

РОЛЬ ГИБКИХ СЕНСОРОВ В РАЗРАБОТКЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ БИОНИЧЕСКИХ ПРОТЕЗОВ

*Уткина А.А., Барухов С.А., Решетников Д.С., Преснова Е.С.
Московский авиационный институт (национальный исследовательский
университет), Москва*

Ключевые слова: бионические протезы, гибкие сенсоры, чувствительные протезы, гибкие материалы, покрытие e-dermis, адаптивные протезы.

Аннотация. В данной статье будут рассмотрены гибкие сенсоры: принцип работы, возможности применения в бионических протезах. Приведены материалы, используемые при создании датчиков, также освещается тема, связанная с тактильной чувствительностью на примере специального покрытия e-dermis. Рассматривается применение адаптивных протезных систем их преимущества и проблемы, возникающие при их разработке.

THE ROLE OF FLEXIBLE SENSORS IN THE DEVELOPMENT OF SENSITIVE BIONIC PROSTHESES

*Utkina A.A., Barukhov S.A., Reshetnikov D.S., Presnova E.S.
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow*

Keywords: bionic prostheses, flexible sensors, sensitive prostheses, flexible materials, e-dermis coating, adaptive prostheses.

Abstract. This article examines flexible sensors, including their operating principles and potential applications in bionic prostheses. The materials used in the creation of such sensors are presented, along with a discussion on tactile sensitivity, exemplified by the specialized e-dermis coating. The application of adaptive prosthetic systems is also considered, highlighting their advantages and the challenges encountered in their development.

Современные бионические протезы представляют собой сложные устройства, сочетающие мехатронные, электронные и нейропротезные технологии для восстановления утраченных функций конечностей, однако протезы, выпущенные на рынок всё ещё несовершенны и уступают по своим возможностям биологическим конечностям. В частности, у них отсутствует или недостаточно совершенна система передачи тактильной и термальной информации от объектов в центральную нервную систему человека. Одно из главных мест в разработке бионики и решения данных проблем занимают сенсорные системы, обеспечивающие протезам возможность взаимодействовать с окружающей средой. Среди них особенно важны гибкие сенсоры, которые предоставляют революционные возможности для разработки высокочувствительных бионических протезов.

Цель данной работы заключается в анализе и исследовании возможностей использования гибких сенсоров в бионических протезах для улучшения передачи тактильной и термальной информации, повышения функциональности и комфорта данных устройств. Работа акцентирует внимание на разработке технологий, которые позволят приблизить характеристики протезов к свойствам биологических конечностей, обеспечивая реалистичность ощущений,

чувствительность к давлению, текстуре и температуре, а также эффективную обратную связь с нервной системой пользователя.

Гибкие сенсоры – это устройства, способные измерять определенные параметры (например, давление, деформацию, температуру или биосигналы) и адаптироваться к сложным поверхностям, таким как кожа человека. В отличие от жестких сенсоров, которые часто характеризуются ограниченной совместимостью с органическими поверхностями и их движениями, гибкие сенсоры изготавливаются из материалов, обладающих механической гибкостью, растяжимостью и прочностью. Такие свойства позволяют создавать протезы, которые точнее воспроизводят естественные ощущения, минимизируют дискомфорт и улучшают обратную связь для пользователей. [1].

Материалы и принципы работы гибких сенсоров

Разработка гибких сенсоров базируется на использовании передовых материалов, таких как:

- проводящие полимеры (например, полианилин, PEDOT:PSS);
- углеродные наноматериалы (например, графен, углеродные нанотрубки);
- металлические наночастицы, нанопроволоки и тонкопленочные материалы;
- силиконы и эластомеры, обладающие высокой эластичностью.

Сенсоры работают на основе изменений электрических, оптических или магнитных свойств материала в ответ на внешние воздействия (давление, растяжение, тепло). Примером являются резистивные сенсоры, где изменение сопротивления указывает на степень деформации, либо емкостные сенсоры, которые реагируют на касание или приближение объектов [2].

Гибкость и совместимость с неровными поверхностями делают такие сенсоры идеальными для работы в контакте с кожей или в качестве компонентов, встроенных в протезные системы, например: бионические протезы.

Применение гибких сенсоров в бионических протезах

Тактильная чувствительность

Гибкие сенсоры позволяют оборудовать протезы системой тактильного восприятия, которая имитирует работу человеческой кожи. Искусственную кожу с тактильными датчиками. Такие сенсоры могут определять давление (например, от захвата объекта или контакта с поверхностью) в реальном времени. Эта разработка позволяет пользователю получать информацию о текстуре и температуре предметов, а также регулировать силу захвата, избегая поломки хрупких предметов или ощущения "нереального" тактильного контакта [3, 4].

Одной из ключевых задач протезирования является создание системы обратной связи, которая передает сигналы от протеза нервной системе человека. Гибкие сенсоры способны фиксировать даже минимальные изменения, передавая сигналы об объекте (температура, текстура поверхности) в мозг протеза. Это важный шаг на пути к созданию протезов, которые смогут приблизиться к имитации реальных тактильных ощущений, как у биологических конечностей.

В статье на сайте [5] описан один из способов передачи сигналов, определяющие давление, боль и температуру к нервной системе человека при помощи гибких сенсоров. На кончиках пальцев находится специальное покрытие

e-dermis [6], сделанное из нескольких слоёв датчиков давления, которые и создают ощущение осязания и боли, путём распознавания раздражителей и передачи сигналов на периферические нервы (рис. 1, 2). Недостаток e-dermis заключается в неспособности ощущать температуру объектов и отсутствию имитации естественной температуры руки.

