

Обратная сенсорная связь для протеза кисти руки

К. К. Иванова, М. Евиченко, Е. Коринец, А. Соколов

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

kirakos196@mail.ru, madoricup@gmail.com,
bobrdoobrmisana@gmail.com, sasha.sokolow.xxx@gmail.com

Аннотация. Данная работа посвящена обзору неинвазивных методов сенсорной обратной связи в бионических протезах верхних конечностей. Рассмотрены физиологические основы соматосенсорного восприятия и три ключевые технологии: вибротактильная (вибромоторы с соматотопическим картированием), электротактильная (стимуляция нервов через кожу с поиском рефлекторных зон) и механико-рефлекторная (стимуляция сухожилий, замыкающая контур управления через спинальные рефлексы). Проведен сравнительный анализ методов по критериям естественности, информационной емкости и энергопотребления, определены перспективы развития гибридных систем.

Ключевые слова: бионический протез; протез кисти; электротактильная технология; вибротактильная технология; механико-рефлекторная технология; неинвазивные технологии; кисть руки

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные бионические протезы верхних конечностей достигли значительного прогресса в реализации моторных функций за счет многоканальных систем управления на основе поверхностной электромиографии и технологий распознавания образов движений. Однако уровень функциональной интеграции устройства в сенсомоторный контур пользователя остается неудовлетворительным. По данным эпидемиологических исследований, частота отказов от использования дорогостоящих многофункциональных протезов кисти достигает 30–50%, что в значительной степени обусловлено отсутствием интуитивно понятного канала обратной сенсорной связи. В условиях дефицита афферентной информации пользователь вынужден компенсировать недостаток ощущений чрезмерной активацией зрительного и слухового анализаторов, что приводит к росту когнитивной нагрузки и исключает возможность воплощения искусственной конечности в схему тела.

Инвазивные подходы, включающие имплантацию электродов в периферические нервы, обеспечивают наиболее физиологичную передачу сенсорной информации, однако их широкое клиническое применение сдерживается хирургическими рисками, биосовместимостью материалов и высокой стоимостью процедуры. В связи с этим особую научно-практическую значимость приобретает разработка и сравнительный анализ неинвазивных методов обратной сенсорной связи, реализуемых посредством транскутанной стимуляции сохранных механо- и ноцицептивных структур кожи культи.

Целью работы является систематизация и классификация существующих неинвазивных типов обратной сенсорной связи (далее – ОСС) для бионических протезов кисти руки на основе анализа их технических характеристик и нейрофизиологических принципов кодирования сенсорной информации.

II. ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СЕНСОРНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

A. Соматосенсорная система человека

Кожные рецепторы делятся на быстро и медленно адаптирующиеся, что позволяет нервной системе получать полную информацию как о статичном давлении, так и о динамических изменениях.

Тельца Мейснера. Расположены поверхностно, обладают малыми рецептивными полями. Обеспечивают высокую чувствительность к легким прикосновениям, фактуре предметов и низкочастотной вибрации [6].

Диски Меркеля. Также обладают малыми полями и высокой разрешающей способностью. Отвечают за восприятие длительности давления и формы предметов, позволяя удерживать мелкие объекты.

Тельца Пачини. Самые крупные, глубокие рецепторы. Реагируют только на быстрые изменения давления (высокочастотная вибрация до 1000 Гц и глубокое давление).

Тельца Руффини. Воспринимают растяжение кожи. В суставных сумках играют роль проприорецепторов, реагируя на степень растяжения капсулы и помогая ощущать положение суставов в пространстве [7].

Рецепторы опорно-двигательного аппарата (проприорецепторы) дают «мышечное чувство» – информацию о положении конечностей, движении и усилии.

Мышечные веретена следят за длиной мышцы и скоростью ее растяжения, что критически важно для тонуса и рефлексов.

Сухожильные органы Гольджи измеряют напряжение мышцы, выступая защитным механизмом от повреждений.

