

УДК 004.421: 004.9

Д-р техн. наук, доцент Бранцевич П.Ю.
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники) (БГУИР), Минск)

D. Sc., Associate professor Brancevich P.J.
(The Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR), Minsk)

Определение информативно-значимых параметров электроэнцефалограмм при цифровой обработке методом разложения на модулированные гармоники

Determination of informatively significant parameters of electroencephalograms during digital processing by the method of decomposition into modulated harmonics

Цифровая обработка электроэнцефалограмм (ЭЭГ), отражающих в определённом смысле состояние нейронной сети головного мозга человека, является современным методом определения их информативно-значимых параметров и характеристик. Рассмотрен способ представления ЭЭГ в виде суммы составляющих, выделенных в узких частотных полосах, которые по сути являются фрагментами модулированных гармоник. Приведены примеры сравнительного анализа ЭЭГ для оценки влияния электросудорожной терапии на состояние нейронной сети головного мозга человека.

Digital processing of electroencephalograms (EEG), which reflect in a certain sense the state of the neural network of the human brain, is a modern method for determining their informatively significant parameters and characteristics. The method of representing EEG as a sum of components isolated in narrow frequency bands, which are essentially fragments of modulated harmonics, is considered. Examples of comparative analysis of EEG are given to assess the effect of electroconvulsive therapy on the state of the neural network of the human brain.

Введение

Основным органом, управляющим поведением человека, является самообучающаяся нейронная сеть его головного мозга, в которой нейроны взаимодействуют посредством электрических токов и химических реакций. В таком аспекте человека можно представить, как органическую автоматическую систему принятия решений, в которую поступает информация о состоянии органов человека и об окружающей среде, а также имеются некоторые исполнительные органы, отражающие или выполняющие принимаемые решения.

Работа головного мозга, вследствие протекающих в нем электрических токов, идентифицируется изменением электромагнитного поля на поверхности головы, которое можно зафиксировать специальными первичными преобразователями и представить в виде изменяющихся параметров тока или напряжения, что и происходит, когда снимают электроэнцефалограмму (ЭЭГ) [1,2]. ЭЭГ – это результат процедуры по определению параметров электрической активности головного мозга. ЭЭГ можно использовать для выявления симптомов нарушения работы

головного мозга, оценки характера отклонений и степень их распространённости [3,4].

Цифровая обработка сигналов электроэнцефалограмм

Электроэнцефалограмма отражает колебания напряжения вследствие изменения ионного тока в нейронах головного мозга и является электрическим сигналом, как результатом спонтанной электрической активности мозга в течение определенного периода времени, полученным с нескольких электродов на поверхности головы. Стандартной системой размещения электродов на поверхности головы, рекомендованной Международной федерацией электроэнцефалографии и клинической нейрофизиологии, является система «10–20%» [5].

Электроэнцефалограмма представляется в виде цифровых сигналов (рис. 1), которые можно обрабатывать и исследовать с помощью методов цифровой обработки сигналов (ЦОС) [6-8].

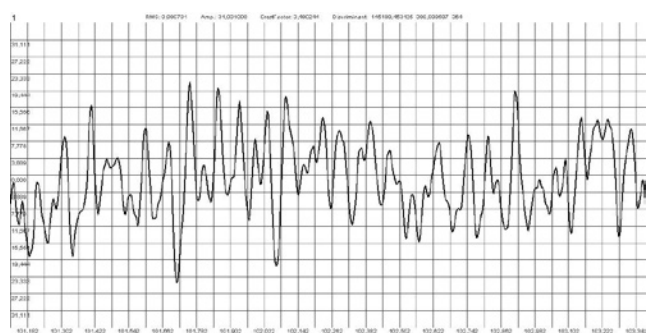


Рис. 1. Пример сигнала электроэнцефалограммы

Сигналы ЭЭГ представляют собой колебательный нестационарный процесс. Целью исследования ЭЭГ является определение параметров, которые можно считать информативно значимыми признаками. Анализируя их изменение можно делать выводы о нарушении работы нейронной сети головного мозга человека, либо об эффективности применяемых методик лечения.

