

# ОПТИМАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

**Дилшод Эльмурадович Эшмурадов,**

доцент Ташкентского государственного технического университета

**Малохат Талатовна Магруппова,**

доцент Ташкентского государственного технического университета

**Дурдона Хайруллаевна Нетьматова,**

магистрант Ташкентского университета информационных технологий

**Аннотация.** В статье даны основные понятия в цифровой обработке биоэлектрических сигналов, рассмотрены современные подходы в общемировой практике, проведен сравнительный анализ научного опыта: выявлены главные достоинства и недостатки методов и средств цифровой обработки биоэлектрических сигналов, определены перспективы развития данного направления.

**Ключевые слова:** *цифровая обработка сигналов, биоэлектрические сигналы, методы обработки сигналов, средства цифровой обработки.*

## OPTIMAL METHODS FOR DIGITAL PROCESSING OF BIOELECTRICAL SIGNALS

**Annotation.** The article gives the basic concepts in the digital processing of bioelectric signals, considers modern approaches in global practice, conducts a comparative analysis of scientific experience: the main advantages and disadvantages of methods and means of digital processing of bioelectric signals are identified, and the prospects for the development of this direction are determined.

**Key words:** *digital signal processing, bioelectrical signals, signal processing methods, digital processing tools.*

### ВВЕДЕНИЕ

Цифровая обработка биоэлектрических сигналов является стремительно развивающимся направлением в науке и технике. Она находит свое применение в диагностике заболеваний, в улучшении качества жизни людей с ограниченными возможностями, в спорте великих достижений. Данное направление тесно связано со здоровьем человека, поэтому предельно важны два аспекта, это безопасность человека в момент считывания биоэлектрических сигналов и точность передачи данных. Сложность регистрации биоэлектрических сигналов заключается в том, что такие сигналы являются слабыми, в то же самое время присутствует значительный уровень помех - шумов внутри организма человека, и артефактов – шумов от измерительных приборов, частотный диапазон которых мешает считывать биоэлектрические сигналы, иногда перекрывая их. [1; 219]

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Биоэлектрические сигналы – это сигналы, которые возникают в результате электрических явлений на мембране клеток; исследования биоэлектрических сигналов по сравнению с другими видами сигналов можно назвать самыми распространенными в

области медицины. [2] За биоэлектрический сигнал принято считать электрический сигнал группы клеток, а не одной конкретной клетки, т.к. для отдельной клетки измерение сигнала практически невозможно; биоэлектрический сигнал может возникать как под действием механических движений в самих клетках, так и от внешнего воздействия электрического тока. [3; 57] Источники биоэлектрической активности располагаются в сердце, головном и спинном мозге, в скелетных мышцах, в желудке, в глазах и т.д. В зависимости от расположения источника биоэлектрической активности показатели частоты и амплитуды будут отличаться, например, во время проведения электрокардиограммы диапазон измеряемых частот равен от 0,05 до 250 Гц, при электромиографии – от 0,01 до 10 000 Гц. Это говорит о том, что методы цифровой обработки для различных участков тела человека не будут одинаковыми, и, даже если речь идет о применении одного и того же метода, например, вейвлет-преобразования для изучения биоэлектрических сигналов головного мозга и желудка, это значит, что для каждого органа вейвлет-преобразование будет интерпретировано исходя из целей и задач, которые необходимо достигнуть для исследования именно на этом участке тела.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Современная наука насчитывает очень большое количество исследований в области цифровой обработки биоэлектрических сигналов, так что не представляется возможным переработать и осмыслить весь массив данных, поэтому в статье предметом обсуждения будут только те методы и средства, которые являются наиболее распространенными и употребляемыми в общемировой практике на сегодня, представленные в таблице 1, таблице 2, таблице 3.

