

Учреждение образования
«Могилёвский государственный областной лицей №3»

МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ В ПРОТЕЗИРОВАНИИ КОНЕЧНОСТЕЙ

Автор:

Дюбанов Павел Александрович,
учащийся 9 «Е» класса
ГУО «Средняя школа № 21 г.
Могилёва»

Научный руководитель:

Ласточкина Яна Николаевна,
учитель физики УО «МГОЛ №3»

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 3 |
| ГЛАВА 1. ТЕОРИЯ БИОНИЧЕСКИХ ПРОТЕЗОВ | 5 |
| 1.1 БИОНИЧЕСКИЕ ПРОТЕЗЫ В ИСТОРИИ ЧЕЛОВЕЧЕСТВА | 5 |
| 1.2 СОВРЕМЕННЫЕ БИОНИЧЕСКИЕ ПРОТЕЗЫ..... | 6 |
| 1.3 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РУКИ И ЭНМГ КОНТРОЛЛЕРА | 9 |
| ГЛАВА 2. МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ В ПРОТЕЗИРОВАНИИ КОНЕЧНОСТЕЙ.. | 12 |
| 2.1 УСТРОЙСТВО МИКРОКОНТРОЛЛЕРА..... | 12 |
| 2.2 ЛИТИЕВЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ. ТИПЫ И УСТРОЙСТВО ЛИТИЕВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ. ПЛАТА ЗАЩИТЫ ПИТАНИЯ. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БАТАРЕЯМИ | 19 |
| 2.3 СЕРВОПРИВОД И ШАГОВЫЙ ДВИГАТЕЛЬ. УСТРОЙСТВО И МАНИПУЛИРОВАНИЕ ПАЛЬЦАМИ БИОНИЧЕСКОГО ПРОТЕЗА..... | 23 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 27 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ | 28 |

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы протезирование бионическими протезами стало одним из наиболее актуальных направлений в медицине. Они позволяют восстанавливать функции поврежденных конечностей и улучшать качество жизни людей, потерявших эти функции в результате травмы или аплазии конечностей.

Бионика – это прикладная наука, которая исследует и копирует принципы функционирования живых организмов и их систем для разработки технологических инноваций. Технически оказывается, что прародителем бионики являлся Леонардо да Винчи. Чертежи его летательных аппаратов основаны на строении крыла птицы, что довольно любопытно. Целью бионики является создание механических, электронных или компьютерных систем, которые функционируют так же эффективно, как живые организмы. Примерами бионических технологий могут быть бионические протезы, роботы-помощники для людей с ограниченными возможностями, искусственные органы и т.д.

Развитие и исследования в обществе бионики и бионических протезов имеет огромную актуальность в настоящее время. Это связано с тем, что все больше людей страдает от различных заболеваний и травм, которые приводят к потере конечностей. Бионические протезы представляют собой новую технологию, которая может значительно улучшить качество жизни людей с ампутациями. Одним из основных преимуществ бионических протезов является возможность восстановления функциональности конечностей, что позволяет людям с ампутациями вернуться к нормальной жизни и повседневным занятиям. Кроме того, исследования в области бионических протезов могут привести к разработке более продвинутых технологий, которые позволят создавать более эффективные и удобные бионические протезы. В 2016 и 2020 годах был проведен Кибатлон (Cybathlon) – соревнование, в котором состязаются пользователи бионических протезов различных частей тела. Это говорит о том, что эти люди смогли совладать с протезом и использовать его в повседневной жизни.

Проблема исследования устройства электронной части бионических протезов связана с недостатком доступной для анализа информации, отчасти связанной с недостаточной распространённостью бионических протезов. Также проблема имеется и с техническими аспектами разработки бионических протезов. Для того чтобы бионический протез был эффективным, необходимо учитывать множество факторов, таких как анатомические особенности конечностей, механические свойства тканей, системы управления, прочный корпус, «начинка» протеза и т.д. Это требует большого количества исследований и разработок, которые могут занять много времени и ресурсов.

Исследование электронной части бионического протеза имеет практическую значимость, так как заключается в анализе текущих разработок и совершенствовании уже существующих микроконтроллеров и механизмов манипулирования, более приближенных к точному аналогу человеческой руки, а также созданию более функциональных протезов.

В моей жизни был момент, когда мне нужно было проходить медицинское обследование. Оно было связано с электронейромиографией. После этого мне стала небезразлична, а тем более интересна возможность считывания сокращений мышц при помощи определённых датчиков и передачи этих данных в протез. Заинтересовавшись производством бионических протезов, я решил разобраться в их устройстве и роли различных электронных компонентов, без которых он бы не функционировал.

Цель: разобраться в работе бионических протезов, описать структуру перехода нервного импульса в бионический протез, разобрать электронные составляющие бионического протеза.

Задачи: Обратить внимание на историю протезов. Исследовать принцип работы микроконтроллера и составляющих современных бионических протезов.

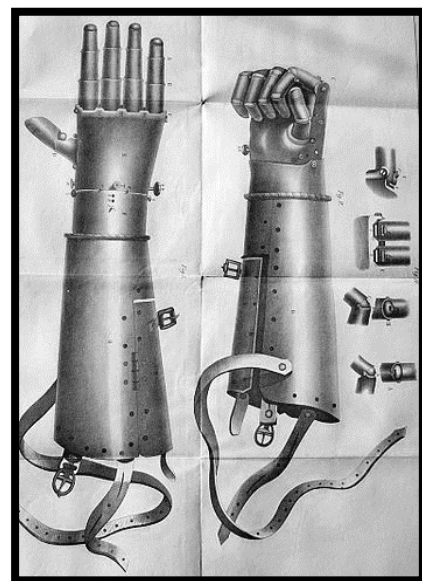
ГЛАВА 1. ТЕОРИЯ БИОНИЧЕСКИХ ПРОТЕЗОВ

1.1 БИОНИЧЕСКИЕ ПРОТЕЗЫ В ИСТОРИИ ЧЕЛОВЕЧЕСТВА

История бионических протезов насчитывает десятилетия, но становятся популярными они начали только в последнее время. Существуют упоминания об использовании протезов в древности. Например, в Древнем Египте использовали протезы для восстановления частей тела, в том числе рук и ног. Для того времени характерны протезы, целиком состоящие из дерева.

Также одним из ранних примеров бионического протеза являлась «железная рука» Готфрида Берлихенгена из XVI века. Готфрид потерял правую руку при осаде города Ландсхута, которую впоследствии заменил, получив прозвище. «Железная рука» имела подвижные пальцы, сгибание которых осуществлялось при помощи кнопки на тыльной стороне ладони. Такой протез позволял захватывать крупные объекты, вроде рукояти оружия или дверной ручки, и, возможно, даже держать перо.

В Великобритании XVIII-XIX веков были популярны механические протезы, приводимые в действие исключительно при помощи жёсткой тяги или гибких тросов. Большую популярность тогда получил мастер протезист Джеймс Джиллингем, изготовивший схожие с человеческими конечностями протезы. Первым его протезом была рука, которую он создал для Уильяма Синглтона, который потерял свою конечность на торжественном салюте в результате несчастного



«Железная рука» Готфрида Берлихенгена, изображённая на бумаге



Протезы ног и рук Джеймса Джиллингема в 1910-х годах

случая. К 1910 году, Джеймс Джиллингем восстановил мобильность и функциональность более чем 15000 пациентам. Медицинский журнал “TheLancet” в одном из информационных блоков положительно описал протезы Джиллингема, как «прочные, лёгкие и долговечные».



