

# NeuroHand: Универсальный бионический протез с ЭЭГ-управлением

*Первый доступный протез, управляемый силой мысли*

## Содержание

1. [Обзор проекта](#)
2. [Проблема и решение](#)
3. [Команда](#)
4. [Roadmap на 3 месяца](#)
5. [Техническая архитектура](#)
6. [Оборудование и бюджет](#)
7. [ЭЭГ система](#)
8. [Искусственный интеллект](#)
9. [Механическая часть](#)
10. [Интеграция системы](#)
11. [Тестирование](#)
12. [Бизнес-модель](#)
13. [Финансирование](#)
14. [Риски и решения](#)
15. [Следующие шаги](#)

<a name="overview"></a>

## Обзор проекта

### Что такое NeuroHand?

**NeuroHand** - это инновационный бионический протез верхней конечности, который управляется **исключительно** сигналами мозга (ЭЭГ) через встроенный адаптивный искусственный интеллект.

### Ключевые характеристики

Параметр	Значение
Тип управления	Чистый ЭЭГ (без ЭМГ)
Универсальность	Работает при любом уровне ампутации
ЭЭГ каналы	6–8 каналов
Степени свободы	3–4 (4 пальца, большой палец, запястье)
Задержка	<500ms (от намерения до движения)
Точность	70–85% (адаптивно растет)
Автономность	6–8 часов
Вес протеза	~400–500г
Себестоимость	\$760 (серийно)
Розничная цена	\$1,500–2,000

### Уникальные преимущества

-  **Универсальность** - работает без мышц, подходит для высоких ампутаций, неврологических пациентов

**Адаптивность** - AI учится под каждого пользователя, точность растет с использованием

**Кастомизация** - модульный дизайн, можно менять насадки (рука, клещня, щупальца, инструменты)

**Доступность** - в 25-50 раз дешевле аналогов (\$1,500 vs \$40,000-100,000)

**Open Source** - открытый исходный код, сообщество может улучшать

<a name="problem"></a>

## ! Проблема и решение

### Существующая проблема

#### Цифры

Показатель	Значение
Люди с ампутацией верхних конечностей в мире	<b>57 миллионов</b>
Ежегодно новых ампутаций	<b>3-5 тысяч</b> (только в Узбекистане)
Не могут позволить протез (развивающиеся страны)	<b>85%</b>
Средняя цена качественного протеза	<b>\$40,000 – 100,000</b>

#### Ограничения текущих технологий

##### ЭМГ-протезы (миоэлектрические):

- Требуют функциональные мышцы в культе
- Не работают при высокой ампутации (близко к плечу)
- Не подходят при повреждении нервов
- Дети с врожденными дефектами не могут использовать
- Нужно "переучиваться" напрягать определенные мышцы
- Не адаптируются под пользователя
- Очень дорогие (\$40,000-100,000)

##### Инвазивные BCI (Neuralink и т.д.):

- Требуют операцию на мозге
- Риски инфекции и осложнений
- Стоимость операции + имплант = \$200,000+
- Недоступны для 99.9% нуждающихся

### Наше решение

#### NeuroHand решает все эти проблемы:

**Не требует мышц** - читает намерение напрямую из мозга (моторная кора)

**Неинвазивный** - портативный ЭЭГ-шлем, надевается как шапка

- ✓ **Интуитивное управление** - "думаешь о движении" → протез двигается
- ✓ **Универсальный** - работает при любом уровне ампутации, подходит для неврологических пациентов
- ✓ **Адаптивный AI** - система учится под каждого человека, точность растет с использованием
- ✓ **Доступный** - себестоимость \$760, цена \$1,500-2,000 (в 25-50 раз дешевле)

## Целевая аудитория

### Первичная аудитория

- Люди с **высокой ампутацией** (где ЭМГ не работает)
- Пациенты с **повреждениями периферических нервов**
- Дети с **врожденными дефектами** конечностей
- Пациенты после **инсульта, ДЦП, травм спинного мозга**

### Вторичная аудитория (будущее)

- Все остальные с ампутациями (как альтернатива ЭМГ)
- Реабилитация после неврологических травм (экзоскелеты)
- Управление инвалидными колясками
- Brain-computer interface для парализованных

## География

- **Год 1-2:** Узбекистан, Центральная Азия
- **Год 3-5:** Развивающиеся страны (Африка, Южная Азия, Латинская Америка)
- **Год 5+:** Глобально

<a name="team"></a>

## 👤 Команда

### Текущий состав (5 человек)

#### Роль 1-2: Медики + Data Science

#### Члены:

- Темур Тураев (Лидер проекта)
- [Участник 2]

#### Образование:

- 5 курс Ташкентского педиатрического медицинского института
- Изучают Data Science

#### Ответственность:

- ✓ Протоколы сбора данных ЭЭГ
- ✓ Медицинская валидация
- ✓ Контакты с пациентами и клиниками

- Обработка биосигналов (preprocessing)
- Разметка датасетов
- Этические одобрения

### Роль 3: Data Scientist

Член: [Участник 3]

