

LG Electronics

Russia R&D Lab

Internal Report

Нейроинтерфейсы - обзор текущего состояния

Подготовил:

Mukhamadiev Artur, Research Engineer

Утвердил:

Dmitry Ketov, Part Leader

Отдел:

Russia R&D Lab, Web Team

Дата:

30 января 2026 г.

Версия:

1.0

Оглавление

Введение	3
1 Brain-machine Interface (BMI)	5
1.1 Основные области применения	5
1.1.1 Клиническая медицина и реабилитация	6
1.1.2 Управление внешними устройствами и робототехника	7
1.1.3 Аффективные и когнитивные вычисления	7
1.1.4 Развлечения, искусство и повседневное использование	7
1.1.5 Специализированные области	7
1.1.6 BCI программные платформы	8
1.2 Алгоритмы декодирования сигналов мозга	9
1.2.1 Глубокое обучение (Deep Learning)	9
1.2.2 Обучение с переносом знаний (Transfer Learning)	10
1.2.3 Классификация на основе многообразий (Manifold-Based Methods)	10
1.2.4 Адаптивное обучение (Adaptive Learning)	11
1.2.5 Анализ источников ЭЭГ (EEG Source Analysis)	11
1.3 Что останавливает перед массовым внедрением интерфейсов мозг-компьютер	11
1.3.1 Психофизиологические вызовы	11
1.3.2 Технологические и алгоритмические ограничения	12
1.3.3 Практические и клинические вызовы	12
1.3.4 Этические и правовые аспекты	13
1.4 Ситуация с Brain-Computer Interface в мире	13
1.4.1 Прорывные технологии из отчета за 2023-2024	14
1.5 Российские организации, которые занимаются ИМК	15
1.5.1 Компании и стартапы	16
1.5.2 НИИ	17
1.5.3 Университеты	17
1.6 Выводы о применимости в рамках лаборатории	17
2 Интерфейсы на основе сопротивления кожи и микродвижений мышц	19
2.1 Электродермальная активность (EDA/GSR)	19

2.2	Поверхностная электромиография (пЭМГ)	20
2.2.1	Области применения	20
2.3	Гибкие датчики мышечного импеданса (FMEIS)	21
2.3.1	Ключевые области применения систем на основе импеданса	22
2.4	Состояние сектора в России	22
2.4.1	Коммерческие компании и продукты	22
2.4.2	Научно-исследовательские группы	23
2.5	Выводы о применимости в рамках лаборатории	24
3	Интерфейсы взаимодействия человек-машина на основе слежения глаз	25
3.1	Ключевые области применения	26
3.2	Технологические прорывы в области	26
3.3	Основные технологии слежения глаза	27
3.4	Состояние сектора в России	28
3.4.1	Коммерческие компании и продукты	28
3.4.2	Научно-исследовательские группы	29
3.5	Выводы о применимости в рамках лаборатории	30
4	Дополнительные материалы	31
4.1	Формулы	31

Введение

Данный отчет необходим для базового изучения области устройств, реализующих интерфейс мозг-человек и его применимости в рамках LG.

LG - прежде всего продуктовая компания. Основные интересы которой лежат на 2026 год в следующих областях: упор на QCD (Quality Cost Delivery), решения для автомобилей, кондиционеров, обогревателей, вентиляционных блоков, программные решения (такие как WebOS, сервисы, подписки), онлайн бизнесы, которые могут привести напрямую к покупателю, а также роботы и платформа CLOi[1].



Рис. 1. Система кондиционирования воздуха со встроенным искусственным интеллектом (Cold-Free)

Если посмотреть на это великолепное разнообразие интересов, несложно заметить, что медицинских решений в данном перечне нет, а B2B ограничивается автомобилями (куда поставляют медиа-системы) и устройствами для различных манипуляций с воздухом (рис 1).

Направление интерфейса мозг-машина является одним из интересных, потому что у многих сейчас на слуху, международные правительства составляют дорожную научную карту, включая данное направление, как одно из наиболее приоритетных в

будущем, которые позволят открыть Web 4.0 и тому подобное. [2]

Разумеется, учитывая подвешенное состояние лаборатории и неопределенность общего вектора специализации, возможность присоединиться к этому Web 4.0 и продвигать его в продуктовых решениях LG - не такая уж и плохая идея.

Однако, чтобы понять насколько она реализуема в реальности, необходимо изучить данную технологическую область и выделить потенциальные интересные направления развития, такие как изучение отклика пользователей на контент, с целью продвижения LG из поставщиков медиа-устройств в поставщика медиа-сервисов, подстраивающихся под каждого пользователя, или носимые устройства для создания системы умного дома, которые по отклику с сенсоров регулировали бы работу системы кондиционирования помещений.

Глава 1

Brain-machine Interface (BMI)

Давайте начнем с определения и терминологии. Что такое Brain-Machine interface (далее BMI или ИМК (интерфейс машина-компьютер))?

BMI - технология, которая предоставляет **прямой интерфейс взаимодействия между мозгом и некоторым электронным устройством** (компьютером, протезом, экзоскелетом и далее). Интерфейс построен на считывании нейронной активности мозга, которую он пытается декодировать в некоторые команды, которые человек хочет послать устройству, минуя мышечную активность.

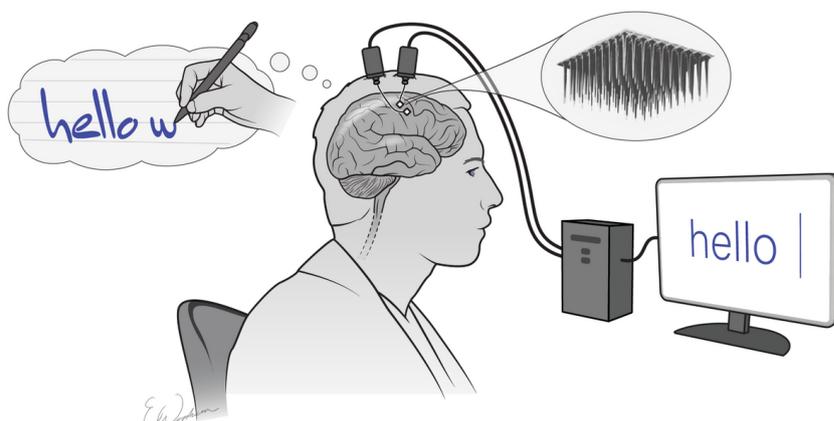


Рис. 1.1. Иллюстрация работы интерфейса мозг-машина

1.1. Основные области применения

Исторически сложилось, что BMI плотно связан с технологиями для улучшения или замены, существующих методов нейрореабилитации, либо как технология для

разработки вспомогательных устройств, которые могли бы контролироваться напрямую мозгом.

А началось все с Видяля в 1973 году, когда он смог зафиксировать активность мозга при помощи электроэнцефалограммы. С этого времени было найдено огромное количество неинвазивных применений (рис. 1.2).

