

# ТАКТИЛЬНО-ПРОПРИОЦЕПТИВНАЯ СИСТЕМА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ МИОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОТЕЗА<sup>1</sup>

Туровский Я.А.,

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*

*Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия*

yaroslav\_turovsk@mail.ru

Миронкин А.П., Токарев Р.А., Вахтин А.А., Борзунов С.В.

*Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия*

artemmironkin@gmail.com, ghostnight600@gmail.com, alvahtin@gmail.com, sborzunov@gmail.com

*Аннотация. Представлена информационная система, реализующая принцип обратной связи для виртуального миоэлектрического протеза. Эта система предоставляет возможность управления виртуальной рукой с помощью мышечной активности. Применение нового канала коммуникации позволяет совершенствовать эргономичность и функциональность миоэлектрических протезов.*

*Ключевые слова: эргатическая система, миоэлектрический протез, миографический интерфейс.*

## Введение

В развитии т. н. биопротезирования одно из ведущих мест в настоящее время занимают системы протезов верхних конечностей, как одни из самых востребованных технических решений [1, 2]. Совершенствуясь на протяжении длительного времени, подобные системы, управляемые электрической активностью мышц пользователя достигли высокого совершенства, обеспечивая, в значительной мере, восстановление утраченных моторных функций. Однако, подавляющее большинство подобных изделий даже на лабораторном уровне не обеспечивают минимальное восстановление сенсорных функций, что, фактически, существенно ограничивает функционал применения миоэлектрических протезов [3]. Интактной верхней конечностью человек способен выполнять функции без контроля зрительного анализатора, за счёт наличия систем обратной связи, тактильной, обеспечивающей контроль за характером поверхности захватываемого объекта, проприоцептивной, обеспечивающей контроль за положением верхней конечности, температурной, обеспечивающей контроль за температурой захватываемого объекта и болевой, не дающей нанести чрезмерные повреждения верхней конечности. Указанная группа систем в случае здорового человека обеспечивает практически полный контроль работы верхней конечности без участия зрения [4, 5]. С другой стороны, очевидно, что повреждение или отсутствие любого компонента из этой группы систем, равно как и системы в целом, приводит к существенным сложностям в генерации активности верхней конечности. Отсюда очевидно, что и отсутствие даже минимального функционала систем обратной связи для миоэлектрических протезов вынуждает пользователя выполнять действия только под контролем зрения, что существенно ограничивает возможности взаимодействия с внешними объектами.

С другой стороны, развитие систем виртуальной и дополненной реальности требует формирования система обратной связи обеспечивающей взаимодействия оператора с объектами виртуального или дополненного мира. В этом случае системы обратной связи с виртуальной верхней конечности формируют, в рамках парадигмы дополненного управления, новый канал коммуникации дополняющий и расширяющий возможности взаимодействия человека и виртуального объекта.

## 1. Программно-аппаратный комплекс системы обратной связи для миоэлектрического протеза

### 1.1. Блок-схема программно-аппаратного комплекса

Основой для операций управления контроля и корректировки является информация, характеризующая положение протеза в пространстве, и описывающая объект, с которым протез взаимодействует.

Рука человека имеет возможность чувствовать свое положение в пространстве, определять текстуру

---

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00664, <https://rscf.ru/project/23-19-00664/>

объекта, температуру, форму, состояния и др. Реализуем систему обратной связи протеза, используя датчики оценки положения пальцев, способные оценить, в каком положении находится палец на данный момент. Для моделирования системы оценки касания реализуем систему датчиков оценки механического взаимодействия ладони и пальцев протеза с объектами окружающей среды. Для оценки температуры используем термопару, данные с которой также можно будет использовать для корректировки значений датчиков касания.

Полученное решение обеспечивает воспроизведение для реального или виртуального миоэлектрического протеза основных систем обратной связи: проприоцептивной, тактильной, температурной. В дальнейшем рассмотрим подробнее каждую из этих систем.

## 1.2. Системы обратной связи для реального и виртуального миоэлектрического протеза

### Датчики изгиба пальцев кисти

Ощущение движения и относительного положения части тела в пространстве у живых организмов обеспечивается системой органов проприоцепторов. Применительно к верхним конечностям это означает, что человек постоянно понимает, в каком положении находится кисть и пальцы, контролирует характер движения и скорость. Для моделирования ощущения проприоцепции в бионическом протезе необходимо разработать датчики способные определять положения пальцев в статическом положении и в движении. Система датчиков должна в режиме реального времени передавать информацию о положении фаланг пальцев протеза пользователю, микропроцессор должен анализировать полученную информацию и передавать оператору протеза.

