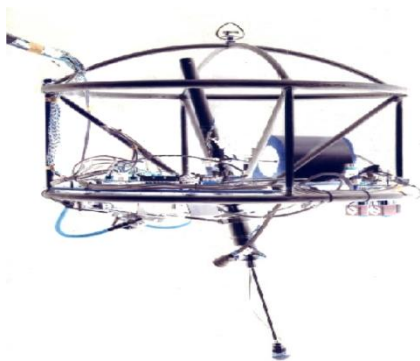


Рисунок 2 - Одноногий прыгающий робот (а), четырехногий робот, бегущий рысью (б), и двуногий робот «Упругий фламинго» (Spring Flamingo) (в)

В 2005 г. представлен динамически устойчивый четырехногий робот (рисунок 3,), созданный совместно компаниями BostonDynamics и Foster-Miller, Лабораторией реактивного движения (НАСА) и Harvard University Concord Field Station при финансовой поддержке DAPRA [3].

Длина робота BigDog 0,91 м, высота 0,76 м, масса 110 кг. В каждой ноге установлено четыре гидропривода (рисунок 3, в): два - для бедренного сустава, и по одному - для коленного и голеностопного суставов.



а



б



в

Рисунок 3 - Динамически устойчивые четырехногие роботы BigDog (2005) (а) и AlphaDog (2012) (б), гидропривод робота BigDog (в)

Гидропривод состоит из гидроцилиндра, сервозолотника, датчиков положения и усилия. Давление питания 200 атм. Бортовой компьютер робота пред-

ставляет собой упрочненный вариант платформы PC/104 с процессором класса Pentium под управлением операционной системы QNX. Робот оснащен устройством стереозрения, оптическим радаром, гиродатчиками и прочими. В настоящее время он способен передвигаться по труднопроходимой местности со скоростью 6,4 км/ч, перевозить 154 кг груза, подниматься на наклонную плоскость с углом наклона 35°, бежать трусцой со скоростью 9,6 км/ч, преодолевать расстояние 19,3 км.

Эволюция робота BigDog привела к созданию в 2012 г. робота LS3 (рисунок 3, б), или AlphaDog, - шагающей системы поддержки боевого подразделения. Эти роботы должны поступить на вооружение Морской пехоты США в 2014 г.

В 2012 г. создан робот «Гепард» (Cheetah), оснащенный гидроприводами (рисунок 4), - самый быстрый бегающий робот, скорость которого превышает 47 км/ч. Предыдущий рекорд скорости 21 км/ч установлен в Массачусетском технологическом институте в 1989 г. Существующая версия робота «Гепард» бегают по высокоскоростной беговой дорожке в лаборатории, где робот запитывается от внешней насосной станции. Робот разработан в рамках программы DAPRA «Максимум мобильности и манипуляции». Утверждается, что программа носит фундаментальный характер и не ориентирована на конкретные военные задачи. Ее цель - исследования по наращиванию возможностей роботов в целом. Однако признается, что в ходе выполнения этой программы используемые технологии могут иметь широкий диапазон военного применения.

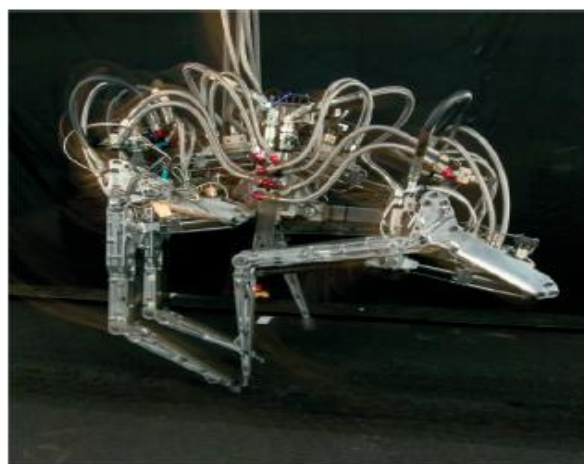
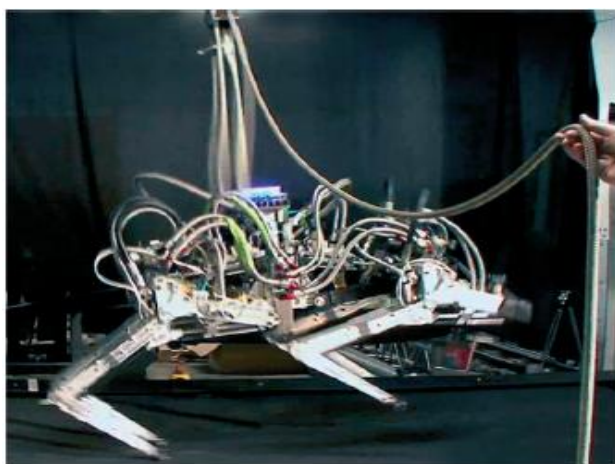


Рисунок 4- Робот «Гепард» (2012)

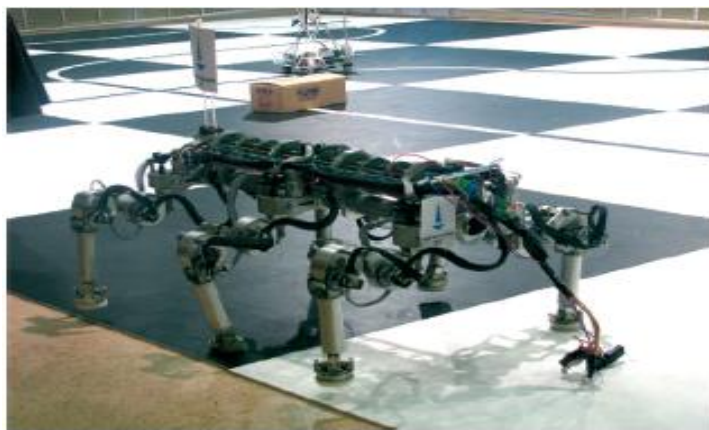
В 2009 г. был представлен двуногий робот Petman (рисунок 5, а). Ноги и гидроприводы этого робота взяты от робота BigDog. Робот ходит походкой человека по беговой дорожке со скоростью 5,2 км/ч, устойчив к внешним силовым воздействиям (в виде сильных боковых толчков, приводящих к изменению траектории его движения). В марте 2012 г. были продемонстрированы новые возможности робота Petman. Робот имел «полноценные» корпус и руки. Скорость его ходьбы возросла до 8 км/ч. В 2013 г. на официальном сайте компании Boston Dynamics была выложена видеoinформация об очередном варианте робота Petman (рисунок 5, б).



Рисунок 5 - Роботы Petman модели 2009 (а) и 2013 г. (б)

Анализируя скорость развития рассматриваемого проекта можно с уверенностью утверждать, что в ближайшем будущем в армии США появится полноценный робот-солдат, приспособленный для работы и ведения боевых действий с помощью всех видов имеющегося вооружения современной армии.

В России задачами антропоморфных роботов занимаются МГУ им. М.В. Ломоносова, МГТУ им. Н.Э. Баумана, НПО «Андронидная техника». Среди наиболее известных работ можно выделить шестиногую машину (рисунок 6, а) и двуногий пятизвенный шагающий робот (рисунок 6, б),



а



б

Рисунок 6 - Шестиногая машина (а) и двуногий робот (б), разработанные в МГУ им. М.В. Ломоносова

Двуногий пятизвенный шагающий робот сконструирован в 1994 г. А.А. Гришиным, С.В. Житомирским, А.В. Ленским и А.М. Формальским [4 - 6]. Аппарат управляется четырьмя электроприводами: двумя - в коленных суставах, двумя - в тазобедренных. В голених установлены датчики усилий, с помощью которых измеряются реакции опоры, приложенные к ногам механизма. Алгоритм управления обеспечивает ходьбу аппарата [7]. Особенностью шестиногого робота является то, что на нем реализована обратная связь по силе, действующей на каждую ногу робота.

На кафедре «Гидромеханика, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» МГТУ им. Н.Э. Баумана решаются задачи по разработке исполнительных механизмов ДШР, оснащенных гидравлическими сервоприводами, и проводятся исследования работы гидроприводов при ходьбе робота. Сотрудниками кафедры были созданы гидравлический роботизированный манекен для испытания костюмов химической защиты и ДШР для исследования управления антропоморфными шагающими роботами с электрогидравлическими приводами в режиме динамической ходьбы [8, 9] (рисунок 7).

На роботизированном манекене (создан в 1991 г. С.Е. Семеновым под руководством А.К. Ковальчука) проводились исследования законов управления электрогидравлическими приводами, обеспечивающих человекоподобные движения антропоморфных исполнительных механизмов.

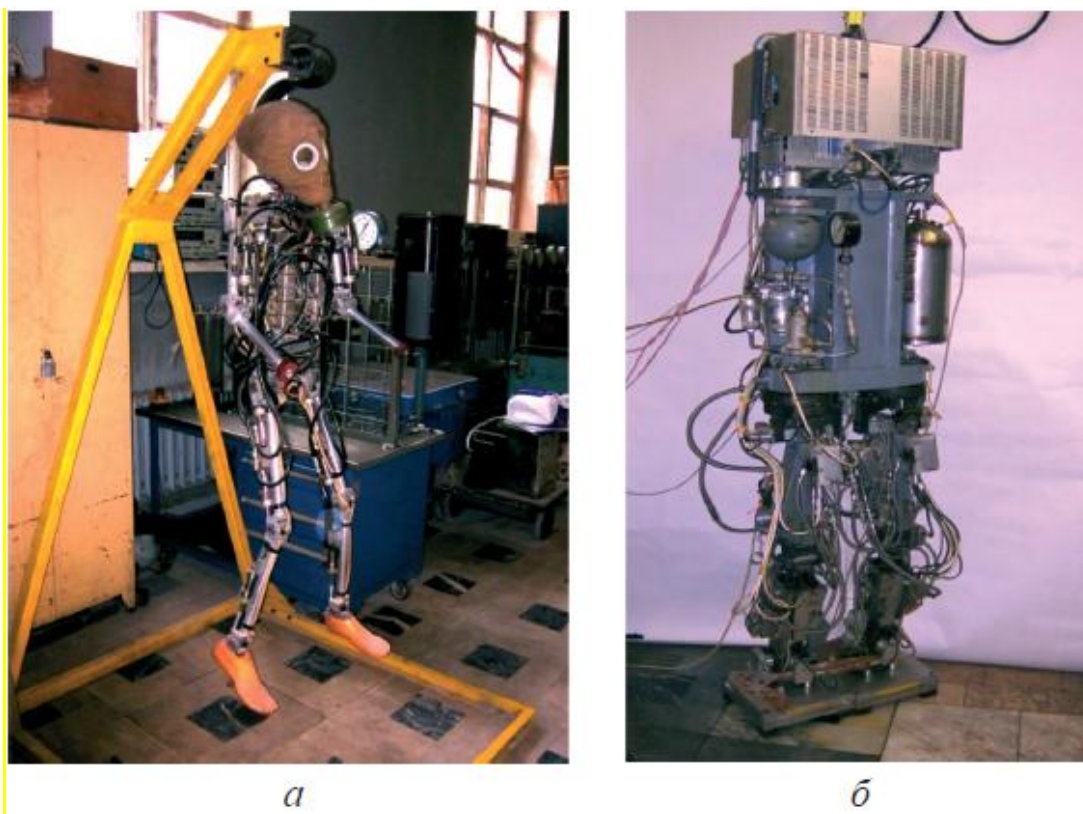


Рисунок 7 - Роботизированный манекен (а) и ДШР (б), разработанные в МГТУ им. Н.Э. Баумана

Исполнительный механизм ДШР (2009), разработанный С.Е. Семеновым, Д.Б. Кулаковым под руководством А.К. Ковальчука, имеет 12 степеней свободы, оснащен гидравлическими следящими сервоприводами (рисунок 8). Высота исполнительного механизма ДШР составляет 2,2 м, масса 220 кг. В корпусе ДШР размещены насосная станция, аппаратура системы управления и системы ориентации (см. рисунок 8). Энергопитание осуществляется по кабелю от внешнего источника электроэнергии. Для управления гидравлическими сервоприводами был разработан программный комплекс системы управления (на базе операционной системы QNX), позволяющий распределять вычислительные задачи, решаемые в реальном времени, между несколькими ЭВМ, которые связаны друг с другом компьютерной сетью Ethernet [10].

На ДШР исследовалась работа системы гидравлических сервоприводов, установленных на исполнительном механизме робота, с учетом микрогеомет-

рии золотниковых пар. Была реализована система стабилизации ходьбы по заданной траектории с управлением моментами, действующими на стопы робота со стороны опорной поверхности; проведены экспериментальные исследования режимов статической и динамической ходьбы ДШР по горизонтальной поверхности [11].

Для замены человека при выполнении работ в открытом космическом пространстве специалисты фирмы General Motors совместно со специалистами НАСА создали робота Robonaut-2 (рисунок 9, а).

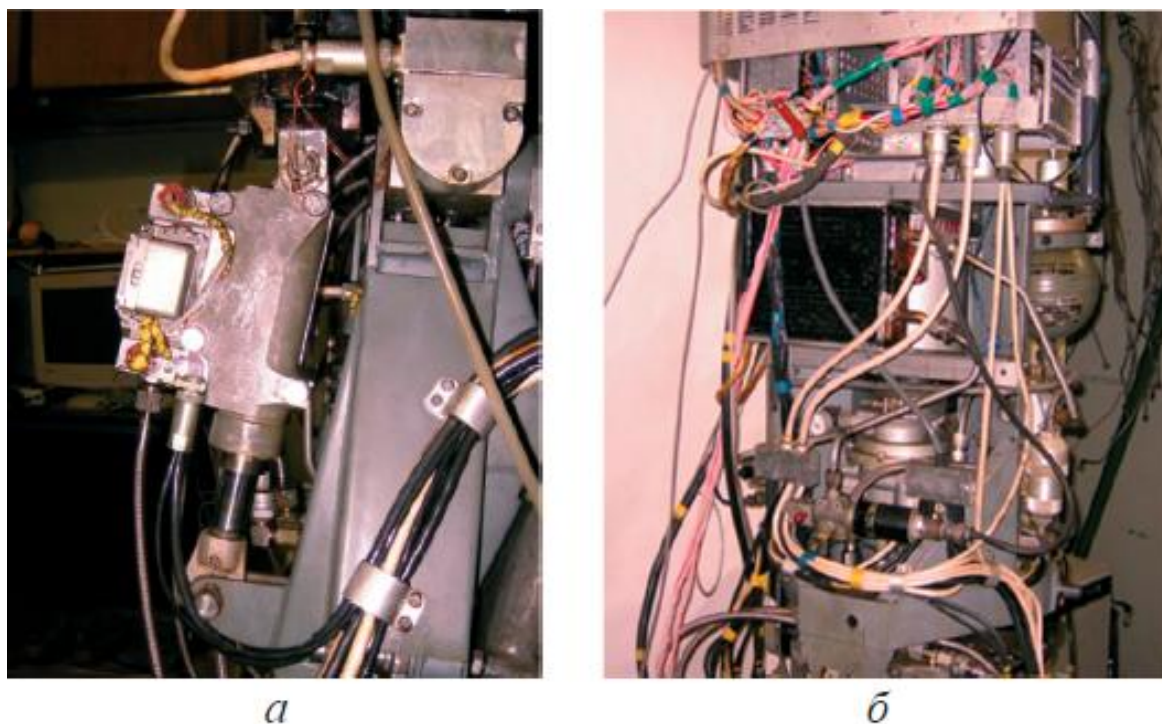


Рисунок 8 - Гидравлический следящий сервопривод (а) и насосная станция ДШР (б)

Робот представляет собой человекоподобную фигуру, на руках у которой есть пять пальцев с суставами наподобие человеческих пальцев. Машина умеет писать, захватывать и складывать предметы, держать тяжелые вещи, например гантель массой 9 кг. Робот пока не имеет нижней половины тела. В шлеме Robonaut-2 вмонтированы четыре видеокамеры, с помощью которых робот не только ориентируется в пространстве, но и транслирует с них сигналы на мониторы диспетчеров. Общее число датчиков и сенсоров превышает 350 штук. Шея

робота имеет три степени свободы, а каждая из рук, размах которых 244 см, - семь степеней свободы. Кисти устройства имеют 12 степеней свободы. Каждый палец выдерживает нагрузку до 2,3 кг. В корпусе робота находится вычислительный центр, в его состав входят 38 процессоров PowerPC. Масса Robonaut-2 составляет 150 кг, рост 1 м. На спине робота размещается рюкзак с энергетической системой. Robonaut-2 был отправлен на Международную космическую станцию.



а



б

Рисунок 9 - Робот Robonaut-2 компании General Motors (а) и SAR-400 НПО «Андроидная техника» (б)

На спине робота размещается рюкзак с энергетической системой. Robonaut-2 был отправлен на Международную космическую станцию (МКС) 24 февраля 2011 г. на борту шаттла «Дискавери» STS-133 и будет постоянно функционировать на станции. Цель запуска робота - проверка его работоспособности в условиях невесомости, изучение влияния на его работу космического и электромагнитного излучения.

По заказу Роскосмоса в НПО «Андроидная техника» создан антропоморфный робот-космонавт SAR-400 (рисунок 9, б) для работы на МКС в качестве помощника космонавта. Проведение космического эксперимента планируется в 2014 г. Таким образом, роботы стали полностью соответствовать первоначальному определению и перспектива замены человека во всех областях его трудовой деятельности возможна. Сейчас создалась ситуация, когда есть все предпосылки для робототехнической революции:

- потребности рынка в массовом внедрении роботов в сферу жизнедеятельности человека;
- достаточный уровень развития технологии и мощностей производства для налаживания массового производства роботов роботами.

Рынок требует удешевления труда, а большинство людей выполняют однообразную монотонную работу. Уже сейчас правительство Японии рассматривает возможности замещения пустых рабочих мест роботами. По данным специалистов, к 2025 г. роботы смогут заполнить 3,5 млн вакансий на рынке труда Японии. Предполагается, что роботы будут помогать ухаживать за пожилыми людьми, чистить в клиниках (высокотехнологичные пылесосы), читать детям книги в детских учреждениях, т. е. заменят медсестер, уборщиков мусора, воспитателей и т. д. При этом главным фактором такой замены является экономический фактор. Так, в результате замены людей роботами Япония сэкономит 21 млрд долл. При этом подчеркивается, что для реализации этого проекта необходимо значительное уменьшение стоимости роботов.

В том, что стоимость роботов будет снижена, а их характеристики улучшатся до уровня, необходимого для их массового внедрения в человеческое общество, сомневаться не приходится. Этому способствуют:

- постоянно растущий уровень технологического развития производства;
- минимизация размеров и совершенствование электронных комплектов;
- повышение вычислительной мощности ЭВМ;
- усовершенствование элементов питания (по последним данным, в ближайшее время будут серийно выпускаться литиевые аккумуляторы, емкость которых вырастет на порядок);
- насыщенность современного производства робототехническими комплексами, позволяющими обеспечивать массовый выпуск высокотехнологичной продукции при минимальном вмешательстве человека;
- развитие алгоритмов управления как одиночными роботами, так и группами роботов.