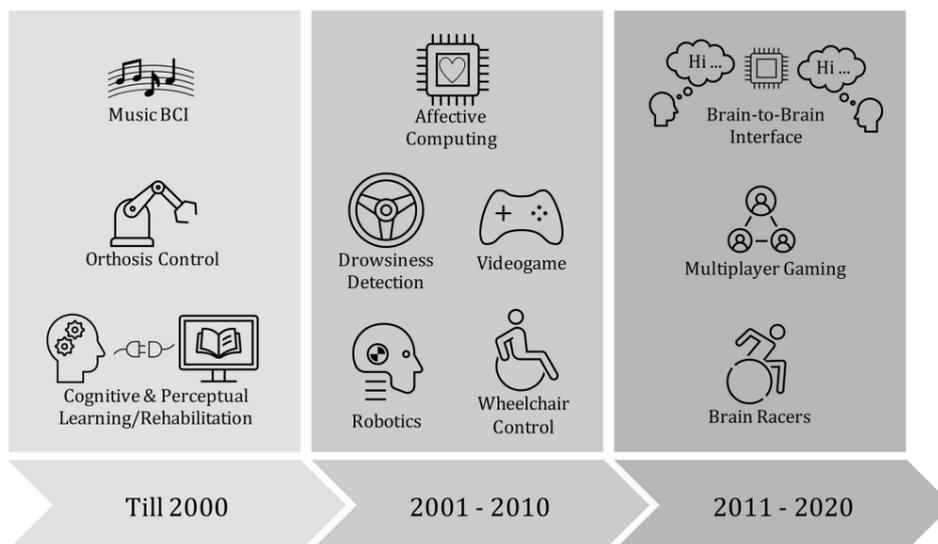


Рис. 1.2. Иллюстрация эволюции применения интерфейса мозг-компьютер

1.1.1. Клиническая медицина и реабилитация

Это наиболее значимая область, нацеленная на помощь людям с тяжелыми нейромышечными нарушениями, такими как боковой амиотрофический склероз (БАС), травмы спинного мозга и последствия инсульта.

- 1. Ассистивные технологии:** ИМК позволяют восстановить коммуникацию и управление для полностью парализованных пациентов («запертых») через системы печати (spellers) или декодирование рукописного ввода прямо из сигналов мозга. [3]
- 2. Восстановительная реабилитация:** Технология используется для стимуляции нейропластичности и восстановления двигательных функций конечностей после инсульта. [4]
- 3. Управление инвалидными колясками:** Разработаны системы для навигации в инвалидном кресле с использованием моторного воображения или зрительных вызванных потенциалов [3]

1.1.2. Управление внешними устройствами и робототехника

ВМІ позволяют преобразовывать намерения пользователя в команды для сложных механизмов.

1. **Роботизированные манипуляторы:** Одной из самых передовых областей является управление робо-руками для выполнения повседневных задач (дотянуться до объекта и схватить его).
2. **Беспилотные аппараты:** Продемонстрирована возможность управления квадрокоптерами в трехмерном пространстве. [4]
3. **Гуманоидные роботы:** ИМК применяются для дистанционного управления человекоподобными роботами, что может быть полезно в опасных средах.

1.1.3. Аффективные и когнитивные вычисления

Эта область сфокусирована на мониторинге психических состояний человека.

1. **Детекция сонливости и усталости:** Пассивные ИМК могут использоваться для предотвращения аварий, отслеживая состояние водителей или операторов.
2. **Эмоциональное регулирование:** Ведутся исследования по обнаружению аффективных состояний (депрессия, тревога) и обеспечению биологической обратной связи для их коррекции

1.1.4. Развлечения, искусство и повседневное использование

С появлением недорогих неинвазивных систем технология вышла за пределы лабораторий.

1. **Гейминг:** Создание «мозговых игр», где управление игровым процессом осуществляется силой мысли, что улучшает пользовательский опыт.
2. **Виртуальная и дополненная реальность (VR/AR):** ИМК обеспечивают эффект погружения и новые способы взаимодействия в виртуальных мирах.
3. **Искусство:** Существуют системы «рисования мозгом», позволяющие творчески самовыражаться людям с ограниченными физическими возможностями

1.1.5. Специализированные области

1. **Космические исследования:** Мониторинг работоспособности космонавтов и управление экзоскелетами в условиях отсутствия гравитации.

2. **Интерфейсы «мозг-мозг»:** Эксперименты по прямой передаче когнитивной информации от одного человека к другому.

В будущем интеграция ИМК с методами нейромодуляции (например, ультразвуковой или электрической стимуляцией) может расширить эти области, позволяя не только считывать намерения, но и корректировать работу мозга в реальном времени

1.1.6. **BCI программные платформы**

1. **OpenViBE[5]:** Программная платформа OpenViBE разрабатывается с 2007 года. OpenViBE реализована на языке C++ и может быть скомпилирована в операционных системах Windows и Linux; для Windows предоставляются готовые исполняемые файлы. OpenViBE основана на архитектуре, которая упрощает интеграцию, расширение и настройку модульной функциональности, а графический интерфейс делает OpenViBE удобной в использовании для широкого круга исследователей, включая инженеров, ученых и врачей. Эти два фактора делают OpenViBE хорошо подходящей для поддержки реализации различных подходов к интерфейсам мозг-компьютер.

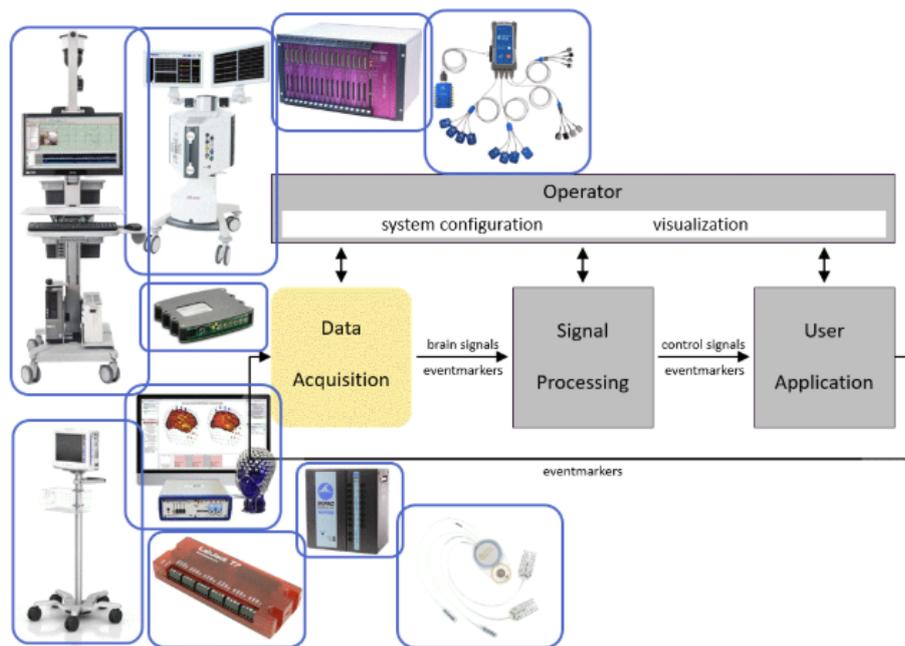


Рис. 1.3. Скриншот гифки с сайта BCI2000 с возможными источниками входных данных

2. **BCI2000 [6]:** Программная платформа BCI2000 разрабатывается с 1998 года. BCI2000 реализована на C++ и может быть скомпилирована под Windows и Linux; для Windows предоставляются готовые исполняемые файлы. Ее реализация основана на модели, которая может описывать любую систему интерфейса

мозг-компьютер (BCI). (рис 1.3) В соответствии с этой моделью BCI2000 имеет четыре модуля, которые взаимодействуют друг с другом: Источник (сбор и хранение данных); Обработка сигналов; Пользовательское приложение; и Операторский интерфейс. Модули взаимодействуют посредством документированного сетевого протокола на основе TCP/IP. Реализация BCI2000 высоко оптимизирована, что позволяет поддерживать даже очень требовательные конфигурации BCI с хорошими временными характеристиками.

