

*Андреев Андрей Андреевич, студент магистратуры  
Московский авиационный институт (МАИ, национальный исследовательский  
университет),*

*Г.Москва*

## **УПРАВЛЕНИЕ БИОНИЧЕСКИМ ПРОТЕЗОМ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОМИОГРАФИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

**Аннотация.** В статье рассматривается разработка системы управления бионическим протезом верхней конечности на основе обработки электромиографических сигналов. Проведён анализ методов регистрации, фильтрации и предварительной обработки нейромышечной активности. Предложен алгоритм выделения информативных признаков во временной области и классификации движений пользователя с использованием метода опорных векторов. Особое внимание уделено адаптации алгоритмов для работы во встроенных системах с ограниченными вычислительными ресурсами. Разработан прототип системы на базе микроконтроллера ESP32, реализующий обработку сигналов и формирование управляющих команд в режиме реального времени. Экспериментальные результаты показали устойчивость работы системы и точность распознавания базовых движений на уровне до 90 %, что подтверждает перспективность применения предложенного подхода в задачах нейроуправления протезами.

**Ключевые слова:** бионический протез, электромиография, нейроуправление, обработка сигналов, классификация, встроенные системы.

**Abstract.** The article presents the development of a control system for an upper-limb bionic prosthesis based on electromyographic (EMG) signal processing. Methods of signal acquisition, filtering, and preprocessing of neuromuscular activity are analyzed. An algorithm for extracting informative features in the time domain and classifying user movements using a support vector machine is proposed.

Particular attention is given to adapting the algorithms for embedded systems with limited computational resources. A prototype based on the ESP32 microcontroller is developed, providing real-time signal processing and control command generation. Experimental results demonstrate stable system performance and classification accuracy of up to 90%, confirming the feasibility of the proposed approach for neuro-controlled prosthetic systems.

**Keywords:** bionic prosthesis, electromyography, neurocontrol, signal processing, classification, embedded systems.

**Введение.** В последние годы наблюдается активное развитие технологий бионического протезирования, направленных на восстановление утраченных функций верхних конечностей человека. Особое внимание уделяется созданию систем нейрорегуляции, обеспечивающих интуитивное взаимодействие пользователя с протезом за счёт использования биологических сигналов [1].

Одним из наиболее распространённых источников информации о намерениях пользователя являются электромиографические сигналы (ЭМГ), отражающие электрическую активность мышц при их сокращении. Применение ЭМГ позволяет формировать управляющие команды на основе естественных движений, что делает управление протезом более точным и удобным [2]. Однако ЭМГ-сигналы характеризуются высокой вариабельностью, наличием шумов и зависимостью от условий регистрации, что усложняет их обработку и интерпретацию [3].

Современные исследования в области обработки биомедицинских сигналов направлены на разработку методов фильтрации, извлечения информативных признаков и классификации движений пользователя. На практике широко применяются признаки временной и частотной областей, а также методы машинного обучения, включая алгоритмы опорных векторов и нейронные сети [4].

Дополнительной сложностью является необходимость реализации алгоритмов обработки сигналов в условиях ограниченных вычислительных

ресурсов встроенных систем. Это требует разработки эффективных и вычислительно экономичных методов, способных обеспечивать работу в режиме реального времени [5].

Таким образом, актуальной задачей является создание системы управления бионическим протезом, обеспечивающей устойчивое распознавание ЭМГ-сигналов и формирование управляющих команд при минимальных вычислительных затратах. Целью данной работы является разработка алгоритма обработки и классификации ЭМГ-сигналов, адаптированного для реализации на микроконтроллерных платформах.

**Регистрация и предварительная обработка ЭМГ-сигналов.** Электромиографические сигналы представляют собой нестационарные случайные процессы, возникающие в результате электрической активности мышечных волокон (Рисунок 1). Основной спектр сигнала сосредоточен в диапазоне частот от 20 до 500 Гц, что определяет требования к системе регистрации и фильтрации [2].