**Таблица 1. Современные методы и средства цифровой обработки при исследованиях биоэлектрических сигналов сердца.**

№	Методы исследования	Методы цифровой обработки	Средства цифровой обработки
1.	Электрокардиография (ЭКГ) – используется для регистрации электрической активности сердечной мышцы.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- цифровая фильтрация (классическая);</li> <li>- вейвлет-преобразование;</li> <li>- адаптивное шумоподавление;</li> <li>- эмпирическая модовая декомпозиция (ЭМД);</li> <li>- методы на основе нейронных сетей;</li> <li>- кластеризация;</li> <li>- гибридные методы.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- фильтр верхних и нижних частот, полосовой и режекторный фильтр;</li> <li>- беспроводное мобильное приложение;</li> <li>- фильтр и адаптивный алгоритм;</li> <li>- алгоритм ЭМД: прямое и косвенное вычитание;</li> <li>- глубокая нейронная сеть;</li> <li>- алгоритм кластеризации;</li> <li>- искусственный интеллект.</li> </ul>
2.	Векторкардиография (ВКГ) – при осуществлении работы сердца дает пространственное	<ul style="list-style-type: none"> <li>- цифровая фильтрация (классическая);</li> <li>- вейвлет-преобразование;</li> <li>- фильтр скользящего среднего;</li> <li>- фильтр Калмана;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- фильтр Чебышева, фильтр Баттерворта;</li> <li>- вейвлет-фильтр;</li> <li>- фильтр скользящего среднего;</li> <li>- фильтр Калмана;</li> </ul>

представление о напряжении в его клетках.	- фильтр Савицкого-Голая; - регрессия основного компонента.	- фильтр Савицкого-Голая; - комплекс QRS.
---	--	--

Метод цифровой фильтрации имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами: он достаточно эффективный, у него низкие требования к техническим характеристикам, он может работать в режиме реального времени, его стоимость является доступной, однако, ему свойственна низкая производительность и его можно применять только в том случае, если помехи и биоэлектрические сигналы находятся в разных диапазонах частот, в обратной ситуации, считывание сигнала будет невозможным. Методы на основе нейронных сетей также имеют много достоинств: хорошую эффективность, они могут работать в режиме реального времени, у них высокое качество передачи сигналов, без помех, но эти методы пока не доступны для использования широкой аудиторией. Оптимальным методом ЭКГ можно назвать метод адаптивного шумоподавления, который имеет хорошую эффективность, работает в режиме реального времени, имеет хорошее качество обработки сигнала, доступен для реализации, но имеет высокие технические характеристики и требует определенных временных затрат для проведения исследования, связанных с настройкой оборудования. Для ВКГ наиболее соответствующий метод на сегодняшний день — это метод с применением фильтра Савицкого-Голая. [2]

**Таблица 2. Современные методы и средства цифровой обработки при исследованиях биоэлектрических сигналов головного мозга.**

№	Методы исследования	Методы цифровой обработки	Средства цифровой обработки
1.	Электроэнцефалография (ЭЭГ) – используется для регистрации электрической активности головного мозга.	- методы фильтрации; - вейвлет-преобразование; - анализ независимых компонентов (АНК); - эмпирическая модовая декомпозиция (ЭМД); - частотно-временное уменьшение размерности изображения; - нейронные сети; - адаптивная нейронно-нечеткая система логического вывода (АНСЛВ); - гибридные методы.	- фильтры нецелого порядка (дробные); - вейвлет-преобразование: непрерывное, дискретное, стационарное, синхронное с шагом; - алгоритм АНК; - алгоритм ЭМД; - частотно-временное уменьшение размерности изображения; - радиальная базисная функция и нейронная сеть функциональной связи; - адаптивная фильтрация с использованием АНСЛВ; - вейвлет-преобразование и анализ независимых компонентов.
2.	Вызванные потенциалы (ВП) – исследование реакции мозга на внешние раздражители (слуховые,	- вейвлет-преобразование; - анализ главных компонентов (АГК);	- вейвлет-фильтр; - алгоритм АГК; - алгоритм АНК;