3. **MNE-Python** [7]: Это библиотека на языке Python с открытым исходным кодом, предназначенная для визуализации и анализа данных электроэнцефалографии (ЭЭГ), магнитоэнцефалографии (МЭГ) и других нейрофизиологических сигналов. В отличие от платформ, ориентированных на реальное время, MNE-Python предоставляет мощный инструментарий для сложной автономной обработки данных: фильтрацию, устранение артефактов (например, с помощью ICA/SSP), статистический анализ и локализацию источников в трехмерном пространстве.
4. **LORETA (Low Resolution Brain Electromagnetic Tomography)** [8]: Представляет собой метод и соответствующее программное обеспечение для решения обратной задачи ЭЭГ — определения трехмерного распределения электрической активности нейронов в коре головного мозга. В отличие от стандартных методов, LORETA не предполагает наличия ограниченного числа точечных источников (диполей), а вычисляет «мягкое» распределение тока во всем объеме мозга.

1.2. Алгоритмы декодирования сигналов мозга

Взято из "Non-Invasive Brain-Computer Interfaces: State of the Art and Trends"[3]

1.2.1. Глубокое обучение (Deep Learning)

Глубокое обучение позволяет автоматически извлекать признаки из «сырых» данных ЭЭГ, минимизируя необходимость в ручном проектировании признаков.

1. **Сверточные нейронные сети (CNN)**: Самый популярный метод, эффективно извлекающий спектральные и пространственные признаки. Ключевыми архитектурами являются EEGNet (универсальная и компактная сеть), Shallow ConvNets и Deep ConvNets.
2. **Графовые сверточные сети (GCN)**: Рассматривают электроды как узлы графа, что позволяет учитывать физическое распределение датчиков на скальпе и внутренние связи между каналами.

3. **Рекуррентные сети (RNN/LSTM):** Фокусируются на временных зависимостях в последовательных сигналах ЭЭГ. Например, архитектуры на базе LSTM успешно используются для декодирования паттернов походки.
4. **Механизмы внимания и трансформеры:** Позволяют модели динамически выделять наиболее важные части ЭЭГ-испытания, что улучшает точность распознавания моторных образов и вызванных потенциалов.
5. **Гибридные модели:** Комбинируют различные архитектуры (например, CNN-LSTM) для одновременного анализа пространственных, спектральных и временных характеристик.

1.2.2. Обучение с переносом знаний (Transfer Learning)

Этот подход решает проблему высокой вариативности сигналов между разными людьми и сессиями.

1. **Тонкая настройка (Fine-tuning):** Модель предварительно обучается на данных большой группы людей, а затем адаптируется под конкретного пользователя.
2. **Доменная адаптация (Domain Adaptation):** Нацелена на выравнивание распределений признаков разных доменов (например, разных испытуемых), чтобы сделать модель инвариантной к индивидуальным особенностям.
3. **Малоприметное обучение (Few-shot learning):** Позволяет создавать бескалибровочные ИМК, способные работать с минимальным количеством размеченных данных от нового пользователя.

1.2.3. Классификация на основе многообразий (Manifold-Based Methods)

В отличие от методов в евклидовом пространстве, эти алгоритмы работают с геометрической структурой данных.

1. **Римановы многообразия:** Используют ковариационные матрицы (4.1) сигналов ЭЭГ, которые являются симметричными положительно определенными (SPD) матрицами.
2. **RMDM (Riemannian Minimum Distance to Means):** Классифицирует сигнал на основе риманова расстояния до средних геометрических значений классов. Эти методы устойчивы к шуму и обладают хорошей обобщающей способностью. (формулы 4.3 и 4.2)

Формулы, если вам вдруг интересно, можно посмотреть в дополнительных материалах.

1.2.4. Адаптивное обучение (Adaptive Learning)

Адаптивные классификаторы способны подстраивать свои параметры в процессе работы, реагируя на изменение ментального состояния пользователя или нестационарность ЭЭГ.

1. **Контролируемая и неконтролируемая адаптация:** Включает методы переобучения на новых данных сессии.
2. **Полуконтролируемое обучение:** Использует такие стратегии, как псевдо-разметка (pseudo-labeling) и самообучение, где модель сама размечает входящие данные для уточнения своих параметров.

1.2.5. Анализ источников ЭЭГ (EEG Source Analysis)

Этот метод отходит от анализа сигналов непосредственно на скальпе и переходит к оценке активности нейронных источников в коре головного мозга.

1. **Обратная задача ЭЭГ:** С помощью математических преобразований (например, LORETA[8] или MNE[7]) сигналы со скальпа преобразуются в оценки активности коры.
2. **Преимущества:** Подход обеспечивает более детальную пространственную информацию, что критически важно для декодирования сложных движений конечностей и управления робототехникой в реальном времени.

Основными целями развития этих алгоритмов авторы называют повышение точности классификации, создание систем, не требующих длительной калибровки, и обеспечение надежности ИМК при долговременном использовании.

1.3. Что останавливает перед массовым внедрением интерфейсов мозг-компьютер

1.3.1. Психофизиологические вызовы

1. **Высокая вариативность сигналов:** Мозговая динамика крайне нелинейна и изменчива как у одного и того же человека в разное время (интраиндивидуальная), так и между разными людьми (интериндивидуальная). На сигналы влияют возраст, пол, уровень внимания, усталость и даже эмоциональное состояние пользователя.

2. **Проблема «ИМК-неграмотности» (BCI illiteracy):** Около 15–30% людей не способны генерировать достаточно стабильные и сильные сигналы мозга для управления системой. Несмотря на новые подходы в декодировании, эта проблема остается нерешенной для значительной части потенциальных пользователей.

1.3.2. Технологические и алгоритмические ограничения

1. **Низкое соотношение сигнал/шум (SNR):** В неинвазивных системах (особенно ЭЭГ) электрические потенциалы сильно ослабляются и искажаются при прохождении через ткани мозга и череп. Это приводит к низкой скорости передачи информации (ITR).
2. **Трудоемкая калибровка:** Большинство систем требуют длительных и утомительных сессий обучения для каждого нового пользователя, чтобы настроить алгоритмы под его индивидуальные особенности. Одной из главных целей исследователей сейчас является создание систем, работающих «из коробки» (calibration-free).
3. **Артефакты:** Сигналы ИМК легко загрязняются биологическими помехами, такими как моргание глаз или движения мышц, а также внешними электрическими шумами, что затрудняет их точную интерпретацию в реальном времени.

1.3.3. Практические и клинические вызовы

1. **Переход из лаборатории в реальную жизнь:** Большинство достижений ИМК продемонстрированы в строго контролируемых лабораторных условиях. Создание надежного беспроводного оборудования для использования в естественной среде остается сложной задачей.
2. **Удобство датчиков:** Существующие высокоточные электроды часто требуют использования токопроводящего геля, что неудобно для повседневного ношения. Разработка «сухих» датчиков, которые обеспечивали бы лабораторное качество сигнала без дискомфорта, — одно из приоритетных направлений.
3. **Гетерогенность пациентов:** В медицине клиническая эффективность ИМК сильно варьируется из-за различий в характере травм или особенностях протекания болезней (например, после инсульта), что затрудняет создание универсальных реабилитационных решений.