В настоящее время для оценки сигналов ЭЭГ чаще всего анализируется мощность сигнала в частотных полосах, называемых: альфа (8-13 Гц); бета (13-35 Гц); гамма (35-70 Гц); дельта (0,3-4 Гц); тэта (4-8 Гц) [7] (рис. 2) [1-4].

Спектральный анализ показывает, что при изменении частотного разрешения изменяются параметры гармонических составляющих, представляющих сигнал ЭЭГ на разных временных интервалах, при этом заметно сохранение интенсивности сигнала в определённых частотных полосах (рис. 3-4) [9-12].



Рис. 2. Полосовой спектр электроэнцефалограммы

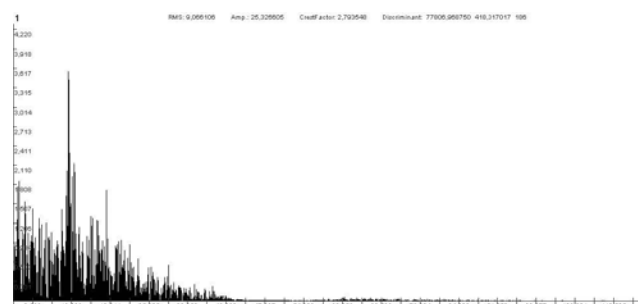


Рис. 3. Амплитудный спектр сигнала ЭЭГ, отведение О1-АА, частотное разрешение 0.122 Гц

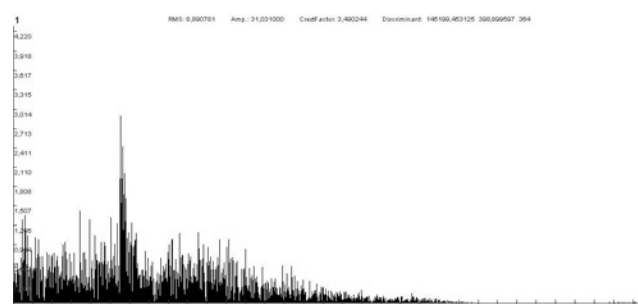


Рис. 4. Амплитудный спектр сигнала ЭЭГ, отведение О1-АА, частотное разрешение 0.061035 Гц

Для обработки сигналов ЭЭГ применяют разные методы, например, цифровую фильтрацию, вейвлет-анализ, преобразование Гильберта-Хуанга [8]. Также представляют интерес результаты, получаемые при определении огибающих сигнала ЭЭГ, выделяемого для частотных полос, и их амплитудные спектры [10-12].

Сравнительный анализ электроэнцефалограмм

Одним из методов психиатрического и неврологического лечения является электросудорожная терапия (ЭСТ). При ее проведении эпилептиформный судорожный припадок вызывается пропуском электрического тока через головной мозг пациента с целью достижения

лечебного эффекта [13]. ЭСТ можно использовать, только если другие мероприятия, например, лекарства и психотерапия, не дали результата [14]. Нейронная сеть головного мозга человека подвергается сильному воздействию, однако пока не определены объективные информативно-значимые признаки на основе анализа ЭЭГ, которые показывали бы или подтверждали эффективность проведенных процедур ЭСТ.

В данной работе рассмотрены способы сравнительного анализа ЭЭГ, полученных до и после проведения сеансов ЭСТ.

Рассмотрим сигналы ЭЭГ (отведение О1-АА), полученные при обследовании пациента до и после ЭСТ (рис. 5) и результаты их спектрального анализа (рис. 6).