В качестве примеров возрастающего технологического уровня производства можно привести достижения в области создания электрических аккумуляторов и электродвигателей, основанных на свойствах высокотемпературной сверхпроводимости.

Команда ученых Стенфордского университета разработала новый электрод - анод на основе кремниевых нанотрубок с двойными стенками, теоретически позволяющий увеличить емкость литий-ионных батарей в 10 раз, а срок службы - в 6 раз.

Ученые Вашингтонского университета под руководством профессора механики и материаловедения Г. Нортон создали и запатентовали новую технологию, которая поможет утроить емкость литий-ионных батарей, увеличить срок их службы и заряжать их в несколько раз быстрее. По прогнозам исследователей, изобретение должно в течение года выйти на рынок. Об успехах в областях автономного энергоснабжения и оптимального управления гидроприводами свидетельствует серийно выпускаемый автономный роботизированный экзоскелет Berkeley Bionics (ExoHiker) (рисунок 10) с гидроприводами.



Рисунок 10 - Экзоскелет Berkeley Bionics

Он позволяет полностью разгружать человека, переносящего груз массой до 70 кг. При этом система энергоснабжения от бортовых аккумуляторов дает возможность человеку с грузом перемещаться на расстояние до 67 км. Масса экзоскелета составляет 14 кг. Следовательно, на современном этапе развития робототехники задачи, которые необходимо решать для создания шагающих роботов следующего поколения, переходят в область таких разделов науки, как кибернетика и мехатроника.

К примеру, синергетический синтез как системы управления, так и механико-приводной части роботов, в целях объединения робастности робота BigDog и энергетической эффективности робота Ranger (рисунок 11) является одной из следующих задач компании Boston Dynamics, озвученных М. Райбертом на его стэнфордской лекции 12 мая 2010 г.



Рисунок 11 - Энергетически эффективный робот Ranger на основе пассивной динамики, разработанный в Корнельском университете

Робот Ranger представляет собой практическую реализацию робота, использующего для перемещения пассивную динамическую ходьбу (Passive

Dynamic Walking), т. е. ходьбу в основном за счет взаимного преобразования собственной механической энергии механизма робота [12]. Параметры энергетической эффективности робота Ranger: мощность 16 Вт, масса 9,91 кг, средняя скорость 2,12 км/ч; максимальное пройденное расстояние на одном заряде батарей 65 км.

Проанализировав основные аспекты и распространенные технические решения в реализации систем управления антропоморфных роботов с множеством степеней свободы, следует отметить, что наибольшее применение в области управления такими сложными системами получили адаптивные системы программного управления. Адаптивные системы программного управления, обладающие значительно большими техническими возможностями, благодаря системам осязания на базе тактильных, локационных, телевизионных и других сенсорных устройств, позволяющих определять положение, конфигурацию и другие особенности объектов манипулирования.

1.2 Система управления роботом как объект исследования

Гуманоидная двуногая структура имеет определенные преимущества для робота, работающего в среде человека в вспомогательных ролях. Двуногий человекоподобный робот может избежать препятствий, типичных для человеческого окружения, посредством локомоции (передвижения) на ногах, есть и другие преимущества. Тем не менее, двуногий контроль ходьбы является проблемой. Это связано с тем, что под степенями связи и нелинейной динамикой нужно управлять многими степенями свободы. За последние четыре десятилетия мы стали свидетелями интенсивных исследований по управлению ходьбой робота-гуманоида. Сообщается о нескольких успешных проектах и результатах [17-22].

Одной из самых сложных проблем в этой области является надежный баланс хода не только на ровном полу, но и на поверхностях с неровностями и уклонами. Сообщается об исследованиях двуногой ходьбы по наклонным или

неровным поверхностям [23-27]. Наклонная поверхность представляет собой очень типичное состояние пола, встречающееся в повседневной жизни человека. Хотя такие поверхности являются частью городской и внешней среды, поскольку внутренние этажи не совсем ровные, наклонные поверхности можно встретить и в наших домах и офисах. В данной работе представлена система адаптации параметров нечеткой логики для управления ходьбой по наклонным плоскостям. Плавная траектория движения создается на основе критерия стабильности ZMP и модели линейного инвертированного маятника (LIPM), как в [28-30]. Независимые совместные ПИД-регуляторы используются для отслеживания ссылок на координаты положения, полученных с помощью обратной кинематики, из центра декартовой системы масс (CoM) на основе ZMP и опор стоп. Предполагается, что робот состоит из двух ног и тела, соединяющего их. Угол тела относительно вертикальной оси называется «углом наклона тела». Угол ступней ног относительно тела называется в данном документе «углом наклона ноги». Средний угол шага тела, вычисленный по истории с конечным числом выборок, используется в качестве входа в систему нечеткой логики, которая вычисляет угол наклона ноги в режиме реального времени, который будет применяться в качестве ходовой опорной модификации. Простая база правил построена таким образом, чтобы ввести зону нечувствительности. Эта мертвая зона препятствует изменению опорного угла наклона ступни, когда тело близко, чтобы быть прямым, чтобы не волновать динамику робота без необходимости. Дополнительный контроллер вычисляет опорную модификацию на совместном уровне для осей шага голеностопа индивидуально. Этот контроллер пытается свести к минимуму моменты шага голеностопного сустава с целью установления надлежащего контакта с опорными поверхностями. Полная динамика. 3D-моделирование с моделью робота 12 DOF проводится для проверки предложенной системы адаптации нечетких параметров.

Остальная часть этой работы организована следующим образом. В следующем разделе определяется проблема хождения по поверхностям с изменяющимися углами. Раздел 3 описывает нечеткую систему управления и до-

полнительный контроллер голеностопного сустава. В Пункте 4 представлена имитационная платформа и представлены результаты моделирования ходьбы при изменении наклонов.

1.3 Определение задачи

На рисунке 1 показан типичный двуногий робот, идущий по ровному полу и по наклонным плоскостям с изменяющимися склонами. Движение робота определяется в неподвижной системе координат, называемой мировым фреймом. Направление движения робота совпадает с осью X системы координат. Другой корпус прикреплен к корпусу робота. Этот неподвижный корпус (или рама кузова) показан на рисунке 2 слева. Тело можно рассматривать как «центральное» звено одно, так как ноги соединены с ним. Первоначально (до начала ходьбы) оси рамки корпуса совмещаются параллельно с соответствующей мировой осью кадра. Однако это параллельное выравнивание изменяется во время ходьбы из-за различных эффектов, включая гравитационные силы, взаимодействие ног с землей, изменение наклонов и эффекты связи между линиями. Угол наклона тела, который представляет собой угол оси z глобальной системы координат с вертикальной линией, является индикатором баланса хода. Этот угол, обозначенный как β , показан на рисунке 2 справа. Предполагая, что походка с нулевым углом наклона тела запланирована в эталонном поколении, измерение этого угла может обеспечить обратную связь, указывающую, следует ли робот за этой ссылкой. Он также может обнаружить падение вперед или назад.

Существует много управляющих действий, которые могут повысить стабильность во время ходьбы, воздействуя на угол наклона тела. Для роботов с независимым шарнирным соединением, которое делит тело на нижнюю часть тела и верхнюю часть тела (соответственно на таз и магистральные звенья, соответственно), движение этого сустава может быть непосредственно использовано для повышения стабильности. В [31] Парк использует этот угол соединения как переменную управления балансом для двумерной (саггитальной плос-

кости) двуносной модели. [32] вводит «угол наклона виртуального таза» и показывает, что движение шага тела может быть применено в качестве управляющего воздействия для роботов без независимого соединения шага тела.

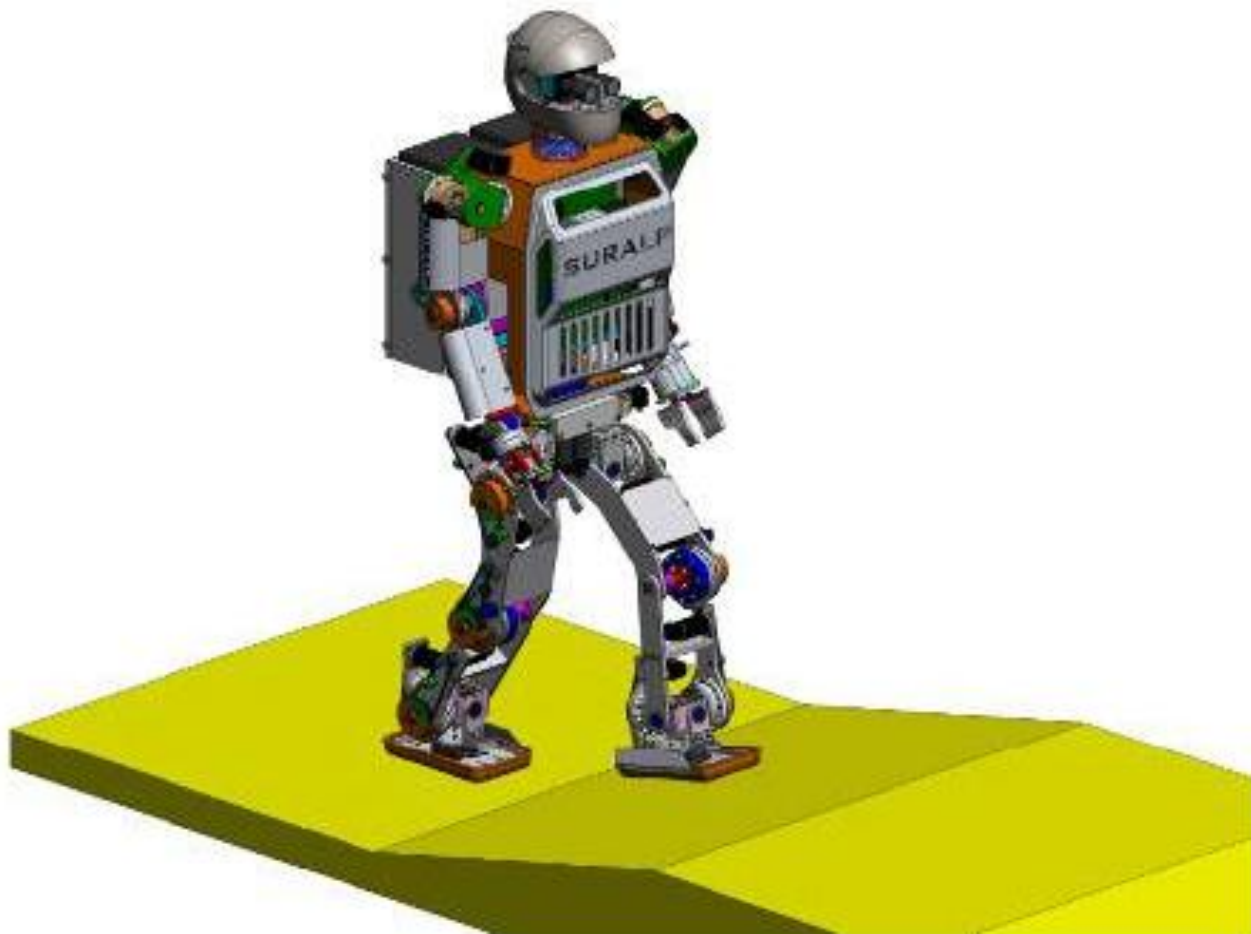


Рисунок 12 - Двуногий робот ходит по изменяющимся склонам

В некоторых подходах угол β наклона тела на рисунке 2 активно модифицируется с выгодой увеличения момента инерции робота вокруг вертикальной оси мирового каркаса. Методы компенсации момента рыскания с использованием этого факта изучаются Фудзимото и Кавамурай [33].

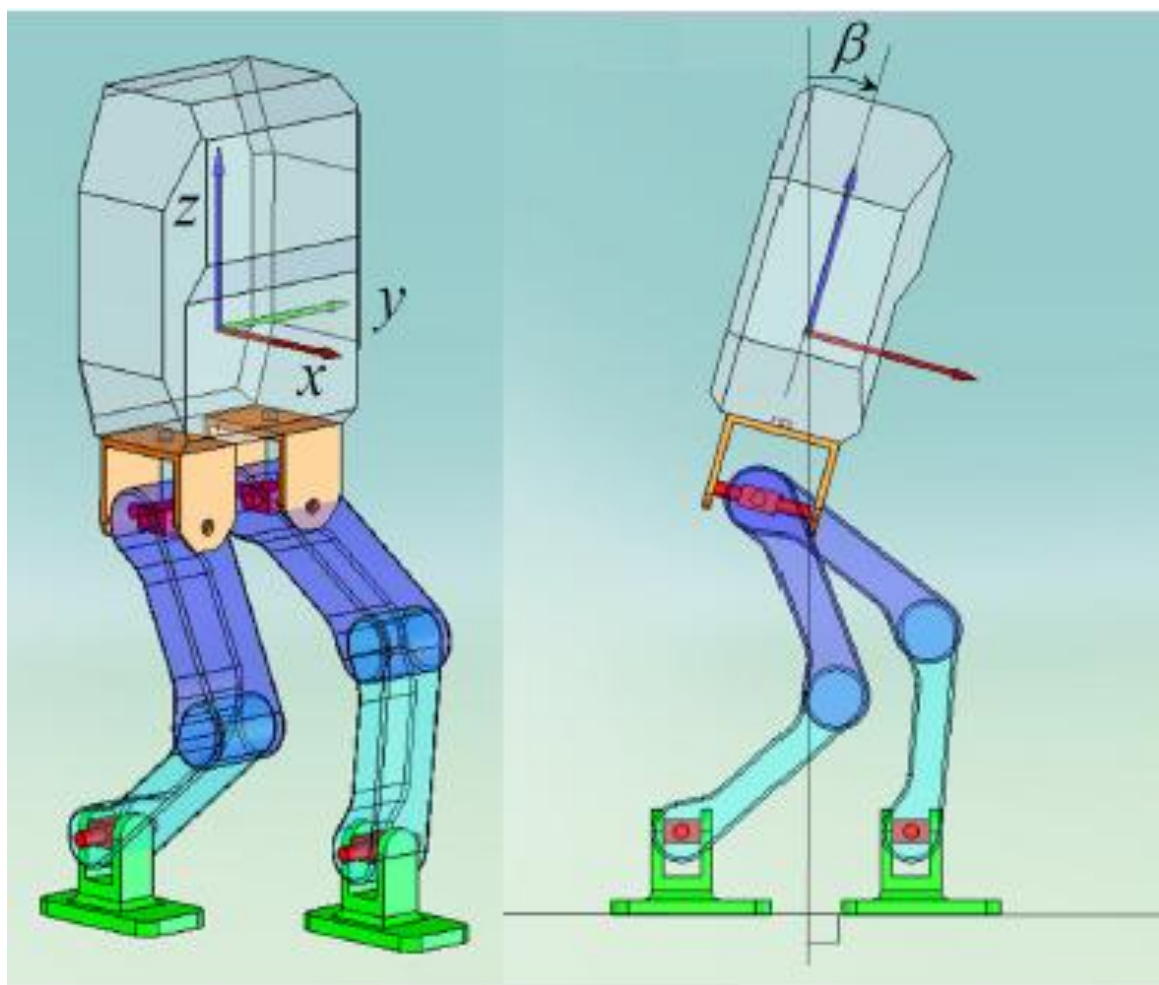


Рисунок 13 - Система координат тела и угол тела

Сохранение угла наклона тела при определенном контрольном значении также является распространенным во многих приложениях, особенно для манипуляций с объектами и взаимодействия человека и робота. В отличие от [31] и [32] используется вертикальная ориентация основного тона тела ($\beta = 0$). Мы считаем, что вертикальное положение имеет свои достоинства на склонах. Минимальное движение (предположительно тяжелого) верхнего тела вызывает только небольшое количество межцепных моментов сцепления и, следовательно, облегчает задачу управления ходьбой. Однако эта легкость достигается за счет одной степени свободы в контрольных действиях: вращательное движение верхней части тела (через независимое соединение между тазом и туловищем или через «угол наклона виртуального таза» в [32]) необходимо избегать. В этой работе мы предлагаем модификацию шагающей плоскости вращением

опор стопы вокруг оси опоры на уровне земли. Расположение этой оси в кадре координат тела определяется параметром H_{body} и смещением параметров на рисунке 3 H_{body} - постоянный опорный параметр высоты тела, используемый в методах генерации опорного сигнала на основе ZMP и LIPM. В этой работе также применяется одинаковый метод равномерного эталонного сравнения. Смещение X_{offset} это x-направленная координата центральной точки правого и левого опор стопы подошвы фрейма, выраженная в кадре координат тела. Роль этого параметра смещения состоит в том, чтобы поместить центр опорного полигона прямо ниже центра масс робота, показанного в виде круга на рисунке. 14. Чертеж левой стороны на этом рисунке показывает положение стоя, а на рисунке справа изображен робот при ходьбе на ровном полу.