1.3.4. Этические и правовые аспекты

1. **Приватность и безопасность данных:** Существует риск несанкционированного доступа к нейронным данным, которые могут содержать конфиденциальную информацию о психическом состоянии или даже намерениях человека.
2. **Влияние на личность и психику:** Использование ИМК и систем нейромодуляции поднимает вопросы об изменении самоидентификации пользователя, его эмоциональной стабильности и возможных долгосрочных последствиях для здоровья

1.4. Ситуация с Brain-Computer Interface в мире

Здесь все уже стандартно для 2025 года. Лидер - Китай по количеству публикаций и патентов. Северная Америка в топе по количеству стартапов (более 87).

Попросил нейронку нагенерировать инфографику, чтобы было стильно модно молодежно, результат смотрите сами (рис 1.4)



Рис. 1.4. Сгенерировано нейронной сетью (NotebookLM)

Сейчас на западе основной фокус идет в направлении инвазивных технологий для медицины.

1. **Neuralink**

К июню 2025 года пять пациентов с тяжелым параличом уже использовали имплантат «Telepathy» для управления цифровыми устройствами силой мысли. [9]

2. **Synchron** - разработала систему Stentrode, которая вводится через кровеносные сосуды (без трепанации черепа), позволяет парализованным людям управлять устройствами. [10]

В 2025 году компания начала интеграцию своих решений в экосистемы Apple и NVIDIA, подтвердив безопасность устройства в ходе 12-месячных испытаний

3. **Blackrock Neurotech**[11] - лидер по количеству установленных имплантатов (более 30 пациентов)

Их технологии позволяют парализованным людям печатать со скоростью 90 символов в минуту и управлять роботизированными манипуляторами для повседневных задач (прием пищи, отправка email)

Если говорить о неинвазивных методах, то здесь все крутится вокруг портативных ЭЭГ устройств. Это уже больше потребительский сектор, можно измерять свой уровень стресса, возраст мозга, мониторить концентрацию и психическое здоровье.

Выделить стоит троих:

1. **Emotiv** - лидер по производству портативных ЭЭГ устройств [12]
2. **Neurable**[13] - интегрирует ИМК в повседневные наушники для мониторинга концентрации
3. **Kernel**[14] - использует оптическую технологию (fNIRS) для оценки психического здоровья и когнитивных функций.

1.4.1. Прорывные технологии из отчета за 2023-2024

Информация на основе отчета [15].

1. **Восстановление речи:** Достигнута скорость декодирования речи в **62–78 слов в минуту**, что приближается к темпу естественного разговора



Рис. 1.5. Пример устройства blackrock

2. **Моторная реабилитация:** Создан «цифровой мост» между мозгом и спинным мозгом, позволивший пациенту с параличом нижних конечностей ходить самостоятельно
3. **Зрение:** Начались работы над проектами Blindsight (Neuralink) и ICVP (Иллинойсский технологический институт) для возвращения зрения через прямую стимуляцию зрительной коры

Насчет Blindsight - по состоянию на 2026 год, судя по всему, получил одобрение как прорывная разработка от управления по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США (по данным РИА новости [16]).

1.5. Российские организации, которые занимаются ИМК

Крутится вокруг программы **Нейронет 2035**[2] - как говорится на сайте, это рынок коммуникаций, основанных на передовых разработках в нейротехнологиях и повышающих продуктивность человеко-машинных систем. В рамках этой национальной технологической инициативы есть много различных компаний, из репорта, который переслали по почте, выделил следующие.

1.5.1. Компании и стартапы

1. **ГК "Нейроботикс"**[17] - компания является одним из ведущих поставщиков нейрофизиологического оборудования и неинвазивных решений в России.

Ключевые продукты: Беспроводные ЭЭГ-системы на сухих электродах серии NeuroPlay (6-канальные гарнитуры и 8-канальные шлемы), программная среда "Когниграф" для создания нейроинтерфейсов и комплекс "Шелтер" для оценки когнитивных функций

2. **Компания "Моторика"** - лидер в области киберпротезирования [18]

Сенсорная обратная связь: Совместно со Сколтехом и ДВФУ компания успешно испытала систему «очувствления» протезов, позволяющую пациентам чувствовать текстуру и силу сжатия, а также избавляться от фантомных болей.

Инновации: В 2024 году было объявлено о создании Центра кибернетической медицины и нейропротезирования для масштабирования этих технологий

3. **Исследовательский центр Neurotrend (Нейротренд)** - крупнейшая российская нейромаркетинговая компания [19]

Использование собственных алгоритмов обработки данных для оценки когнитивной нагрузки и вовлеченности аудитории

4. **Проект «Нейрочат»** [20]

Позволяет пациентам с тяжелыми нарушениями речи и моторики (после инсультов, травм) набирать текст на экране силой мысли

5. **Neiry**

Занимаются разработкой потребительских устройств для мониторинга ЭЭГ, нейроотклика и когнитивных способностей - для обучения и wellness применения.

6. **BrainBit**

Носимые ЭЭГ устройства

7. **NeuroAssist Tech**

Нейро-реабилитационные системы на основе нейронных сетей и экзоскелеты.

8. **NTINeuroNet Consortsium**

Объединение университетов, НИИ, стартапов и медицинских центров для разработки нейроинтерфейсов, нейропротезирования и когнитивных ИИ систем.

1.5.2. НИИ

1. **Институт Курчатова**

Участвует в исследованиях в области декодирования сигналов мозга и нейро-модуляции, а также гибридных систем, совмещающих ЭЭГ и fNIRS.

2. **Институт высшей неврологической активности и нейрофизиологии.**

Фокусируется на фундаментальной науке и моделях коммуникации мозг-компьютер.

3. **Российский Квантовый Центр**

Исследует применение квантовых технологий в области обработки нейронных сигналов

4. **Skolkovo Foundation NeuroTech Cluster**

Центр нейробиологии и нейрореабилитации им. В. Зельмана выступает научным координатором проектов по созданию двунаправленных нейропротезов. Также Сколково в целом поддерживает стартапы в этом направлении

1.5.3. Университеты

1. **ДФФУ (Дальневосточный федеральный университет)**

Единственное место в России, где проводятся операции по вживлению электродов в периферические нервы и спинной мозг для "очувствления" конечностей [18]

2. **МФТИ** - активно занимаются машинным обучением в ВСИ и обработке нейронных сигналов

3. **ИТМО** - есть некоторые программы, посвященные НМИ (human-machine interaction) и нейроинформатике.

4. **МИФИ** - занимаются разработками систем мониторинга ЭЭГ и приложениями в области нейро-безопасности.

5. **МГУ** - также есть некоторое количество программ в области нейрофизиологии и когнитивной нейронауки.

1.6. Выводы о применимости в рамках лаборатории

Здесь можно выделить следующие направления применимости:

1. Управление робототехникой и платформой CLOi

Использование неинвазивных ИМК на основе моторного воображения или зрительных вызванных потенциалов (SSVEP) открывает новые способы взаимодействия с сервисными роботами.

2. Аффективные вычисления для WebOS и медиа-сервисов

Технологии детекции эмоционального состояния и уровня концентрации (аналогично разработкам **Neurable** и **Neiry**) могут стать основой для Web 4.0.

3. Сотрудничество с локальной экосистемой (Нейронет 2035)

Использование российских ЭЭГ-платформ для сбора данных и последующей тренировки собственных моделей глубокого обучения (EEGNet, трансформеры) для специфических задач LG.

Глава 2

Интерфейсы на основе сопротивления кожи и микродвижений мышц

На основе предоставленных материалов можно выделить два основных направления использования электрических характеристик кожи и подкожных тканей в интерфейсах: электродермальную активность (EDA/GSR) [21] для оценки психофизиологического состояния и измерение электрического импеданса мышц (EIM/FMEIS) [22] для управления устройствами.