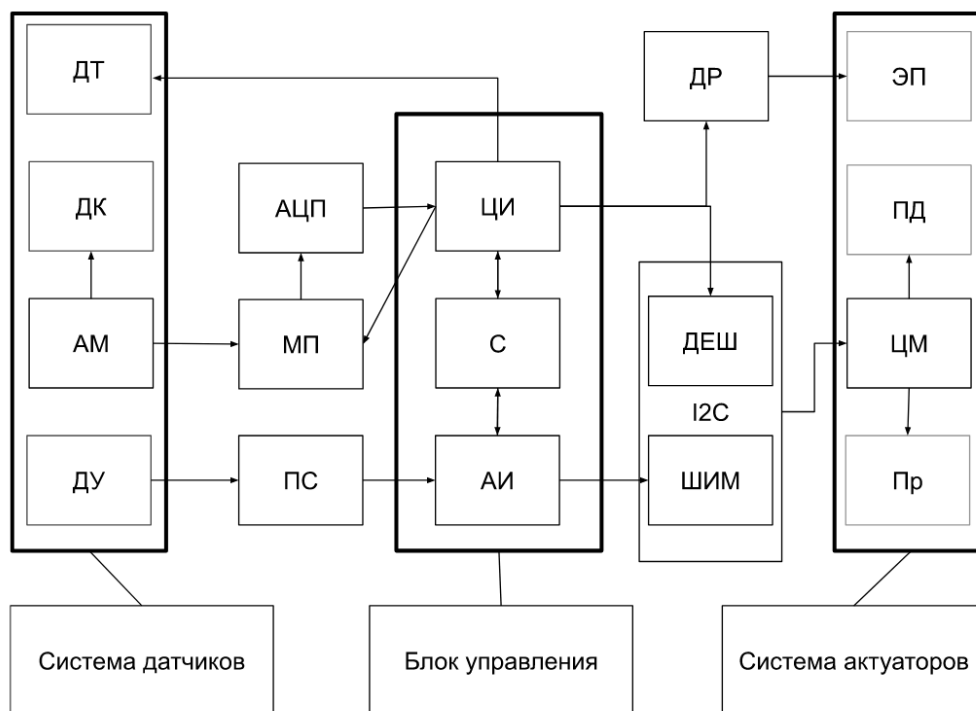
В качестве органов проприоцепторов в протезе верхних конечностей логично использовать датчики сопоставляющие положение пальца в согнутом и расслабленном виде. Датчик должен оценивать изменяющийся угол изгиба, а не выдавать дискретное значение, согнут или разомкнут палец. Было принято решение использовать датчики изгиба. Были рассмотрены два варианта датчиков способных обеспечить реализацию подобного функционала: оптический датчик изгиба и тензорезистивный.

В оптическом датчике меняется уровень улавливаемого чувствительным элементом сигнала от излучателя при деформации проводящей трубки. Принцип действия тензорезистора основан на изменении сопротивления токопроводника при его гибкой деформации. Для реализации был выбран тензорезистивный датчик, поскольку он более помехоустойчив и энергоэффективен, а также поскольку для его работы не требуется питать отдельно чувствительный элемент – фоторезистор и излучатель – светодиод.

Набор из пяти датчиков был установлен в каждую фалангу пальцев, что позволило отслеживать угол изгиба пальца и не задействуя органы зрения получать информацию о положении пальцев протеза в режиме реального времени.

### Датчик температуры

Для оценки температуры объекта взаимодействия в протез был встроен цифровой термометр. Оценка температуры повышает эргономичность использования протеза благодаря появлению нового канала обратной связи. Также получая информацию о температурном режиме среды, в которой используется протез, возможно реализовать систему реагирования на условия, опасные для использования бионического протеза как сложного физического устройства. Тем самым повышается надежность и долговечность программно-аппаратного комплекса в целом (см. рис. 1).



ДТ - датчик температуры, ДК - датчик касания, АЦП - аналогово цифровой преобразователь, ДЕШ - дешифратор задающий адрес, ДР - драйвер питания, ЦИ - цифровой интерфейс, АИ - аналоговый интерфейс, ДУ - датчик угла, ПС - преобразователь сопротивления, С - сумматор, ШИМ - контроллер широтно импульсной модуляции, ЭП - элемент Пельтье, ЦМ - цифровой мультиплексор, АМ - аналоговый мультиплексор, МП - мостовой преобразователь, Пр - электромеханический привод, ПД - привод давления

Рис. 1. Блок-схема программно-аппаратного комплекса

Используя значения температуры окружающей среды, возможно вносить автоматические корректировки датчиков касания, которые чувствительны к этим значениям. Таким образом существует возможность получить замкнутую систему управления с системой автоматической корректировки.