Сравнивая амплитудные спектры сигналов ЭЭГ до и после процедуры ЭСТ, можно выявить их отличия. Но

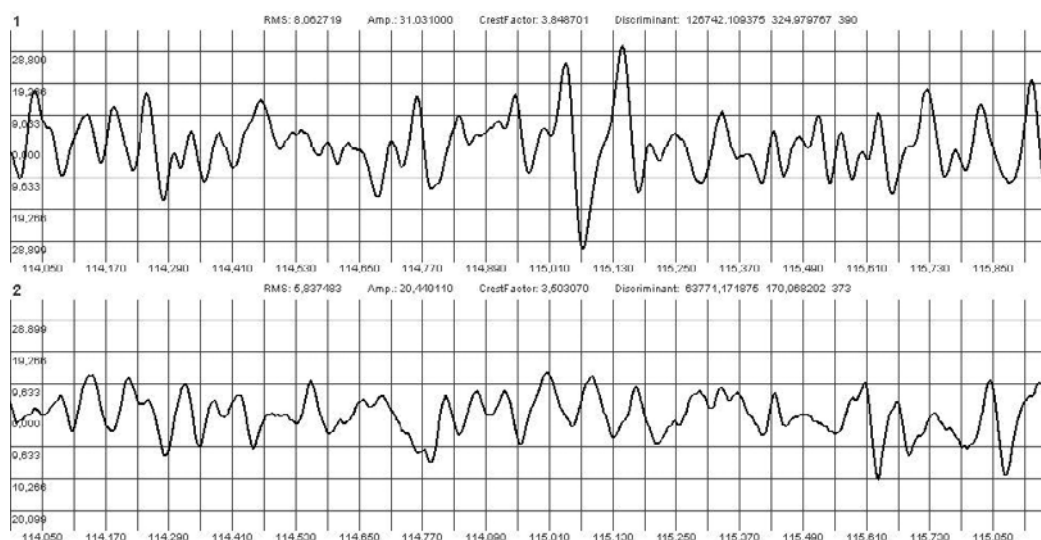


Рис. 5. Отрезки сигналов ЭЭГ, отведение О1-АА, до процедуры ЭСТ (верхний сигнал) и после (нижний сигнал). Ось абсцисс – время, с; ось ординат – напряжение, мВ

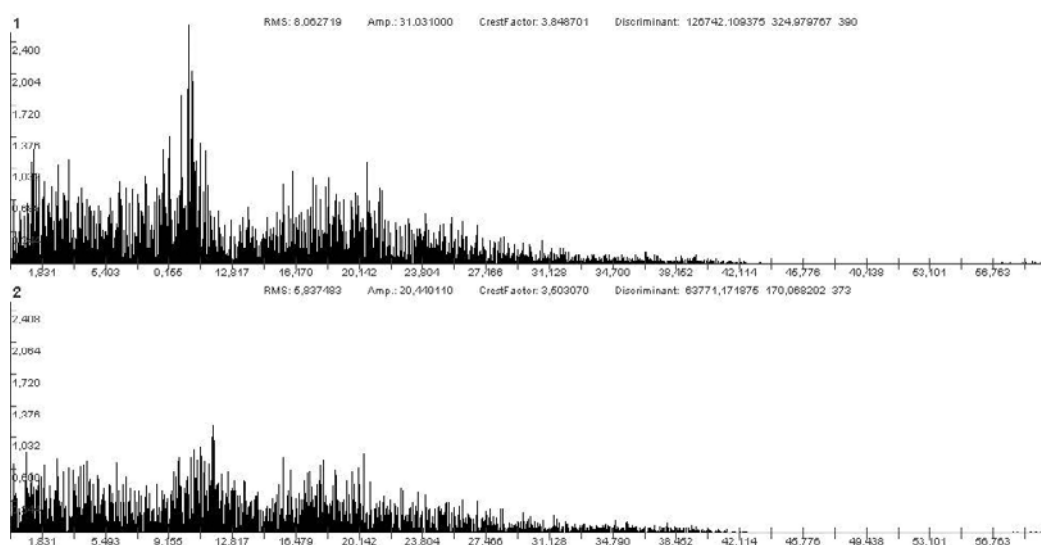


Рис. 6. Амплитудные спектры сигналов ЭЭГ, отведение О1-АА, до процедуры ЭСТ (верхний сигнал) и после (нижний сигнал), частотное разрешение 0.061035 Гц

изменение структуры спектра при изменении частотного разрешения спектрального анализа говорит о случайном характере сигналов ЭЭГ, что затрудняет формулировку выводов о подобии сравниваемых сигналов.