2.1. Электродермальность активность (EDA/GSR)

Этот метод основывается на измерении изменений электрической проводимости кожи, возникающих из-за активности эккриновых потовых желез.

1. **Физический принцип:** На кожу подается неощутимое напряжение, и система фиксирует скорость его прохождения. Сильные эмоциональные реакции вызывают потоотделение, что повышает проводимость и, соответственно, снижает сопротивление кожи.
2. **Компоненты сигнала:**
 - **Тонический (SCL):** Отражает медленные, постепенные изменения базового уровня проводимости.
 - **Фазический (SCR):** Фиксирует быстрые и резкие всплески сигнала в ответ на конкретные стимулы.
3. **Применение:** EDA считается эффективным инструментом для измерения уровня возбуждения (arousal) и эмоциональных реакций.

2.2. Поверхностная электромиография (пЭМГ)

Современные интерфейсы на основе поверхностной электромиографии (пЭМГ) и носимых браслетов представляют собой неинвазивную технологию, которая считывает электрические сигналы мышц для управления цифровыми устройствами (рис. 2.1). [23]

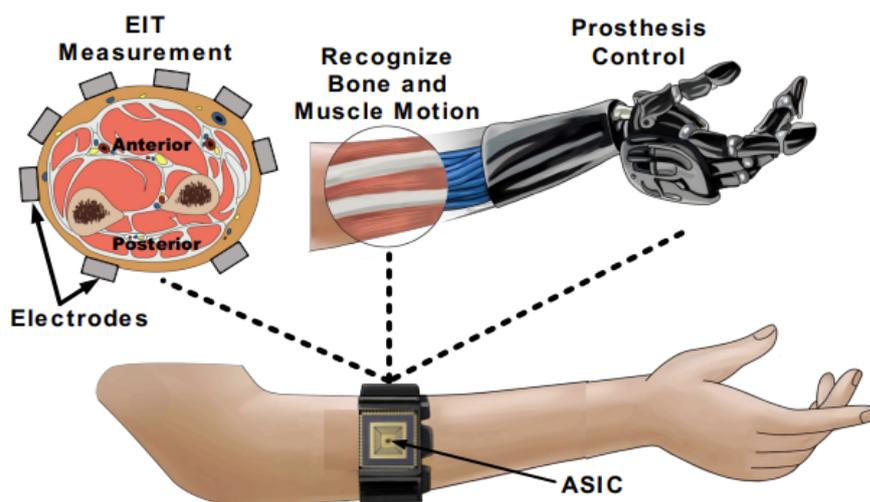


Рис. 2.1. Система управления протезом [24]

2.2.1. Области применения

1. **Непрерывная навигация:** Пользователи могут управлять курсором на экране, используя микронаклон запястья (скорость захвата целей - 0,66 в секунду).
2. **Дискретные жесты:** Распознавание щипков пальцами и взмахов большим пальцем позволяет управлять интерфейсами без прямого контакта с экраном (0,88 жеста в секунду).
3. **"Воздушный" почерк:** Декодирование движений кисти, имитирующих письмо, позволяет набирать текст со скоростью 20,9 слов в минуту.
4. **Протезирование и реабилитация:** ЭМГ-интерфейсы являются базой для управления современными бионическими протезами рук. В России компания «Моторика» внедряет двунаправленные интерфейсы, где микродвижения мышц управляют протезом, а пациент получает тактильную обратную связь через электростимуляцию нервов.

5. **Мультисенсорные системы:** Для повышения точности некоторые браслеты интегрируют данные ЭМГ с инерциальными измерительными модулями (IMU), которые отслеживают положение руки в пространстве.

2.3. Гибкие датчики мышечного импеданса (FMEIS)

Более продвинутая технология использует многоканальное измерение импеданса для прямого управления интерфейсами «человек-машина» (HMI).

1. **Принцип работы:** Через ткани пропускается высокочастотный ток (например, 50 кГц), а электроды фиксируют изменения электрического поля, вызванные деформацией мышц при сокращении.
2. **Преимущества перед ЭМГ:** В отличие от традиционной электромиографии (ЭМГ), которая видит только активные сокращения, датчики импеданса могут фиксировать и пассивное растяжение мышц, что дает более полную информацию о силе и положении конечности.
3. **Конструкция:** Современные устройства, такие как FMEIS, представляют собой ультратонкие (220 мкм) и гибкие пластыри с гидрогелевыми электродами, которые плотно прилегают к коже и минимизируют помехи от движения.
4. **Алгоритмы декодирования:** Данные многоканального импеданса обрабатываются с помощью машинного обучения для классификации жестов и предсказания мышечной силы.

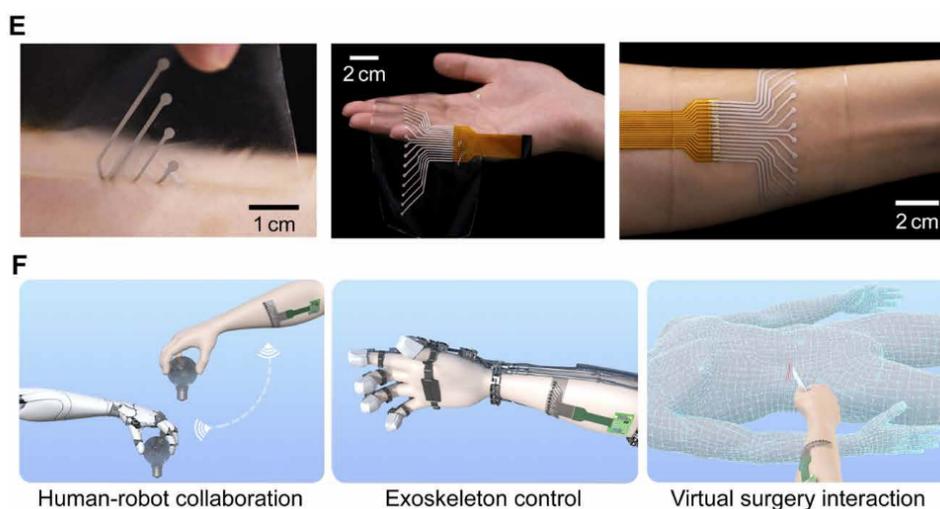


Рис. 2.2. Система управления протезом на основе FMEIS[22]

2.3.1. Ключевые области применения систем на основе импеданса

Материалы описывают несколько высокотехнологичных сценариев использования таких интерфейсов:

1. **Человеко-роботизированное взаимодействие:** Управление роботизированными руками и манипуляторами для выполнения сложных задач, таких как сборка деталей или закручивание винтов.
2. **Управление экзоскелетами:** Прогнозирование усилий пользователя для активации пневматических приводов, что помогает снизить мышечную усталость.
3. **Виртуальная хирургия:** Передача точных данных о силе нажатия скальпеля в VR-среду, что позволяет проводить обучение хирургов с высокой степенью реализма.
4. **Нейромаркетинг и полиграфы:** Российские компании, такие как Neurotrend[19], используют биосенсоры кожной проводимости в составе полиграфов для оценки эмоциональной значимости рекламных стимулов.

2.4. Состояние сектора в России

О многих игроках мы уже говорили в секции 1.5. Здесь немного продублируем эту информацию, может раскроется с чутка другой стороны.

2.4.1. Коммерческие компании и продукты

1. ViTronics Lab

Пионер в области образовательных нейротехнологий и биосигнальных интерфейсов. [25] Скажу так, для стартовой точки - может и пойдет, продают учебные наборы.

2. Моторика [18]

Крупнейший разработчик и производитель функциональных протезов рук.