#### Тактильные датчики

Для решения задачи подбора датчиков способных обеспечить необходимый объём информации достаточной для обеспечения понимания пользователем параметров объекта взаимодействия необходимо, чтобы датчик мог понимать взаимодействует с чем-то объект или нет, оценивать его размеры и меть ресурс работы позволяющий осуществлять постоянную работу в течении продолжительного периода времени.

Последнее требование позволяет отказаться от использования привычных переменных резисторов, основанных на принципе изменения сопротивления за счет изменения длины проводника путем перемещения контактора поскольку подобную систему сложно реализовать или использовать готовое решение без набора сложных подвижных элементов, подверженных истиранию и деформации при длительной эксплуатации в окружающей среде. Поэтому было принято решение использовать чувствительные тензорезисторы, общий принцип действия которых был рассмотрен выше. Различие между модулем проприоцептивных датчиков и датчиков касания заключается в уровне чувствительности. Для системы касания были использованы пленочные тензорезисторы, используемые в весах. Работая в связке с модулем АЦП и мультиплексором получилось наладить работу системы из 16 датчиков, способных оценивать размеры объекта, с которым взаимодействует протез.

Рассмотрим более подробно систему актуаторов.

#### Термоактуаторы

Для системы актуаторов, работающих в связке с термодатчиком, необходимо разработать устройство, способное передавать температуру пользователю. Поскольку логично использовать чувствительность здорового участка кожи к температуре как уже имеющийся канал связи в организме. Можно сформулировать задачу температурного актуатора как задачу перевода цифровой

характеристики с датчика температуры в физический нагрев температурного актуатора. Рассмотрев вариант с нагревом проводника при прохождении по нему тока, было принято решение отказаться от данного подхода ввиду его опасности и энергозатратности. В качестве температурного актуатора был использован элемент Пельтье, характер работы которого в решении нашей задачи будет достаточно оценить как возможность охлаждаться и нагреваться при прохождении тока по его составным элементам. Используя систему из двух элементов Пельтье, отвечающих за знакопеременную передачу температуры, драйвер подачи питания и вычислительный алгоритм определения коэффициента усиления, получилось реализовать нативную передачу температуры от протеза пользователю.

#### Проприоцептивные актуаторы

Основной задачей актуаторов является передача информации от протеза к пользователю. Для максимальной эргономичности будем руководствоваться принципа уже использованного в термоактуаторах а конкретно в моделировании системы актуаторов похожих по своему принципу действия на имеющиеся в организме. Если для температурного датчика это воздействия температурой на кожу, то для проприоцепции это давление и перемещение по коже контактного валика. Таким образом, алгоритм работы можно описать следующим образом: изменение положение пальца вызывает пропорциональное перемещение валика упруго надавливающего на свободный участок кожи человека. Масштабируя указанный алгоритм на пять пальцев, получим потребность разместить на коже систему из пяти электромеханических приводов, способных изменять положение валика, воздействующего на пользователя в заданном диапазоне.

#### Актуаторы касания

Для данной подсистемы нужно разработать модуль актуаторов передающих срабатывание датчиков касания через давление на кожу. Имея большое количество датчиков необходимо разработать комплекс актуаторов, компактно расположенных относительно друг друга на руке пользователя (см. рис. 2).