#### Ответственность:

- Разработка архитектуры нейросети
- Обучение и оптимизация моделей
- Алгоритмы online learning
- Deployment на embedded устройства
- А/В тестирование моделей

### Роль 4-5: Hardware Engineers

Члены: [Участник 4], [Участник 5]

#### Ответственность:

- Механический дизайн протеза
- 3D-печать и сборка
- Электроника (сервоприводы, контроллеры)
- Интеграция ЭЭГ → Процессор → Протез
- Системы питания (батареи, управление энергией)
- Разработка крепления ЭЭГ-шлема

### Роли для будущего расширения

Роль	Когда нужна	Зачем
Embedded Software Engineer	Месяц 6–9	Оптимизация для Jetson, real-time системы
UX/UI Designer	Месяц 6–9	Интерфейс калибровки, мобильное приложение
Clinical Coordinator	Месяц 9–12	Организация клинических испытаний
Business Developer	Месяц 9–12	Продажи, партнерства, инвестиции
Industrial Designer	Год 2	Эстетический дизайн продукта
Regulatory Specialist	Год 2	Сертификация (CE mark, FDA)

### Доступ к ресурсам

#### Школа 21 (безлимитный доступ):

- 3D-принтеры (ABS, PLA, PETG)
- Мастерская с инструментами
- Рабочее пространство
- Менторы (программирование)
- Нетворкинг с IT сообществом

#### TashPMI:

- Доступ к пациентам (стажировки в больницах)
  - Научные руководители (профессора неврологии)
  - Лаборатория биосигналов
  - Этический комитет (для одобрений)
- 

<a name="roadmap"></a>

## Roadmap: 3 месяца до Proof of Concept

### Общая стратегия



МЕСЯЦ 1: Foundations



МЕСЯЦ 2: Integration



МЕСЯЦ 3: Refinement & Demo



РЕЗУЛЬТАТ: Working Prototype + Demo Video + Grant Applications

---

### МЕСЯЦ 1: Foundations (Недели 1-4)

#### Неделя 1: Setup & Planning

##### Цели:

- Заказать все оборудование
- Настроить рабочее окружение
- Распределить задачи

##### Hardware Team:

- Заказать OpenBCI Cyton v3 (6-8 каналов) - \$250
- Заказать PiEEG kit (backup) - \$150
- Заказать Raspberry Pi 5 (8GB) - \$80
- Заказать базовые компоненты (см. список оборудования)
- Инвентаризация в Школе 21 (что есть, что нужно купить)

##### Software/DS Team:

- Создать GitHub repository (private)
- Настроить Python окружение (PyTorch, MNE-Python, scikit-learn)
- Изучить документацию OpenBCI
- Скачать публичные датасеты ЭЭГ (PhysioNet, BCI Competition)
- Изучить state-of-art papers по EEG motor imagery

##### Medical Team:

- Подать заявку в этический комитет TashPMI
- Разработать протокол информированного согласия
- Набрать 5 здоровых добровольцев (команда + друзья)
- Изучить литературу: EEG motor imagery, artifact removal

#### Deliverables:

- GitHub repo создан
- Оборудование заказано
- 5 добровольцев найдены
- Заявка в этком подана

---

## Неделя 2: First Data Collection

**Цель:** Собрать первый сырой датасет ЭЭГ

#### Hardware:

- Получить и протестировать OpenBCI
- Подобрать оптимальное расположение электродов (C3, C4, Cz обязательны)
- Решить вопрос крепления (заказать Ultracortex или DIY шапка)
- Проверить качество сигнала (impedance <10kΩ)

#### Протокол сбора данных:

Параметр	Значение
Участники	5 человек
Длительность сессии	~60 минут
Команды	4 (Сжать, Разжать, Повернуть, Покой)
Trials на команду	50
Длительность trial	7 секунд (1с кью + 4с воображение + 2с отдых)
Общее количество trials	200 на человека

#### Структура trial:

1. **Подсказка (1 сек):** На экране появляется текст "Prepare: GRASP"
2. **Воображение (4 сек):** "Imagine: GRASP" - участник воображает движение
3. **Отдых (2 сек):** "Rest" - расслабление

#### Software:

- Написать скрипт стриминга данных с OpenBCI
- Визуализация real-time
- Сохранение данных в формат MNE (.fif) или .csv

#### Deliverables:

- Собраны данные от 5 добровольцев
- ~1000 trials (5 человек × 200 trials)
- Данные сохранены и структурированы

---

## Неделя 3: Data Preprocessing & Baseline Model

## DS Team:

### Задачи по обработке данных:

- Реализовать pipeline preprocessing
- Визуальный контроль качества (найти плохие каналы, артефакты)
- Разделить на train/val/test: 70%/15%/15%

### Pipeline обработки:



1. Bandpass filter (0.5-50 Hz) - удалить очень низкие и высокие частоты
2. Notch filter (50 Hz) - удалить сетевую наводку
3. ICA - Independent Component Analysis - отделить артефакты (моргания, движения)
4. Epoch extraction - нарезать на окна (например, -1 до 4 сек от начала команды)
5. Normalization - привести к единому масштабу
6. Feature extraction (опционально) - CSP, wavelet, или сырые данные для DL