Полосовой спектральный анализ [13] для частотных диапазонов альфа, бета, гамма, дельта, тэта позволяет получить более усредненную картину. На рис. 7-8 представлены полосовые спектры сигналов ЭЭГ, полученные до и после процедур ЭСТ на временном интервале 8,192с.

В большинстве случаев наблюдается существенное изменение полосовых спектров, после проведения процедуры ЭСТ, однако имеют место и случаи, когда полосовые спектры сохраняют близкие к исходному соотношения интенсивностей колебаний в частотных полосах [14].

Важную информации можно получить, анализируя временные тренды параметров среднеекватрического значения (СКЗ) сигнала ЭЭГ и СКЗ в частотных полосах ЭЭГ, варьируя шаг по времени и протяжённость

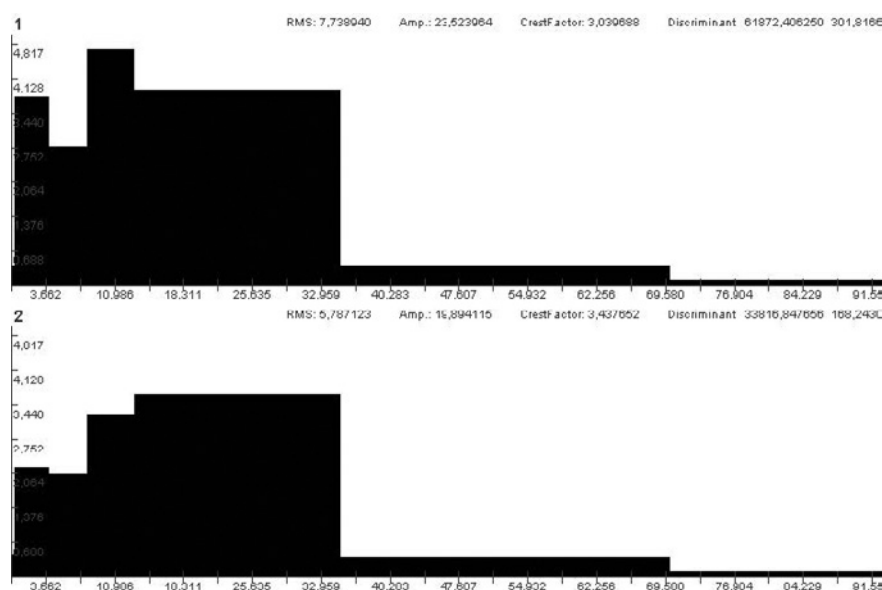


Рис. 7. Полосовые спектры сигналов ЭЭГ, полученные до и после процедур ЭСТ на временном интервале 8,192 с. Эксперимент 1