Протезы 20 века

С приходом XX века, появились всё более совершенные протезы. Материалы, из которых они были изготовлены, были намного легче, а с появлением пластика и облегчённых сплавов решилась проблема повышенной нагрузки на одну из сторон тела, приводившая к дисбалансу опорно-двигательного аппарата. Пластик позволял создавать реалистичные модели протезов, что положительно сказывалось на социализации их владельцев.

Но, несмотря на то, что прогресс человечества в создании протезов рос, в то время они представляли из себя малофункциональные аналоги настоящих конечностей. Движения протезов были ограниченными и неточными, и они скорее доставляли дискомфорт, чем были аналогами утраченных конечностей.

1.2 СОВРЕМЕННЫЕ БИОНИЧЕСКИЕ ПРОТЕЗЫ

В современности, благодаря развитию микроэлектроники, в том числе промышленных микроконтроллеров, более энергоэффективных RISC и ARM процессоров, созданию более совершенных и пригодных материалов, нейрофизиологии и других немаловажных отраслей, появилась возможность создания устройств, максимально приближённых к человеческим конечностям. Именно эти устройства можно смело назвать бионическими протезами.

Бионический протез – это искусственный объект, относящийся к разделу науки, который используется для восстановления функций поврежденных органов или тканей, может быть изготовлен из различных материалов, к примеру, следующих:

1. **Пластик**. Этот материал довольно часто используется в качестве основы для изготовления многих бионических протезов конечностей. Он лёгкий, имеет хорошую гибкость и доступность, что позволяет создать 3D-принтеры, доступные рядовому пользователю. Благодаря свойствам пластика, он подходит для изготовления внешних частей бионического протеза. Различают следующие виды пластика, подходящие для создания деталей: акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), полилактид (PLA), поликапролактон (PCL), полиэтилентерефталат (PET) и нейлон. Самым мягким из них является PLA пластик, так как в его основе лежит молочная кислота. Одним из его преимуществ является низкая токсичность. При работе с ним, однако не могу порекомендовать его из-за меньшего срока службы по сравнению с остальными пластмассами.

2. **Металлы**. Некоторые бионические протезы конечностей могут быть собраны из металлов, таких как титан или нержавеющая сталь. Эти металлы прочны и долговечны, потому их используют для изготовления протезов, которые должны выдерживать высокие нагрузки. Однако использование металлов в изготовлении бионических протезов руки нецелесообразно в связи с большим весом деталей в сравнении с пластиком, что, как уже упоминалось, приводило к проблемам с опорно-двигательным аппаратом и нарушением осанки.

3. **Углеродное волокно** – материал, состоящий из тонких нитей диаметром до 3 микрон, образованных атомами углерода. В таком материале атомы углерода объединены в микроскопические кристаллы и выровнены параллельно. Углеродные волокна характеризуются низким весом, низким коэффициентом расширения и высокой силой натяжения. Углеродное волокно активно используется во многих бионических протезах в связи со своими свойствами и эстетичным видом.

Существует два основных вида бионических протезов, позволяющих вернуть функции утраченных конечностей полностью или частично. Они приведены ниже:

- **Первый** тип бионических протезов чаще всего имеет два сервопривода, которые активируются одновременно. Таким образом можно осуществлять хват предметов. Они являются простейшими протезами и не восстанавливают возможность использовать «пальцы» конечности по отдельности.

- **Второй** тип бионических протезов способен сокращать сервоприводы «пальцев» в соответствии с сигналом от мышц, поступающим в микроконтроллер, откуда далее он поступает в индивидуальные сервоприводы пальцев кисти. Такие протезы способны вернуть функции утраченной конечности.

Для подготовки и установки протеза конечности, человеку с ограниченными возможностями (далее – пациенту) необходимо пройти следующие этапы:

1. *Диагностика.* Врач проводит осмотр и определяет причину повреждения или потери конечности, а также устанавливает, какой тип бионического протеза будет наиболее подходящим для пациента.

2. *Оценка состояния культи.* Врач оценивает медицинское состояние пациента для того, чтобы убедиться, что он готов к протезированию. От этого зависит, насколько сложным будет процесс изготовления и возможности будущего протеза.

3. *Изготовление бионического протеза.* Инженеры и инженеры-протезисты создают, изготавливают и настраивают протез, используя технологии и определённые материалы, учитывая индивидуальность травмы и предпочтения пациента.

4. *Установка бионического протеза.* Специализированный врач устанавливает протез и проводит определённую настройку для обеспечения максимального комфорта и функциональности протеза.

5. *Реабилитация.* Пациент проходит реабилитационные мероприятия для восстановления подвижности и улучшения функционирования бионического протеза. Реабилитация может включать в себя физиотерапию, обучение упражнениям и адаптацию к новой конечности.

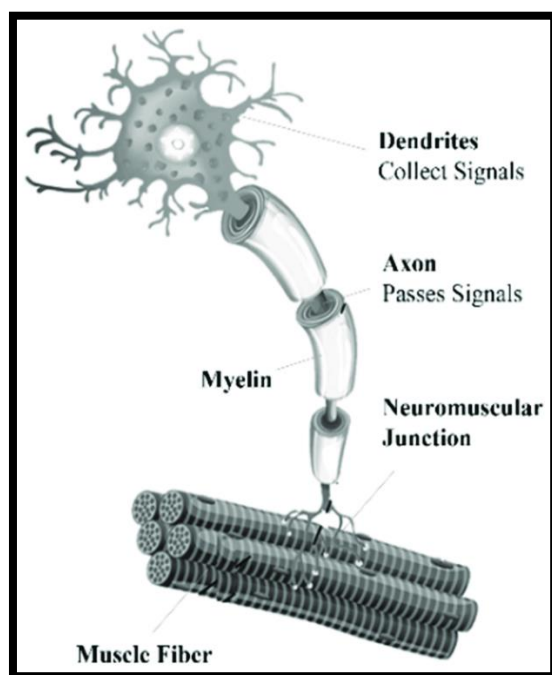
Будет важным заметить, что протезирование – длительный процесс, доставляющий свои неудобства. Требуется большое количество времени, нервов и постоянной поддержки врачей и здравоохранения. С правильным подходом и помощью, многие люди смогут восстановить функциональность и прожить долгую и полноценную жизнь с протезом.