### Baseline модели:

Модель	Подход	Ожидаемая точность
CSP + LDA	Classical ML	60–65%
CSP + SVM	Classical ML	60–65%
EEGNet	Deep Learning (CNN)	65–75%
ShallowConvNet	Deep Learning (CNN)	65–75%

### Метрики оценки:

- Accuracy (4-class classification)
- Confusion matrix
- Precision, Recall, F1 per class
- Cross-validation (5-fold)

### Deliverables:

- Данные обработаны и чистые
- Обучена baseline модель
- Accuracy >60% на validation set
- Документация pipeline

## Неделя 4: Mechanical Design

### Hardware Team:

### 3D-печать протеза:

- Выбрать базовую модель: Open Bionics Brunel Hand v2
- Скачать STL файлы с GitHub
- Модифицировать под ваши требования (4 пальца группой, большой отдельно)
- Напечатать все части

## Параметры печати:

Параметр	Значение
Материал	ABS (прочность)
Layer height	0.2mm
Infill	30% (пальцы), 50% (ладонь)
Температура	230–250°C
Скорость	40mm/s
Поддержки	Да (для пальцев)
Время печати	~24 часа (весь протез)
Филамент	~600–700г

## Электроника:

- Заказать сервоприводы: 3x MG996R (по \$8)
- Купить тросики (fishing line 50lb)
- Arduino Mega для первых тестов
- Breadboard, провода, коннекторы

## Deliverables:

- Все части протеза напечатаны
- Электроника заказана
- Начальная сборка (пальцы + ладонь)

# МЕСЯЦ 2: Integration (Недели 5-8)

## Неделя 5: Enhanced Data Collection

**Цель:** Расширить датасет, улучшить качество

### Hardware:

- Финализировать крепление ЭЭГ-шлема
- Тестировать impedance (<10kΩ всегда)
- Решить проблемы с артефактами (экранирование проводов)

### Data Collection v2:

- Набрать еще 10 участников (всего 15)
- Расширенный протокол: 6 команд вместо 4

### Команды:

#	Команда	Описание
1	Сжать кулак	Воображение полного сжатия
2	Разжать	Открытая ладонь
3	Повернуть влево	Поворот запястья против часовой
4	Повернуть вправо	Поворот запястья по часовой
5	Pinch grip	Большой + указательный
6	Покой	Полное расслабление

- По 200 trials на команду на человека
- Разные условия: утро/вечер, усталый/свежий (для проверки стабильности)

## Deliverables:

- Собраны данные от 15 человек
  - ~18,000 trials (15 человек  $\times$  6 команд  $\times$  200 trials)
  - Высокое качество (impedance контролируется)
- 

## Неделя 6: Advanced ML Models

### DS Team:

#### Transfer Learning:

- Загрузить pre-trained модель (обученную на PhysioNet MI dataset)
- Fine-tune на ваших данных
- Сравнить с baseline

#### Custom Architectures:

#### Варианты для экспериментов:

Архитектура	Описание	Сложность
EEGNet	CNN оптимизированная для ЭЭГ	Средняя
DeepConvNet	Глубокая CNN	Средняя
EEG Transformer	Attention-based	Высокая
LSTM + CNN	Hybrid рекуррентная + сверточная	Высокая

#### Online Learning Prototype:

- Реализовать incremental learning с EWC (Elastic Weight Consolidation)
- Тестировать: базовая модель  $\rightarrow$  дообучение на 50 новых примерах
- Измерить улучшение accuracy

#### Target метрики:

- Accuracy  $>75\%$  на validation (6 классов)
- Inference time  $<50\text{ms}$  на Raspberry Pi

## Deliverables:

- Несколько моделей протестированы
  - Лучшая модель выбрана
  - Online learning работает
- 

## Неделя 7: Mechanical Assembly

### Hardware Team:

#### Сборка руки:

- Установить тросики во все пальцы
- Закрепить сервоприводы в предплечье
- Подключить сервоприводы к Arduino
- Калибровать натяжение тросов

## Калибровка (критично!):

Сервопривод	Позиция 0°	Позиция 90°	Результат
4 пальца	Пальцы вытянуты	Пальцы согнуты 90°	Функциональный хват
Большой палец	Вытянут	Противопоставлен	Оппозиция
Запястье	Нейтральное	Согнуто вверх/вниз	Подвижность

## Тестирование хватов:

- Cylindrical grasp (бутылка)
- Pinch (монета, ключ)
- Hook (сумка)

## Vibration Feedback:

- Добавить 3 вибромотора (большой палец, указательный, запястье)
- Протестировать ощущения

## Deliverables:

- Полностью собранный и функциональный протез
- Может выполнять базовые хваты
- Вибрация работает

## Неделя 8: First Integration (ЭЭГ → AI → Протез)

### Full Team:

### Архитектура:



ЭЭГ (OpenBCI)

→ Bluetooth →

Raspberry Pi (AI Model)

→ USB →

Arduino (Servo Control)

→ PWM →

Servos (Рука двигается!)