B. Фантомные ощущения и соматотопическая организация

Основой для понимания сенсорной обратной связи служит концепция соматотопической организации коры (сенсорный гомункулус Пенфилда). Кора содержит упорядоченную нейрональную карту тела, где области с

наиболее плотной иннервацией (рот, кисть, пальцы) занимают непропорционально большую площадь. Важнейшее следствие - феномен фантомной конечности. Нейрофизиологические исследования доказали его корковую природу: карта ампутированной конечности сохраняется в мозге пожизненно. Электрическая стимуляция нервов культи вызывает у ампутантов четкие ощущения, проецирующиеся на отсутствующую кисть. Существуют две модели фантомных феноменов: маладаптивной реорганизации (соседние зоны «захватывают» кору) и персистирующей репрезентации (представительство конечности остается активным). Современные модели показывают, что они дополняют друг друга. Для протезирования из этого следует фундаментальный вывод: сохранность корковой карты позволяет использовать её для передачи сенсорной информации. Воздействуя на нервные структуры культи, можно генерировать сигнал, который попадет именно в ту зону коры, которая «запрограммирована» на восприятие сигналов от кисти [4].

С. Принципы кодирования сенсорной информации

Кодирование информации о стимуле осуществляется за счет временных и пространственных паттернов нервных импульсов.

Кодирование модальности (типа ощущения). Обеспечивается принципом «меченой линии»: каждый тип рецепторов чувствителен к своему раздражителю, и сам факт активации конкретного пути уже несет информацию о типе сигнала.

Кодирование интенсивности. Обеспечивается двумя механизмами: частотным кодированием (рост частоты импульсов при усилении стимула) и популяционным кодированием (вовлечением большего числа рецепторов).

Кодирование временных параметров. Начало и конец стимула кодируются фазными ответами быстро адаптирующихся рецепторов, а длительность – тоническим разрядом медленно адаптирующихся.

Пространственное кодирование. Информация о локализации кодируется за счет топической организации – упорядоченной проекции рецептивного поля на нейронные структуры (сенсорные карты). Пространственное разрешение зависит от размера рецептивных полей и латерального торможения [3].

Особенностью нервного кодирования является его избыточность: один параметр может кодироваться параллельно несколькими способами, что повышает надежность восприятия. На периферии ведущую роль играет временное кодирование (паттерны импульсации), а в коре – пространственное (возбуждение специфических групп нейронов).

III. НЕИНВАЗИВНЫЕ МЕТОДЫ СЕНСОРНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

А. Вибротактильная стимуляция

Вибротактильная ОСС основана на активации быстро адаптирующихся механорецепторов кожи (преимущественно телец Пачини и телец Мейснера в высокочастотном диапазоне) посредством модулированных механических колебаний. В качестве исполнительных устройств применяются линейные резонансные актуаторы либо эксцентрики

вращающиеся массы. С точки зрения кодирования информации о состоянии исполнительного механизма протеза, модуляция сигнала осуществляется по одному из двух параметров: амплитуде вибрации (интенсивность) или частоте сигнала (обычно в полосе 50–250 Гц). В рамках проприоцептивного замещения вибротактильная обратная связь обеспечивает эффективную передачу кинематических параметров движения пальцев за счет феномена тендонной вибрационной иллюзии, индуцирующей у пользователя ощущение изменения угла сустава или скорости движения конечности. Основным техническим преимуществом метода является ультранизкое энергопотребление и возможность интеграции в гильзу протеза без существенного увеличения массогабаритных характеристик (табл. 1).

В. Электротактильная стимуляция

Электротактильный метод реализуется путем чрескожной электрической стимуляции поверхностных нервных волокон с использованием матричных или коаксиальных электродов. В отличие от механической вибрации, электрическая стимуляция обеспечивает прямое возбуждение афферентных аксонов при прохождении тока плотностью от 1 до 20 мА. Информационная емкость данного канала связи достигается за счет многомерной модуляции параметров импульсной последовательности: вариации амплитуды тока (кодирование силы захвата), частоты следования импульсов (кодирование скорости смыкания) и ширины импульса (пространственная локализация). Несмотря на высокую энергоэффективность и компактность системы, клиническое применение ограничено нестабильностью интерфейса «электрод–кожа» (вариабельность импеданса при изменении потоотделения) и риском возникновения паразитной интерференции с каналами управления, основанными на поверхностной электромиографии.