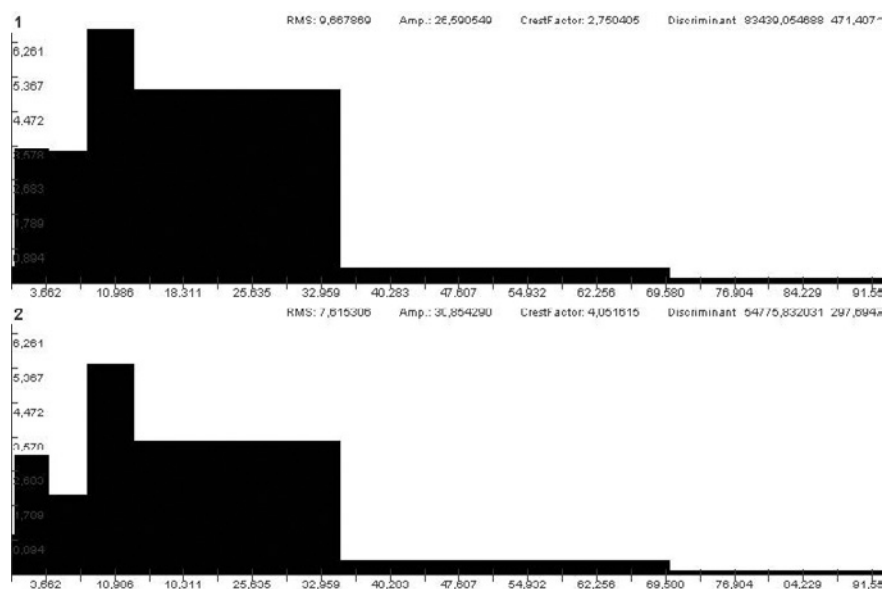


Рис. 8. Полосовые спектры сигналов ЭЭГ, полученные до и после процедур ЭСТ на временном интервале 8,192 с. Эксперимент 2

интервала наблюдения. На рис. 9-10 показаны временные тренды параметров для сигнала ЭЭГ до и после процедуры ЭСТ.

Можно заметить колебательный во времени характер изменения среднего квадратического значения (СКЗ)

сигнала ЭЭГ и СКЗ в отдельных частотных полосах. При интервале анализа в 65 секунд амплитуда колебаний СКЗ уменьшается, а изменение тренда приобретает плавный характер. Такие данные уже можно использовать для визуального сравнительного анализа [13].

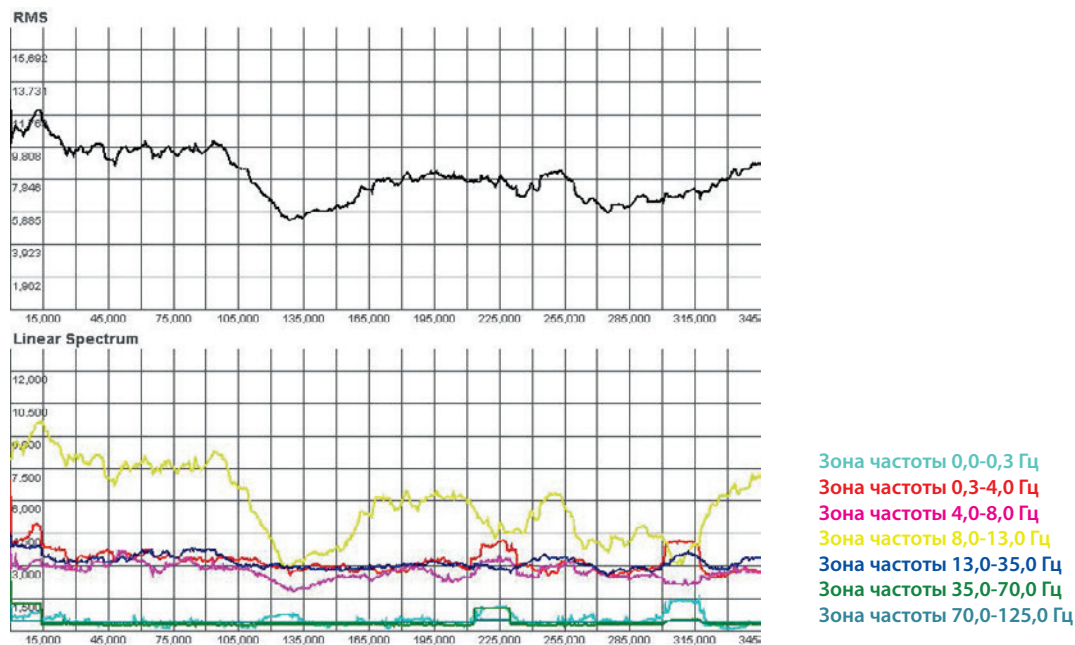


Рис. 9. Временные тренды СКЗ сигнала ЭЭГ и СКЗ в частотных полосах до процедуры ЭСТ. Шаг по времени 0,5 с, интервал анализа 8,192 с