1.3 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РУКИ И ЭНМГ КОНТРОЛЛЕРА

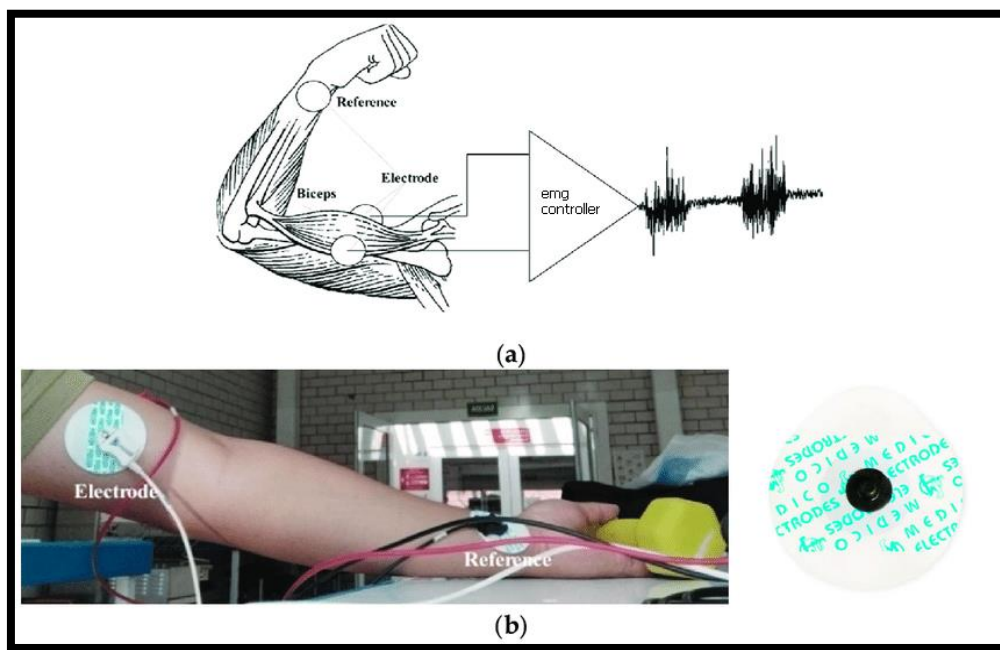
Бионические протезы, вроде протезов ног или рук, обычно манипулируются с помощью механических или электронных контроллеров типа электронейромиографического контроллера, которые установлены непосредственно в протезе. Некоторые бионические протезы также могут быть управляемы с помощью внешних устройств, таких как пульт дистанционного управления или при помощи мобильного приложения в смартфоне пациента. Это может упростить использование их протезов в повседневной жизни.

В человеческом теле сокращение мышц происходит благодаря сложному взаимодействию между мышечными волокнами и центральной нервной системой.

Каждая мышечная клетка состоит из множества **миофибрилл** – органоидов клеток поперечнополосатых мышц, обеспечивающих их сокращение, которые в



Миелизированный нейрон, контролирующий сокращение поперечнополосатой мышцы при помощи выделения ацетилхолина



Преобразование биопотенциалов, вызванных мышечными сокращениями, в аналоговые значения при помощи электронейромиографического контроллера, присоединённого к руке человека

свою очередь содержат актиновые и миозиновые белки – основные компоненты, отвечающие за сокращение мышцы.

Когда нервный импульс достигает мышечной клетки, он вызывает выделение химического вещества - **ацетилхолина**, которое передается через нейромышечный синапс и активирует рецепторы на поверхности мышечной клетки. Это приводит к изменению химических реакций внутри клетки, которые в свою очередь приводят к сокращению миофибрилл.

Актиновые и миозиновые белки, находящиеся внутри мышечной клетки, взаимодействуют друг с другом, создавая силу, необходимую для сокращения мышц. Этот процесс происходит благодаря изменению конфигурации белковых цепей миозина, которые "прицепляются" к актиновым филаментам и скользят вдоль них, сокращаясь и сокращая всё мышечное волокно.

Когда мышечная клетка прекращает получать сигнал от нервной системы, происходит расслабление мышц. На этот раз рецепторы на поверхности клетки перестают получать сигналы от нервных окончаний, что приводит к остановке процесса сокращения. В это время кальций, необходимый для сокращения мышечной клетки, возвращается в клеточное хранилище, и мышечная клетка возвращается в свою исходную форму.

ЭНМГ (электронейромиографический) контроллер - это устройство, которое позволяет измерять и анализировать электрическую активность мышц, вызванную активацией рецепторов на поверхности мышечной клетки. Это делается путем размещения электродов на коже, которые регистрируют электрические сигналы, поступающие от мышц.

Полный принцип работы ЭНМГ контроллера состоит из нескольких этапов:

- **Размещение электродов на коже** – это может быть область мышцы или же место, где проходят нервы, которые контролируют мышцу.

- **Регистрация электрических сигналов** – электроды получают электрические сигналы, которые поступают от мышцы, и передают их на ЭНМГ контроллер

- **Усиление сигналов и фильтрация помех** для получения более точных и чётких данных

- **Обработка данных** – электронейромиографический контроллер преобразует сигналы из одного канала в единый считываемый аналоговый сигнал.

- **Отправка сигналов в микроконтроллер** – передача обработанного и усиленного сигнала в аналоговый вход микроконтроллера

В связи с индивидуальностью культы у разных пациентов, ЭНМГ электроды расположены в соответствии с расположением необходимых в восстановлении мышц. У некоторых людей могут отсутствовать определённые мышцы в связи с индивидуальностью полученной травмы, что может помешать создать такой бионический протез, который способен восстановить все функции утраченной конечности.

ГЛАВА 2. МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ В ПРОТЕЗИРОВАНИИ КОНЕЧНОСТЕЙ

Электронная часть бионического протеза состоит из следующих компонентов:

- **Электронеуромиографических (ЭНМГ, или ЭМГ) датчиков.** (Электронеуромиография – метод исследования биоэлектрических потенциалов, возникающих в мышцах при возбуждении мышечных волокон.)

- **Сервоприводов,** выполняющих роль искусственных мышц.
- **Микроконтроллера,** обрабатывающего показания с ЭНМГ датчиков, передающего определённые данные в сервоприводы. (Микроконтроллер – программируемая микросхема, предназначенная для управления электронными устройствами.).

- **Аккумуляторов, платы зарядного устройства и платы защиты аккумуляторов** для автономной работы бионического протеза. Зачастую плата зарядки аккумуляторов имеет встроенную функцию защиты аккумуляторов от перенапряжения и переразряда, что предотвращает выход из строя и повреждение аккумуляторов.

- **Модули Wi-Fi, Bluetooth, мобильной сети или радиочастотной связи,** а возможно и прочие модули дистанционного взаимодействия (зависит от технологии производителя).

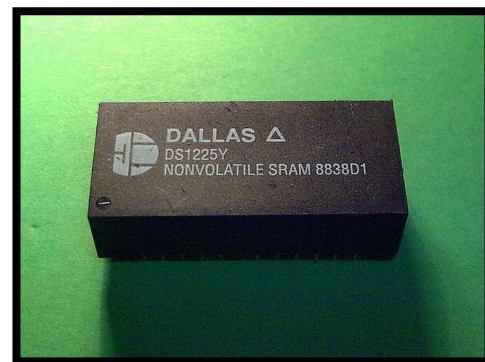
- **Соединительные провода** (преимущественно монтажные и/или одножильные провода вроде витой пары)

- Прочие **проприетарные(несвободные)модули** (зависит от технологии производства и предпочтений производителя).