- **Продукт:** Бионические протезы линейки **Manifesto** и **Indy** с управлением через ЭМГ-датчики.
- **Применение:** Протезирование верхних конечностей для детей и взрослых; развитие систем осязания протезов (передача сигналов от искусственных пальцев в нервную систему пользователя) и облачной платформы мониторинга активности.

3. ГК Нейроботикс

Крупнейший центр разработки нейро- и миоинтерфейсов в Зеленограде.

- **Продукт:** Нейрогарнитуры **NeuroPlay** и активные ортезы с биологической обратной связью.
- **Применение:** Медицинская реабилитация после инсультов, управление экзоскелетами через миосигналы и создание нейроколясок.

4. SensoMed [26]

Резидент «Сколково», специализирующийся на высокотехнологичной реабилитации моторики.

- **Продукт:** Сенсорный комплекс **SensoRehab** («умная перчатка»).
- **Применение:** Тренировка мелкой моторики кисти с использованием ИИ-анализа микронапряжений мышц для пациентов с ДЦП и рассеянным склерозом.

2.4.2. Научно-исследовательские группы

1. НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана (ЮФУ) [27]

Научно-технологический центр нейротехнологий в Ростове-на-Дону.

- **Направление:** Разработка интеллектуальных алгоритмов классификации многоканальных ЭМГ-сигналов для естественного управления многозвенными манипуляторами.

2. Лаборатория нейрофизиологии и НКИ (МГУ им. М.В. Ломоносова) [28]

Ведущий центр под руководством проф. А.Я. Каплана.

- **Направление:** Создание гибридных интерфейсов, сочетающих ЭЭГ и ЭМГ (микродвижения лица) для обеспечения коммуникации пациентов в терминальных состояниях.

3. Центр нейроэкономики и когнитивных исследований (НИУ ВШЭ) [29]

Междисциплинарная группа, работающая на стыке биологии и экономики.

- **Направление:** Использование интерфейсов на основе кожно-гальванической реакции (КГР) для изучения процессов принятия финансовых решений и оценки когнитивной нагрузки.

4. Лаборатория интеллектуальной космической робототехники (Сколтех) [30]

Исследовательская группа в области перспективных интерфейсов управления.

- **Направление:** Разработка систем управления космическими роботами-манипуляторами с помощью жестовых интерфейсов и носимых миосенсоров в условиях скафандра.

2.5. Выводы о применимости в рамках лаборатории

Здесь можно выделить следующие направления применимости:

1. **Адаптивный микроклимат на основе EDA/GSR**
2. **Бесконтактное жестовое управление для WebOS и робототехники (пЭМ-Г/FMEIS)**
3. **Интерфейсы для автомобильных медиа-систем**
В рамках B2B-направления для автомобилей технологии миоинтерфейсов могут стать безопасной альтернативой тачскринам. (декодирование воздушных жестов)
4. **Нейромаркетинг и персонализация медиа-сервисов**
Переход LG к модели поставщика контента и подписок требует инструментов оценки вовлеченности аудитории.

Глава 3

Интерфейсы взаимодействия человек-машина на основе слежения глаз

Интерфейсы «мозг-машина» на основе слежения за глазами (айтрекинга) представляют собой высокоскоростной канал передачи информации, который переводит визуальное внимание и когнитивное состояние человека в команды управления в режиме реального времени.

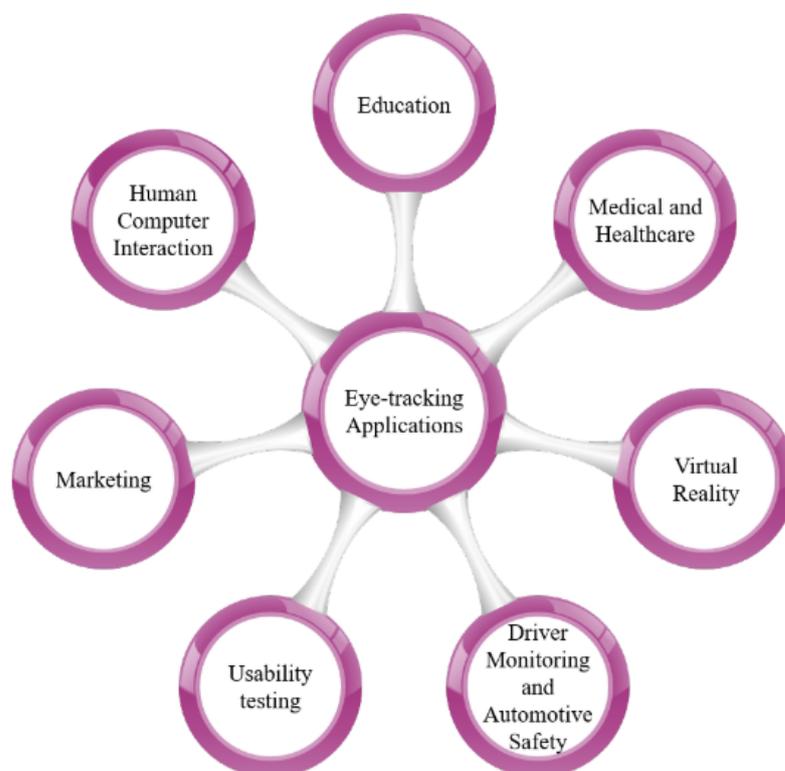


Рис. 3.1. Области применения технологии слежения за глазом [31]

3.1. Ключевые области применения

Технология вышла за рамки лабораторий и активно внедряется в критически важные сектора (рис 3.1):

1. **Автомобильная безопасность:** Согласно протоколам Euro NCAP [32] 2026 (см таблицу 3.1), системы мониторинга водителя (DMS) становятся обязательными для получения пятизвездочного рейтинга безопасности. Прямое отслеживание глаз позволяет выявлять не только сонливость, но и алкогольное или наркотическое опьянение по специфическим микродвижениям век и зрачка.
2. **Ассистивные технологии:** Для пациентов с синдромом «запертого человека» [33] интерфейсы на основе взгляда являются единственным способом коммуникации. Современные системы включают предиктивный ввод текста и коррекцию ошибок, значительно ускоряя процесс общения.
3. **Робототехника:** Интеграция айтрекинга с робо-руками позволяет выполнять динамическое планирование пути за 2,97 миллисекунды, [34] обеспечивая интуитивный захват предметов силой взгляда.
4. **Клиническая диагностика:** Характеристики саккад¹ и стабильность фиксации используются как биомаркеры для мониторинга прогрессирования болезни Паркинсона с чувствительностью до 80,4%.
5. **XR и пространственные вычисления:** Динамический фовеальный рендеринг снижает вычислительную нагрузку на графический процессор, отрисовывая в высоком разрешении только ту зону, куда направлен взгляд. [35]

3.2. Технологические прорывы в области

Развитие глубокого обучения позволило переводить физиологические движения в осознанные намерения с высокой точностью:

1. **Классификация движений (GMM-NMM)[34]:** Использование гауссовых смесей и скрытых марковских моделей позволяет разделять типы движений на фиксации, саккады и плавное преследование с точностью 94,39%.

¹быстрые, строго согласованные движения глаз, происходящие одновременно и в одном направлении

³Согласно новым протоколам, критическим считается отвлечение более чем на 2 секунды (Long Glance).

³Включает детекцию рук водителя и визуальное распознавание корпуса смартфона.