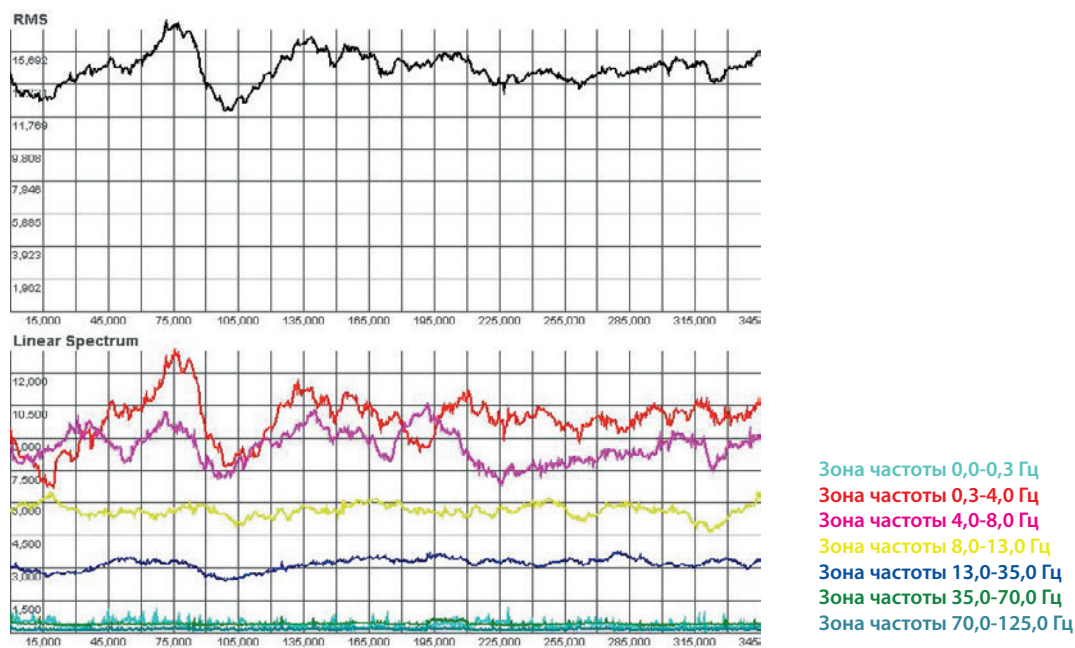


Рис. 10. Временные тренды СКЗ сигнала ЭЭГ и СКЗ в частотных полосах после процедуры ЭСТ. Шаг по времени 0,5 с, интервал анализа 8,192 с

Для более детального исследования ЭЭГ, выделения их информативно-значимых признаков, предлагается представление ЭЭГ в виде декомпозиции частотных составляющих с узкими частотными полосами. На рис. 11-23 в качестве примера показаны исходная ЭЭГ и ее частотные составляющие для отведения О1-АА, частота дискретизации 250 Гц.

Из рис. 14-21 видно, что в узких частотных полосах составляющие ЭЭГ представляют собой фрагменты модулированных гармоник. Также можно предположить, что параметры этих составляющих ЭЭГ являются информативно-значимыми параметрами при сравнении ЭЭГ или оценке их изменений.