	зрительные, соматосенсорные).	- анализ независимых компонентов (АНК); - гибридные методы;	- вейвлет-преобразование, АНК;
3.	Электрокортикография (ЭКоГ) – метод, используемый для обследования пациентов с эпилепсией, болезнью Паркинсона, отличающийся тем, что электроды накладываются непосредственно на кору головного мозга.	- эмпирическое вейвлет-преобразование (ЭВП); - эмпирическая модовая декомпозиция (ЭМД); - динамическая модовая декомпозиция (ДМД); - частотно-временное уменьшение размерности изображения.	- преобразование Фурье, метод масштабно-пространственного обнаружения, ЭВП; - преобразование Гильберта-Хуанга, ЭМД; - ДМД; - частотно-временное уменьшение размерности изображения.

Оптимальными методами цифровой обработки при ЭЭГ и ВП можно считать метод вейвлет-преобразования, анализ независимых компонентов; для ЭКоГ – метод эмпирической модовой декомпозиции, т.к. все эти методы имеют хорошее шумоподавление, хорошую эффективность, работают в режиме реального времени, хорошее качество обработки сигнала, недостатком этих методов являются высокие технические требования и как следствие удорожание проведения исследований. [4]

**Таблица 3. Современные методы и средства цифровой обработки при исследованиях биоэлектрических сигналов скелетных мышц, нейронов в центральной нервной системе, желудка, глаз.**

№	Методы исследования	Методы цифровой обработки	Средства цифровой обработки
1.	Электромиография (ЭМГ) – используется для регистрации электрической активности скелетных мышц.	- цифровая фильтрация (классическая); - адаптивное шумоподавление; - вейвлет-преобразование; - анализ независимых компонентов (АНК); - эмпирическая модовая декомпозиция (ЭМД); - гибридные методы.	- диапазонный полосовой фильтр; - адаптивный фильтр, алгоритм на основе метода наименьших квадратов; - вейвлет-фильтр; - многократное вычисление алгоритма АНК; - алгоритм ЭМД, медианный фильтр; - вейвлет преобразование, АНК.
2.	Электронейрография (ЭНГ) – используется для регистрации электрической активности нейронов в центральной нервной системе.	- цифровая фильтрация (классическая); - адаптивное шумоподавление; - вейвлет-преобразование; - анализ независимых компонентов (АНК);	- цифровой фильтр; - адаптивный фильтр; - вейвлет-фильтр, фильтр Вайнера; - алгоритм АНК; - алгоритм (ЭМД).

		- эмпирическая модовая декомпозиция (ЭМД).	
3.	Электрогастрография (ЭЭГ) - используется для регистрации электрической активности желудка.	- цифровая фильтрация (классическая); - адаптивное шумоподавление; - вейвлет-преобразование; - анализ независимых компонентов (АНК); - эмпирическая модовая декомпозиция (ЭМД); - гибридные методы.	- цифровой фильтр; - адаптивный фильтр; - вейвлет-фильтр; - алгоритм АНК; - алгоритм ЭМД, портативный регистратор; - алгоритм ЭМД, адаптивный фильтр; - полосовой фильтр, алгоритм АНК, адаптивный фильтр.
4.	Электроокулография (ЭОГ) - используется для регистрации электрической активности глазных мышц.	- метод опорных векторов; - сглаживающий фильтр Савицкого-Голея; - метод на основе распределенной арифметики.	- алгоритм на основе метода опорных векторов; - сглаживающий фильтр Савицкого-Голея; - алгоритм на основе распределенной арифметики.
5.	Электроретинография (ЭРГ) - используется для регистрации электрической активности сетчатки глаза.	- цифровая фильтрация (классическая); - адаптивное шумоподавление; - вейвлет-преобразование; - эмпирическая модовая декомпозиция.	- цифровой фильтр; - адаптивный фильтр; - дискретный вейвлет-фильтр; - алгоритм ЭМД, мультифокальная электроретинография.