Таблица 3.1. Метрики Euro NCAP 2026 по мониторингу состояния водителя

Метрика Euro NCAP 2026	Детали требований	Стратегия реализации
Продолжительность взгляда ²	Отслеживание взглядов < 2 и > 2	Датчики прямого отслеживания взгляда и головы
Размещение телефона	Обнаружение на коленях или в поле зрения ³	Широкоугольные камеры мониторинга салона
Окно оценки состояния	Анализ в течение первых 10 минут	Непрерывный анализ биометрических данных
Доступность системы	Включена по умолчанию при каждой поездке	Интегрированная логика запуска системы автомобиля

- 2. Оптимизированное детектирование (YOLOv11):** Улучшенные модели на базе YOLOv11 повысили точность распознавания радужной оболочки на 9,9%, что критично для определения направления взгляда в сложных условиях.
- 3. Обучение без учителя (Representational Learning):** Фреймворки вроде DMAgaze обучаются отделять признаки взгляда от индивидуальных особенностей лица или освещения, что повышает надежность систем в неконтролируемой среде.

3.3. Основные технологии слежения глаза

Таблица 3.2. Сравнение модальностей систем отслеживания взгляда

Тип модальности ⁴	Механизм считывания	Частота	Энергия	Ключевое преимущество
VOG	NIR-камера / блики (glint)	90–120 Гц	Высокое	Высокая пространственная точность при стабильном свете
EOG	Электрический потенциал	Непрерывно	Низкое	Независимость от освещения; высокая амплитуда
Событийные	Асинхронный DVS-сенсор	≈1 кГц	Ультранизкое	Без размытия движения; фиксация микросаккад
Радар	Волны 60–120 ГГц	300 Гц	Среднее	Работает без прямой видимости глаза

Эффективность систем слежения за глазом зависит от точности сбора данных, который реализуется через три основные технологические семьи

1. **Видеоокулография (VOG)**: Современный коммерческий стандарт, используемый в гарнитурах Apple Vision Pro и VIVE Focus Vision. Система использует инфракрасные светодиоды для создания бликов на поверхности глаза, которые фиксируются камерами для вычисления вектора взгляда. Для качественной работы (например, для фовеального рендеринга) требуются частоты дискретизации выше 100 Гц.
2. **Электроокулография (EOG)**: Измеряет электрический потенциал между роговицей и сетчаткой. Преимущество EOG заключается в том, что амплитуда сигнала (более 1 мВ) значительно выше типичных сигналов ЭЭГ, что упрощает обработку. Метод независим от освещения, косметики или наличия контактных линз, что делает его идеальным для клинического мониторинга пациентов с тяжелыми нарушениями моторики.
3. **Нейроморфные событийные сенсоры (DVS)**: Самое революционное направление, где сенсоры фиксируют не целые изображения, а изменения интенсивности света в каждом пикселе асинхронно. Это позволяет достичь временного разрешения на уровне микросекунд, необходимого для фиксации микроскачков и ускорений глаза до $24\,000^\circ/\text{с}^2$. Система E-Gaze на базе DVS достигает точности $0,46^\circ$ при частоте обновления 950 Гц. [36]

3.4. Состояние сектора в России

О многих игроках мы уже говорили в секции 1.5. Здесь немного продублируем эту информацию, может раскроется с чутка другой стороны.

3.4.1. Коммерческие компании и продукты

1. ГК Нейроботикс[17]

Ведущий разработчик нейротехнологического оборудования.

- **Продукт:** Линейка стационарных и мобильных айтрекеров **Eye-track**.
- **Применение:** Создание ассистивных интерфейсов для управления инвалидными колясками и программными комплексами «виртуальной печатной машинки» через фиксацию взгляда.

⁴В контексте человеко-компьютерных интерфейсов (НСИ) и нейротехнологий термин «модальность» означает конкретный канал связи или тип физического сигнала, который используется для передачи информации от человека к машине.

2. Нейрочат (NeuroChat)[20]

Социально значимый проект, специализирующийся на сетевой коммуникации.

- **Продукт:** Мультимодально-интерфейсная система связи.
- **Применение:** Реабилитация пациентов с тяжелыми нарушениями речи и моторики. Система интегрирует технологию отслеживания глаз для быстрого выбора объектов на экране в дополнение к ЭЭГ-каналам.

3. ГК «Исток-Аудио» [37]

Разработчик комплексных ИТ-решений для инклюзивного образования. Помимо этого, основной вид деятельности - перепродажа существующих инклюзивных решений в России.

- **Продукт:** Специализированное ПО EyeTracking.care.
- **Применение:** Адаптация компьютерных рабочих мест для людей с ОВЗ, использование взгляда как основного манипулятора в образовательном процессе.

3.4.2. Научно-исследовательские группы

1. Лаборатория нейрофизиологии и нейрокомпьютерных интерфейсов (МГУ им. М.В. Ломоносова)

Под руководством проф. А.Я. Каплана.

- **Направление:** Исследование гибридных ИМК (интерфейсов мозг-компьютер), где айтрекинг используется для определения пространственного внимания, а ЭЭГ — для подтверждения намерения совершить действие.

2. Центр когнитивных нейронаук (НИУ ВШЭ)

Академическая группа, сфокусированная на когнитивной психологии и НСИ.

- **Направление:** Изучение паттернов движения глаз для оценки когнитивной нагрузки и проектирования интуитивно понятных интерфейсов «человек-машина».

3. Институт системного программирования (ИСП РАН)

Группы, занимающиеся машинным зрением.

- **Направление:** Разработка алгоритмов компьютерного зрения для бесконтактного окулографического анализа (Gaze Estimation) без использования дорогостоящих ИК-датчиков.

3.5. Выводы о применимости в рамках лаборатории

Основная проблема в технологиях отслеживания взгляда - взгляд Мидаса[38]. То есть ложные срабатывания из-за произвольных или непреднамеренных (без желания совершить действие) движениях глаза. Решение этой проблемы является важным направлением работы, существует три основных метода для решения данной проблемы: повышение задержки, жесты глазами и совмещение с данными ЭЭГ.

Если говорить о применимости в рамках лаборатории и потенциальных направлениях работы, то можно выделить следующее:

1. Создание устройств для мониторинга состояния водителя по стандарту Euro NCAP 2026
2. Управление взглядом телевизором или устройствами LG. Заход сюда может идти через решение существующих проблем.

Глава 4

Дополнительные материалы

4.1. Формулы

Ковариационная матрица (Covariance Matrix)

$$C = \frac{1}{N-1} X X^T \in \mathbb{R}^{N \times N} \quad (4.1)$$

Риманово расстояние (Riemannian Distance)

$$\delta_R(C_1, C_2) = \left\| \log \left(C_1^{-1/2} C_2 C_1^{-1/2} \right) \right\|_F = \left[\sum_{i=1}^N \log^2 \lambda_i \right]^{1/2} \quad (4.2)$$

здесь λ_i — это вещественные собственные значения матрицы $(C_1^{-1/2} C_2 C_1^{-1/2})$, а $\| \cdot \|_F$ обозначает норму Фробениуса

Риманово геометрическое среднее (Riemannian Geometric Mean)

$$G(C_1, \dots, C_I) = \operatorname{argmin}_{C \in \mathcal{C}(n)} \sum_{i=1}^I \delta_R^2(C, C_i) \quad (4.3)$$

где $\mathcal{C}(n)$ — пространство SPD-матриц. Этот метод (RMDM) устойчив к шуму и хорошо обобщает данные.