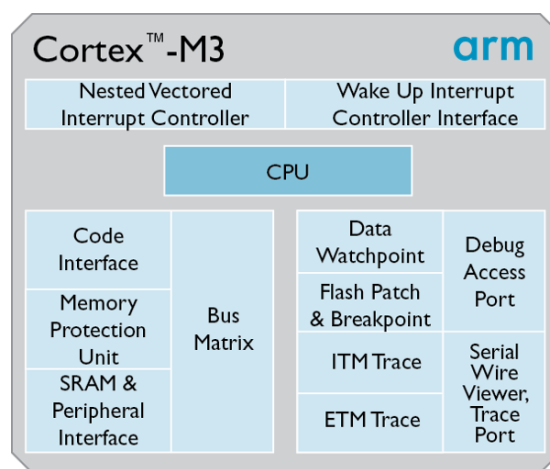
2.1 УСТРОЙСТВО МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

Микроконтроллер, который является мозгом всей электронной схемы, состоит из компонентов, многие из которых перечислены ниже:

- **Энергоэффективный процессор** с архитектурами (преимущественно) RISC, ARM (AdvancedRiscMachines – armel/armv6, armhf/armv7, возможно arm64/armv8), Intelx86 и очень редко – MIPS, MIPSel. В современности среди популярных коммерческих и промышленных микроконтроллеров распространена архитектура ARM в связи с намного более высокой энергоэффективностью. Так в 1994 году на 233MHz процессору приходился 1 Вт), а последующие версии требовали ещё меньше. При таком энергопотреблении ARM имеет производительность, сравнительно превосходящую аналогичные процессоры. Также различными ARM процессорами снабжены и современные встраиваемые системы и тем более – мобильные телефоны (до 98% из 1 млрд устройств на состояние от 2006 года), а в четвёртом квартале 2020 года был представлен процессор AppleM1 с рекордной мощностью для процессоров с архитектурой ARM.



Возможности популярного среди микроконтроллеров процессорного ядра Cortex-M3

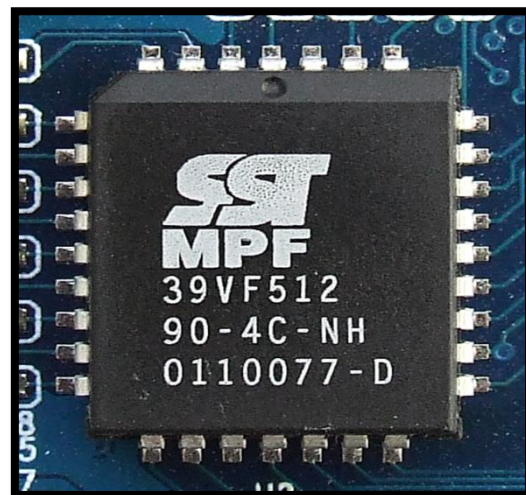


DallasSemiconductorDS1225Y - Полупроводниковая оперативная занятая память типа SRAM

- **Полупроводниковая оперативная занятая память** типа **SRAM** (англ. – Staticrandomaccessmemory, рус. – Статическая память с произвольным доступом). SRAM применяется в микроконтроллерах и ПЛИС (Программируемая логическая интегральная схема) благодаря низкому энергопотреблению (за счёт отсутствия сложного контроллера динамической памяти), предсказыванию с точностью до такта времени работы подпрограмм и отладки прямо на устройстве.

- **Постоянного запоминающего устройства** – энергонезависимой памяти, в которой хранится исполняемая микроконтроллером программа.

Подходящим на роль энергонезависимой памяти в микроконтроллере типом ПЗУ является **EEPROM** – элеткрически перепрограммируемая энергонезависимая память, которая также известна и является обычной flash памятью. На сегодня под EEPROM подразумеваются вытеснившие оригинал форматы NAND, используемый в переносных Flash накопителях вроде USBFlash накопителей (в обиходе – флешках), SD карт (MicroSD, SDHC, SDXC, SDUC), и NOR, используемый в твердотельных накопителях (англ. – SolidStateDrive).



SiliconStorageTechnology (SST) 39VF512 EEPROM постоянное запоминающее устройство, имеющее объем в 512 килобайт

Оригинальная EEPROM является очень дорогим типом памяти в связи с особенностью изготовления, но предоставляет высокую скорость чтения (чтение одного байта занимает $\sim 0,4$ микросекунды) и возможность перезаписывать память более десяти тысяч раз. Сегодня в различной технике трудно найти постоянное запоминающее устройство типа EEPROM объёмом больше 4 мегабайт, однако они всё ещё производятся и закупаются компаниями.

- **Генератор тактовых импульсов (генератор тактовой частоты)** предназначенный для синхронизации различных процессов в микроконтроллере. Он вырабатывает электрические импульсы (обычно прямоугольной формы) заданной частоты, которая часто используется как эталонная — считая количество импульсов, можно, к примеру, измерять временные интервалы. В микропроцессорной технике один тактовый импульс, как правило, соответствует одной атомарной операции (операции, которая либо выполняется целиком, либо не выполняется вовсе. Это такая операция, которая не может быть частично выполнена и частично не выполнена).

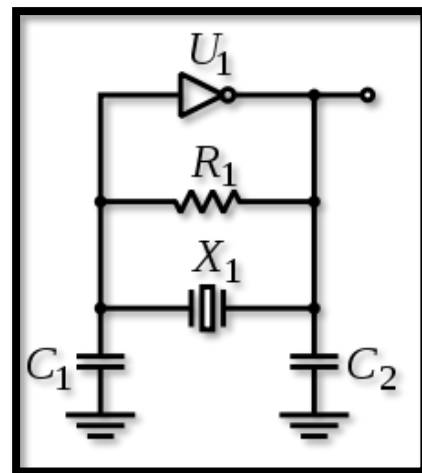
Частота тактовых импульсов определяет быстродействие микроконтроллера. Из некоторых тактовых импульсов складываются машинные циклы, при которых происходит одно обращение к памяти или устройствам

ввода-вывода. Обработка одной инструкции может производиться за один или несколько тактов работы микропроцессора, в зависимости от архитектуры и типа инструкции. В зависимости от микроконтроллера могут использоваться различные виды генераторов, вплоть до встроенного в процессор, находящегося на одном кристалле. Вот несколько типов тактового генератора:

1. Кварцевый:

Так же известен под названием *генератор Пирса*, является производным от генератора Колпитца. Устроен по следующей схеме, содержащей кварцевый резонатор, резистор, два конденсатора и логический элемент НЕ (NOT).

Данный генератор активно используется в микроконтроллерах



Кварцевый генератор

2. «Классический»:

В микроконтроллерах, не критичных к стабильности тактового генератора, часто используется последовательное включение нескольких инверторов через RC-цепь, состоящую из конденсатора и резистора. Частота колебаний зависит от номиналов резистора и конденсатора.

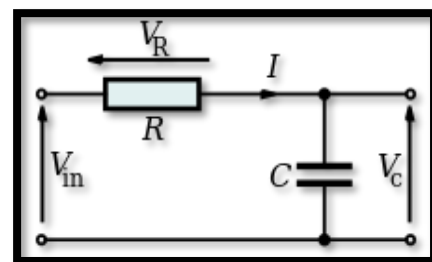
Основной недостаток данной конструкции — низкая стабильность, а достоинство — предельная простота.