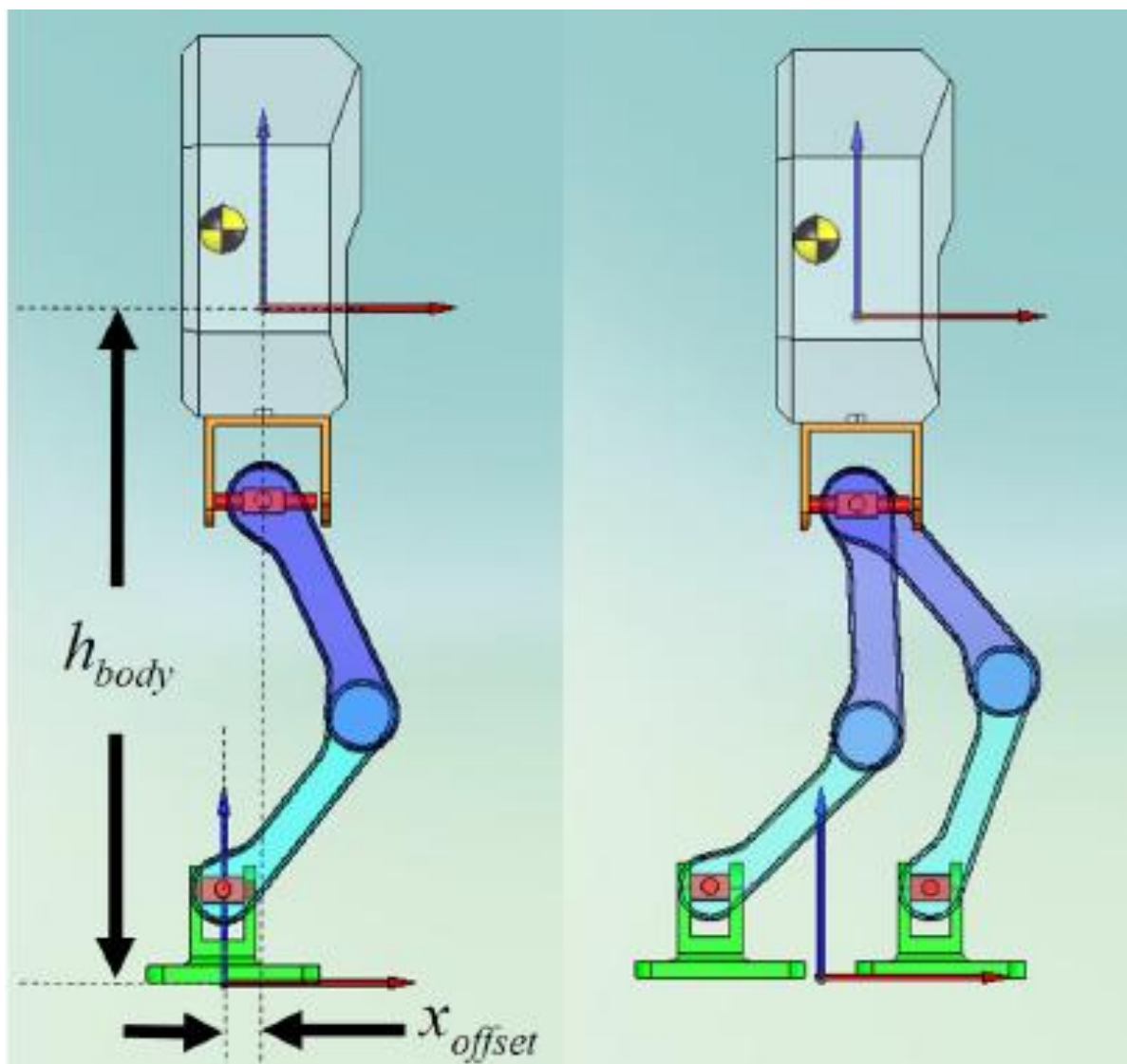


Рисунок 14 - Система координат прикреплена к центральной точке опор стопы на уровне земли. Эта система координат служит для определения вращения опор стопы для изменения шагающей плоскости

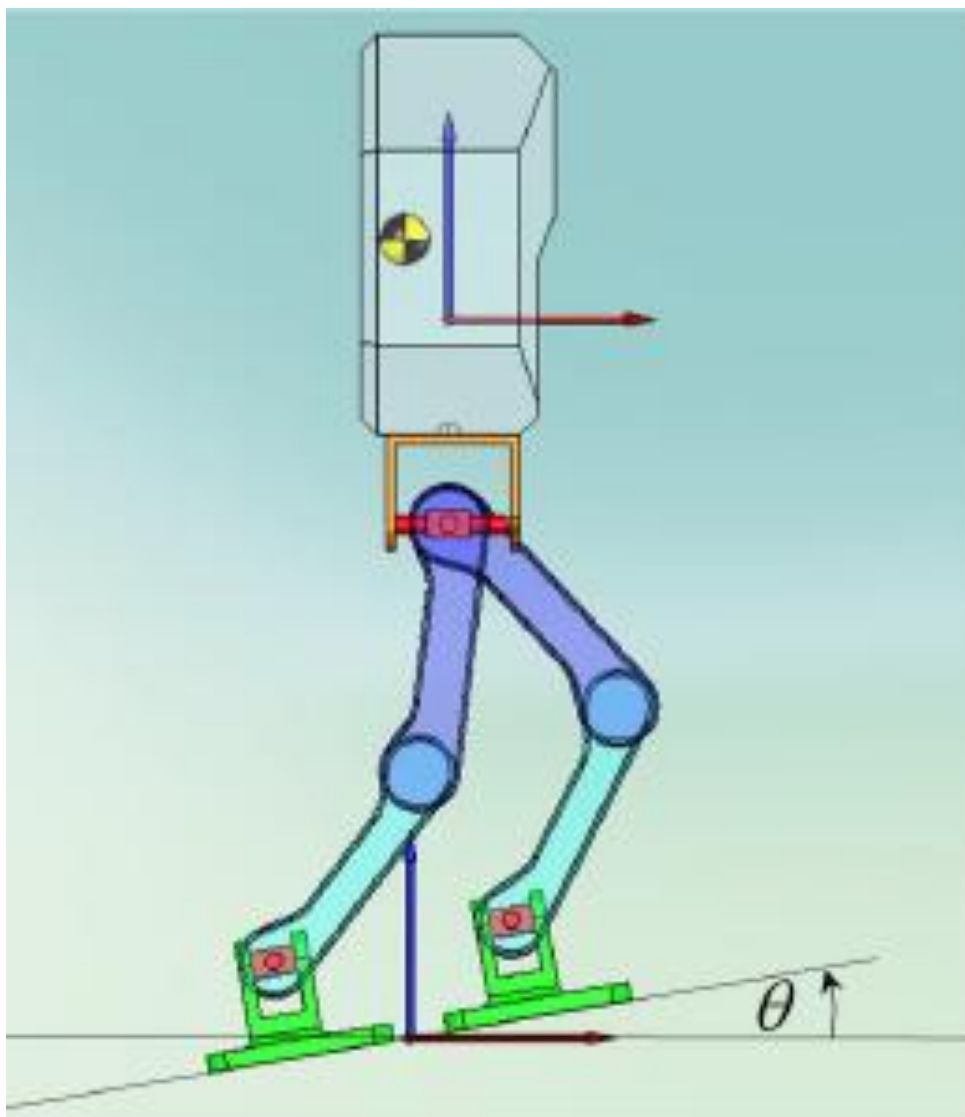


Рисунок 15 - Поворот основного механизма на θ определяет траектории движения на новой плоскости.

Расположив систему координат в центральной точке пешечной траектории с ориентацией, идентичной раме координат тела, определим угол θ на рисунке. 15 как угол поворота вокруг отрицательной оси u этого кадра. (Мы называем этот угол «угол наклона ноги».) Координаты опорной ноги (для любого времени), выраженные в этом кадре, поворачиваются в новые ссылки.

Результатом этого вращения является изменение плоскости ходьбы, без изменения ориентации тела. Следует отметить, что вращательное преобразование опор стопы - это больше, чем изменение ориентации ног. Это преобразование также изменяет направление движения стопы. После преобразования дви-

жение стопы, первоначально определенное параллельно четному полу, становится параллельным углу наклона плоскости света θ . В следующем разделе мы разработаем систему нечеткой логики, которая регулирует угол θ в режиме реального времени, вычисляя угол наклона тела β . Эта нечеткая система, дополненная дополнительным компенсатором угла наклона лапки при входном моменте голеностопного сустава, используется в качестве ходячего контроллера при изменении наклонов.

Наши симуляции и экспериментальные результаты предполагают, что угол наклона тела колеблется во время ходьбы. Даже при устойчивом и стабильном ходу траектория угла наклона тела может быть в виде периодического сигнала с пиковыми значениями в несколько градусов. Поэтому одно измерение угла может вводить в заблуждение при определении состояния равновесия робота. Для того чтобы сделать вывод о том, что робот работает с устойчивым ходовым рисунком или находится в тенденции к падению, более подходящим является среднее значение, а не мгновенное значение угла таза. Усреднение может быть сделано разными способами. Один вопрос, на который нужно ответить, связан с длиной окна усреднения. Другой проблемой является период выборки для усреднения данных. Обычно в робототехнических применениях используются времена выборки космического контроллера от одного до десяти миллисекунд. Использование длинного окна усреднения с текущего момента выборки с низким периодом выборки в порядке совместного контрольного периода выборки потребует большого объема памяти и использования вычислительных ресурсов в режиме реального времени. Существует компромисс между точностью вычисления осреднения и эффективным использованием вычислительной мощности. Используя количество выборок N , используемых в среднем вычислении, и период T_p выборки угла наклона тела в качестве параметров конструкции, среднее значение β угла наклона тела β на рисунке 14 вычисляется как

$$\beta(kT_p) = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \beta((K-1)T_p) \quad (1)$$

где k - показатель выборки. Следующие рекомендации описывают роль β в регулировке угла наклона тела, используемого в этой работе:

Когда среднее значение угла наклона тела является положительным, можно сделать вывод, что это поза, склонная к падению вперед, к направлению ходьбы. В этом случае угол наклона ступни должен быть уменьшен (и даже сделан отрицательным), чтобы толкать землю за пальцы и компенсировать гравитационный эффект наклоненного вперед тела.

Аналогично вышеизложенному руководящему указанию, когда среднее значение угла наклона тела является отрицательным, угол наклона лапки должен быть увеличен, чтобы компенсировать гравитационный эффект наклоненного назад тазобедренного звена, толкая грунт пяткой.

Два приведенных выше руководства могут использоваться различными способами для создания механизма корректировки для θ . Аналитическим соотношением между β и θ может быть один из вариантов. Метод, предложенный в этой работе, использует нечеткие системы для этого контроля. (В контексте контроля двуногого хождения модификация траекторий ходьбы с обратной связью с датчиком является наиболее распространенным управляющим действием замкнутого контура, поэтому мы также вызываем регулировку «управления»). Нечеткие системы - это естественный выбор для использования словесных описаний (Как два вышеприведенных руководства) растения или проблемы для получения механизмов контроля или адаптации. Таблица 1 и Рисунок. 16 описывают три нечетких правила, используемых при вычислении θ . В таблице 1 индекс «P» силы правила $\Delta\theta_p$ обозначает положительное значение. «Z» обозначает «нуль», а «N» означает «отрицательный». Численные значения сильных правил и угловых положений функций трапецеидального членства на рисунке 16 приведены в таблице в разделе результатов моделирования, в таблице 1. Эти значения получены методом проб и ошибок. Правила сведены в таблицу 1. Пример правила: «Правило 1: Если β отрицательное, то увеличивайте θ с приращением $\Delta\theta_p$ ». Выбор базы правил и функций принадлежности удовлетворяет условиям выше. Нечеткая логика осуществляется выражением:

$$\Delta\theta = \frac{\mu_{negative} \beta^{\Delta\theta_p} + \mu_{zero} \beta^{\Delta\theta_z} + \mu_{positive} \beta^{\Delta\theta_n}}{\mu_{negative} \beta + \mu_{zero} \beta + \mu_{positive} \beta} \quad (2)$$

В каждом цикле вычислений (с периодом T_p) параметр θ обновляется

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \Delta\theta_p \quad (3)$$

Это значение команды (ссылки), используемое как вход для вычислений обратной кинематики. «Интегрирующая формула» (3) очень полезна для адаптации к наклонным плоскостям с неизвестными склонами.

Правило силы $\Delta\theta_z$ выбрано равным нулю, и, следовательно, центральная трапецеидальная функция принадлежности на рисунке 17 представляет собой мертвую зону вокруг окрестности нулевого угла наклона тела. Эта мертвая зона помогает сходимости угла наклона ступни без управляющей активности (изменение θ) в устойчивом состоянии.

Хотя вышеописанная стратегия управления весьма успешна в постепенном и плавном изменении «опорного» шагающего поезда, для того, чтобы робот смог пережить удар в момент смены самолетов, необходим сопровождающий контроллер. В отличие от θ , который является входом для обратной кинематической подпрограммы, дополнительная управляющая переменная действует на уровне соединения, на ссылку на положение соединения опоры голеностопного сустава. Модификации шага голеностопного сустава, независимо для правой и левой лодыжек, используются для изменения этих общих положений. Это действие описано ниже. В [20] предложены контроллеры ориентации посадки для голеностопных суставов. Этот подход предполагает, что два сустава с совпадающими осями, перпендикулярными друг другу, находятся на лодыжках. На этой схеме вычисляются корректировки эталонных углов таким образом, что стопы выравниваются параллельно земле, когда они находятся в контакте с землей. Закон изменения эталона в [20] представляет собой форму фильтра первого порядка, применяемого к контактным моментам стопы. Мы также применили этот метод и для нашей системы управления. Для оси опоры голеностопного сустава мы используем следующий ссылочный закон модификации в области Лапласа.

$$\theta_{ankle}(S) = \theta_{ankle}(S) + \left(\frac{K_{ankle}}{S} + \lambda_{ankle}\right)T_{ankle}S \quad (4)$$

где s - переменная Лапласа. θ_{ankle} голеностопный сустав представляет собой опорный угол соединения опоры голеностопного сустава, вычисленный по обратной кинематике. θ_{roll} является эталонным углом наклона голеностопного сустава после эталонной модификации. T_{ankle} - это крутящий момент вокруг оси крена из-за взаимодействия ноги с землей. Предполагается, что этот крутящий момент измеряется датчиками крутящего момента, расположенными на лодыжке в экспериментальной работе, и легко доступен в наших расчетах моделирования

Таблица 1 – Правила нечеткой логики

Negative β	$\Delta\theta_z$ Правило 1
Zero β	$\Delta\theta_z$ Правило 2
Positive β	$\Delta\theta_z$ Правило 3

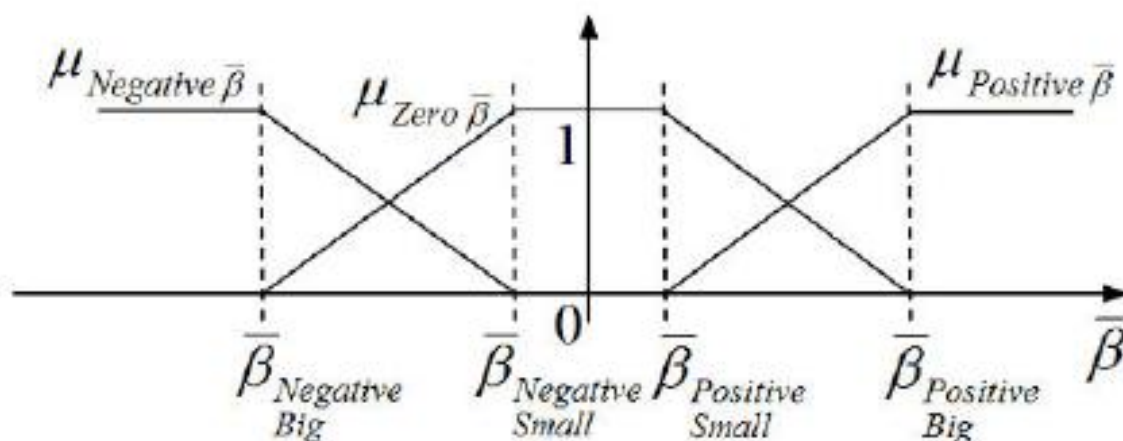


Рисунок 16 – Функции принадлежности

K_{ankle} и λ_{ankle} являются фильтрами нижних частот, которые определяются методом проб и ошибок в нашем подходе. В цифровой реализации функция переноса области Лапласа в (4) аппроксимируется разностным уравнением. Мы

использовали технику аппроксимации Тастина для получения разностного уравнения. Когда нога контактирует с землей только с углом или краем, крутящий момент развивается и с применением (4) ссылки на угол соединения скорректированы таким образом, чтобы поворачивать лодыжку, чтобы обеспечить ориентацию стопы параллельно земле. Когда нога касается только наклонной плоскости пальцами ног, эффект этого уравнения состоит в том, чтобы повернуть соединение опоры голеностопного сустава до тех пор, пока нога не окажется в контакте с обеими плоскостями, исходной и недавно коснутой наклонной плоскостью. При применении вместе с нечетким контроллером в (1-3) это движение обладает поглощающей силой природой, которая позволяет переходы плоскости на плоскость без падения. В следующем разделе представлены результаты моделирования с рассмотренными выше контроллерами.

1.4 Моделирование

Двуногая модель, используемая в симуляциях, состоит из двух 6-DOF-ног и магистрали, соединяющей их. Три суставных оси расположены на бедре. Два сустава находятся на лодыжке и один на колене. Численные значения различных параметров динамики взяты для сопоставления экспериментального робота-гуманоида SURALP (лабораторная платформа Robotic ReseArch University Sabanci) [14,18] (рисунок 17, таблица 2). Этот робот оснащен комбинированными датчиками, инклинометром на его торсе, датчиками силы шестерки на ее лодыжках и запястьях, двумя камерами CCD во главе. Детали алгоритма моделирования можно найти в [20].

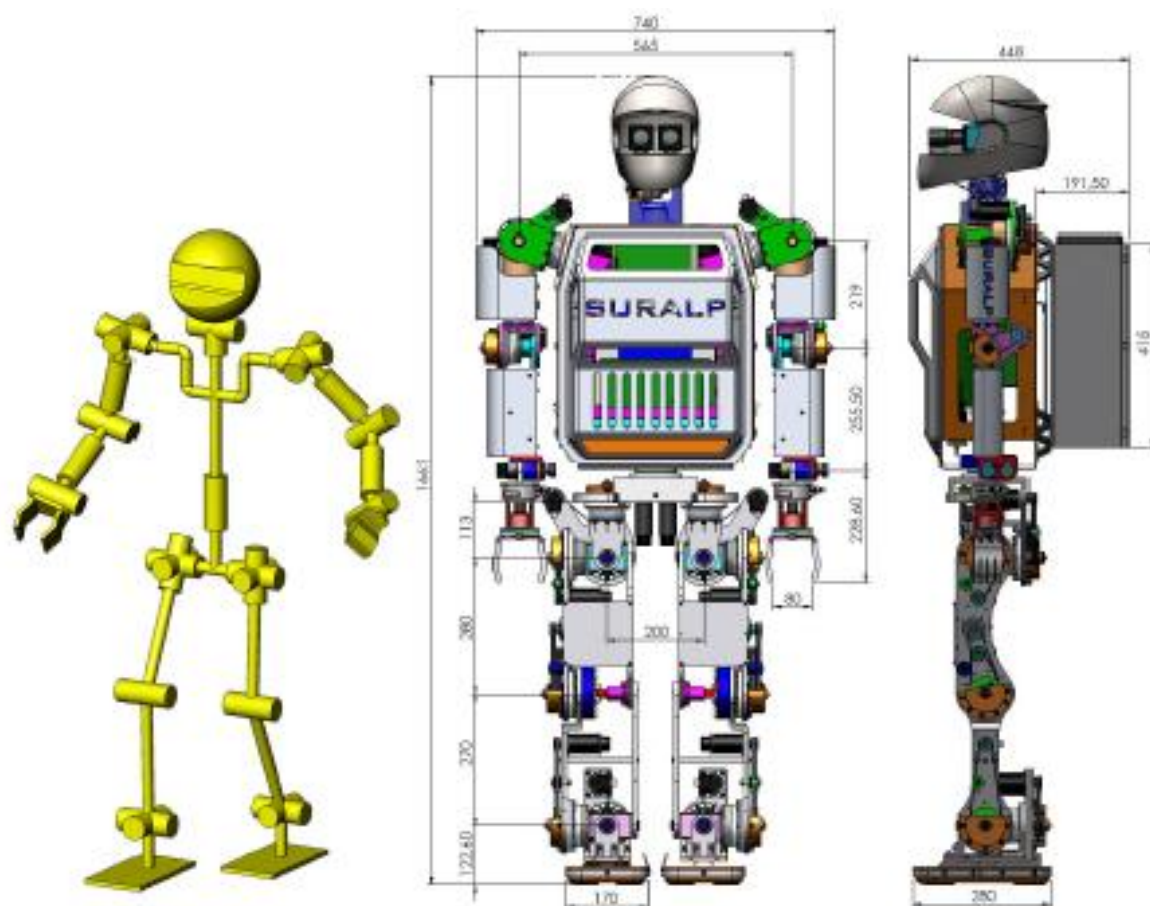


Рисунок 17 - Кинематическая компоновка SURALP

Производится эталонное тестирование ходьбы на ровном полу, как в [14]. Параметры, используемые для генерирования эталонов, представлены в таблице 3. Алгоритм управления является простым, основанным на независимых совместных регуляторах положения ПИД-регулятора.