### Задачи:

- Написать main control loop на Python (Raspberry Pi)
- Интеграция: стриминг ЭЭГ → preprocessing → AI inference → команда Arduino
- Тестирование latency (цель: <500ms)

### Первое тестирование:

- Участник надевает ЭЭГ шлем
- Думает "сжать кулак"
- Рука сжимается! 🎉

## Типичные проблемы и решения:

Проблема	Причина	Решение
Задержка >1 сек	Медленный preprocessing	Оптимизировать фильтры, упростить
Ложные срабатывания	Низкий порог уверенности	Увеличить confidence threshold
Дрожание руки	Шум в предсказаниях	Voting mechanism (3 последних)
Рука не двигается	Неправильный mapping	Проверить Arduino serial

## Deliverables:

- End-to-end система работает
- Участник может управлять протезом ЭЭГ
- Latency <500ms
- Видео-демо (30 сек)

## МЕСЯЦ 3: Refinement & Demo (Недели 9-12)

### Неделя 9: Optimization

#### DS Team:

##### Model Optimization:

- Pruning: удалить 30% весов (уменьшить размер модели)
- Quantization: FP32 → INT8 (ускорить inference)
- ONNX export (для кросс-платформенности)

#### Целевые метрики:

Метрика	До оптимизации	После оптимизации
Inference time	100ms	<50ms
Model size	50MB	<10MB
Accuracy drop	-	<5%

#### Hardware Team:

##### Power Optimization:

- Измерить текущее потребление
- Найти баланс: производительность vs батарея
- Тестировать battery life (цель: >6 часов)

#### Если нужно:

- Upgrade to Jetson Orin Nano (если Raspberry Pi не справляется)
- TensorRT optimization на GPU

## Deliverables:

- Модель оптимизирована
- Система быстрая и энергоэффективная
- Battery life 6+ часов

## Неделя 10: User Testing (Alpha)

**Цель:** Протестировать с новыми пользователями (не из команды)

**Протокол:**

**Участники:** 5 новых добровольцев

**Процедура для каждого:**

**1. Калибровка (10 минут):**

- 20 примеров × 4 команды = 80 trials
- Система обучает персональную модель

**2. Real-world Tasks (20 минут):**

Задача	Описание	Success criteria
Взять бутылку	Пластиковая бутылка 0.5L	Поднять без падения
Взять ручку	Шариковая ручка	Удержать в pinch grip
Поднять чашку	Кофейная кружка (пустая)	Cylindrical grasp
Открыть дверь	Повернуть ручку	Rotate wrist + grasp

- По 10 попыток на задачу
- Success: выполнить за  $\leq 3$  попытки

**3. Questionnaire (5 минут):**

**Вопросы (шкала 1-10):**

- Насколько естественным было управление?
- Насколько быстро рука реагировала?
- Насколько точными были движения?
- Удобен ли ЭЭГ-шлем?
- Использовали бы ежедневно? (да/нет)

**Метрики:**

Метрика	Target
Success rate	>60%
Avg attempts per task	<2.5
User satisfaction	>7/10
Willing to use daily	>80% "да"

**Deliverables:**

- 5 участников протестированы
- Success rate измерен
- Feedback собран
- Видео успешных executions

---

## Неделя 11: Adaptive Learning Showcase

**Цель:** Продемонстрировать, что система учится

**Эксперимент:**

**Протокол:**

- Участник использует протез 30 минут
- Каждые 5 минут: тест на стандартной задаче (поднять бутылку)
- Система собирает данные и автоматически дообучается
- Измерить improvement в точности

## Ожидаемый результат:

### Время (мин) Success Rate Улучшение

0 (baseline)	70%	–
5	72%	+2%
10	75%	+5%
15	78%	+8%
20	80%	+10%
30	82%	+12%

## Visualization:

- График: ось X = время, ось Y = accuracy
- Показывает upward trend
- Доказывает адаптивность!

## Deliverables:

- Adaptive learning работает
- Доказано улучшение +10-15%
- График для презентации

## Неделя 12: Documentation & Demo Preparation

### All Team:

#### Demo Video (5 минут):

#### Структура:

1. **Intro (1 мин):** Проблема - миллионы людей без доступа к протезам
2. **Технология (1 мин):** Как работает NeuroHand (ЭЭГ → AI → Протез)
3. **Live Demo (2 мин):** Человек управляет рукой силой мысли, выполняет задачи
4. **Adaptive Learning (30 сек):** График улучшения
5. **Call to Action (30 сек):** Призыв к инвестициям/партнерству

#### Presentation (Pitch Deck):

- Обновить слайды
- Добавить реальные данные с тестирований
- Финансовые проекции

#### Technical Report (15-20 страниц):

#### Структура:

- Abstract
- Introduction
- Methods (ЭЭГ, AI, механика)
- Results (accuracy, latency, user satisfaction)
- Discussion
- Conclusion

- Appendices

## GitHub Repository:

- Сделать публичным (или оставить private до патента)
- README с инструкциями
- Документация API
- Видео демо на главной

## Grant Applications:

- Подать заявку на грант Zmin Fund (Uzbekistan) - до \$5,000
- USAID Innovation Grant
- Конкурс InnoWeek Uzbekistan
- IT Park Demo Day (регистрация)