Такой генератор редко используется в микроконтроллерах, или не используется вовсе в связи с низкой стоимостью кварцевых тактовых генераторов.

3. Интегрированный тактовый генератор:

Автогенератор, формирующий рабочие такты процессора («частоту»).

Кроме тактирования процессора, в обязанности тактового генератора входит организация циклов системной шины. Потому его работа часто тесно связана с прочими компонентами микроконтроллера.



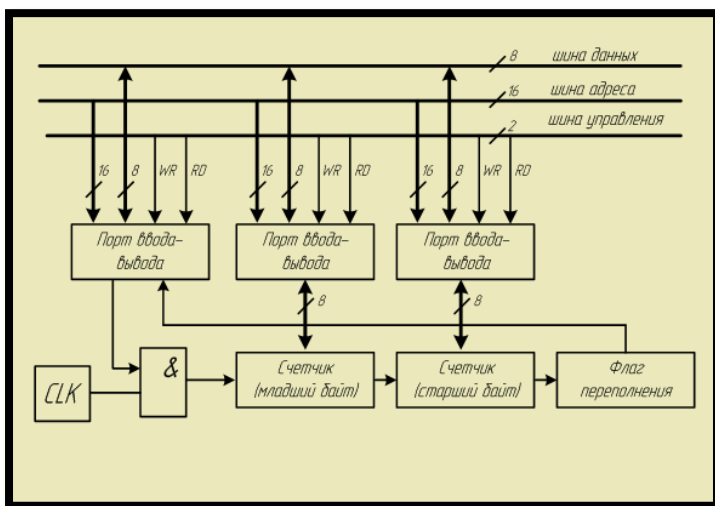
RC-цепь

В некоторых микроконтроллерах встроен в процессор.

- **Таймер** - одно из важнейших для микроконтроллера устройств, их можно разделить на две категории. К первой категории относятся таймеры общего назначения. Вторую категорию составляет сторожевой таймер (watchdog).

Сторожевой таймер — аппаратно-реализованная схема контроля над зависанием системы. Представляет собой таймер, который периодически сбрасывается контролируемой системой. Если сброса не произошло в течение некоторого интервала времени, происходит принудительная перезагрузка системы. В некоторых случаях сторожевой таймер может посылать системе сигнал на перезагрузку

(«мягкая» перезагрузка), в других же — происходит аппаратная перезагрузка (замыканием сигнального RST или подобного ему). В большинстве случаев, существуют специальные отладочные средства,



Схематичное отображение таймера общего назначения

позволяющие узнать причину сброса. В некоторых процессорах, сторожевой таймер вызывает не общий сброс, а прерывание.

Таймеры общего назначения используются для формирования различных интервалов времени и прямоугольных импульсов заданной частоты. Кроме того, они могут работать в режиме счетчика и подсчитывать тактовые импульсы заданной частоты, измеряя, таким образом, длительность внешних сигналов, а также при необходимости подсчитывать количество любых внешних импульсов. По этой причине данные таймеры называют «таймеры/счетчики». К примеру, в микросхемах AVR применяются как восьмиразрядные, так и шестнадцатиразрядные таймеры/счетчики. Их количество для разных микроконтроллеров изменяется от одного до четырех.

- **Аналого-цифровой преобразователь (АЦП, англ. - *Analog-to-digital converter, ADC*)** – устройство, преобразующее входящий аналоговый сигнал в цифровой сигнал (дискретный код). Вкратце данное устройство позволяет считывать аналоговый сигнал от различных электронных компонентов и даёт возможность программе обрабатывать его для дальнейшего использования.

- **Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП, англ. – *digital-to-analog converter, DAC*)** — устройство для преобразования цифрового (обычно двоичного) кода в аналоговый сигнал (ток, напряжение или заряд). Цифро-аналоговые преобразователи являются интерфейсом между дискретным цифровым миром и аналоговыми сигналами. Современные ЦАП создаются по полупроводниковым технологиям в виде интегральной схемы.

Они также позволяют генерировать аналоговый сигнал при помощи ШИМ – широко-импульсной модуляции. Он нужен для манипуляции устройствами, которым требуется аналоговый сигнал для работы, к примеру: сервоприводы (поворот), светодиоды (яркость), вентиляторы (скорость) и др.

- **Порты (пины) микроконтроллера** – это устройства ввода/вывода, позволяющие микроконтроллеру передавать или принимать данные. У многих контроллеров имеются аналоговые, цифровые и интерфейсные пины.

Аналоговые пины позволяют принимать и передавать аналоговый сигнал в зависимости от АЦП и ЦАП микроконтроллера.

Цифровые пины позволяют передавать два значения – 1 (истинно) и 0 (ложно), которые являются максимальным и минимальным напряжением соответственно.

Интерфейсные пины являются цифровыми, однако для них имеется поддержка шин, которые позволяют взаимодействовать с сложными устройствами и прочими датчиками.

Современные микроконтроллеры поддерживают следующие шины:

1. **UART** - *Универсальный асинхронный приёмопередатчик* (англ. *UniversalAsynchronousReceiverandTransmitter*) – узел вычислительных устройств, предназначенный для организации связи с другими цифровыми

устройствами. Преобразует передаваемые данные в последовательный вид так, чтобы было возможно передать их по одной физической цифровой линии другому аналогичному устройству. Метод преобразования хорошо стандартизован и широко применяется в микроконтроллерах встраиваемых системах, мобильных телефонах, роутерах и подобной технике.

2. **SPI** (*последовательный периферийный интерфейс*, англ. – *Serial Peripheral Interface*) - последовательный синхронный стандарт передачи данных в режиме полного дуплекса, предназначенный для обеспечения простого и недорогого высокоскоростного сопряжения микроконтроллеров и периферии, который также иногда называют четырёхпроводным интерфейсом. SPI является синхронным интерфейсом, в котором любая передача синхронизирована с общим тактовым сигналом, генерируемым ведущим устройством (процессором). Принимающая (ведомая) периферия синхронизирует получение битовой последовательности с тактовым сигналом. К одному последовательному периферийному интерфейсу ведущего устройства-микросхемы может присоединяться несколько микросхем. Ведущее устройство выбирает ведомое для передачи, активируя сигнал «выбор кристалла» (*chip select*) на ведомой микросхеме. Периферия, не выбранная процессором, не принимает участия в передаче по SPI.

3. **I²C** (*ай-ту-си*, англ. *Inter-Integrated Circuit*, ИС, I2C) – последовательная асимметричная шина для связи между периферией и микроконтроллером. Использует две двунаправленные линии связи (SDA и SCL), применяется для соединения низкоскоростных периферийных компонентов с процессорами и микроконтроллерами.

4. **1-Wire** - двунаправленная шина связи для устройств с низкоскоростной передачей данных, в которой данные передаются по цепи питания. Таким образом используются всего два провода — один общий, а второй для питания и данных; в некоторых случаях используют и отдельный провод питания. Пример устройства, использующего такую шину – термодатчик *DS18D20*.