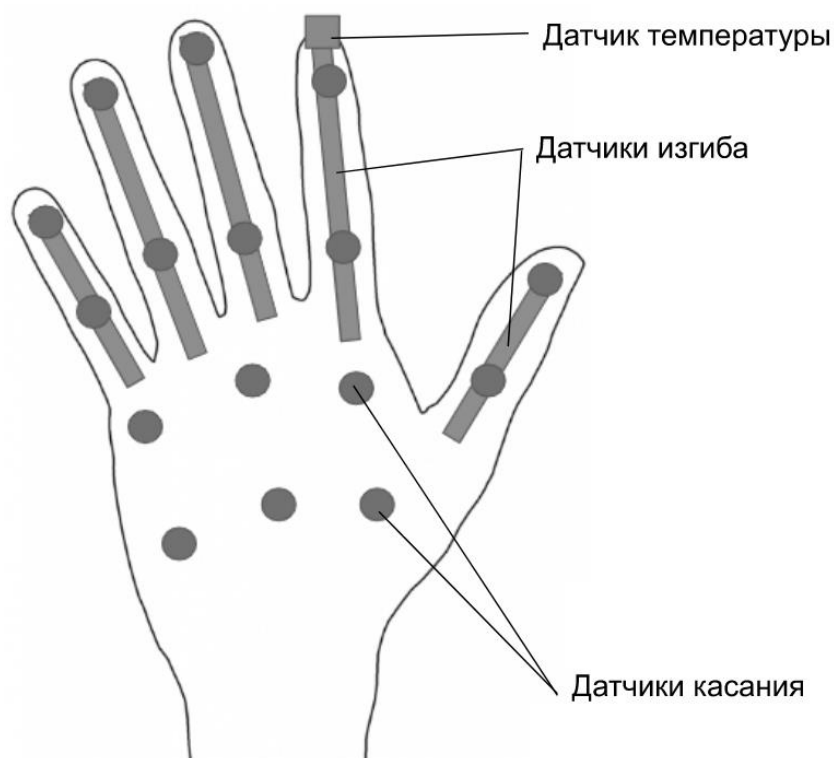


Рис. 2. Расположение датчиков различного назначения на поверхности руки

На данный момент разработана и апробируется возможность использовать ферромагнитную жидкость. Разместив жидкость в гибкой изолирующей капсуле и создавая магнитное поле электронным магнитом можно преобразовывать размеры капсулы гибко сгибающейся за счет движения внутри нее жидкости. Тем самым сигнал от датчика касания преобразуется в физическое воздействие на кожу.

## 2. Программная реализация информационной системы виртуального миоэлектрического протеза с обратной связью

Подготовка пользователя к применению миоэлектрического протеза включает в себя и достаточно длительный, в рамках реабилитационного периода, цикл работы на тренажерах. Одним из таких тренажеров является система, обеспечивающая взаимодействие с виртуальными объектами.

Реализованы проект на Unity и приложение на C#, обрабатывающее поступающий электромиографический сигнал и отправляющий команды в Unity проект с виртуальной рукой. Это приложение способно получать данные о касании виртуальной рукой различных предметов при различной виртуальной температуре. Электромиографический сигнал принимается и сглаживается скользящим средним, после чего соответствующие значения сглаженного и исходного сигнала вычитаются по модулю, а разности впоследствии суммируются, образуя накопленную сумму. После этого сумма сравнивается с верхней зафиксированной в ближайшее время границей накопленной суммы и нижней границей, после чего определяется должное положение пальца и команда передается на виртуальную руку. Для каждого пальца используется отдельный канал, что позволяет пользователю, напрягая мышцу, с которой записывается канал, управлять положением пальца. Со временем, в случае, если границы не обновляются, нижняя граница постепенно увеличивается, а верхняя уменьшается, чтобы избежать потери чувствительности после того, как программы зафиксирует слишком сильное или слишком слабое напряжение. Интерфейс программы, реализующей данные вычисления, представлен на рис. 3.

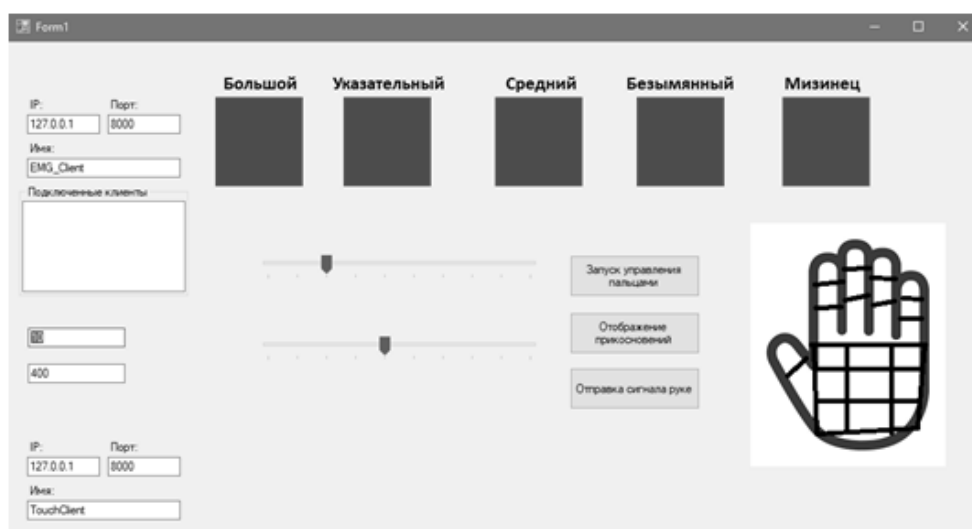


Рис. 3. Внешний вид программы

В интерфейсе присутствуют ползунки чувствительности, которые позволяют настроить работу программного обеспечения под каждого пользователя. Также присутствует возможность установить необходимый размер децимации для оптимизации работы программы под определенные системы. Кроме того, присутствуют элементы отображения положения пальцев и прикосновений к предметам.