Таблица 2 - Параметры робота

Длина верхней ноги	280 мм
Длина нижней ноги	270 мм
Расстояние между подошвами и лодыжкой	124 мм
Размеры стопы	240 мм x 150 мм
Длина верхней руки	219 мм
Длина нижней руки	255 мм
Масса робота	114 кг

Ссылки на общую позицию генерируются с помощью обратной кинематики из CoM и опорных стоп опор в глобальных системах координат. Прирост ПИД-регулятора достигается методом проб и ошибок. Используемое время моделирования и время цикла ПИД-регулятора составляют 0,5 миллисекунды. Однако время цикла подпрограммы нечеткой адаптации установлено равным 200 миллисекундам. Значение числа выборок, N , в (1) равно 20. Дополнительные параметры системы управления в (1-4) представлены в таблице IV. Результаты моделирования, полученные с помощью этой системы управления, показаны на рисунках 19, 20, 21, 22.

Таблица 3 - Параметры генерации траектории

Одиночный период поддержки	0,6 с
Двойной период поддержки	0,9 с
Задание критерия стабильности в направлении у	8 см
Движение критерия стабильности под подошвой	4 см
Размер шага	10 см
Высота ступеньки	2,5 см

Ходовая поверхность среды моделирования содержит две части: ровную поверхность и плоскость, наклоненную на 5,6 градуса (10% погрешность).

Таблица 4 - Правила нечетной логики

Правило	Числовое значение (Градусы)	Угол	Угловое числовое значение (градусы)
$\Delta\theta_P$	0.5	$\beta_{negative\ big}$	-5
$\Delta\theta_Z$	0	$\beta_{negative\ small}$	-0.25
$\Delta\theta_N$	-0.5	$\beta_{positive\ big}$	0.25
		$\beta_{positive\ big}$	5

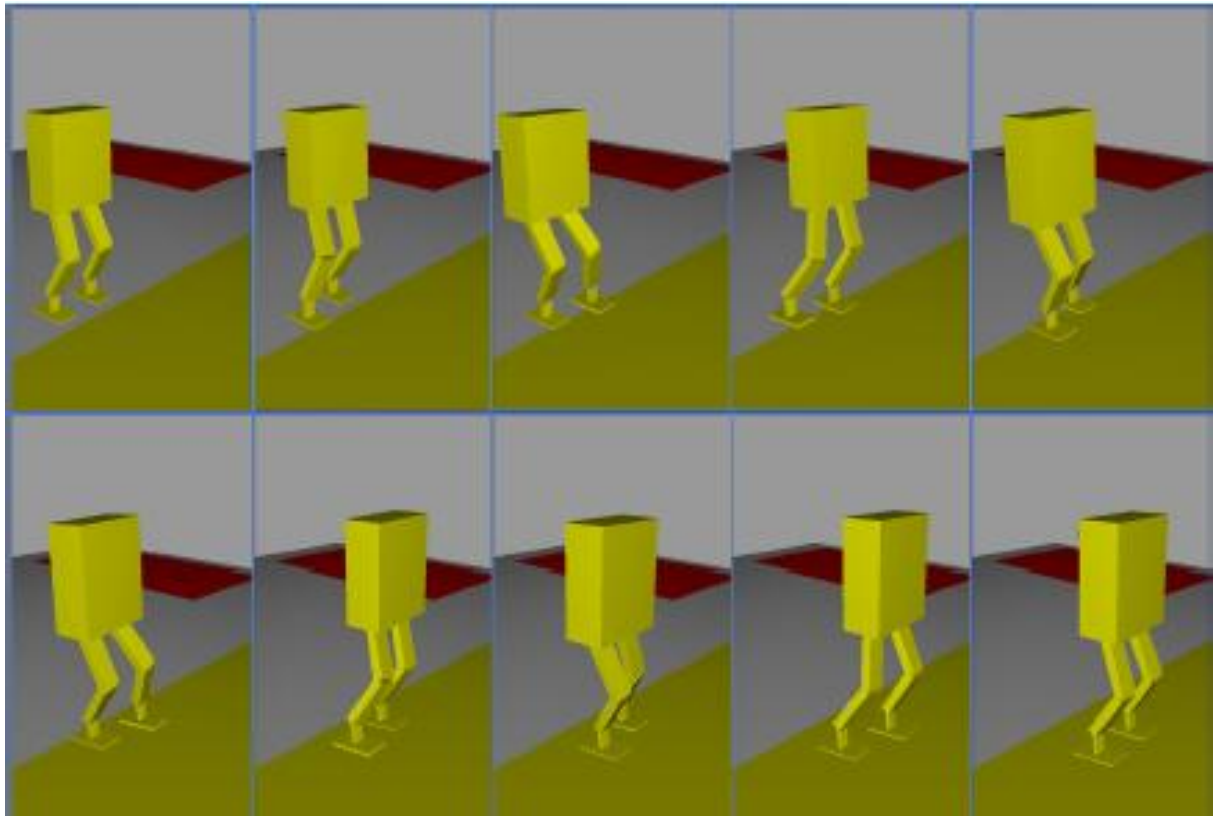


Рисунок 18 - Робот в движении от ровной земли до наклонной плоскости

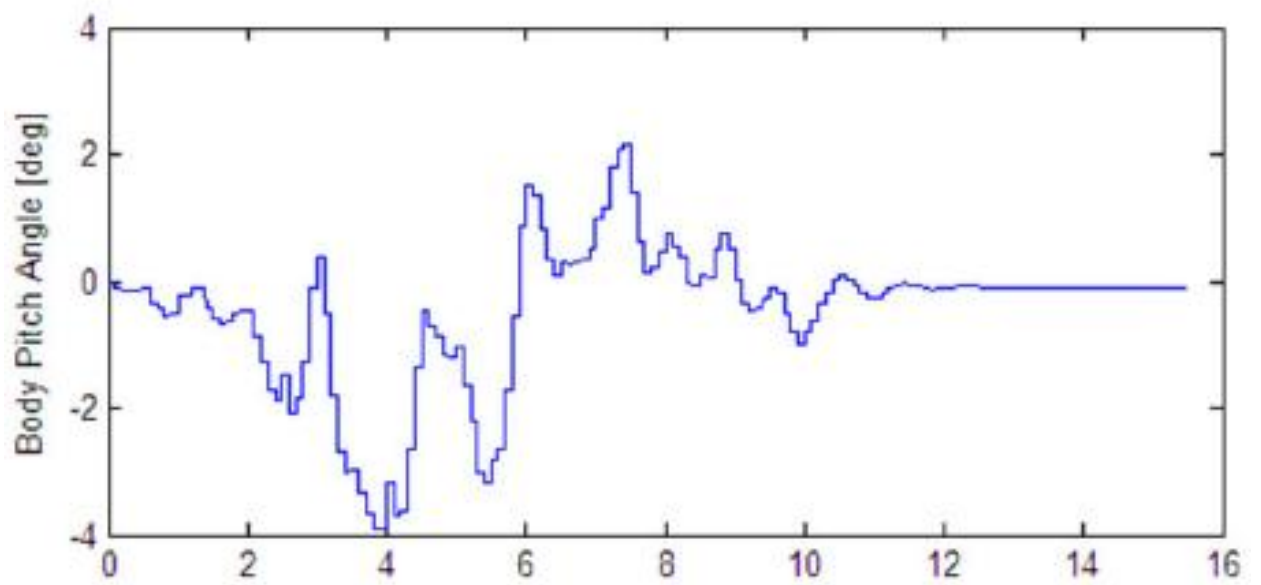


Рисунок 19 - Углы тела робота во время моделирования

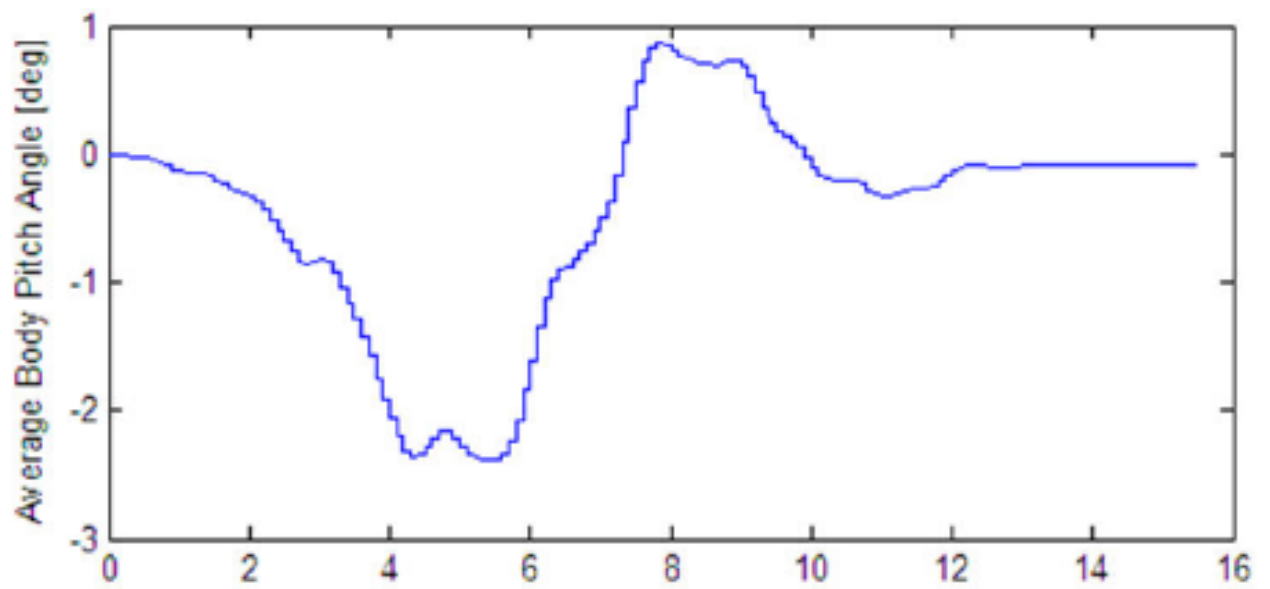


Рисунок 20 - Углы тела робота во время моделирования

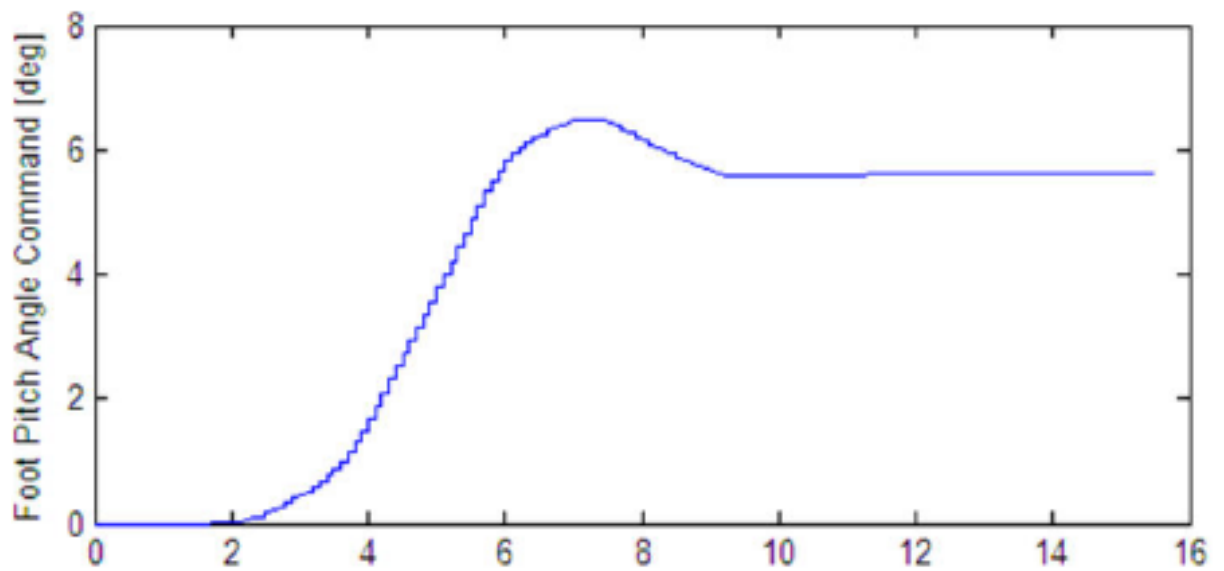


Рисунок 21 - Углы ног во время моделирования

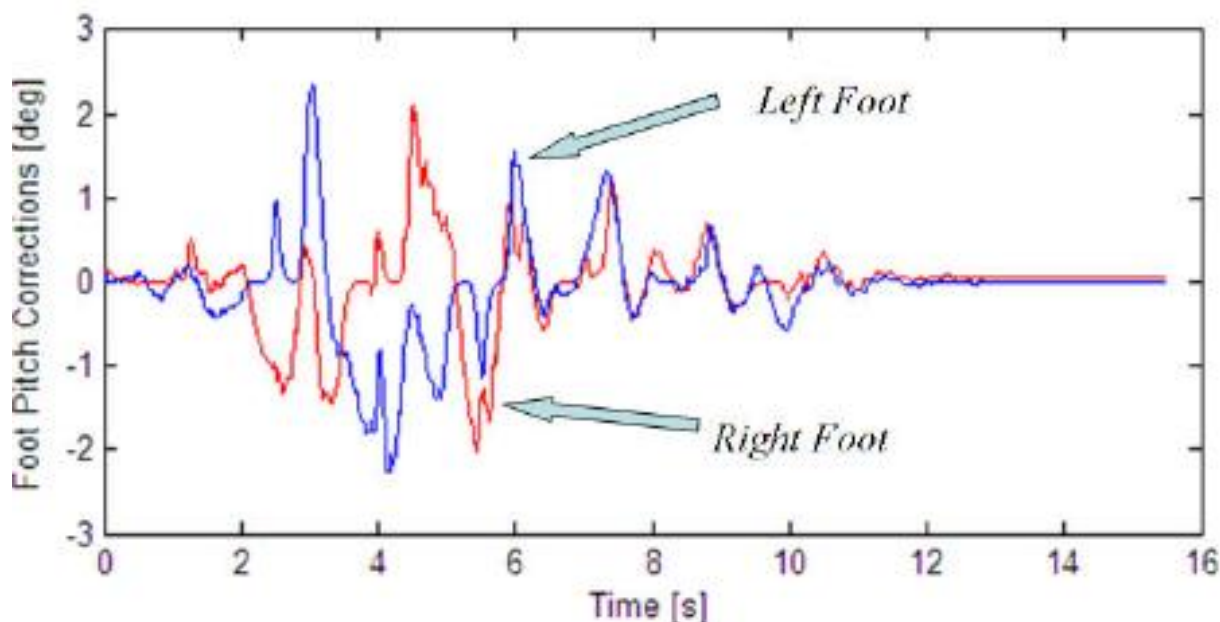


Рисунок 22 - Углы ног во время моделирования

Снимки робота из окна моделирования показаны на рисунках 18-22. Изначально моделирование начинается с робота в вертикальном положении на расстоянии 12 см от наклонной плоскости. Это видно из рисунка 18 видно, что робот доходит до наклонной плоскости приблизительно через 2 секунды с момента начала ходьбы. График β (рисунок 20) показывает, что среднее колебание верхней части робота в этот период мало. После установления контакта с наклонной плоскостью β изменяется значительно быстрее. Система адаптации нечетких параметров действует в соответствии с нечеткой базой правил и находит соответствующий угол θ (рисунок 21).

Этот угол сначала увеличивается в ответ на отрицательные значения β и быстро сходится после полного перехода на наклонную плоскость. Самый нижний график на рисунке 22 показан угол коррекции угла наклона голеностопного сустава, вычисленный по формуле (4). Можно заметить, что при выполнении плоскости наклона сначала требуется большее количество исправлений. Необходимость исправления исчезает по ходу движения на наклонной плоскости. Моделирование также выполняется с 15% -й оценкой, и роботу удалось сохранить равновесие и подняться на плоскость наклона, хотя ноги опирались назад на отдельных этапах поддержки. Исследования по моделированию

проводятся путем деактивации нечеткой адаптации и коррекции углов сочленения дополнительного голеностопного сустава. Отмечается, что робот не может подняться на наклонную плоскость с наклоном 10% и падает при отсутствии какого-либо контроллера.

Двуногая походка по неровным поверхностям является важной областью исследований. Наклонные плоскости обычно встречаются в нашей среде обитания. Этот случай изучен в этой работе. Предложены система управления нечеткой логикой для ориентации шага тела и дополнительного регулятора коррекции угла сочленения шага голеностопного сустава. Модель 12-DOF двуногого ходунка используется в моделированиях, которые демонстрируют эффективность алгоритма адаптации в различных условиях склона. Результаты моделирования показывают, что система управления успешно добивается устойчивого шага при переходе от горизонтальной плоскости к наклонной с уровнем до 15%. Наше будущее исследование мотивировано на реализацию алгоритма на нашем человекоподобном роботе

2 Анализ функциональной схемы управления

2.1 Общие сведения

Антропоморфный (человекоподобный) робот AR-101M высокотехнологичное электромеханическое изделие, правдоподобно имитирующее основные движения человеческого тела. Включая подлинное (с отрывом стопы от поверхности) прямохождение, спортивную, танцевальную и ряд иных деятельности. Поставляется в сборе готовым к использованию.