В дополнение к основным функциям микроконтроллера можно добавить использование беспроводных модулей, вроде:

- **Bluetooth** (*блютуз, синий зуб*) модуля, предоставляющего использование беспроводных частот, близких к 2,4 ГГц и управления бионическим протезом. В связи с отсутствием более удобных протоколов, вроде протоколов стека TCP/IP, Bluetooth имеет подходящий протокол RFCOMM (Radio Frequency Communications) для разработки собственной надстройки передачи данных. RFCOMM является протоколом эмуляции RS-232 (RecommendedStandart 232 – стандарт физического уровня, совместимого с UART. Позднее был вытеснен USB), то есть последовательного порта для уже описанного выше UART. Минусом использования Bluetoothмодуля может стать низкая устойчивость к физическим препятствиям.

- **Wi-Fi** (*WirelessFidelity, IEEE 802.11a/b/g/n/ac*) модуля, также предоставляющего использование беспроводных частот 2,4 ГГц (2412 МГц-2472 МГц), 5 ГГц (5160-5825 МГц) и 6 ГГц (5955-7115 МГц). Wi-Fi является технологией беспроводной локальной сети, потому использование Wi-Fi модуля, такого как ESP8266 или ESP32 в режиме точки доступа (AccessPoint) можно рассматривать как вариант беспроводного соединения с бионическим протезом. Минусом использования Wi-Fi модуля могут стать сгенерированные частотные помехи со стороны «недоброжелателей» или использование аппаратного обеспечения для нарушения работы точек доступа Wi-Fi, однако такие ситуации случаются очень редко и пресекаются законом.

2.2 ЛИТИЕВЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ. ТИПЫ И УСТРОЙСТВО ЛИТИЕВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ. ПЛАТА ЗАЩИТЫ ПИТАНИЯ. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БАТАРЕЯМИ

Немаловажно также и разобрать принцип работы литиевых аккумуляторов, питающих электронику бионического протеза. В наше время повсеместно распространены литий-ионные и литий-полимерные

аккумуляторы, которые повсеместно распространены. Их устройство и методы защиты следует рассмотреть ниже:

1. **Литий-ионные** аккумуляторы (**Li-ion**) – широко распространённый тип аккумуляторов в современной технике. Является самым популярным выбором во многих мобильных и переносных устройствах. Первая попытка создания таких аккумуляторов была произведена в 1970 году, однако только в 1996 году удалось создать аккумулятор с высоким напряжением в 4 В.

За историю создания литий-ионных аккумуляторов было разработано 4 различающихся между собой типов аккумуляторов, которые стоит описать:

1. **Литий-кобальтовые** аккумуляторы (**ICR**) имеют самую высокую ёмкость, но требовательны к условиям работы. Рабочий диапазон напряжений — от 3 до 4,2 В. Литий-кобальтовые аккумуляторы взрывоопасны и могут воспламениться при перегреве или вследствие глубокого разряда. По этим причинам они обычно снабжаются защитной платой и имеют маркировку Protected. Нежелательна зарядка большим током. Не работают при температуре -5°C . Крайне токсичны при воспламенении. Напряжение разряда — не ниже 3 В. Взрывоопасны при повреждении корпуса, быстро стареют. Средний срок жизни — 3-5 лет, в циклах «заряд-разряд» — не более 500.

2. **Литий-марганцевые** аккумуляторы (**IMR**) более долговечны и безопасны, а зарядка большим током, в отличие от литий-кобальтовых аккумуляторов разрешена. Рабочий диапазон напряжений — от 2,5 до 4,2 В. Такие аккумуляторы редко снабжают защитной платой, а зарядная цепь имеет ограничение по питанию. Не взрываются и не возгораются. Неработоспособны при температуре ниже -10°C .

3. Литий-железофосфатные

аккумуляторы – последнее поколение, используемое в бытовой, портативной технике. Рабочий диапазон напряжений — от 2 до 3,65 В, номинальное напряжение — 3,2 В. Примерно 1500-3000 циклов «заряд-разряд» и 8000 циклов при мягких условиях.



Литий-железофосфатный аккумулятор типа 18650

Плюсом является возможность держать высокий ток под нагрузкой и выдавать стабильное напряжение. Идеальный вариант для использования как в бионических протезах, так и в электромобилях, марсоходах, электросамокатах и прочих, требующих таких качеств, устройствах. Допустима зарядка большим током с сохранением безопасности. При самых тяжёлых условиях эксплуатации не выделяют газа, не взрываются и не возгораются.

4. **Литий-титановые** аккумуляторы имеют наивысшую долговечность и температурный интервал работы. Рабочий диапазон напряжений и от 1,6 до 2,7 В, номинальное – 2,3 В. Более 15 000 циклов «заряд-разряд». Температурный диапазон и от -60°C до $+60^{\circ}\text{C}$. Имеют очень низкое сопротивление, позволяющее использовать сверхбыстрый заряд, и низкий саморазряд, примерно 0,02 % в сутки. Минусом является лишь низкое напряжение, которое можно исправить повышающим преобразователем.

5. **Литий-полимерный** аккумулятор (**Li-Po, Li-poly**) – усовершенствованная конструкция литий-ионного аккумулятора, где в качестве электролита (вещества, проводящего ток) используется полимерный материал. В повседневности данные аккумуляторы используются в мобильных телефонах, цифровой технике и прочей портативной технике за последние 10 лет. Также помимо обычных литий-полимерных аккумуляторов существуют специальные силовые варианты, способные отдавать ток в 130 раз больше собственной ёмкости. Существует проблема, заключающаяся в том, что эти аккумуляторы пожароопасны при перезаряде и/или перегреве. Преимуществами литий-

полимерных аккумуляторов является низкий саморазряд, широкий диапазон рабочих температур от -20°C до $+40^{\circ}\text{C}$, гибкость формы аккумуляторов и большая плотность энергии на единицу массы, что соответственно даёт больший объём. Такие аккумуляторы нашли своё применение в переносных системах и также являются прекрасным вариантом для использования в бионических протезах.

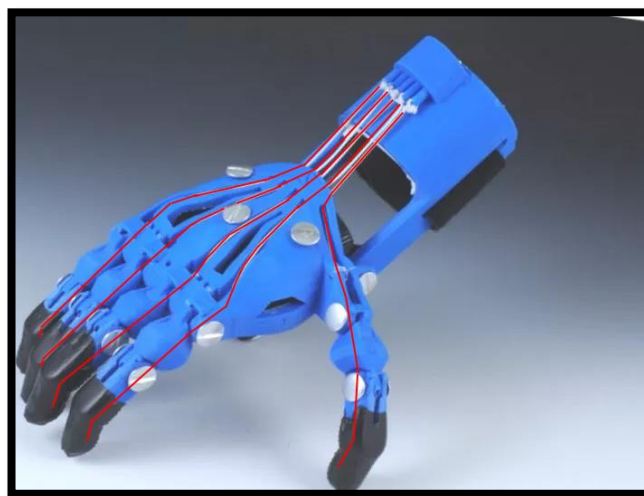
Для защиты литиевых аккумуляторов были разработаны специальные платы защиты аккумуляторов (Battery Protection Circuit Module, BPCM). Такие платы важны для сохранности и безопасности использования аккумуляторов. Плата защиты аккумуляторов предназначена для защиты аккумулятора от перезарядки, переразрядки, короткого замыкания и термических перегрузок. Плата защиты аккумуляторов может иметь различные конфигурации в зависимости от требований конкретного приложения и типа аккумулятора. Некоторые платы защиты могут иметь встроенный балансировочный модуль, который распределяет заряд и разряд между отдельными ячейками аккумулятора, чтобы поддерживать их равномерный заряд.