## Deliverables:

- Demo video готово (5 мин, профессиональное качество)
- Pitch deck finalized
- Technical report написан
- 2+ grant applications поданы
- GitHub repo структурирован

## Итоговые цели Proof of Concept

К концу 3 месяцев должно быть:

### Технические метрики

Метрика	Target	Измерение
Offline accuracy	>70%	4–6 классов, validation set
Online success rate	>60%	Real-world tasks
Latency	<500ms	От намерения до движения
Battery life	>6 часов	Непрерывное использование
Adaptive improvement	+10–15%	После 30 мин использования
Inference time	<50ms	На Raspberry Pi / Jetson

### Пользовательские метрики

Метрика	Target
User satisfaction	>7/10
Calibration time	<15 минут
Willing to use daily	>80%
Task completion	Can perform 4 basic tasks

### Бизнес метрики

**Метрика****Target**

**Working prototype**  Да

**Demo video**  5 минут, professional

**Grant applications**  $\geq 2$  поданы

**Team complete** 5+ человек

**Potential partners** 3+ identified

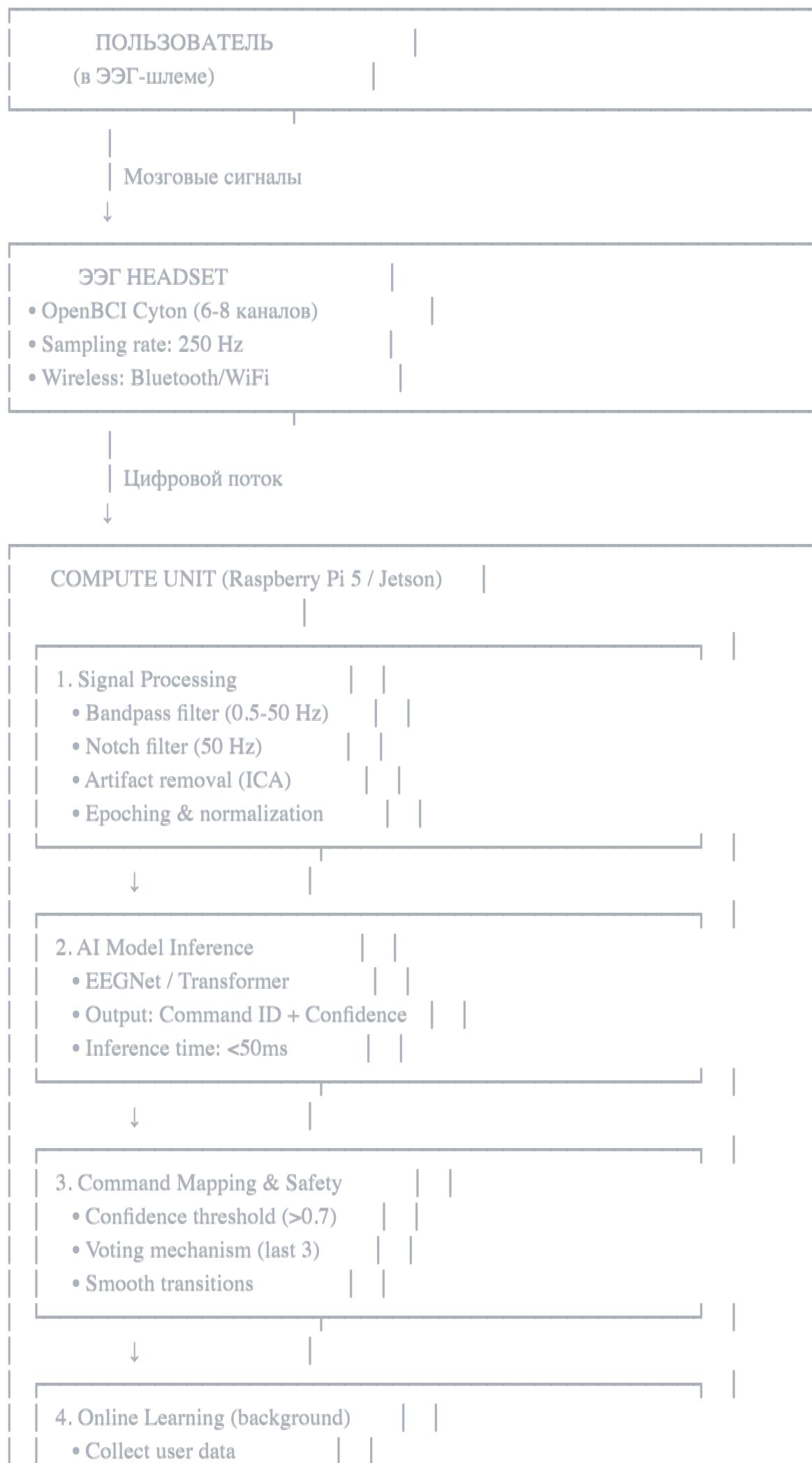
---

<a name="architecture"></a>

## Техническая архитектура

### System Overview





- Incremental fine-tuning (EWC)
- Improve accuracy over time

Serial/USB: "GRASP\n"