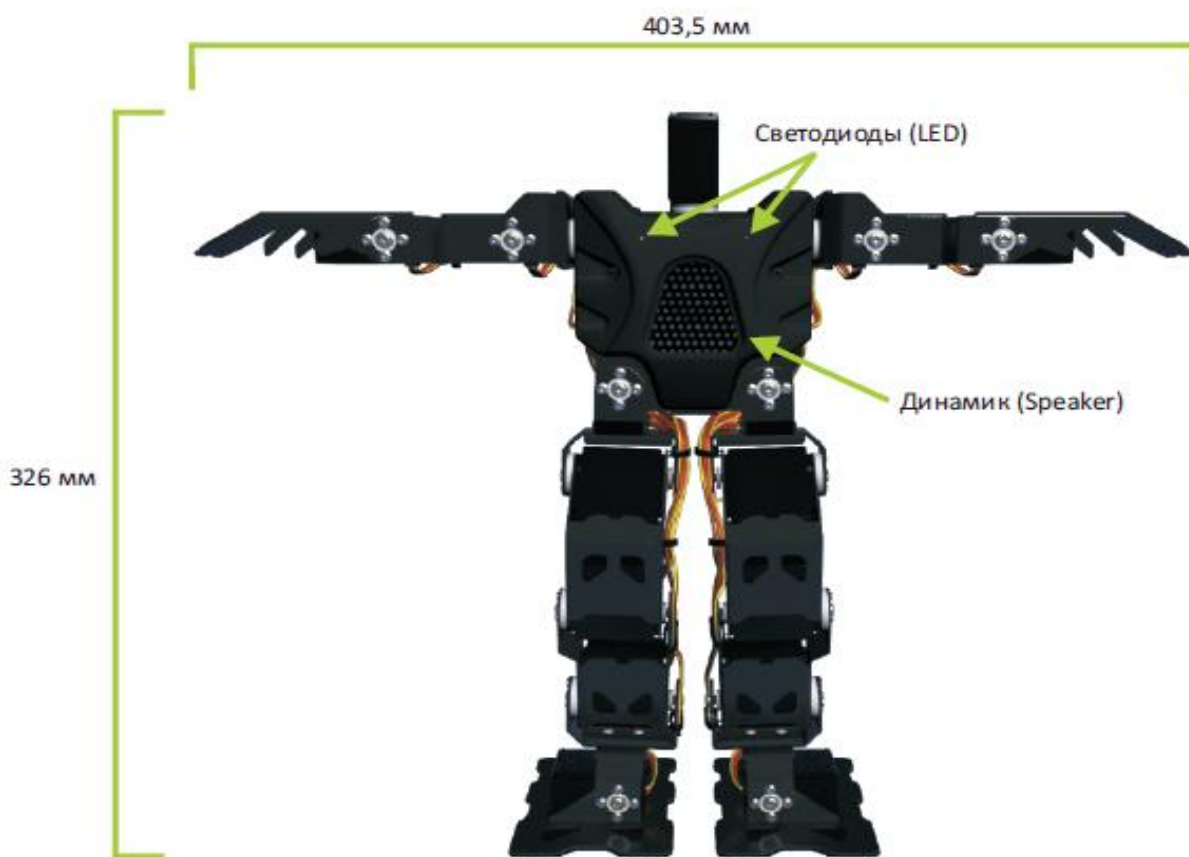


Рисунок 23- Общий вид антропоморфного робота AR-101M

Состоит из 16 (17) сервомоторов, управляемых программируемым контроллером, элементов питания и набора связующих и несущих элементов. Роботом можно управлять с помощью компьютера (программное обеспечение прилагается), либо вручную (при наличии пульта дистанционного управления). Связь с компьютером осуществляется - по радиоканалу (Bluetooth v.1.2), либо

через проводное USB-соединение. Возможно расширение возможностей робота дополнительным оборудованием - ПДУ (пульт дистанционного управления), гироскопы, сенсоры движения, расстояния, датчик температуры и влажности. Общий вид показан на рисунке 23.

2.1 Разработка функциональной схемы

Функциональная схема управления антропоморфным роботом (рисунок 24) с множеством степеней свободы включает в себя: управляющий контроллер, сервопривод а также датчики. Для того чтобы функциональная схема стала замкнутой, следует использовать датчики различного назначения (в зависимости от выполняемых задач).

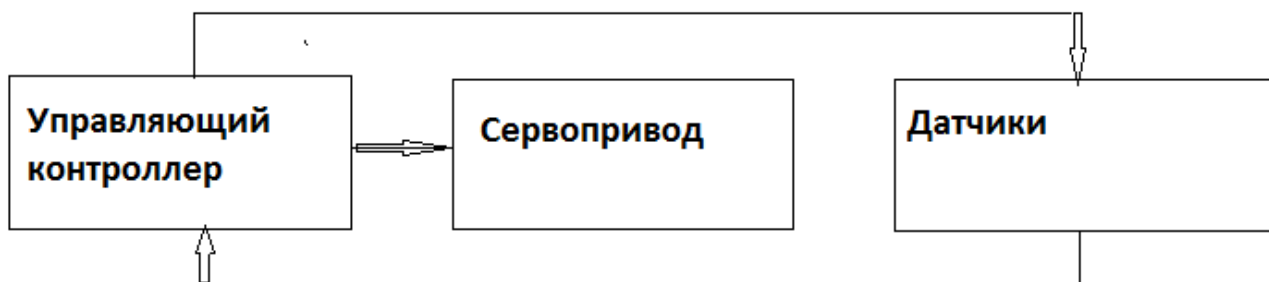


Рисунок 24 – Функциональная схема управления

Теперь нужно рассмотреть подробнее каждый блок функциональной схемы управления робота с множеством степеней свободы. Главным компонентом в этой системе является микроконтроллер.

2.1 Описание управляющего контроллера

Контроллер МК-66. Внешний вид платы показан на рисунке 25 и рисунке 26. Количество управляемых сервоприводов: до 24 (в зависимости от конкретной модели);



Рисунок 25 - Контроллер МК66

- Внутренняя память: 512 Кб (312 КБ доступно пользователю);
- Количество портов ввода/вывода (I/O): 40;
- Количество базовых операций: 128;
- Тактовая частота процессора: 60 Mhz;
- Скорость выполнения микрокоманд виртуальной машины: 100 тыс. в секунду;
- Разрядность виртуальной машины: 32 бита;
- Количество переменных виртуальной машины: 255 (int32);
- Количество каналов АЦП: 8;
- Каналы подключения RF/IR приемника: 1;
- Каналов аудио выхода: 1;
- Каналов I2C: 1;
- Каналов SPI (MMC Card): 1;
- Каналов Open Drain (LCD): 1;
- Каналов управления внешним светодиодом: 1;
- Каналов UART (ESD-100): 1;
- Интерфейс сопряжения с PC: USB 1.1 / 2.0 @1 mbit/s;
- Напряжение питания внешних устройств: 5 / 3.3 В;
- Напряжение питания процессора: 3.3 В;

-
- The diagram illustrates the layout of the MK-66 board with the following components and connections:
- Top Left:** A circular connector with 8 pins: SP+, SCK, GND, GND, GND, GND, GND, GND. Below it, a row of 8 pins: nc, MISO, +3.3, +3.3, +5, +5, +5, +5. At the bottom, a row of 8 pins: SP-, MOSI, CS, SDA, SDA, ODR, LED, IR/RF.
 - Top Center:** A square connector labeled **USB**.
 - Top Right:** A circular connector with 8 pins: GND, GND, GND, GND, GND, GND, GND, GND. Below it, a row of 8 pins: +5, +5, +5, +5, +5, +5, +5, +5. At the bottom, a row of 8 pins: AD1, AD2, AD3, AD4, AD5, AD6, AD7, AD8.
 - Left Side:** A vertical strip of 12 pins labeled S1 to S12. Each pin is connected to GND and VBAT.
 - Right Side:** A vertical strip of 12 pins labeled S13 to S24. Each pin is connected to GND and VBAT.
 - Center:** A square component labeled **CPU**.
 - Bottom Left:** A circular connector with 2 pins: +VBAT, -VBAT.
 - Bottom Center:** A rectangular component labeled **МК-66**.
 - Bottom Right:** A circular connector with 2 pins: +VBAT, -VBAT.
 - Annotations:**
 - An arrow points to the center of the board with the text: "гнездо для подключения Bluetooth ESD100/110 - модуля".
 - A rectangular box is located to the right of the CPU component.
 - An oval box is located below the CPU component.

- Разъемы S1-S24 используются для подключения сервоприводов;
- Разъемы AD1-AD8 используются для подключения дополнительного оборудования, такого как гироскопы, сенсоры движения, сенсоры расстояния;
- Порт IR/Rf служит для подключения ИК/Радио приемника;
- Порт LED служит для подключения светодиодных ламп;
- Разъемы SDA используются для шины I2C;
- Разъемы CS и MOSI используются для подключения Flash памяти;
- Порт Sp служит для подключения динамика;
- +Vbat/-Vbat используются для питания платы.

Антропоморфный робот AR-101M управляется контроллером семейства ARM7: NXP LPC2138FBD64 который изображен на рисунке 27.

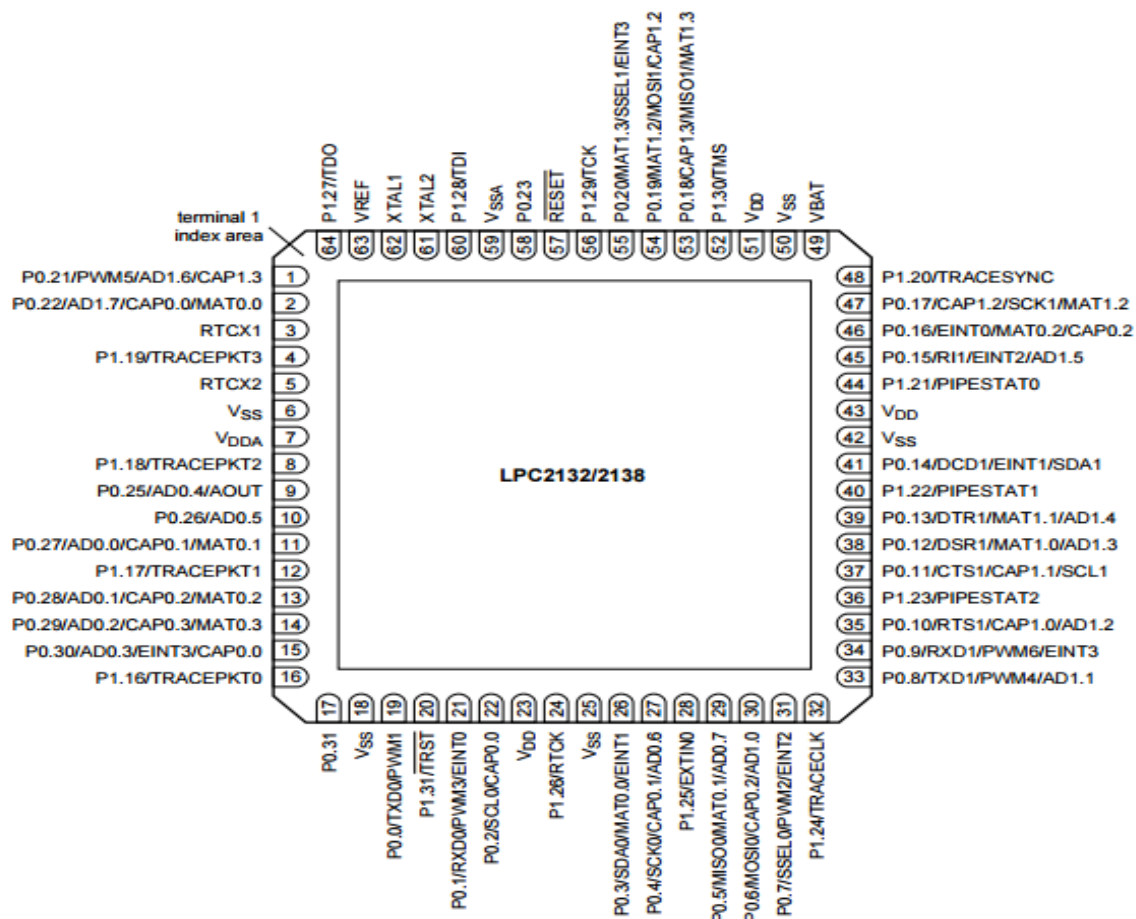


Рисунок 27 - Внешний вид микроконтроллера NXP 2138

Главной задачей этой работы является разработка системы управления группой сервоприводов робота. Задача является крайне сложной в связи с отсутствием программы запуска и настройки, которую предоставляет завод изготовитель. В этой работе я постарался обойти программу, записанную заводом изготовителем. Микроконтроллер семейства ARM7 NXP 2138 достаточно распространен. Для того чтобы моделировать контроллер я воспользовался программой PROTEUS 8. Контроллеры семейства ARM7 могут быть запрограммированы на языке Си, для этого я использовал подходящий компилятор Keil Uvision 5.

3 Управление серводвигателями с помощью микроконтроллеров

Серводвигатели - это тип электромеханических приводов, которые не вращаются постоянно, как DC / AC или шаговые двигатели, а перемещаются в определенное положение и сохраняют его. Они применяются там, где не требуется непрерывное вращение. Сервоприводы применяют там, где необходимо перейти к конкретной позиции, а затем остановиться и сохранять положение. Функциональная схема изображена на рисунке 28. Сервопривод в свою очередь состоит из: двигателя (М) преобразователя (ПР), регулятора тока (РТ), датчика скорости (ДС), регулятора скорости (РС), датчик угла (ДУ) и цифровой регулятор положения (ЦРУ)

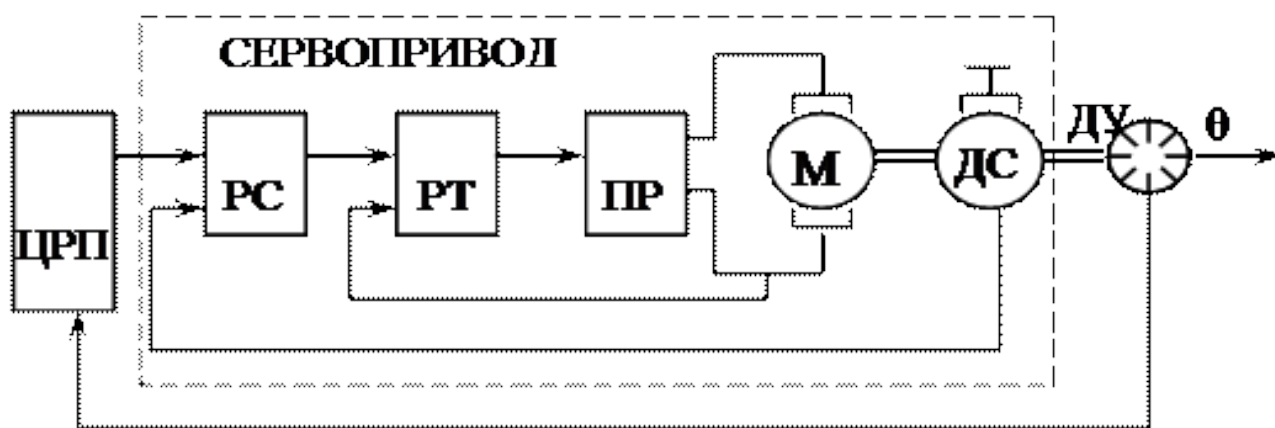


Рисунок 28 – Функциональная схема сервопривода

В сервоприводах также используется механизм обратной связи, поэтому он может обрабатывать ошибки и при позиционировании их исправить. Такая система называется следящей. Таким образом, если внешние силы оказывают воздействие на привод и отклоняют его, то сервопривод будет применять силу в противоположном направлении и попытается исправить ошибку. Сервоприводы применяются также для контроля руля RC- автомобилей, робототехники и т.д. Существует много видов сервоприводов, в этой работе мы сосредоточимся на малых сервоприводах так называемых hobby. Hobby двигатель и его механизм управления встроен в один блок. Подключение осуществляется с помо-

щью трех соединительных проводов. Мы будем использовать сервопривод DS14 внешний вид сервопривода DS14 изображен на рисунке 29.



Рисунок 29 - Внешний вид сервопривода DS14

Управлять сервоприводом легко с помощью микроконтроллера, не нужно никаких внешних драйверов. Как показано на рисунке 17, подавая управляющий сигнал сервопривод будет позиционировать на любой заданный угол. Частота управляющего сигнала обычно 50 герц (т.е. период 20 мс), а длительность импульса задает величину угла.

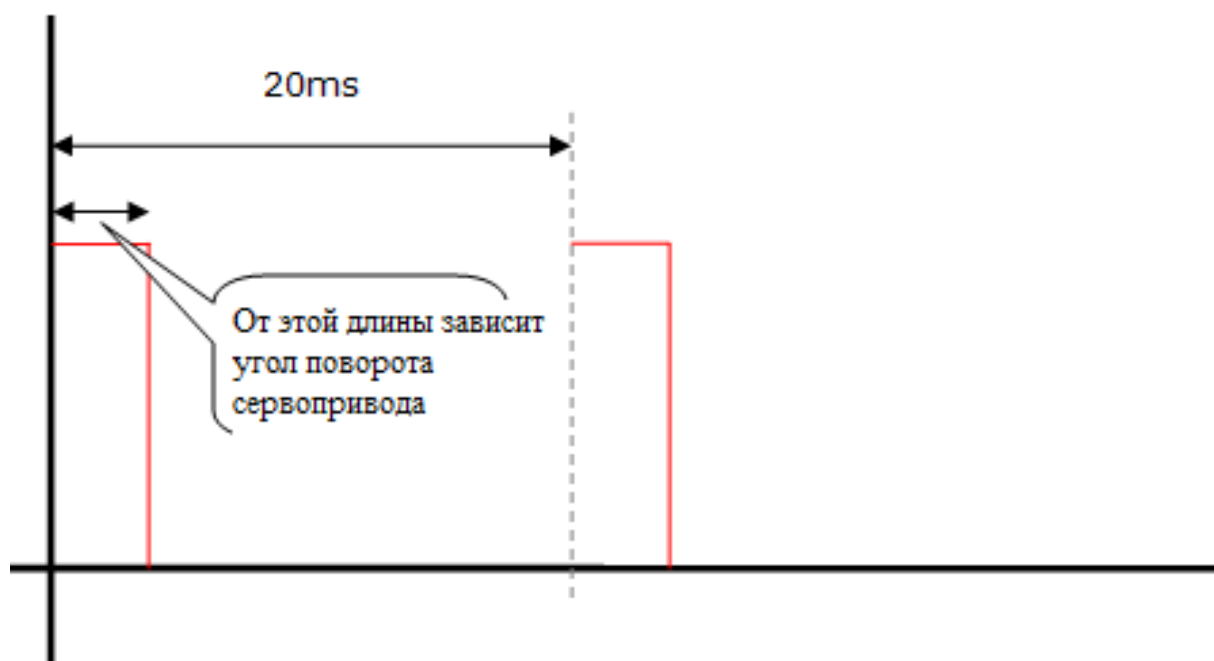


Рисунок 30 - Управление сервоприводом с помощью ШИМ

Сервопривод управляется подачей на него прямоугольных импульсов по сигнальной линии с частотой около 50Гц, амплитудой не менее 3.3В (часто не менее 4.8В), шириной стандартно от 1000 до 2000мкс, что соответствует стандартным крайним положениям. Обычно реальный диапазон может быть чуть шире (например, 900-2100мкс), но это уже на усмотрение конкретного производителя сервоприводов. Распиновка разъема. Три провода черный (коричневый), красный, белый (желтый) - соответственно земля, питание и управляющий сигнал (ШИМ).

3.1 Принцип работы программы управления двигателем.

Для понимания работы программы возьму пять сервоприводов. Для управления сервоприводами будем использовать 16 битный таймер T1. В счетном регистре сформировано 50 Гц при помощи канала А будут формироваться импульсы OCR1A для сервоприводов. На рисунке 31 наглядно изображено, как управлять большим количеством сервоприводов, углы перемещения каждого сервопривода представим на временной диаграмме.