Регрессия для оценки взгляда (Gaze Estimation) В подразделе о контроле взгляда (который также является частью интерфейсов в статье) используется квадратичная полиномиальная модель:

$$g = f(e) = v c \quad (4.4)$$

где $g = (g_x, g_y)$ — координаты взгляда, c — коэффициенты модели, а вектор v включает члены до второго порядка:

$$v = (1, x, y, xy, x^2, y^2, m, n) \quad (4.5)$$

здесь (x, y) — координаты зрачка, а (m, n) — координаты угла глаза. Для решения этой задачи используется метод наименьших квадратов

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. LG CLOI SERVEBOT (новость с официального сайта). — URL: <https://www.lg.com/kz/about-lg/press-and-media/lg-predstavlyat-servisnogo-robotu-cloi-servebot/>.
2. Нейронет — nti2035.ru. — <https://nti2035.ru/markets/mneuronet>.
3. Non-Invasive Brain-Computer Interfaces: State of the Art and Trends / B. J. Edelman [и др.] // IEEE Reviews in Biomedical Engineering. — 2025. — Т. 18. — С. 26—49. — ISSN 19411189. — DOI: [10.1109/RBME.2024.3449790](https://doi.org/10.1109/RBME.2024.3449790).
4. Progress in Brain Computer Interface: Challenges and Opportunities / S. Saha [и др.]. — 02.2021. — DOI: [10.3389/fnsys.2021.578875](https://doi.org/10.3389/fnsys.2021.578875).
5. OpenVibe - Wikipedia.
6. bci2000.org. — <https://www.bci2000.org/>.
7. MNE — MNE 1.11.0 documentation. — 01.2026. — URL: <https://mne.tools/stable/index.html>.
8. LORETA; documentation link. — URL: https://www.mitsar-eeg.ru/download/manuals/Loreta_UM_RUS.pdf.
9. Top 10 Brain-Computer Interface Companies in 2025. — URL: <https://www.sphericalinsights.com/blogs/top-10-companies-leading-the-brain-computer-interface-market-in-2025-key-players-statistics-future-trends-2024-2035>.
10. The Technology | Synchron. — URL: <https://synchron.com/technology>.
11. Blackrock Neurotech | Empowered by Thought. — URL: <https://blackrockneurotech.com/>.
12. Brain Data Measurement & Wireless EEG Solutions | Emotiv. — URL: <https://www.emotiv.com>.
13. Neurable | The Mind. Unlocked. | Work Smarter, Not Longer. — URL: <https://www.neurable.com/>.
14. Kernel. — URL: <https://www.kernel.com/>.

15. Brain-computer interfaces in 2023–2024 / S. Chen [и др.] // Brain-X. — 2025. — Март. — Т. 3. — DOI: [10.1002/brx2.70024](https://doi.org/10.1002/brx2.70024).
16. *Новости* P. Neuralink впервые вживит человеку зрительный имплант, заявил Маск - РИА Новости, 31.03.2025. — URL: <https://ria.ru/20250331/neuralink-2008320527.html>.
17. Нейроботикс - Главная. — URL: <https://neurobotics.ru/>.
18. Кибер-протез с новой системой очувствления испытали в России | Новости науки. — <https://xn--80aa3ak5a.xn--p1ai/news/zavershilsya-4-y-etap-issledovaniy-po-ochuvstvleniyu-protezo- i - kupirovaniyu-fantomnykh-boley/>.
19. Крупнейшая российская нейромаркетинговая компания - Нейротренд. — URL: <https://neurotrend.ru/>.
20. Коммуникационная система НейроЧат - официальный сайт. — URL: <https://neurochat.pro/>.
21. *Navarro D., Garro V., Sundstedt V.* Electrodermal Activity Evaluation of Player Experience in Virtual Reality Games: A Phasic Component Analysis // Proceedings of the International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications. Т. 2. — Science, Technology Publications, Lda, 2022. — С. 2184–4321. — DOI: [10.5220/0011006100003124](https://doi.org/10.5220/0011006100003124).
22. E N G I N E E R I N G Flexible multichannel muscle impedance sensors for collaborative human-machine interfaces : тех. отч. / J. Li [и др.]. — 2025. — С. 3359. — URL: <https://www.science.org>.
23. A generic non-invasive neuromotor interface for human-computer interaction / P. Kaifosh [и др.] // Nature. — 2025. — Сент. — Т. 645, вып. 8081. — С. 702–711. — ISSN 14764687. — DOI: [10.1038/s41586-025-09255-w](https://doi.org/10.1038/s41586-025-09255-w).
24. A human-machine interface using electrical impedance tomography for hand prosthesis control / Y. Wu [и др.] // IEEE transactions on biomedical circuits and systems. — 2018. — Т. 12, № 6. — С. 1322–1333.
25. Набор-конструктор «Юный нейромоделист» BiTronics Lab. — URL: <https://bitronicslab.com/neuromodelist>.
26. Резидент «Сколково» зарегистрировал «умную перчатку» для. — URL: <https://sk.ru/news/rezident-skolkovo-zaregistroval-umnuyu-perchatku-dlya-reabilitacii-posle-insulta/>.
27. Научно-исследовательский технологический Центр нейротехнологий. — URL: https://sfedu.ru/www/stat_pages22.show?p=ELS/inf/D%5C&x=ELS/10484.

28. Лаборатория нейрокомпьютерных интерфейсов. — URL: https://human.bio.msu.ru/lab_neurophysiology.html.
29. О нас — Центр нейроэкономики и когнитивных исследований — Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». — URL: <https://www.hse.ru/cdm-centre/about>.
30. Центр инженерных систем и наук |. — URL: <https://www.skoltech.ru/center/engineering>.
31. A Comprehensive Framework for Eye Tracking: Methods, Tools, Applications, and Cross-Platform Evaluation. — 10.2025. — DOI: [10.3390/jemr18050047](https://doi.org/10.3390/jemr18050047).
32. *Lyrheden F.* Driver Monitoring 2.0: How Euro NCAP is Raising the Bar in 2026 - Smart Eye. — 04.2025. — URL: <https://www.smarteye.se/blog/driver-monitoring-euro-ncap-2026/>.
33. An Advanced Human-Machine Interface Utilizing Eye Tracking For Enhanced Written Communication Among Locked-In Syndrome Patients By Using Haar Cascade Algorithm / A. Gomathy [и др.]. — 2024. — URL: www.migrationletters.com.
34. GMM-HMM-Based Eye Movement Classification for Efficient and Intuitive Dynamic Human-Computer Interaction Systems / J. Xie [и др.] // Journal of Eye Movement Research. — 2025. — Июль. — Т. 18, вып. 4. — С. 28. — DOI: [10.3390/jemr18040028](https://doi.org/10.3390/jemr18040028).
35. Eye tracking — a catalyst for innovation in AR, VR, and MR - Tobii. — URL: <https://www.tobii.com/products/integration/xr-headsets>.
36. *Li N., Chang M., Raychowdhury A.* E-Gaze: Gaze Estimation with Event Camera // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. — 2024. — Янв. — Т. PP. — DOI: [10.1109/TPAMI.2024.3359606](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2024.3359606).
37. Слуховые системы костной проводимости | ГК «Исток-Аудио». — URL: <https://www.istok-audio.com/implantiruemye-slukhovye-sistemy/>.
38. Toward Gaze-Based Map Interactions: Determining the Dwell Time and Buffer Size for the Gaze-Based Selection of Map Features / H. Liao [и др.] // ISPRS International Journal of Geo-Information. — 2022. — Февр. — Т. 11, вып. 2. — ISSN 22209964. — DOI: [10.3390/ijgi11020127](https://doi.org/10.3390/ijgi11020127).