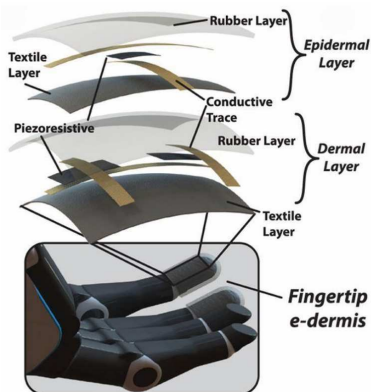


Рис. 1. Модель устройства системы e-dermis

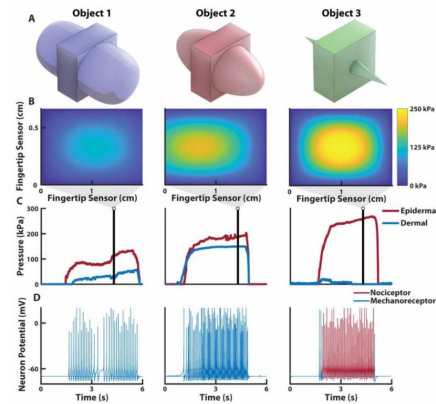


Рис. 2. Принцип работы e-dermis

Есть и другой способ, заключающийся в существовании замкнутой системы, соединяющей силиконовые подушечки на протезе с подушечками на культе и опосредованная воздухом. Силиконовые подушечки со встроенными гибкими датчиками, в зоне ампутационной культи расширяются при прикосновении протезом к объекту, тем самым вызывая у человека ощущение прикосновения. Эта технология имеет те же ключевые недостатки по отсутствию систем ощущения температуры и подогрева, что и e-dermis. Кроме того, уступает e-dermis по диапазону возможностей [7].

Адаптивные протезные системы

Гибкие сенсоры играют ключевую роль в создании адаптивных протезов, которые могут в режиме реального времени реагировать на изменения не только окружающей среды, но и активности пользователя. Например, сенсоры, встроенные в основу протеза, способны мониторить напряжение мышц и передавать эти данные для автоматической настройки силы и скорости движений.

Из выше сказанного можно выделить несколько ключевых преимуществ использования гибких сенсоров в бионике:

- Улучшение биосовместимости. Мягкие материалы минимизируют раздражение кожи и повышают комфорт при длительном использовании.
- Устойчивость к деформациям. Сенсоры сохраняют функциональность даже при значительных изменениях формы или растяжении, что важно для пользователей в активной физической деятельности.
- Высокая чувствительность. Тонкопленочные технологии позволяют фиксировать даже минимальные внешние воздействия.
- Модульность и персонализация. Гибкие сенсоры можно адаптировать для конкретных нужд и интегрировать в протез любой сложности.

Но, несмотря на преимущества гибких сенсоров, их разработка сталкивается с рядом проблем:

– Сложности при массовом производстве, в следствии увеличение стоимости протезов, связанных с использованием передовых материалов и технологий.

– Перспективы миниатюризации остаются важным вопросом, так как прецизионные сенсоры требуют встроенных энергоэффективных схем обработки данных.

– Повышение надежности системы, работающей в условиях повышенной влажности, экстремальных температур и физических воздействий.

Перспективные исследования сосредоточены на создании автономных сенсорных систем, объединяющих сбор данных и их обработку внутри компактного устройства. Также активными остаются исследования о применении гибких сенсоров для сбора данных ЭМГ (электромиографических сигналов), что позволяет улучшить управление протезами.

Вывод

Гибкие сенсоры играют центральную роль в создании чувствительных и адаптивных бионических протезов. Эти технологии обеспечивают не только физическую и комфортную совместимость в биологической системе “человек – протез”, но также способствуют интеграции тактильного восприятия и обратной связи, делая протезы максимально естественными. Несмотря на существующие проблемы, развитие гибких сенсоров формирует революционный подход в бионике, приближая возможности полного восстановления утраченных функций человеческого тела.

Список литературы

1. Takao Someya, Zhenan Bao, George G. Malliaras. The rise of plastic bioelectronics // Nature. 2016, vol. 540, pp. 379-385.
2. Бурункова Ю.Э., Самуйлова Е.О. Сенсорные системы и материалы. – СПб.: Университет ИТМО, 2023. – 117 с.
3. Peng Y., Yang N., X, Q., Dai Y., Wang Z. Recent Advances in Flexible Tactile Sensors for Intelligent Systems // Sensors. 2021, vol. 21(16), p. 5392. doi.org/10.3390/s21165392.
4. Бионические протезы: возможности и ограничения // Архангельское ПрОП [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://prop29.ru/articles/bionicheskie-protezi/>
5. Учёные хотят заставить протезы передавать болевые ощущения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rb.ru/story/making-bionic-arms-feel-pain/>.
6. Лабораторное оснащение // Электронная кожа научит протезы осязать и болеть [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.moslabo.ru/info/elektronnaya-kozha-nauchit-protezy-osyazat-ibolet/>
7. Хоукс Шервуд. Сенсорная обратная связь для пользователей бионического протеза руки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://olymp.hse.ru/mirror/pubs/share/841521952.pdf>.

Сведения об авторах:

Уткина Арина Александровна – техник учебно-научной производственной лаборатории 1101;

Барухов Сергей Алексеевич – техник кафедры 1101;

Решетников Даниил Сергеевич – техник кафедры 1101;

Преснова Елизавета Сергеевна – инспектор отдела по работе с образовательными учреждениями.