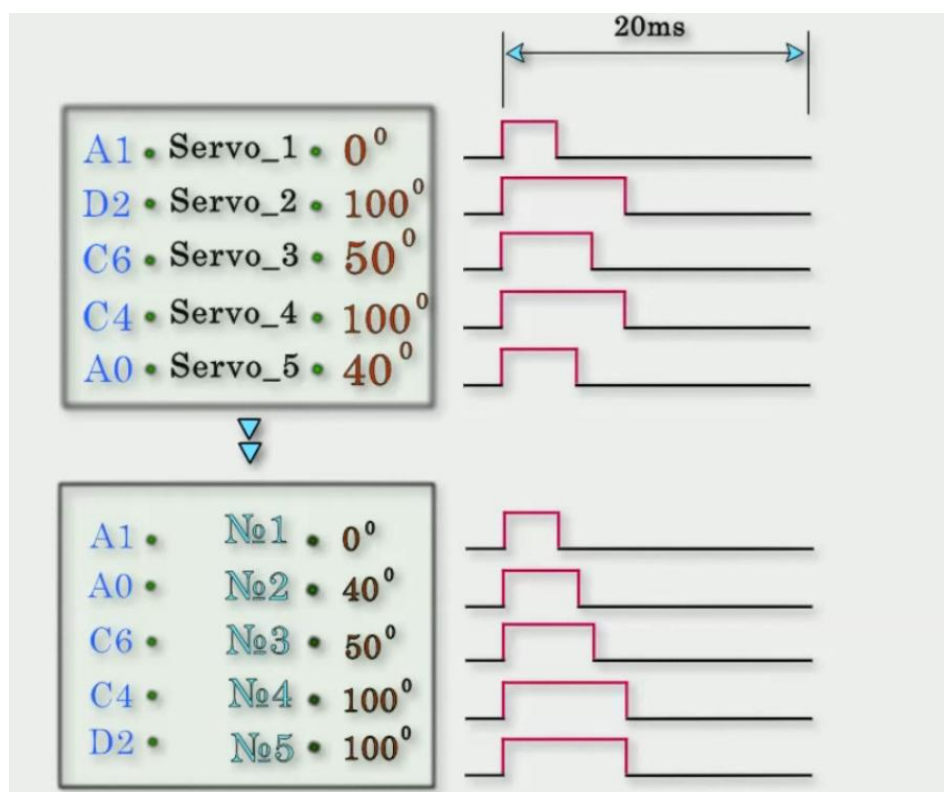


Рисунок 31 - Временная последовательность формирования импульса

Согласно диаграмме, мы видим, что начало формирования импульса для каждого сервомотора одинаково. Продолжительность может быть разной в зависимости на какой угол перемещается сервопривод. Получается, что мы можем выставить в высокое состояние порты к данным сервоприводам сразу. Так формируем начало импульса для сервопривода. Поскольку время изменения импульса происходит от меньшего к большему, данные по углам сдвига сервопривода мы должны отсортировать по возрастанию от меньшего к большему.

После сортировки, мы видим временную последовательность формирования импульса для каждого сервопривода. В программе придется объединить приводы с одинаковыми углами. Углы отклонения могут быть одинаковыми, а порты разными. Теперь данные только для 4 приводов. Как показано на рисунке 19 для получения импульса, следует загружать данные угла по порядку, в канал сравнения А. Рассмотрим алгоритм работы программы: Как только сработает прерывание в счетном регистре, выставляем для всех электродвигателей «начало импульса», простыми словами выставляем высокий уровень на портах относящихся к сервоприводам.

В канал сравнения А записываем первое значение завышения импульса, таймер начинает считать, срабатывает прерывание по совпадению канала А, считываем какой порт выключить, тем самым мы формируем импульсы для сервоприводов к данному углу перемещения.

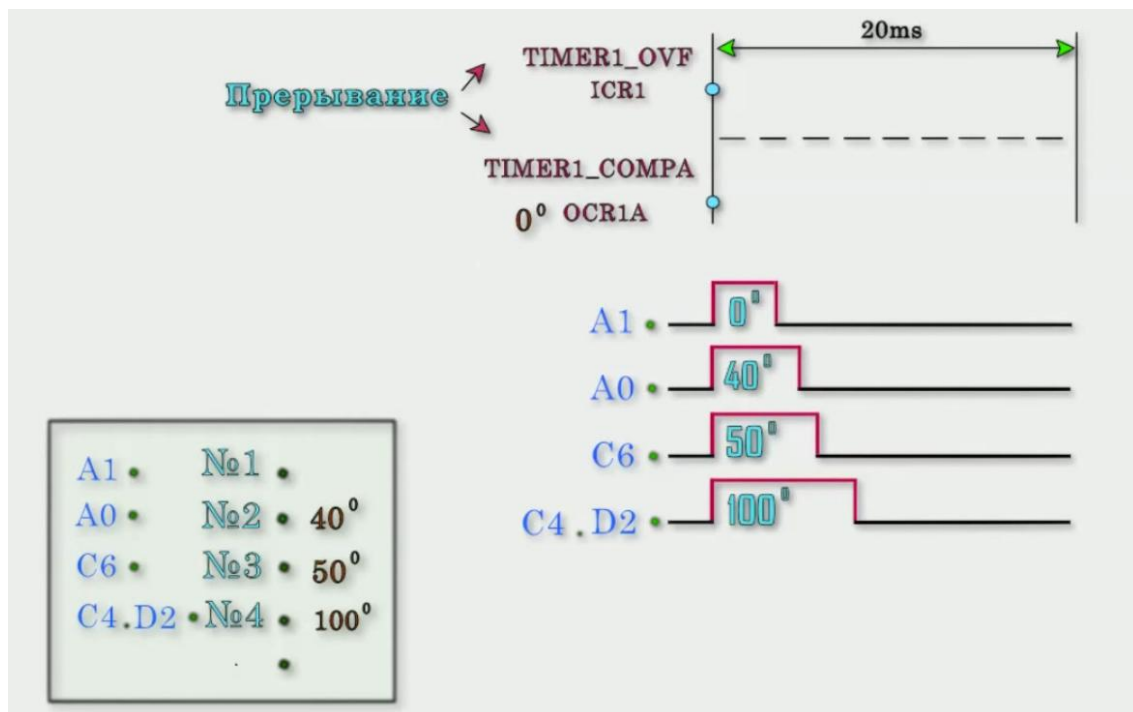


Рисунок 32 - Формирование импульсов

Загружаем новые данные в канал сравнения А, счет продолжается до следующего хода по совпадению, и так все данные по порядку, затем весь процесс начинается заново. Гораздо сложнее реализовать этот процесс программно, потому что требуемая программа должна выполнять другие задачи.

В самом начале задаем максимальное количество сервоприводов используемых в проекте, в моем случае это 17. Указав максимальное количество электроприводов, задаем на какой порт разместили каждый электропривод. Нумерация сервоприводов происходит с 0 по 16. Размещать сервоприводы можно на 4 порта, а именно порт В, С, D, А. Для простоты назначения и пина порта нужную информацию задаем в шестеричном исчислении.

Первый сервопривод размещаем на порт А пин 6 , второй на порт В пин 0 и так указываем данные по портам для всех сервоприводов. Следующим этапом задаем начальные данные угла перемещения для каждого сервопривода. В са-

мой программе задаем данные для любого сервопривода, задавать нужно не угол, а число от 40 до 240. Число 40 эквивалентно перемещению на 0 градусов, соответственно 240 на 180 градусов.

В программе нужно будет использовать 2 функции. Рассмотрим, что там происходит. В одной из функций происходит начальная установка. Поскольку сервоприводы размещаются на порт микроконтроллера, естественно для нормальной работы нужно данные порты настроить. Не нужно переопределять направление каждого порта относящегося к сервоприводу. В программе реализовано выявление порта и пина для сервопривода на входе и переопределяет на выход самостоятельно данные порты. Простыми словами программа делает начальную установку по портам. В зависимости от частоты такта микроконтроллера, задаем число в программе. Для LCP2138 это 250.

Рассмотрим основную функцию, в которой происходит работа с данными сервоприводов. Обработка функции происходит один раз через каждые 50 ГЦ. Программа выполняет сортировку по возрастанию углов перемещения сервоприводов. Для достижения максимального быстродействия процесса, выполняется при помощи указателей. Поскольку приходится сортировать массив данных по портам и углам сервоприводов, также была применена ускоренная сортировка данных, а именно пузырьковая сортировка массива

3.2 Методы управления сервоприводами с микроконтроллерами

В процессе работы мною была подготовлена программа управления сервоприводами в среде Proteus, однако я столкнулся с проблемой нехватки входов для подключения сервоприводов в микроконтроллере.

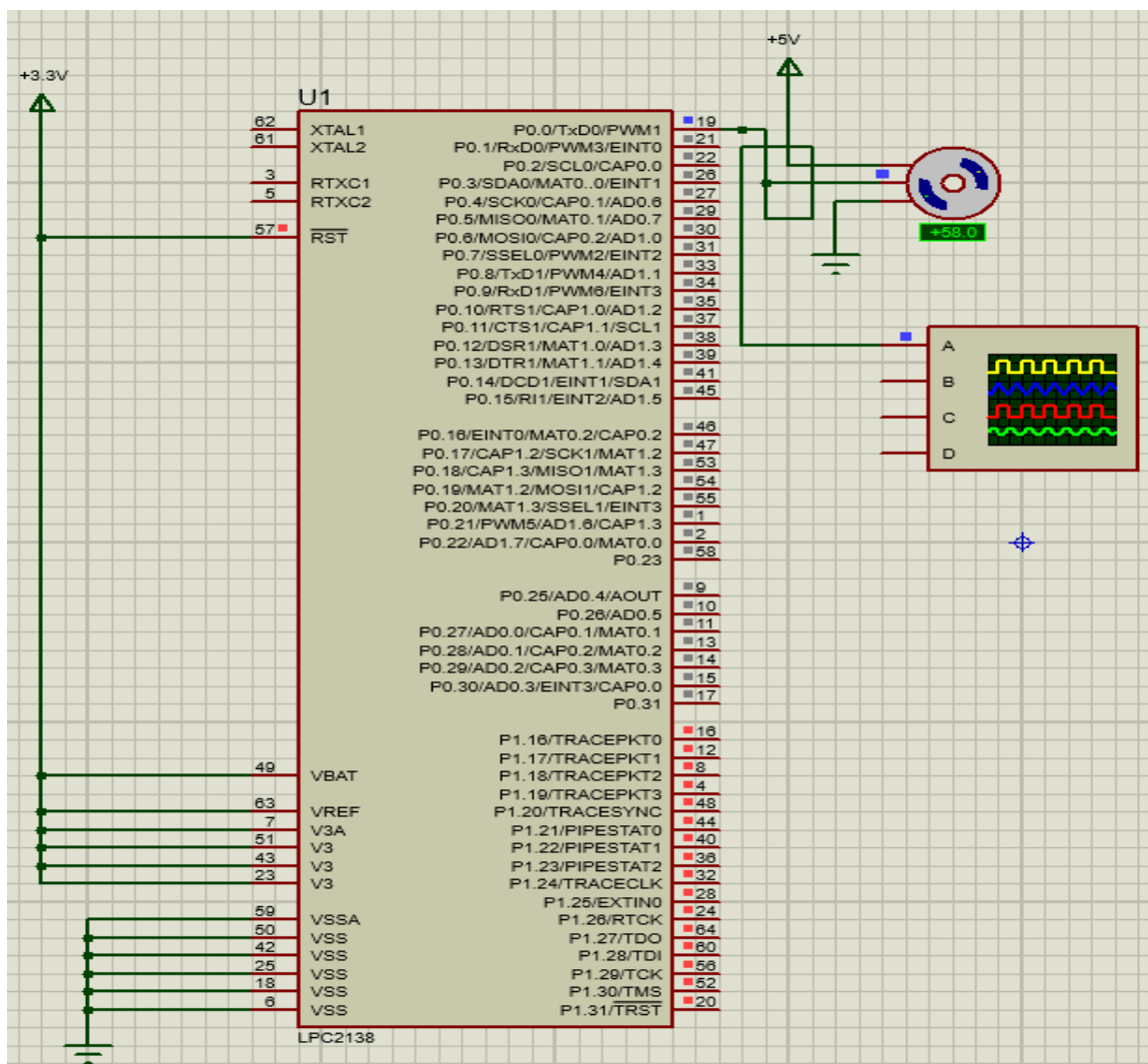


Рисунок 33 - Скриншот программы управления сервоприводом

Рисунок модели тестирования представлен на рисунке 33. Для того чтобы использовать сервомотор с микроконтроллером ARM7 нужно задать следующие параметры:

- LOW Fuse = 0xFF и
- HIGH Fuse = 0xC9
- Частота= 16 МГц.

В интерфейсе программы Proteus существуют уже запрограммированные сервомоторы, из списка мною был найден сервопривод-клеймо DS14. Микроконтроллером является NXP 2138. Документацию и модель контроллера можно найти на сайте производителя, в программную среду Proteus также была загружена модель используемого в этой работе микроконтроллера

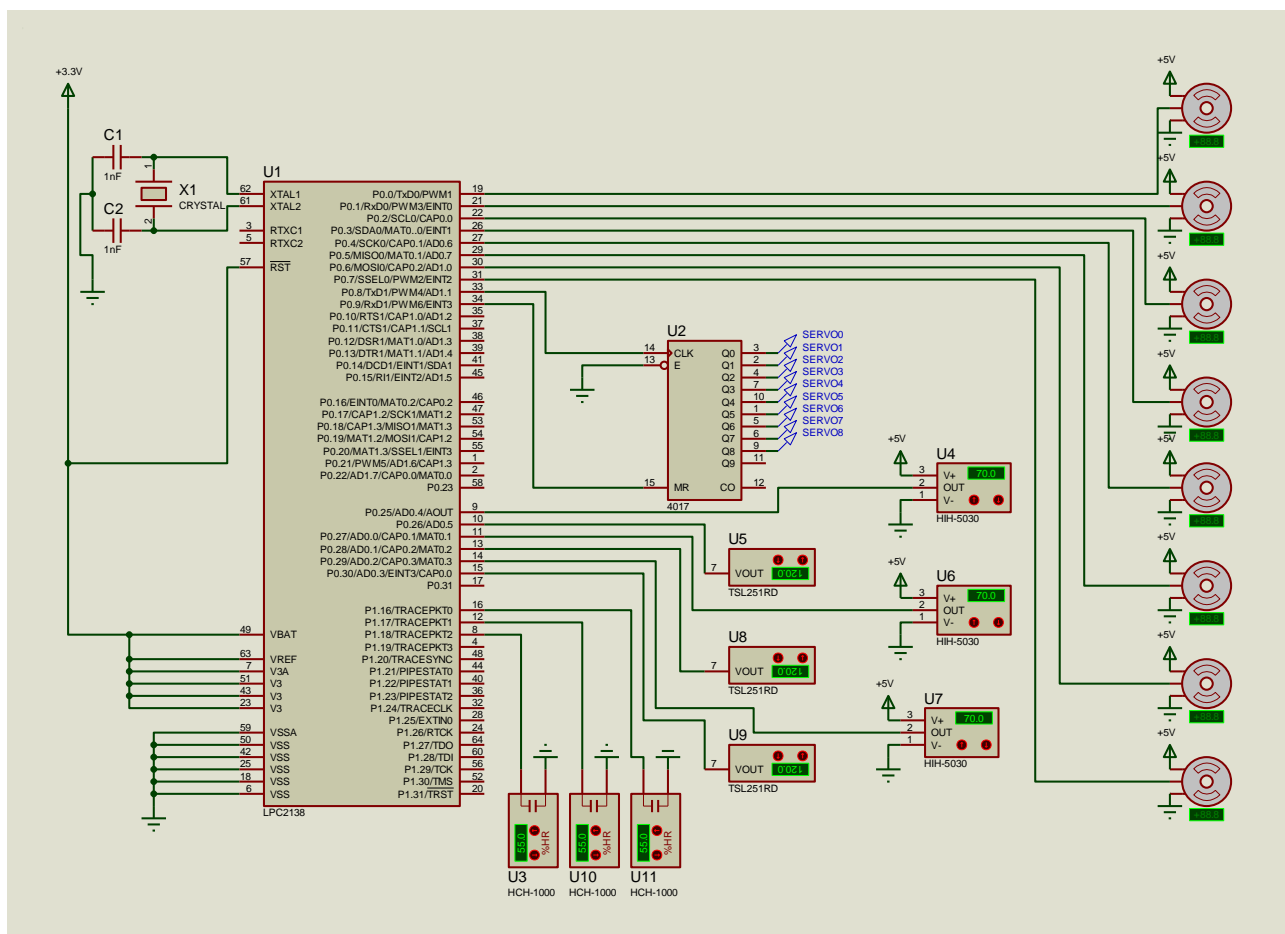


Рисунок 34 – Схема подключения 16 приводов и 9 датчиков

Для управления сервоприводами был выбран наиболее простой и самый распространенный способ управления – широтно-импульсная модуляция. В работе представлена модель главного контроллера. С помощью модели главного контроллера были произведены пробные исследования по настройке широтно-импульсной модуляции и управлению сервоприводом. Используя лишь встроенные в микроконтроллер аппаратные генераторы ШИМ можно добиться управления восемью сервоприводами, чего конечно не достаточно для выполнения задачи прямохождения. Для дальнейшей работы мною были проанализированы многие методы управления сервоприводами с помощью ШИМ и выбран наиболее подходящий.

Существует несколько основных методов управления сервоприводами с помощью микроконтроллера:

-

При помощи данной программы происходит объединение портов при одинаковом угле перемещения, также формируется последовательность выключения портов для экономии времени работы прерывания.

На рисунке 35 показаны схемы подключения сервоприводов к контроллеру. Первый способ это подключение сервоприводов к стандартным встроенным ШИМ выходам контроллера. Второй способ показывает реализацию программ-

ного ШИМ выполненного с помощью таймера и прерываний. Подробное описание программы, а также пошаговая разработка программы описаны мною выше. Для дальнейшей разработки системы управления, требуется добавить элементы. Чтобы система стала замкнутой, планируется добавить элементы обратной связи.

Для управления сервоприводами был выбран наиболее простой и самый распространенный способ управления – широтно-импульсная модуляция. В работе представлена модель главного контроллера. С помощью модели главного контроллера были произведены пробные исследования по настройке широтно-импульсной модуляции и управлению сервоприводом.

3.10 Моделирование антропоморфного робота в среде V-REP

Симулятор робота V-REP со встроенной средой разработки основан на распределенной архитектуре управления: каждый объект / модель может управляться индивидуально через встроенный скрипт, плагин, узел ROS, удаленный API-интерфейс или пользовательское решение.