Виртуальная рука имеет возможность сгибать по отдельности каждый из пальцев, причем пальцы могут быть согнуты не полностью. Путем этого пользователь может брать предметы этой виртуальной рукой. Ее внешний вид изображен на рис. 4.

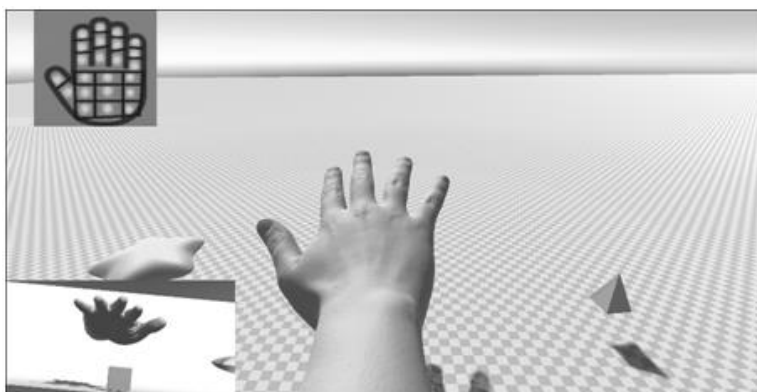


Рис. 4. Внешний вид виртуальной руки на виртуальном полигоне

В процессе тестирования функционала были обнаружены следующие особенности.

- При слишком большом мышечном напряжении или расслаблении программа становится менее чувствительной к обычным стимуляциям.
- Кроме того, каждый пользователь имеет разную развитость используемых групп мышц, а потому было невозможно одинаково удобно управлять степенями сгиба отдельных пальцев.

Для исправления были внесены следующие изменения:

- Были добавлены ползунки чувствительности, определяющие пределы для сгиба пальцев, так как каждый пользователя имеет разную развитость используемых групп мышц. Один из них определяет границу, достигая которую происходит неполный сгиб пальца, а второй – границу, достигая которую происходит полный сгиб.
- Далее было добавлено устранение потери чувствительности после того, как программы зафиксирует слишком сильное или слишком слабое напряжение. Каждый небольшой промежуток времени верхняя граница постепенно уменьшается, а нижняя, в свою очередь, увеличивается.

### 3. Заключение

Рассмотренная информационная система, действующая по принципу обратной связи для виртуального миоэлектрического протеза, предоставляет возможность управления виртуальной рукой с помощью мышечной активности. Эта система также работает на использовании абсолютных значений, находящихся путем вычисления неотрицательной разности между сигналом, сглаженным скользящим средним и исходным сигналом. Виртуальная рука была успешно реализована в рамках данного проекта, причем каждый палец на виртуальной руке использует отдельный канал для управления. Рука способна взаимодействовать с виртуальными объектами, предоставляя возможность для высокоэффективной домашней реабилитации. Новый канал коммуникации позволяет совершенствовать эргономичность и функциональность миоэлектрических протезов, а также в целом дополняет и расширяет возможности взаимодействия человека и виртуальных объектов.

### Литература

1. Roche A.D., Rehbaum H., Farina D., Aszmann O.C. Prosthetic myoelectric control strategies: A clinical perspective // Current Surgery Reports. – 2014. – Vol. 2. – P. 1-11.
2. Li W., Shi P., Li S., Yu H. Current status and clinical perspectives of extended reality for myoelectric prostheses // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. – 2024. – Vol. 11. – P. 1334771.
3. Fougner A., Stavdahl Ø., Kyberd P. J., Losier Y. G., Parker P. A. Control of upper limb prostheses: Terminology and proportional myoelectric control – A review // IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering. – 2012. – Vol. 20(5). – P. 663-677.
4. Туровский Я.А., Борзунов С.В., Вахтин А.А. Эмоционально зависимые нейрокомпьютерные и окулографические интерфейсы на основе дополнительного канала связи человек-компьютер // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2019): материалы Двенадцатой междунар. конф. – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 1152-1153.