С. Механико-рефлекторная стимуляция

Данный тип ОСС направлен на создание локального механического смещения кожного покрова (давления или сдвига) для избирательной активации медленно адаптирующихся механорецепторов Меркеля и Руффини, отвечающих за восприятие статической силы и тактильного образа объекта. Исполнительные механизмы представлены пьезоэлектрическими толкателями, сервоприводами с тактильными штифтами или пневматическими манжетами. Ключевым отличием метода является биомиметичность, то есть максимальная степень естественности перцептивного образа. Однако реализация обратной связи по силе схвата методом прямого давления на культи сопряжена с технологическими ограничениями, связанными с громоздкостью актуаторов и высоким удельным энергопотреблением, что накладывает существенные ограничения на автономность носимых устройств.

ТАБЛИЦА I.

Параметр	Вибротактильная	Электротактильная	Механико-рефлекторная
Физический принцип	Механическая вибрация	Электрический ток	Механическое давление /сдвиг
Тип рецептора-мишени	Тельца Пачини	Афферентные нервы	Тельца Меркеля, Мейснера
Модулируемые параметры	Частота (Гц) амплитуда	Ток (мА) частота импульса	Сила (Н) смещение (мм)
Энергопотребление	Низкое	Очень низкое	Высокое

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного аналитического обзора научно-технической литературы систематизированы и детально охарактеризованы три базовых типа неинвазивной обратной сенсорной связи, применимых в системах управления бионическими протезами кисти: вибротактильный, электротактильный и механотактильный.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность Кузьминой Наталье Николаевне и Титовой Илоне Игоревне за познавательные обсуждения и развитие интереса к данной теме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Воротников С.А., Струнин В.С., Выборнов Н.А. Биометрическая система управления протезом руки // Прикаспийский журнал: Управление и высокие технологии. 2013. №3. С. 147-162.
- [2] Югова Е.А. Ю15 Психофизиология сенсорных систем: учебное пособие. Екатеринбург: УрГПУ, 2024. 249 с
- [3] Ковалева А. В. К56 Нейрофизиология, физиология высшей нервной деятельности и сенсорных систем: учебник для академического бакалавриата. Изд-во Юрайт, 2016. 365 с. Серия: Бакалавр. Академический курс.
- [4] Корабельников Д.И., Ткаченко Е.В. Магомедалиев М.О. Фантомы и фантомные конечности: история описания феномена. Эпилепсия и пароксизмальные состояния. 2024, 16 (4): 409-416 <https://doi.org/10.17749/2077-8333/epi.par.sop.2024.219>
- [5] «Функциональные методы исследования чувствительности пальцев кисти» В.Ф. Байтингер, А.А. Никулин, ГБОУ ВПО СибГМУ Минздрава России, г. Томск, АНО НИИ микрохирургии ТНЦ СО РАМН, г. Томск // журнал «Вопросы реконструктивной и пластической хирургии» № 1(44) март 2013.
- [6] USH2A is a Meissner's corpuscle protein necessary for normal vibration sensing in mice and humans Fred Schwaller, Valérie Bégay, Gema García-García, Francisco J. Taberner, Rabih Moshourab, Brennan McDonald, Trevor Docter, Johannes Kühnemund, Julia Ojeda-Alonso, Ricardo Paricio-Montesinos, Stefan G. Lechner, James F.A. Poulet, Jose M. Millan & Gary R. Lewin. // Nature Neuroscience, volume24, pages74–81 (2021)
- [7] Быков В.Л. Частная гистология человека. СПб.: Сотис, 2001. 304 с.