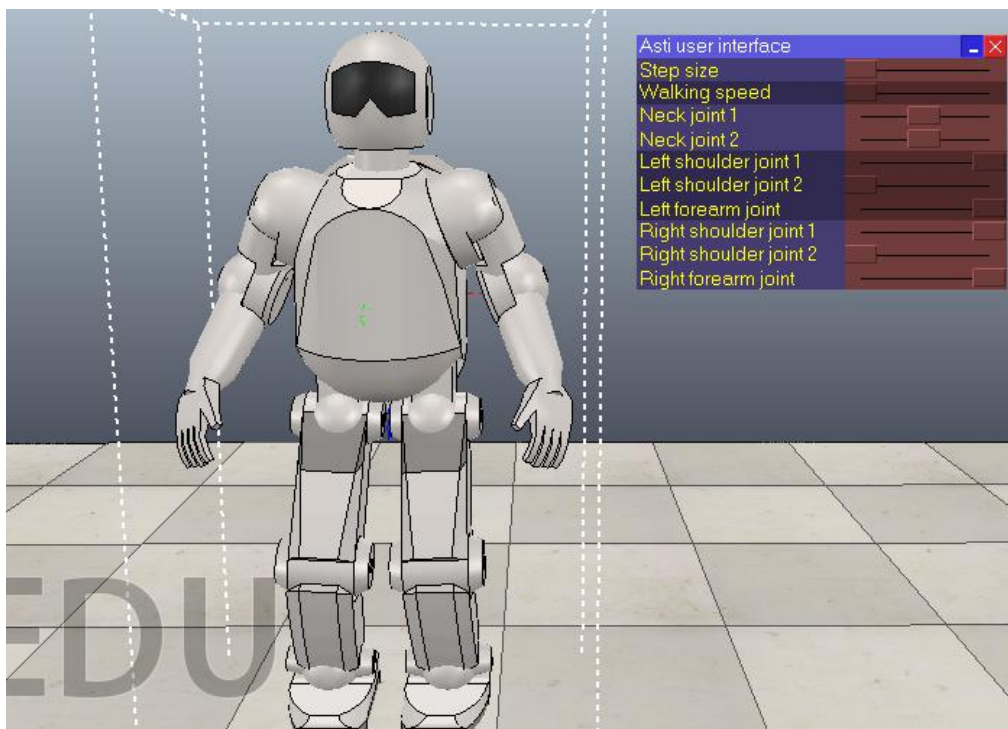


Рисунок 36 - Управление роботом с помощью программы V-Rep

Это делает V-REP очень универсальным и идеальным для многомоторных приложений. Контроллеры могут быть написаны на языках C / C ++, Python, Java, Lua, Matlab или Octave.

V-REP используется для быстрой разработки алгоритмов, моделирования автоматизации производства, быстрого прототипирования и верификации, обучения робототехнике, удаленного мониторинга, проверки безопасности

В среде V-Rep можно выбрать оболочку для робота, есть наиболее известные разработки о которых упоминалось в первом разделе. Мною был выбран робот Asti. На рисунке 36 изображена модель робота в программе V-Rep

Интерфейс программы позволяет загрузить программу управления антропоморфным роботом и посмотреть как будет вести себя тот или иной робот в режиме реального времени. Мною была создана панель, внешний вид которой изображен на рисунке 37, виртуальный пульт управления роботом в которой можно регулировать положение верхних конечностей (локтевые, плечевые соединения а также движения головой)

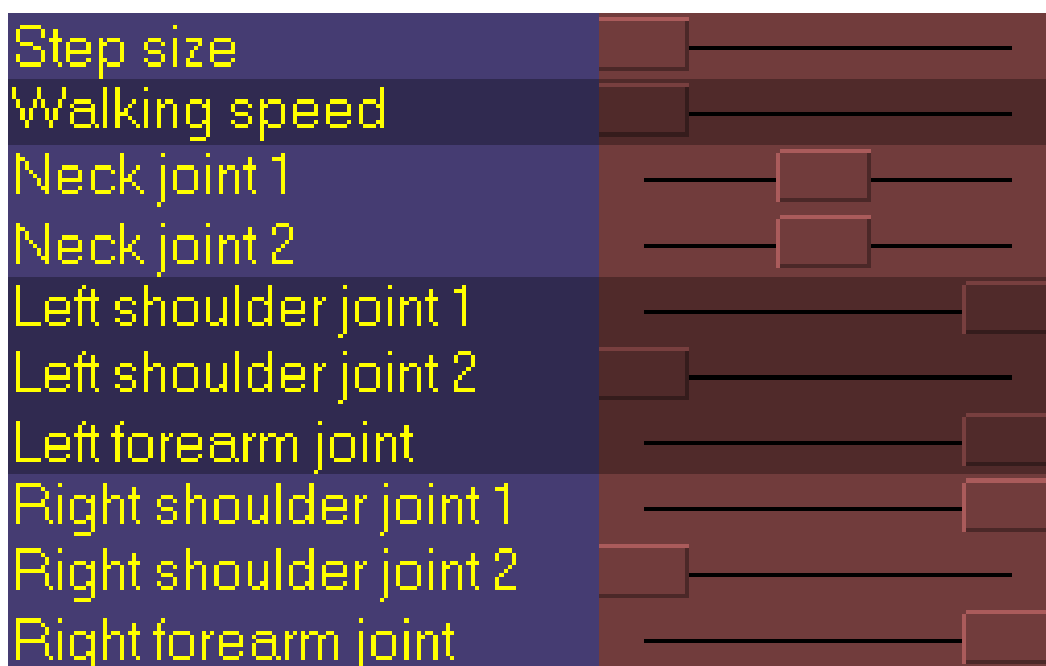


Рисунок 37 – Панель управления антропоморфным роботом

Скорость шага, а также величину шага можно также отрегулировать через панель управления. Движение робота происходит в автоматическом режиме

при запуске программы. На рисунке 38 изображен робот при изменении параметров в панели управления.

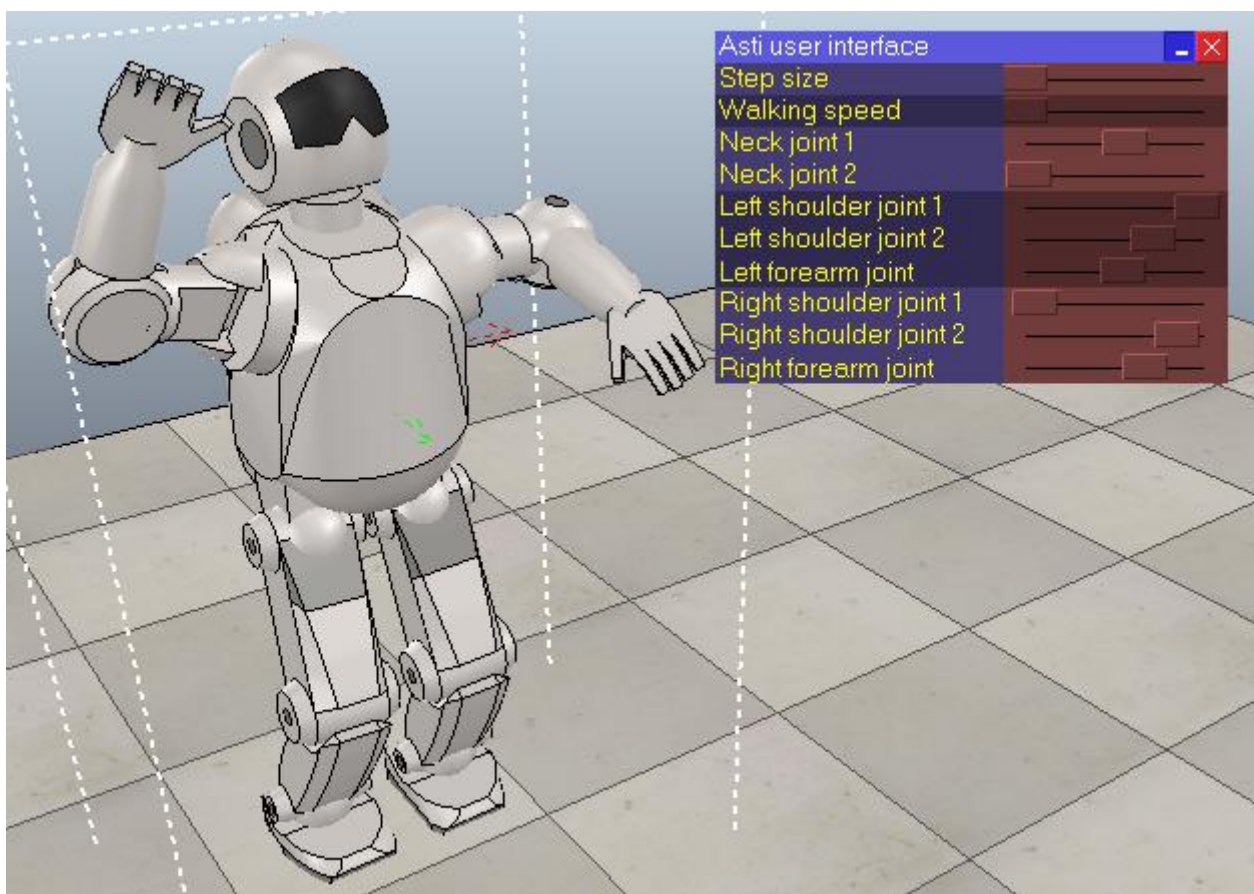


Рисунок 38 – Изменение параметров движения верхних конечностей

Передвижение робота происходит с помощью нижних конечностей (ступни, колени и тазобедренные суставы). Движение робота происходит аналогично человеку. Для программирования движения прямохождения был разработан код программы на языке Lua, код программы в приложении 1. Также в приложении 1 внесен код программы панели управления робота реализованной также на языке Lua.

При разработке системы управления движения робота я столкнулся с множеством сложностей в выполнении поставленной задачи (прямохождение антропоморфного робота с множеством степеней свободы). В первую очередь стоит отметить, что для разработки системы управления большого количества сервоприводов требуется процессор с аппаратной генерацией ШИМ. Однако

для данной задачи (17 сервоприводов управляются одним контроллером) требуется применять метод программной генерация ШИМ с использованием таймера и внешних компонентов. В этом разделе я подробно описал, каким образом использовать такой метод генерации ШИМ. На основе полученных в среде Proteus данных, была разработана модель робота и визуализирована с помощью среды V-Rep.

5 Специальные вопросы обеспечения безопасности

5.1 Функциональная безопасность

В самом начале требуется определить, что является функциональной безопасностью. Функциональная безопасность – это часть безопасности, относящаяся к управляемому оборудованию и системе управления управляемым оборудованием связанной с безопасностью системы при выполнении функции безопасности. Другими словами – это раздел безопасности отвечающий за безопасность технического устройства по отношению к окружающей его среде, людям и также другим устройствам. Данную часть безопасности описывает ГОСТ Р МЭК 61508, включающий несколько частей.

Исследуемый в данной работе антропоморфный робот с множеством степеней свободы в определённых случаях может являться источником опасности для окружающих его технических систем. Так как робот является сложным техническим устройством, очевидно, у него могут случаться различные отказы, чем сложнее система, тем выше вероятность выхода из строя системы или её отдельных узлов. Оценим же функциональную безопасность разработанного нами технического устройства.

Каждая оценка функциональной безопасности должна быть спланирована. План должен определять всю информацию, необходимую для проведения эффективной оценки, включая:

- область применения оценки функциональной безопасности;
- вовлечённые организации;
- требуемые ресурсы;
- лиц, осуществляющих оценку функциональной безопасности;
- уровень независимости лиц, выполняющих оценку функциональной безопасности;
- компетентность всех лиц, выполняющих оценку функциональной безопасности;

- выходные материалы при каждой оценке функциональной безопасности;

- как оценка функциональной безопасности соотносится и должна быть интегрирована с другими оценками функциональной безопасности в соответствующих случаях.

В нашем случае план будет выглядеть примерно так, по причине того, что нам не требуется выполнить оценку функциональной безопасности абсолютно по ГОСТу:

Перечень возможных отказов и их последствия;

Оценка будет применена для антропоморфного робота с семнадцатью движущимися частями функционирующего в условиях лаборатории кафедры РАПС;

Для оценки функциональной безопасности нам потребуется только сам робот и информация о процессе его разработки;

Лицо, производящее оценку, заинтересовано в положительном результате;

Лицо, производящее оценку, выполняет первую в своей практике оценку функциональной безопасности;

Составить отчёт об оценке функциональной безопасности.

Перечень возможных отказов и их последствия:

Отказ - выход из строя одного или нескольких сервоприводов, привод перестаёт управляться и останавливается.

Последствия – робот начинает перемещаться по непредсказуемому курсу с малой скоростью, что может привести к незначительным повреждениям хрупкого напольного оборудования и лёгким повреждениям мягких тканей человека.

Отказ – выход из строя основной платы управления.

Последствия – от основной платы управления перестают поступать управляющие сигналы для сервоприводов, двигатели останавливаются, робот останавливается.

Отказ – выход из строя всех сервоприводов.

Последствия – робот потерять равновесие и упасть, что может привести к незначительным повреждениям хрупкого напольного оборудования и лёгким повреждениям мягких тканей человека.

Все основные виды отказов, которые могут повлиять на окружающую робота среду приведены выше. Но робот является сложным техническим устройством, и в его составе присутствует множество компонентов, которые, в свою очередь, тоже могут выйти из строя. Все эти выходы из строя приведут, в конечном итоге, к одному из выше описанных отказов. Таким образом никакие отказы не могут привести к иным последствиям, кроме тех, что описаны выше.

Исследуемый в данной работе антропоморфный робот с множеством степеней свободы является относительно безопасным для окружающей его среды. Все его возможные отказы могут привести только к незначительным повреждениям окружающего оборудования, а также незначительным травмам окружающих его людей. Вероятность возникновения того или иного отказа не рассматривается в данном разделе. Как один из возможных вариантов защиты окружения робота, при возникновении отказа, издавать звуковой сигнал, оповещающий людей быть на безопасном расстоянии. Робот может повреждать окружение только путём столкновения робота с чем бы то ни было. Таким образом, мы обезопасим людей от влияния робота.

4.2 Безопасность для человека

Исследуемый в данной работе антропоморфный робот с множеством степеней свободы может являться источником повышенной опасности для пользователя и окружающих его людей. Можно выделить несколько факторов риска, которым подвергает себя пользователь и обслуживающий персонал: управляется с помощью слаботочного оборудования.

Таким образом нам стоит рассмотреть вопросы электрической и пожарной безопасности. Не стоит забывать, что в процессе эксплуатации многофунк-

циональный робот питается от литий-ионной батареи, а такие батареи имеют вероятность самовоспламенения при неправильном использовании и физических повреждениях

Антропоморфный робот с множеством степеней свободы в автономном режиме питается от литий-ионных аккумуляторов с выходным напряжением 5 В.

Изучим степень риска при нарушении целостности изоляции проводов питающих двигателей вследствие нормальной эксплуатации. Пример нарушения целостности изоляции проводов изображен на рисунке 39.



Рисунок 39 - Нарушение целостности изоляции проводов.

Эти провода находятся под наибольшим напряжением и током в системе, поэтому мы можем оценить максимальную опасность при прямом прикосновении к ним, а также при касании провода на стальной корпус. Так как ток в установке используется постоянный, тело человека будет обладать довольно большим сопротивлением. В данном случае рассмотрим наиболее опасный режим – двухфазное прикосновение. Схема двухфазного прикосновения в сети постоянного тока показана на рисунке 40.

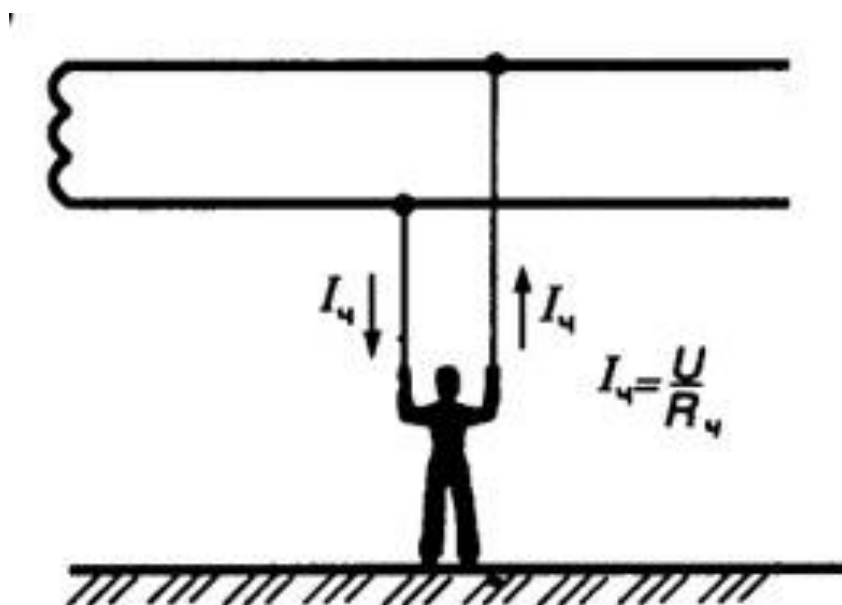


Рисунок 40 - Схема двухфазного прикосновения в сети постоянного тока.

При этом режиме ток, протекающий по телу человека, будет зависеть только от сопротивления его тела, и формула будет следующей:

$$I_h = \frac{U_h}{R_h} \quad (5)$$

Сопротивление прикосновения R_h складывается из сопротивления наружного слоя кожи взятого два раза и сопротивления внутренностей человека. Внешний слой кожи покрыт омертвевшими тканями из-за этого неповреждённые участки кожи обладают большим сопротивлением от 3 кОм до 100 кОм. Но если удалить этот слой, сопротивление падает очень сильно, до 1-5 кОм. Также нагрев тканей тоже уменьшает их сопротивление и очевидно влажность кожи тоже снижает её сопротивление. Предположим человек взялся за два провода разными руками, значит ток потечёт от одной руки к другой. Среднее значение подобного касания примем равным 550 кОм, руки сухие и не нагреты выше нормальной температуры человеческого тела. Напряжение прикосновения у нас будет равно напряжению отдаваемого аккумулятором, 5 В. В итоге получим:

$$I_h = \frac{U_h}{R_h} = \frac{5 \text{ В}}{550000 \text{ Ом}} = 0,00909 \text{ мА} \quad (6)$$

Обычно человек начинает ощущать воздействие постоянного электрического тока при его величине 5-7 мА. А дальнейшее увеличение тока приводит к вредным воздействиям, от покалывания до остановки дыхания и сердца. Таким образом можно сделать вывод, что двухфазное прикосновение к основным токоведущим проводам не опасно для здоровья человека. А если учесть, что эти провода находятся под наибольшим напряжением в системе, можно сказать, что антропоморфный робот с множеством степеней свободы относительно безопасен с электрической точки зрения. Антропоморфного робота с множеством степеней свободы можно отнести к классу защиты III, работает на сверхнизких безопасных напряжениях.

Антропоморфный робот с множеством степеней свободы в автономном режиме питается от литий-ионных аккумуляторов с выходным напряжением 5 В. Внешний вид литий-ионного аккумулятора показан на рисунке 41.



Рисунок 41 - Литий-ионный аккумулятор Cytac R123

Защищенный литий-ионный аккумулятор Cytac R123 емкостью 650 мАч обеспечит продолжительную и надежную работу любых устройств с питанием этого типа. Плата защиты предохраняет аккумулятор от слишком сильного заряда, глубокой разрядки и короткого замыкания.