Наиболее соответствующим методом цифровой обработки для проведения ЭМГ, ЭНГ, ЭРГ является адаптивное шумоподавление, данный метод имеет высокое качество обработки сигнала, хорошую производительность, работает в режиме реального времени, но предполагает высокие технические требования и является дорогостоящим. Для ЭЭГ – это методы вейвлет-преобразование и адаптивное шумоподавления, методы имеют хорошее качество обработки сигнала, хорошую производительность, работают в режиме реального времени, но также предполагают высокие технические требования и являются дорогостоящими. Для ЭОГ оптимальным методом будет сглаживающий фильтр Савицкого-Голея, метод имеет высокое качество обработки сигнала, высокую производительность, работает в режиме реального времени, также необходимы высокие технические требования, вследствие чего он является дорогостоящим [5].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря методам цифровой обработки биоэлектрических сигналов уже сейчас можно получить данные хорошего качества при проведении исследования организма человека и выполнять точную диагностику заболеваний, выявлять заболевания на ранних стадиях для сердечно-сосудистой системы, головного мозга, желудка и т.д. Проблема такой диагностики заключается в трудностях реализации методов на практике, это значит, что

диагностика остается не доступной для массового исследования, ввиду того, что методы дающие точные результаты представляются дорогостоящими, требуют сложных манипуляций при их проведении.

Научное сообщество в свою очередь возлагает большие надежды на развитие методов цифровой обработки биоэлектрических сигналов. В настоящее время уже были предприняты попытки с их помощью осуществить контроль протезов посредством сигналов головного мозга у людей с ограниченными возможностями; печатать текст на компьютере с использованием движений глаз человека; в планах у исследователей реализация передачи информации от мозга человека компьютеру при помощи больших данных. Таким образом открытия в области цифровой обработки могут глобально повлиять на привычный образ жизни людей.

## REFERENCES

1. Филист С. А. Изготовление биотехнических и медицинских аппаратов и систем / С. А. Филист, О. В. Шаталова – Москва: Юрайт, 2023. – 309 с.
2. Martinek R. Advanced Bioelectrical Signal Processing Methods: Past, Present and Future Approach—Part I: Cardiac Signals / R. Martinek, M. Ladrova, M. Sidikova, R. Jaros, K. Behbehani, R. Kahankova, A. Kawala-Sterniuk // Multidisciplinary Digital Publishing Institute [сайт], 2021. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/15/5186> (дата обращения: 13.12.2022).
3. Бакалов В. П. Медицинская электроника. Основы биотелеметрии / В. П. Бакалов – Москва: Юрайт, 2023. – 326 с.
4. Martinek R. Advanced Bioelectrical Signal Processing Methods: Past, Present and Future Approach—Part II: Brain Signals: Cardiac Signals / R. Martinek, M. Ladrova, M. Sidikova, R. Jaros, K. Behbehani, R. Kahankova, A. Kawala-Sterniuk // Multidisciplinary Digital Publishing Institute [сайт], 2021. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/19/6343#B120-sensors-21-06343> (дата обращения: 14.12.2022).
5. Martinek R. Advanced Bioelectrical Signal Processing Methods: Past, Present, and Future Approach—Part III: Other Biosignals / R. Martinek, M. Ladrova, M. Sidikova, R. Jaros, K. Behbehani, R. Kahankova, A. Kawala-Sterniuk // Multidisciplinary Digital Publishing Institute [сайт], 2021. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/18/6064> (дата обращения: 14.12.2022).
6. Биомедицинские сигналы и изображения в цифровом здравоохранении: хранение, обработка и анализ : учебное пособие / В.С. Кубланов, А.Ю. Долганов, В.Б. Костоусов [и др.] ; [под общ. ред. В. С. Кубланова] ; Мин-во науки и высш. образования РФ. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020.— 240 с.
7. Эшмурадов Д.Э. Конспект лекций по предмету «Компьютерные технологии в здравоохранении». Ташкентский университет информационных Технологий имени мухаммада ал-Хоразмий. 2022.
8. Эшмурадов Д. Э., Элмурадов Т. Д. Математическое моделирование авиационной среды //Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2020. – Т. 23. – №. 5. – С. 67-75.