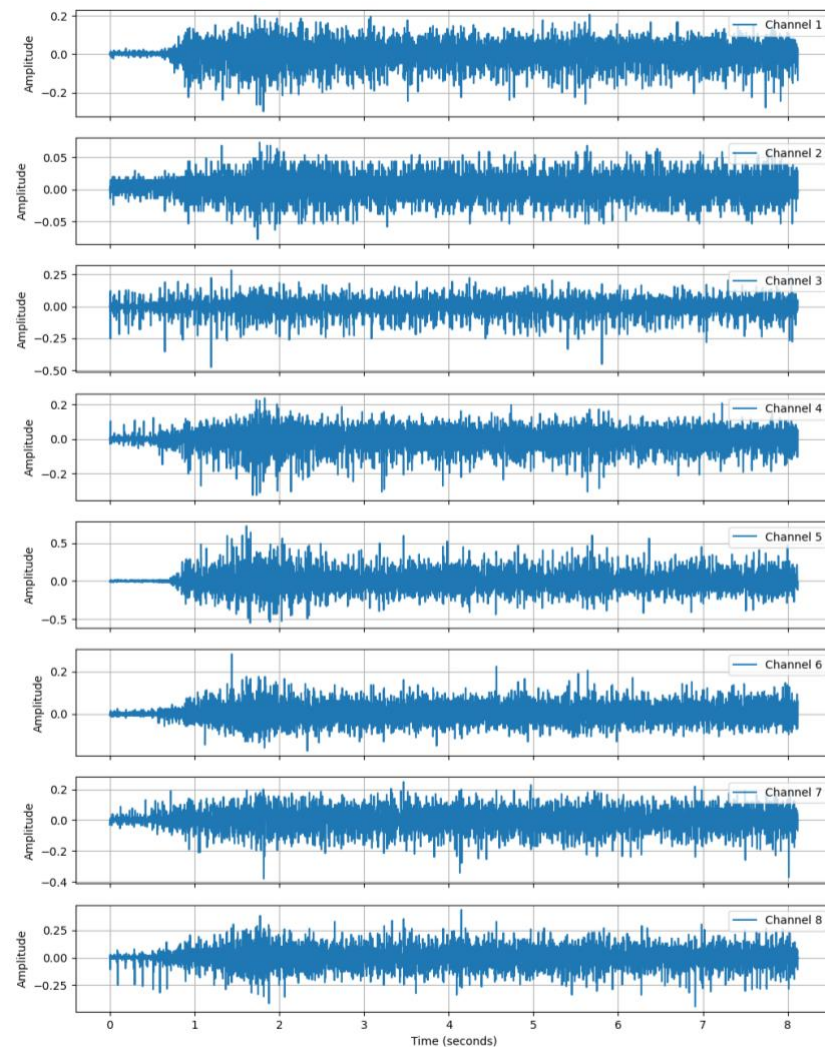


Рисунок 1 – пример данных ЭМГ-сигнала

Сигналы регистрируются с использованием поверхностных электродов, размещаемых на коже в области исследуемых мышц. Качество регистрации зависит от расположения электродов, состояния кожного покрова и уровня внешних электромагнитных помех.

Предварительная обработка сигналов включает удаление постоянной составляющей, нормализацию и фильтрацию. Для выделения информативного диапазона частот применяется полосовой фильтр, а для подавления сетевых помех — режекторный фильтр на частоте 50 Гц [3]. После фильтрации сигнал разбивается на временные окна фиксированной длины, что позволяет осуществлять дальнейший анализ в режиме реального времени.

**Извлечение информативных признаков.** Для уменьшения объёма данных и повышения эффективности классификации выполняется извлечение

признаков. В работе используются признаки временной области, обладающие низкой вычислительной сложностью и высокой информативностью [4].

Среднее абсолютное значение сигнала (MAV) определяется как:

$$MAV = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i|$$

Среднеквадратичное значение (RMS) рассчитывается по формуле:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

Длина волны сигнала (WL) характеризует суммарную изменчивость сигнала:

$$WL = \sum_{i=1} |x_{i+1} - x_i|$$

Дополнительно используются признаки, основанные на количестве пересечений нулевого уровня и изменении знака производной. Совокупность данных характеристик позволяет эффективно описывать амплитудные и динамические свойства сигнала.

**Классификация движений пользователя.** Задача классификации заключается в отнесении вектора признаков к одному из заранее определённых классов движений. В рамках работы используется метод опорных векторов (SVM), который широко применяется в задачах распознавания ЭМГ-сигналов благодаря высокой точности и устойчивости к шумам [4].