Особенности:

емкость 650 мАч

защищен от КЗ, полного разряда, чрезмерной зарядки

до 1000 циклов заряда/разряда

напряжение 5V

размеры: D 16 мм x L 32 мм

вес: 17 г

имеет сертификат РСТ



Рисунок 42 - Воспламенение литий-ионного аккумулятора

Литиевые аккумуляторы изредка проявляют склонность к взрывному самовозгоранию (рисунок 42). Интенсивность горения даже от миниатюрных аккумуляторов такова что может приводить к тяжким последствиям. Авиакомпании и международные организации принимают меры к ограничению перевозок литиевых аккумуляторов и устройств с ними на авиатранспорте.

Самовозгорание литиевого аккумулятора очень плохо поддается тушению традиционными средствами. В процессе термического разгона неисправного или поврежденного аккумулятора происходит не только выделение запасенной электрической энергии, но и ряд химических реакций, выделяющих энергию для саморазогрева, кислород и горючие газы. Потому вспыхнувший аккумулятор способен гореть без доступа воздуха. Для его тушения непригодны средства изоляции от атмосферного кислорода. Более того, металлический литий активно реагирует с водой с образованием горючего газа водорода, поэтому тушение литиевых аккумуляторов водой эффективно только для тех видов аккумуляторов, где масса литиевого электрода невелика. В целом тушение загоревшегося литиевого аккумулятора неэффективно. Цель тушения снизить температуру аккумулятора и предотвратить распространение пламени. А уберечь аккумулятор от механических повреждений поможет прочный металлический корпус исследуемого антропоморфного робота с множеством степеней свободы.

В данном разделе были рассмотрены вопросы функциональной безопасности исследуемого в данной работе антропоморфного робота с множеством степеней свободы вопросы безопасности окружающих людей при эксплуатации робота.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы получены следующие результаты:

Изучены общие положения об антропоморфных роботах с множеством степеней свободы

Для управления сервоприводом с помощью микроконтроллера были изучены несколько способов управления

При разработке системы управления движения робота я столкнулся с множеством сложностей в выполнении поставленной задачи (прямохождение антропоморфного робота с множеством степеней свободы). В первую очередь стоит отметить, что для разработки системы управления большого количества сервоприводов требуется процессор с аппаратной генерацией ШИМ. Однако для данной задачи (17 сервоприводов управляются одним контроллером) требуется применять метод программной генерации ШИМ с использованием таймера и внешних компонентов. В этом разделе я подробно описал, каким образом использовать такой метод генерации ШИМ. На основе полученных в среде Proteus данных, была разработана модель робота и визуализирована с помощью среды V-Rep.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Aoustin Y., Formal'sky A. Postural Control of a Feet-less Biped Vertical Posture Using Limited Torques, Robotics: Trends Principles and Applications, Univesity of New Mexico, pp. 485-490.
2. Formal'skii A., Ballistic Walking Design via Impulsive Control. Journal of Aerospace Engineering, 2010, no 129, pp. 129-138.
3. Белов, М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М.П. Белов, А.Д. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М.: Академия, 2007. – 576 с.
4. Bhounsule Pr.A., Cortell J., Ruina A. Design and Control of Ranger: an Energy efficient, Dynamic Walking Robot. CLAWAR 2012: Proceeding of the 15th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Baltimore, MD, USA, 23–26 july, 2012, pp. 441-448.
5. Кулаков Б.Б., Кулаков Д.Б., Беляев В.В. Антропоморфные роботы как новая сфера применения Аидроприводов. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 4. Режим доступа:
<http://engjournal.ru/catalog/machin/hydro/682.html> (Дата обращения: 17.02.2017).
6. Василенко Н.В. ОСНОВЫ РОБОТОТЕХНИКИ. Томск:Раско, 1993. 543 с.
7. Васильев. В.Н. Гибкие производственные системы, промышленные роботы, робототехнические комплексы: В 14 кн. Кн. 11. Перспективы развития ГПС: Практ. пособие / Под ред. Б.И. Черпакова. М.: Высш. шк., 1989. 111 с.
8. ГОСТ 25685-85. Роботы промышленные. Классификация. М.: Изд-во стандартов, 1983.
9. 20. ГОСТ 25686-85. Манипуляторы, автооператоры и роботы. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1985.
10. 21. ГОСТ 12.2.072-82. Роботы промышленные, роботизированные технологические комплексы и участки. Общие требования безопасности. М.: Изд-во стандартов, 1982.

11. Егоров В.А. Транспортно-накопительные системы для ГПС. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. 293 с.
12. Иванов М.Н. Волновые зубчатые передачи: Учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1981. 184 с.
13. Иванов М.Н. Детали машин: Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1976. 399 с.
14. Hirai K., Hirose, M., Haikawa, Y. and Takenaka, T. (1998). "The development of Honda humanoid robot", Proceedings of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp: 1321 -1326 vol.2. May.
15. Sakagami, Y., Watanabe, R., Aoyama, C., Shinichi, M., Higaki, N. and Fujimura, K. (2002). "The intelligent ASIMO: System overview and integration", Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Lausanne, Switzerland, October.
16. Kaneko, K., Kanehiro, F., Kajita, S., Yokoyama, K., Akachi, K., Kawasaki, T., Ota, S. and Isozumi, T. (2002). "Design of prototype humanoid robotics platform for HRP", IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2431-2436, vol.3, October.
17. Kim, J. H., Park, I. W., Oh, J. H. (2007). "Walking Control Algorithm of Biped Humanoid Robot on Uneven and Inclined Floor", J Intell Robot Syst (2007) 48:457–484, January.
18. Hyon, S. and Cheng, G. (2006). "Gravity Compensation and Full-Body Balancing for Humanoid Robots," IEEE-RAS/RSJ Int. Conf. on Humanoid Robots (Humanoids 2006), CD-ROM, pp. 214-221, December.
19. Ogura, Y., Aikawa, H., Shimomura, K., Kondo, H., Morishima, A., Lim H. and Takanishi, A. (2006). "Development of A Humanoid Robot WABIAN-2," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 76-81. Kajita, S. and Tani, K. (1996a). "Adaptive Gait Control of a Biped Robot Based on Realtime Sensing of the Ground Profile," in 1996 Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 570-577.

20. Hirukawa, H., Hattori, S., Kajita, S., Harada, K., Kaneko, K., Kanehiro, F., Morisawa M. and Nakaoka, S. (2007). "A Pattern Generator of Humanoid Robots Walking on a Rough Terrain," in 2007 Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 2181-2187.
21. Kajita, S. and Tani, K. (1996b). "Experimental Study of Biped Dynamic Walking," in IEEE Control Systems Magazine, vol. 16, Feb. , pp. 13–19.
22. Yokoi, K., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Kajita S. and Hirukawa, H. (2001). "A Honda Humanoid Robot Controlled by AIST Software," in 2001. IEEE Int. Conf. Humanoid Robots, pp. 259-264. S. M. Metev and V. P. Veiko, Laser Assisted Microtechnology, 2nd ed., R. M. Osgood, Jr., Ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1998.
23. Taskiran, E., Seven, U., Koca, O., Yilmaz M. and Erbatur, K. (2009). "Walking Control of a Biped Robot on an Inclined Plane," Proc. ICONS 2009 - The 2nd International Conference on Intelligent Systems and Control, Istanbul, Turkey, September.
24. Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Harada, K., Yokoi, K., Hirukawa, H. (2003). "Biped walking pattern generation using preview control of the zero-moment-point", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp: 1620 - 1626, vol.2, Taipei, Taiwan, September.
25. Erbatur K., Kurt O., (2009). "Natural ZMP Trajectories for Biped Robot Reference Generation," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 3, pp. 835-845, March.
26. Taskiran, E., Yilmaz, M., Koca, O., Seven U. and Erbatur, K. (2010). "Trajectory Generation with Natural ZMP References for the Biped Walking Robot SURALP," Proc. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA, Alaska, USA.
27. Park, J. H., (2003). "Fuzzy-Logic Zero-Moment-Point Trajectory Generation for Reduced Trunk Motions of Biped Robots," Fuzzy Sets and Systems, Vol. 134, No. 1, pp. 189-203.

28. Yilmaz, M., Seven, U., and Erbatur K., "Biped Robot Walking Control on Inclined Planes with Fuzzy Parameter Adaptation," IFAC Workshop on Adaptation and Learning in Control Systems and Signal Processing, ALCOSP 2010, August 26-28, 2010, Antalya-Turkey.
29. Fujimoto, Y. and Kawamura, A. (1998). "Simulation of an autonomous biped walking robot including environmental force Interaction", IEEE Robotics and Automation Magazine, pp. 33-42, June.
30. Erbatur, K., Seven, U., Taskiran, E., Koca, O., Kızıltas, G., Inel, M., Sabanovic, A., Onat, A. (2008). "SURALP-L, The Leg Module of a New Humanoid Platform," Proc. IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 168-173, Daejeon-Gyeongju Korea, December.
31. Erbatur, K., Seven, U., Taskiran, E., Koca, O., Yilmaz, M., Kızıltas, G., Inel, M., Sabanovic, A., Onat, A. (2009). "SURALP: A New Full-Body Humanoid Robot Platform", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS, St. Louis, MO, USA, October.
32. Erbatur K. and Kawamura, A. (2003). "A new penalty based contact modeling and dynamics simulation method as applied to biped walking robots," Proc. 2003 FIRA World Congress, October 1-3, Vienna, Austria.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПРОГРАММНЫЙ КОД УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ

```
if (sim_call_type==sim_childscriptcall_initialization) then
    asti=simGetObjectHandle("Asti")

    lFoot=simGetObjectHandle("leftFootTarget")

    rFoot=simGetObjectHandle("rightFootTarget")

    lPath=simGetObjectHandle("leftFootPath")

    rPath=simGetObjectHandle("rightFootPath")

    lPathLength=simGetPathLength(lPath)

    rPathLength=simGetPathLength(rPath)

    ui=simGetUIHandle("astiUserInterface")

    simSetUIButtonLabel(ui,0,simGetObjectHandleName(asti).. " user interface")

    dist=0

    correction=0.0305


    minVal={0,          -- Step size

            0,          -- Walking speed

            -math.pi/2, -- Neck 1

            -math.pi/8, -- Neck 2

            -math.pi/2, -- Left shoulder 1

            0,          -- Left shoulder 2
```

```

-math.pi/2,  -- Left forearm

-math.pi/2,  -- Right shoulder 1

0,          -- Right shoulder 2

-math.pi/2}  -- Right forearm

rangeVal={ 2,          -- Step size

0.8,        -- Walking speed

math.pi,    -- Neck 1

math.pi/4,   -- Neck 2

math.pi/2,   -- Left shoulder 1

math.pi/2,   -- Left shoulder 2

math.pi/2,   -- Left forearm

math.pi/2,   -- Right shoulder 1

math.pi/2,   -- Right shoulder 2

math.pi/2}   -- Right forearm

uiSliderIDs={3,4,5,6,7,8,9,10,11,12}

relativeStepSize=1

nominalVelocity=0.4

neckJoints={ simGetObjectHandle("neckJoint0"),simGetObjectHandle("neckJoint1")
}

```

```
leftArmJoints={ simGetObjectHandle("leftArmJoint0"),simGetObjectHandle("leftAr  
mJoint1"),simGetObjectHandle("leftArmJoint2")}
```

```
rightArmJoints={ simGetObjectHandle("rightArmJoint0"),simGetObjectHandle("righ  
tArmJoint1"),simGetObjectHandle("rightArmJoint2")}
```

-- Now apply current values to the user interface:

```
simSetUISlider(ui,uiSliderIDs[1],(relativeStepSize-minVal[1])*1000/rangeVal[1])
```

```
simSetUISlider(ui,uiSliderIDs[2],(nominalVelocity-minVal[2])*1000/rangeVal[2])
```

```
simSetUISlider(ui,uiSliderIDs[3],(simGetJointPosition(neckJoints[1])-  
minVal[3])*1000/rangeVal[3])
```

```
simSetUISlider(ui,uiSliderIDs[4],(simGetJointPosition(neckJoints[2])-  
minVal[4])*1000/rangeVal[4])
```

```
simSetUISlider(ui,uiSliderIDs[5],(simGetJointPosition(leftArmJoints[1])-  
minVal[5])*1000/rangeVal[5])
```

```
simSetUISlider(ui,uiSliderIDs[6],(simGetJointPosition(leftArmJoints[2])-  
minVal[6])*1000/rangeVal[6])
```

```
simSetUISlider(ui,uiSliderIDs[7],(simGetJointPosition(leftArmJoints[3])-  
minVal[7])*1000/rangeVal[7])
```

```
simSetUISlider(ui,uiSliderIDs[8],(simGetJointPosition(rightArmJoints[1])-  
minVal[8])*1000/rangeVal[8])
```

```
simSetUISlider(ui,uiSliderIDs[9],(simGetJointPosition(rightArmJoints[2])-  
minVal[9])*1000/rangeVal[9])
```

```
    simSetUISlider(ui,uiSliderIDs[10],(simGetJointPosition(rightArmJoints[3])-  
minVal[10])*1000/rangeVal[10])
```

```
end
```

```
if (sim_call_type==sim_childscriptcall_cleanup) then
```

```
end
```

```
if (sim_call_type==sim_childscriptcall_actuation) then
```

```
    -- Read desired values from the user interface:
```

```
    relativeStepSize=minVal[1]+simGetUISlider(ui,uiSliderIDs[1])*rangeVal[1]/1000
```

```
nominalVelocity=minVal[2]+simGetUISlider(ui,uiSliderIDs[2])*rangeVal[2]/1000
```

```
simSetJointTargetPosition(neckJoints[1],minVal[3]+simGetUISlider(ui,uiSliderIDs[3]  
])*rangeVal[3]/1000)
```

```
simSetJointTargetPosition(neckJoints[2],minVal[4]+simGetUISlider(ui,uiSliderIDs[4]  
])*rangeVal[4]/1000)
```

```
simSetJointTargetPosition(leftArmJoints[1],minVal[5]+simGetUISlider(ui,uiSliderI  
Ds[5])*rangeVal[5]/1000)
```

```
simSetJointTargetPosition(leftArmJoints[2],minVal[6]+simGetUISlider(ui,uiSliderI  
Ds[6])*rangeVal[6]/1000)
```

```
simSetJointTargetPosition(leftArmJoints[3],minVal[7]+simGetUISlider(ui,uiSliderI  
Ds[7])*rangeVal[7]/1000)
```

```
simSetJointTargetPosition(rightArmJoints[1],minVal[8]+simGetUISlider(ui,uiSliderI  
Ds[8])*rangeVal[8]/1000)
```

```
simSetJointTargetPosition(rightArmJoints[2],minVal[9]+simGetUISlider(ui,uiSliderI  
Ds[9])*rangeVal[9]/1000)
```

```
simSetJointTargetPosition(rightArmJoints[3],minVal[10]+simGetUISlider(ui,uiSlide  
rIDs[10])*rangeVal[10]/1000)
```

-- Get the desired position and orientation of each foot from the paths (you can also use a table of values for that):

```
t=simGetSimulationTimeStep()*nominalVelocity
```

```
dist=dist+t
```

```
lPos=simGetPositionOnPath(lPath,dist/lPathLength)
```

```
lOr=simGetOrientationOnPath(lPath,dist/lPathLength)
```

```
p=simGetPathPosition(rPath)
```

```

rPos=simGetPositionOnPath(rPath,(dist+correction)/rPathLength)

rOr=simGetOrientationOnPath(rPath,(dist+correction)/rPathLength)


-- Now we have the desired absolute position and orientation for each foot.

-- Now transform the absolute position/orientation to position/orientation relative
to asimo

-- Then modulate the movement forward/backward with the desired "step size"

-- Then transform back into absolute position/orientation:

astiM=simGetObjectMatrix(asti,-1)

astiMInverse=simGetInvertedMatrix(astiM)


m=simMultiplyMatrices(astiMInverse,simBuildMatrix(lPos,lOr))

m[8]=m[8]*relativeStepSize

m=simMultiplyMatrices(astiM,m)

lPos={ m[4],m[8],m[12]}

lOr=simGetEulerAnglesFromMatrix(m)


m=simMultiplyMatrices(astiMInverse,simBuildMatrix(rPos,rOr))

m[8]=m[8]*relativeStepSize

m=simMultiplyMatrices(astiM,m)

rPos={ m[4],m[8],m[12]}

```

```
rOr=simGetEulerAnglesFromMatrix(m)
```

```
-- Finally apply the desired positions/orientations to each foot  
-- We simply apply them to two dummy objects that are then handled  
-- by the IK module to automatically calculate all leg joint desired values  
-- Since the leg joints operate in hybrid mode, the IK calculation results  
-- are then automatically applied as the desired values during dynamics calculation
```

```
simSetObjectPosition(lFoot,-1,lPos)
```

```
simSetObjectOrientation(lFoot,-1,lOr)
```

```
simSetObjectPosition(rFoot,-1,rPos)
```

```
simSetObjectOrientation(rFoot,-1,rOr)
```

```
end
```

```
-----
```

```
-- Following few lines automatically added by V-REP to guarantee compatibility  
-- with V-REP 3.1.3 and earlier:
```

```
colorCorrectionFunction=function(_aShapeHandle_)
```

```
local version=simGetInt32Parameter(sim_intparam_program_version)
```

```
local revision=simGetInt32Parameter(sim_intparam_program_revision)
```



```

if (version<30104)and(revision<3) then

    return _aShapeHandle_

end

return '@backCompatibility1: '.._aShapeHandle_

end

-----

if (sim_call_type==sim_childdscriptcall_initialization) then

    -- Determin the colors we want

    whiteStr=simGetScriptSimulationParameter(sim_handle_self,'whiteColor')

    greyStr=simGetScriptSimulationParameter(sim_handle_self,'greyColor')

    w={0.46,0.46,0.46}

    g={0.29,0.29,0.29}

    i=1

    for token in string.gmatch(whiteStr,"^[^%s]+") do

        w[i]=token

        i=i+1

    end

    i=1

    for token in string.gmatch(greyStr,"^[^%s]+") do

```

```

    g[i]=token

    i=i+1

end

-- Get all the visible shapes in this model:

allObjectsToExplore={ simGetObjectAssociatedWithScript(sim_handle_self)}

allVisibleShapes={ }

while (#allObjectsToExplore>0) do

    obj=allObjectsToExplore[1]

    table.remove(allObjectsToExplore,1)

    if (simGetObjectType(obj)==sim_object_shape_type) then

        r,v=simGetObjectInt32Parameter(obj,sim_objintparam_visibility_layer) -- get
the layers this shape is visible in

        if (v<256) then -- by default, the first 8 layers are visible, the last ones are in-
visible

            table.insert(allVisibleShapes,obj)

        end

    end

end

index=0

while true do

    child=simGetObjectChild(obj,index)

    if (child==-1) then

        break

```

```

        end

        table.insert(allObjectsToExplore,child)

        index=index+1

    end

end

-- Now change the color of all those shapes:

for i=1,#allVisibleShapes,1 do

simSetShapeColor(colorCorrectionFunction(allVisibleShapes[i]),'NAO_WHITE',0,w
)

simSetShapeColor(colorCorrectionFunction(allVisibleShapes[i]),'NAO_GREY',0,g)

    end

end

if (sim_call_type==sim_childscriptcall_cleanup) then

end

```