- MOTOR CONTROLLER (Arduino Mega)
- Receives commands via Serial (115200 baud)
  - Controls servos (PWM signals)
  - Drives vibration motors
  - Safety checks (timeout, range limits)

PWM Signals

- PROSTHETIC HAND
- 3× Servos → pull tendons
  - Fingers curl/extend
  - Vibration feedback to user

## Data Flow

### Real-time Loop (10 Hz):



1. Stream ЭЭГ: Collect 1 second window (250 samples × 6 channels)

↓

2. Preprocess: Filter, clean, normalize (~30ms)

↓

3. AI Inference: Predict command (~20ms)

↓

4. Voting: Check last 3 predictions for stability (~1ms)

↓

5. Send to Arduino: Serial command "GRASP\n" (~10ms)

↓

6. Execute: Arduino moves servos (~50-100ms)

↓

7. Feedback: Vibration confirms action (~50ms)

Total latency: ~200-300ms (well under 500ms target!)

## Software Stack

Layer	Technology	Purpose
Data Acquisition	pyOpenBCI, pylsl	ЭЭГ streaming
Signal Processing	MNE-Python, scipy	Filtering, ICA, epoching
Machine Learning	PyTorch, scikit-learn	Model training & inference
Optimization	ONNX, TensorRT	Fast deployment
Control Logic	Python (custom)	State machine, safety
Communication	pySerial	Arduino communication
Embedded	C++ (Arduino)	Servo control

[<a name="equipment"></a>](#)

## Оборудование и бюджет

### Phase 1: Must Have (Первый месяц)

Для запуска проекта:

Категория	Item	Specs	Qty	Unit	Price	Total	Where to Buy
ЭЭГ	OpenBCI Cyton Board	8-ch, 250Hz	1	\$250	\$250	openbci.com	
ЭЭГ	Electrode Starter Kit	Gold cup, paste	1	\$60	\$60	openbci.com	
Compute	Raspberry Pi 5	8GB RAM	1	\$80	\$80	raspberrypi.com	
Storage	MicroSD Card	128GB UHS-I	2	\$20	\$40	Amazon	
Control	Arduino Mega 2560	54 I/O pins	1	\$15	\$15	AliExpress	
Actuators	Servo MG996R	10kg torque	5	\$8	\$40	AliExpress	
Mechanical	Fishing Line	50lb, 100m	1	\$10	\$10	Amazon	
Electronics	Breadboard + Jumpers	Prototyping kit	1	\$15	\$15	AliExpress	
Power	5V 10A Power Supply	For servos	1	\$20	\$20	AliExpress	
Power	18650 Li-Ion cells	3000mAh	8	\$5	\$40	AliExpress	
Power	BMS 3S Module	Battery management	1	\$10	\$10	AliExpress	
Feedback	Vibration Motors	3V coin type	5	\$2	\$10	AliExpress	
Material	ABS Filament	1kg, black	2	\$25	\$50	Local / Amazon	
Tools	Basic toolkit	См. ниже	-	-	\$95	Local	
					<b>TOTAL</b>	<b>\$735</b>	

## Phase 2: Upgrades (Месяц 2-3)

Для улучшения производительности:

Item	Specs	Qty	Price	Total	When Needed
Jetson Orin Nano	8GB, Dev Kit	1	\$500	\$500	Если Raspberry медленный
PiEEG	Backup ЭЭГ	1	\$150	\$150	Альтернатива OpenBCI
Dynamixel XL430	Smart servo	3	\$50	\$150	Для точности
Coral USB Accelerator	TPU for Raspberry	1	\$60	\$60	Ускорение AI
FSR Sensors	Force feedback	5	\$5	\$25	Тактильная обратная связь
Ultracortex Mark IV	Профессиональный шлем	1	\$500	\$500	Или печатать самим
				<b>TOTAL \$1,385</b>	

## Tools (если нет в Школе 21)

Tool	Price
Паяльник + припой	\$40
Мультиметр	\$20
Wire strippers/cutters	\$15
Набор отверток	\$10
Клеевой пистолет	\$10
<b>Total</b>	<b>\$95</b>

## Бюджетные сценарии

### Минимальный старт (\$500):

- Muse 2 headband (б/у) - \$150
- Raspberry Pi 4 - \$60
- Coral TPU - \$60
- Базовые сервоприводы - \$40
- Минимальная электроника - \$50
- Расходники - \$40
- ABS филамент (1кг) - \$25
- Инструменты (базовые) - \$75

### Оптимальный (\$735):

- OpenBCI Cyton - \$250
- Raspberry Pi 5 - \$80

- Все необходимое из Phase 1

## Продвинутый (\$2,120):

- Phase 1 + Phase 2
- Jetson Orin Nano
- Профессиональный шлем
- Лучшие сервоприводы