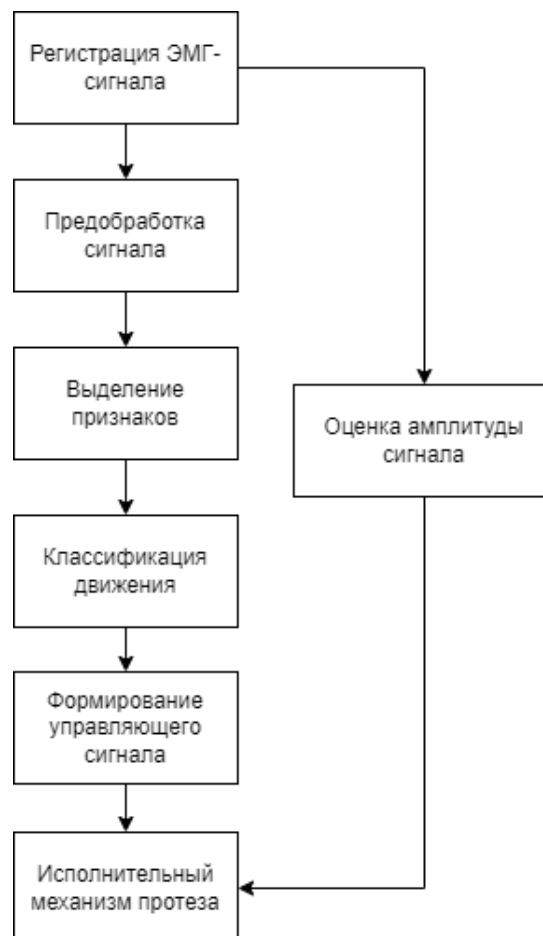
Обучение модели проводится на размеченных данных, полученных при выполнении пользователем базовых движений, таких как сжатие и разжатие кисти. После обучения модель используется для классификации входящих сигналов в режиме реального времени.

Использование SVM позволяет достичь высокой точности распознавания при сравнительно низких вычислительных затратах, что делает данный метод пригодным для реализации во встроенных системах.

**Реализация системы на микроконтроллере.** Разработанная система реализована на базе микроконтроллера ESP32, обладающего достаточной вычислительной мощностью и встроенными средствами связи. Архитектура системы включает модули регистрации сигналов, их обработки, классификации и управления исполнительными механизмами, схема представлена на рисунке 2.

Программная реализация построена с учётом требований работы в реальном времени. Обработка сигналов осуществляется по оконному принципу, что позволяет минимизировать задержки и обеспечить непрерывность управления.

Особое внимание уделено оптимизации алгоритмов, направленной на снижение вычислительной нагрузки. Использование признаков временной области и компактных моделей классификации позволяет эффективно реализовать систему без необходимости применения высокопроизводительных вычислительных платформ [5].



## Рисунок 2 – Структурная схема системы управления бионическим протезом на основе обработки ЭМГ-сигналов

**Заключение.** В работе предложен вариант системы управления бионическим протезом верхней конечности на основе обработки электромиографических сигналов. Проведён анализ методов регистрации и предварительной обработки нейромышечной активности, а также рассмотрены подходы к извлечению информативных признаков и классификации движений пользователя.

Предложен алгоритм, основанный на использовании признаков временной области и метода опорных векторов, адаптированный для реализации во встроенных системах с ограниченными вычислительными ресурсами. Показана возможность реализации системы на базе микроконтроллера ESP32 с обеспечением обработки сигналов и формирования управляющих команд в режиме реального времени.

Результаты экспериментальных исследований демонстрируют устойчивость работы системы и точность распознавания базовых движений на уровне до 90 %. Полученные результаты подтверждают перспективность применения электромиографических сигналов для задач нейрорегуляции бионическими протезами.

Дальнейшее развитие работы может быть связано с расширением набора распознаваемых движений, повышением точности классификации, а также применением адаптивных и нейросетевых методов обработки сигналов.

### Литература

1. Lebedev M. A., Nicolelis M. A. L. Brain-machine interfaces: past, present and future // *Trends in Neurosciences*. — 2006. — Vol. 29, № 9. — P. 536–546.
2. De Luca C. J. The use of surface electromyography in biomechanics // *Journal of Applied Biomechanics*. — 1997. — Vol. 13, № 2. — P. 135–163.
3. Phinyomark A., Phukpattaranont P., Limsakul C. Feature reduction and selection for EMG signal classification // *Expert Systems with Applications*. — 2012. — Vol. 39, № 8. — P. 7420–7431.

4. Oskoei M. A., Hu H. Myoelectric control systems — A survey // *Biomedical Signal Processing and Control*. — 2007. — Vol. 2, № 4. — P. 275–294.
5. Джиган В. И. Адаптивная обработка сигналов: основы // Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн. — 2021. — С. 5–25.
6. Федотов А. А. Прикладной анализ биомедицинских сигналов: методические указания. — Самара: Самарский университет, 2018. — 132 с.
7. Попов Е. В. Системы управления роботами: современные подходы. — СПб.: Питер, 2019. — 256 с.
8. Цикора А. В. Электронные устройства управления сервомоторами. — М.: Энергия, 2018. — 192 с.
9. Фильтр Чебышёва [Электронный ресурс] // EDU-ikit. — URL: [https://edu.ikit.sfu-kras.ru/CP\\_Electronics/pages/mm/7\\_1/index.html](https://edu.ikit.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/mm/7_1/index.html) (дата обращения: 20.10.2025).