Кроме того, Плата защиты аккумуляторов может быть интегрирована в систему управления аккумулятором, именуемую **системой управления батареей (Battery Management System, BMS)**. BMS – это электронная система, которая контролирует процессы заряда и разряда аккумуляторной батареи, что позволяет значительно увеличить срок их эксплуатации и безопасность работы. Дополнительно может проводить мониторинг состояния батареи, контроль температуры, количества циклов заряда/разряда. Система балансировки обеспечивает индивидуальный контроль напряжения и сопротивления каждой ячейки аккумулятора, распределяет токи между составными элементами батареи во время зарядного процесса, контролирует ток разряда, защищает аккумулятор от короткого замыкания, перегрузки по току, перезаряда, переразряда (недопустимо высокого или низкого напряжения каждой ячейки), перегрева. В некоторых моделях BMS предусмотрена возможность записи данных о работе аккумуляторной батареи для их последующей передачи на компьютер и анализа.

Из этого следует, что аккумуляторы бионического протеза должны выдерживать высокие нагрузки и иметь систему управления батареями для обеспечения работоспособности, функциональности и портативности протеза.

2.3 СЕРВОПРИВОД И ШАГОВЫЙ ДВИГАТЕЛЬ. УСТРОЙСТВО И МАНИПУЛИРОВАНИЕ ПАЛЬЦАМИ БИОНИЧЕСКОГО ПРОТЕЗА

В человеческом теле манипулирование кисти и пальцев контролируется центральной нервной системой и совокупностью мышц и сухожилий, находящихся как в самой кисти, так и в предплечье. Основными мышцами, которые участвуют в сгибании кисти, являются короткий сгибатель большого пальца, короткий сгибатель мизинца и червеобразные мышцы, которые позволяют сгибать пальцы, расположенные на передней стороне кисти, а также разгибатель пальцев, разгибатель мизинца, короткий разгибатель большого пальца и длинный разгибатель большого пальца, расположенные в задней группе мышц предплечья, которые, соответственно, разгибают пальцы кисти. Эти мышцы связываются с кистью через длинные сухожилия, проходящие через каналы в запястье.

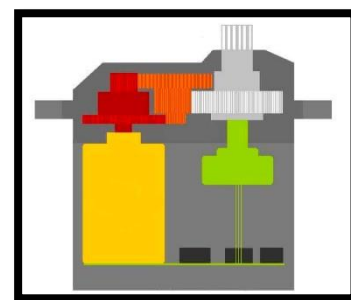


Для замены функций сгибателей и разгибателей в бионических протезах используются сервопривод или шаговый двигатель, которые обеспечивают механическое движение, а именно «сокращение» и «расслабление», к примеру, пальцев или поворот целой кисти в соответствующие реальной стороны. Рассмотрим данные устройства:

Сервопривод (*следающий привод*, от латинского *servus* - слуга) – механический привод с самостоятельной автокоррекцией состояния в соответствии с получаемым сигналом.

Сервопривод состоит из следующих элементов:

1. **Привода**, состоящего из связки электромотора и редуктора – механизма передачи механической энергии, преобразующего частоту вращения и крутящий момент по величине). Редукция предполагает, что крутящий момент на входе будет меньше, чем на выходе и, соответственно, угловая скорость на входе будет больше, чем на выходе.



*Устройство сервопривода:
редуктор, потенциометр,
двигатель постоянного тока
и плата контроллера*

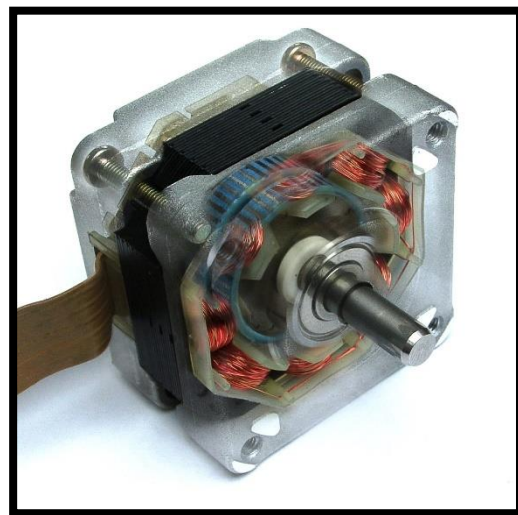
Так же предполагается использование **пневмопривода** – совокупности устройств, которые предназначены для приведения в движение частей машин и механизмов посредством энергии сжатого воздуха.). Следует использовать сервоприводы.

2. **Датчика обратной связи, потенциометра или энкодера** – измерительного преобразователя угла поворота, который отвечает за автоматический контроль угла поворота сервопривода.

3. Блока питания и управления, являющегося также и преобразователем частоты, и серво усилителем и инвертором. Простейший блок управления сервопривода с электромотором может использовать сравнение показателей энкодера с подачей напряжения соответствующей полярности на электродвигатель. Более сложные микропроцессорные схемы могут учитывать инерцию и реализовывать плавный разгон и торможение, однако данные функции могут компенсироваться использованием сторонних библиотек при программировании основного микроконтроллера, управляющего сервоприводом. Пример сторонней библиотеки, реализующей плавный разгон и торможение – ServoSmooth под авторством AlexGyver

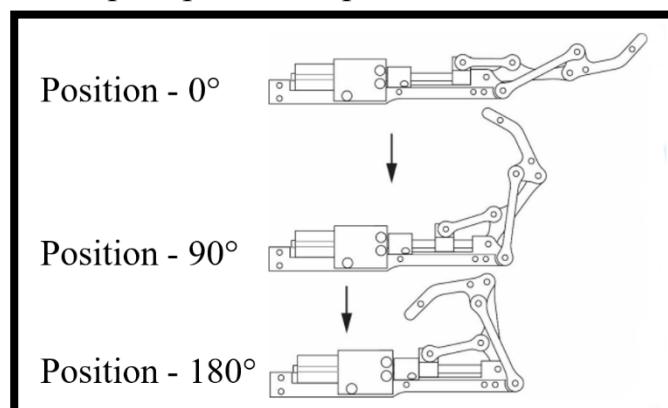
4. **Аналоговый вход**, подающий ШИМ-сигнал для манипулирования сервоприводом.

• **Шаговый двигатель (Шаговый электродвигатель)** – синхронный бесщёточный электродвигатель с несколькими обмотками. Подаваемый на одну обмотку ток вызывает фиксацию ротора, а последующие последовательные активации обмоток вызывают шаговые движения шагового двигателя. Главным преимуществом шаговых приводов является очень высокая точность. При активации определённой обмотки двигатель поворачивается на строго соответствующий угол. Шаговый привод является недорогой альтернативой сервопривода и может использоваться в бионических протезах. Минусом шагового двигателя может являться его больший размер по сравнению с сервоприводом, но, при грамотной расстановке внутри бионического протеза, использование шаговых двигателей технически реализуемо.