## Стоимость производства (после R&D)

### Bill of Materials - один протез:

Компонент	Единично	При 100 шт	При 1000 шт
Механика (печать + компоненты)	\$50	\$30	\$20
Сервоприводы (3–4 шт)	\$250	\$150	\$100
Jetson Orin Nano	\$500	\$350	\$300
Электроника (PCB, датчики)	\$150	\$80	\$50
Батарея	\$40	\$25	\$20
ЭЭГ шлем (расходники)	\$100	\$50	\$30
Упаковка + документация	\$20	\$15	\$10
<b>TOTAL</b>	<b>\$1,110</b>	<b>\$700</b>	<b>\$530</b>

### Розничная цена:

Масштаб	Себестоимость	Розница	Маржа
Прототипы (1–10)	\$1,110	\$3,000–5,000	170–350%
Мелкая серия (10–100)	\$700	\$2,000–3,000	185–330%
Серийное (1000+)	\$530	\$1,500–2,000	185–280%

<a name="eeg"></a>

## 🧠 ЭЭГ Система

### Electrode Placement (система 10-20)

#### Минимальная конфигурация (6 каналов):



Лоб

Fz

|

F3--Cz--F4

|

C3-----C4 ← САМЫЕ ВАЖНЫЕ! (моторная кора)

|

P3--Pz--P4

Затылок

#### Назначение каналов:

Электрод	Позиция	Зачем нужен
C3	Левая моторная кора	Воображение движения правой руки
C4	Правая моторная кора	Референс / контроль
Cz	Центральная	Общая моторная активность
F3, F4	Лобные	Внимание, концентрация
P3 или P4	Теменные	Сенсорная интеграция
Fpz	Лоб (центр)	Ground (земля)
Ухо	Мочка / сосцевидный отросток	Reference (референс)

## Типы электродов

### Wet Electrodes (мокрые):

- Лучшее качество сигнала (impedance  $<5\text{k}\Omega$ )
- Стабильный контакт
- Нужна подготовка кожи (10-15 мин)
- Гель пачкает волосы
- Срок службы: 2-4 часа

### Dry Electrodes (сухие):

- Быстрая установка (2-3 мин)
- Без геля
- Удобно для ежедневного использования
- Качество хуже (impedance  $20-50\text{k}\Omega$ )
- Чувствительны к движению

**Рекомендация:** Wet для исследований, Dry для конечного продукта

## Крепление шлема - КРИТИЧНО!

**Проблема:** Сдвиг электродов на 1-2 см = совершенно другой сигнал!

### Решения:

#### Вариант А: Ultracortex Mark IV (рекомендуется)

### Характеристики:

- Профессиональный дизайн от OpenBCI
- 3D-печатная рама
- Пружинные держатели электродов = стабильное давление
- Adjustable для разных размеров
- Время установки: 5-10 минут

### Стоимость:

- Купить готовый: \$500
- Напечатать самому: \$50 (только компоненты)

**Файлы:** [github.com/OpenBCI/Ultracortex](https://github.com/OpenBCI/Ultracortex)

#### Вариант Б: DIY Шапка (бюджет)

## Материалы:

- Плавательная шапка (латекс/силикон): \$10
- Elastic bands: \$5
- Липучки: \$5

## Как сделать:

1. Отметить позиции 10-20 на шапке
2. Вырезать отверстия для электродов
3. Вшить кармашки с липучками
4. Elastic bands для плотной посадки

**Плюсы:** Дешево (\$20), быстро сделать **Минусы:** Менее стабильно, нужны итерации

## Вариант B: Bandana Style (быстрый прототип)

- 3D-печатные клипсы для электродов
- Крепятся на эластичные ленты
- Быстро надевать (2 мин)
- Хорошо для начальных тестов

## Проверка качества сигнала

### Impedance Test (обязательно!):

Impedance	Качество	Действия
<5 kΩ	Отлично <span style="color: green;">✓</span>	Можно начинать
5–10 kΩ	Хорошо <span style="color: green;">✓</span>	Приемлемо
10–20 kΩ	Средне <span style="color: yellow;">⚠</span>	Попробовать улучшить
>20 kΩ	Плохо <span style="color: red;">✗</span>	Переустановить электрод

### Как улучшить impedance:

1. Очистить кожу спиртом
2. Легкая абразия (NuPrep gel) - снимает мертвые клетки
3. Больше геля (для wet electrodes)
4. Сильнее прижать (для dry electrodes)

## Борьба с артефактами

### Типы артефактов:

Артефакт	Частота	Амплитуда	Как выглядит
Моргания	3–4 Hz	Очень высокая	Резкие пики
Движения глаз	<2 Hz	Высокая	Медленные дрифты
Мышечная активность	20–100 Hz	Средняя	Высокочастотный шум
Сетевая наводка	50 Hz (Узбекистан)	Средняя	Синусоида 50 Hz
Дрейф электродов	<0.5 Hz	Низкая	Медленный тренд

### Решения:

#### 1. Фильтрация (программная):

- **Bandpass filter:** 0.5-50 Hz (убирает очень низкие и высокие частоты)
- **Notch filter:** 50 Hz (убирает сетевую наводку)
- **ICA (Independent Component Analysis):** Отделяет артефакты от полезного сигнала

## 2. Предотвращение (аппаратная):

- Экранированные провода (уменьшают помехи)
- Хороший Ground и Reference (стабилизируют сигнал)
- Попросить участника:
  - Расслабить лицо (меньше мышечных артефактов)
  - Смотреть в одну точку (меньше движений глаз)
  - Не жевать, не говорить

## 3. AI подход:

- Обучить модель игнорировать артефакты
- Использовать данные с артефактами в обучающей выборке
- Модель научится отличать "моргание" от "намерение двигать рукой"

## Протокол калибровки

### Первичная калибровка (день 1):

Длительность: 10-15 минут

#### Процедура:

##### 1. Baseline (2 мин):

- Глаза открыты, расслаблен: 1 минута
- Глаза закрыты, расслаблен: 1 минута

##### 2. Обучение команд (8-10 мин):

- Для каждой команды: 20 примеров
- 4 команды  $\times$  20 = 80 trials
- Структура trial:
  - Подсказка (1 сек): "Prepare: GRASP"
  - Воображение (4 сек): интенсивно представлять движение
  - Отдых (2 сек)

##### 3. Проверка (2-3 мин):

- 10 случайных commands
- Система дает обратную связь
- Участник видит точность

### Ежедневная калибровка (5 минут):

- По 10 примеров каждой команды
- 4 команды  $\times$  10 = 40 trials
- Система подстраивается под сегодняшнее состояние

### Когда нужна рекалибровка:

- Каждое утро (обязательно)
- После 4+ часов использования
- Если точность упала >10%
- После переустановки шлема

---

<a name="ai"></a>

## Искусственный интеллект

### Стратегия с данными

#### Phase 1: Публичные датасеты (pre-training)

Датасет	Участники	Каналы	Задачи	Размер
PhysioNet Motor MI	109	64	Левая/правая рука, ноги	~2 GB
BCI Competition IV-2a	9	22	4 класса (руки, ноги, язык)	~500 MB
GigaDB	52	64	Motor imagery	~5 GB

## Зачем:

- Предобучить модель на большом количестве данных
- Научить распознавать общие паттерны моторного воображения
- Transfer learning на ваших данных будет быстрее

## Phase 2: Собственные данные

### План сбора:

Этап	Участников	Trials/чел	Всего trials	Цель
Неделя 2	5	200	1,000	Baseline модель
Неделя 5	15	1,200	18,000	Продвинутая модель
Неделя 10	20	1,200	24,000	Финальная модель

### Формат данных:

- ЭЭГ: (n\_samples, n\_channels, n\_timepoints)
- Labels: (n\_samples,) - command ID
- Metadata: participant\_id, session\_id, timestamp

## Архитектуры моделей

### Baseline: EEGNet

#### Характеристики:

- Легковесная CNN оптимизированная для ЭЭГ
- Параметров: ~2,000-5,000
- Размер модели: ~2-5 MB
- Inference time: 10-20ms (CPU)

#### Структура:



Input (1, channels, timepoints)



Temporal Convolution (выделяет временные паттерны)



Spatial Convolution (выделяет пространственные паттерны)



Separable Convolution (эффективное извлечение признаков)



Fully Connected → Output (n\_classes)

### Плюсы:

- Быстрая
- Мало параметров (не переобучается)
- State-of-art для ЭЭГ
- Легко развернуть на embedded

## Advanced: EEG Transformer

### Характеристики:

- Attention-based архитектура
- Параметров: ~50,000-200,000
- Размер: ~20-50 MB
- Inference: 30-50ms (GPU)

### Структура:



Input → Patch Embedding (делим сигнал на куски)



Positional Encoding (где во времени/пространстве)



Multi-head Self-Attention (какие части важны)



Feed-Forward Network



Classification Head → Output

### Плюсы:

- Может найти долговременные зависимости
- Лучше handling шума
- Потенциально выше точность (+5-10%)

### Минусы:

- Медленнее
- Больше данных нужно
- Сложнее интерпретировать

**Рекомендация:** Начать с EEGNet, если время/данные позволяют - попробовать Transformer

## Training Pipeline

### Этапы обучения:

#### 1. Preprocessing (на этапе подготовки данных):



## Raw ЭЭГ

- ↓ Bandpass filter (0.5-50 Hz)
- ↓ Notch filter (50 Hz)
- ↓ ICA (artifact removal)
- ↓ Epoching (-1 to 4 sec от команды)
- ↓ Normalization (z-score)
- ↓

Clean ЭЭГ готов для обучения

## 2. Data Augmentation (опционально):

- Time shifting: сдвиг окна на  $\pm 0.1$  сек
- Gaussian noise: добавить малый шум
- Channel dropout: случайно отключить 1-2 канала
- Цель: модель более robust

## 3. Train/Val/Test Split:

- 70% training
- 15% validation (для early stopping)
- 15% testing (финальная оценка)

## 4. Training Loop:



For каждый epoch (обычно 50-200):

For каждый batch (обычно 32-64 samples):

1. Forward pass: предсказания
2. Compute loss: cross-entropy
3. Backward pass: градиенты
4. Update weights: Adam optimizer

Validate на validation set

If validation loss не улучшается 10 epochs:

Early stopping (прекратить)