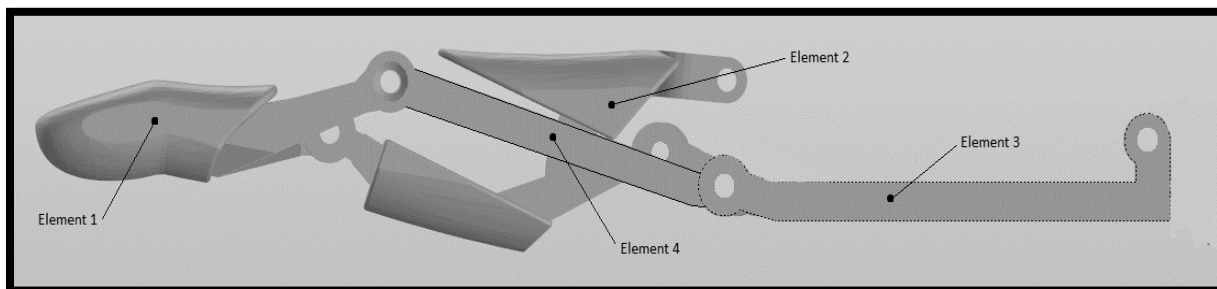
Шаговый электродвигатель с 8 обмотками

Среди бионических протезов кисти или предплечья преобладает использование сервоприводов так как они обладают необходимыми в работе возможностями и имеют ряд преимуществ перед шаговыми двигателями, в основном, в скорости и цене. Именно сервоприводы приводят в движение пальцы протезов, позволяя им сгибаться и разгибаться подобно обычным человеческим пальцам. Во многих протезах используется следующий или подобный механизм для искусственных пальцев.



Данная конструкция рассчитана на линейные сервоприводы, имеющие иную функцию, однако они не имеют существенных различий с уже описанными сервоприводами кроме видоизменённого вала и редуктора. Поворот линейного сервопривода и сгибание пальца происходят следующим образом:

Исходя из материала, подведём итог. Сервопривод и шаговый двигатель



играют роль искусственной мышцы, позволяя сгибать и разгибать механизм искусственного пальца бионического протеза. Была рассмотрена последняя часть компонентов бионического протеза кисти.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой исследовательской работе мной были описана структура перехода нервного импульса под воздействием ацетилхолина в бионический протез, где посредником является микроконтроллер, разобраны составляющие бионического протеза, такие, как литий-полимерные, литиево-кобальтовые, литиево-марганцовые, литиево-железофосфатные и литиево-титановые аккумуляторы, BMS, электронейромиографический контроллер, микроконтроллер и сервопривод. Также были подробно описаны составляющие микроконтроллера: Процессор (в т.ч. энергоэффективность и преимущества ARM процессоров), оперативная занятая память (ОЗУ) типа SRAM, энергонезависимая память EEPROM и вытеснившие её аналоги NAND и NOR, таймеры и сторожевой таймер, аналогово-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи, генератор тактовой частоты и его виды, порты и шины UART, SPI, I2C, 1-Wire; использование беспроводных модулей Wi-Fi и Bluetooth. Разобрал составляющие сервопривода и шагового двигателя и привёл пример манипулирования пальцем бионического протеза при помощи линейного сервопривода.

Добавлю, что и современные бионические протезы используют устаревающую технологию управления при помощи считывания биопотенциалов мышц. Развитие нейрокибернетики и появление нейрокомпьютерных интерфейсов позволяет использовать эти технологии для связи бионического протеза напрямую с мозгом, а примером использования этих технологий является кохлеарный нейроимплантат. Также хочу подметить, что стоимость бионических протезов плохо оправдана и, по моему мнению, после проверки сравнения стоимости комплектующих и работ, она оказалась невероятно сильно переоценена. Пора задуматься над разработкой улучшенных бионических протезов и тем более – новым методом управления бионическими протезами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ресурс Google Картинки – Режим Доступа: <https://www.google.by/imghp>
2. Викисклад фонда Wikimedia – Режим Доступа: <https://commons.wikimedia.org/wiki/>
3. Моторика, производитель протезов РФ – Режим Доступа: <https://motorica.org/blog/tpost/fzm1vu86m1-istoriya-protezirovaniya-ot-indiiskoi-ko>
4. Интернет-журнал Культурология – Режим Доступа: <https://kulturologia.ru/blogs/030815/25554/>
5. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Берлихинген,_Готфрид_фон
6. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Центральная_нервная_система
7. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Спинной_мозг
8. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Миелин>
9. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ацетилхолин>
10. Библиотека плавного управления сервоприводами – Режим доступа: <https://alexgyver.ru/servosmooth/>
11. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Зависание>
12. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Таймер_\(информатика\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Таймер_(информатика))
13. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Генератор_Пирса
14. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/RC-цепь>
15. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Сторожевой_Таймер
16. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Атомарная_операция
17. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Микроконтроллер>
18. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Процессор>
19. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ARM>
20. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/RISC>
21. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/MIPS>
22. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ЦАП>

23. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа:
<https://ru.wikipedia.org/wiki/АЦП>
24. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа:
<https://ru.wikipedia.org/wiki/ПЗУ>
25. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа:
https://ru.wikipedia.org/wiki/Оперативная_Память
26. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа:
<https://ru.wikipedia.org/wiki/EEPROM>
27. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа:
https://ru.wikipedia.org/wiki/Энергонезависимая_память
28. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа:
<https://ru.wikipedia.org/wiki/SRAM>
29. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа:
<https://ru.wikipedia.org/wiki/DRAM>
30. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа:
<https://ru.wikipedia.org/wiki/Флеш-память>
31. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа:
<https://ru.wikipedia.org/wiki/I2C>
32. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа:
<https://ru.wikipedia.org/wiki/SPI>
33. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа:
<https://ru.wikipedia.org/wiki/UART>
34. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа:
<https://ru.wikipedia.org/wiki/1-Wire>
35. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа:
<https://ru.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>
36. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа:
<https://ru.wikipedia.org/wiki/Bluetooth>
37. Компьютерная компания Никс. Протокол RFCOMM – Режим Доступа:
https://www.nix.ru/computer_hardware_news/hardware_news_viewer.html?id=187908
38. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа:
<https://ru.wikipedia.org/wiki/Сервопривод>
39. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа:
<https://ru.wikipedia.org/wiki/Пневмопривод>
40. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа:
https://ru.wikipedia.org/wiki/Датчик_угла_поворота
41. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа: Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Редуктор>
42. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа:
https://ru.wikipedia.org/wiki/Шаговый_Двигатель
43. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа:
https://ru.wikipedia.org/wiki/Литий-ионный_аккумулятор
44. Википедия, свободная энциклопедия – Режим Доступа:
https://ru.wikipedia.org/wiki/Литий-полимерный_аккумулятор

45. Сообщество IT-специалистов Habr. «Разрабатываем бионический протез с нуля»: <https://habr.com/ru/post/572146/>

46. Белорусский национальный технический университет. «Программируемые цифровые устройства: Микроконтроллеры» – Режим Доступа: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/70435/Programmiruemye_cifrovye.pdf