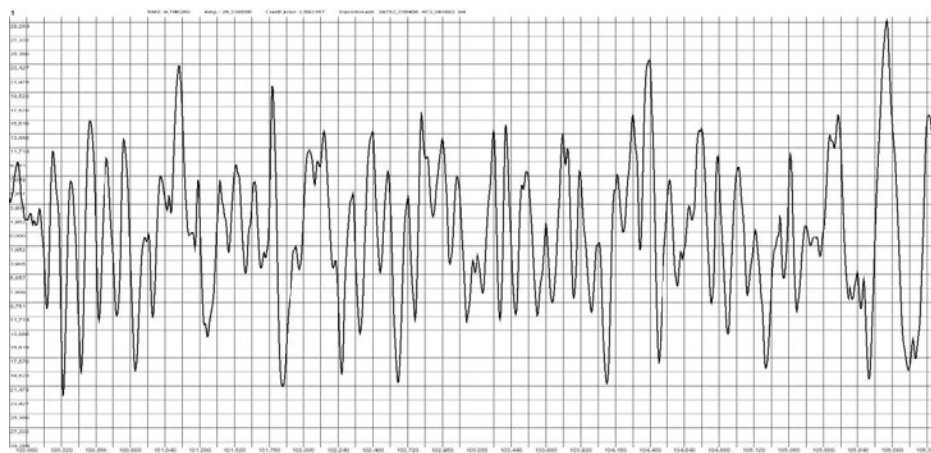


Рис. 11. Сигнал ЭЭГ отведения О1-АА



Рис. 12. Амплитудный спектр сигнал ЭЭГ отведения О1-АА, частотное разрешение 0,12207 Гц



Рис. 13. Амплитудный спектр сигнал ЭЭГ отведения О1-АА, частотное разрешение 0,061035 Гц

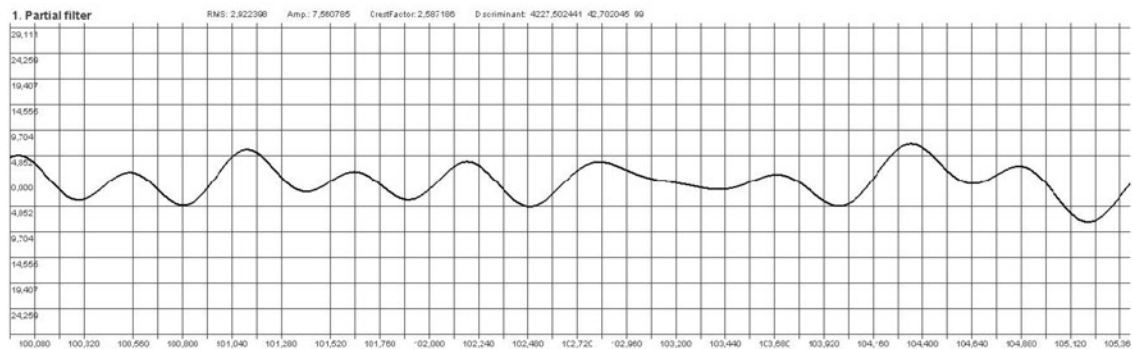


Рис. 14. Составляющая сигнала ЭЭГ в частотной полосе 0,1-2 Гц

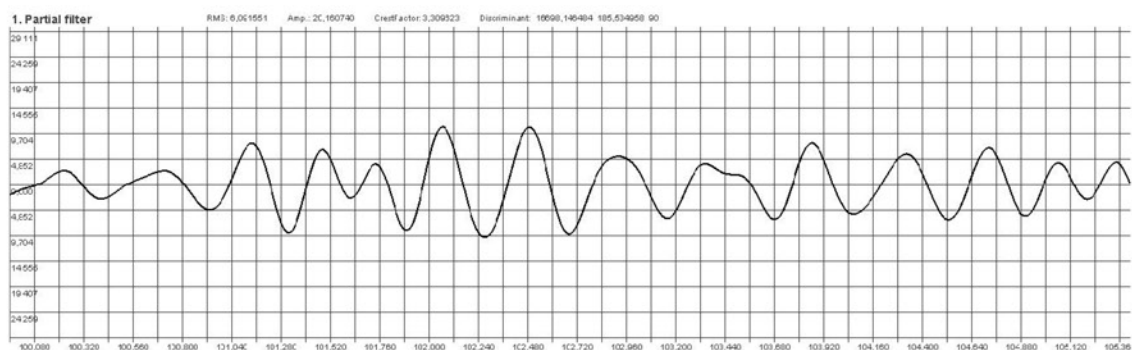


Рис. 15. Составляющая сигнала ЭЭГ в частотной полосе 2-4 Гц

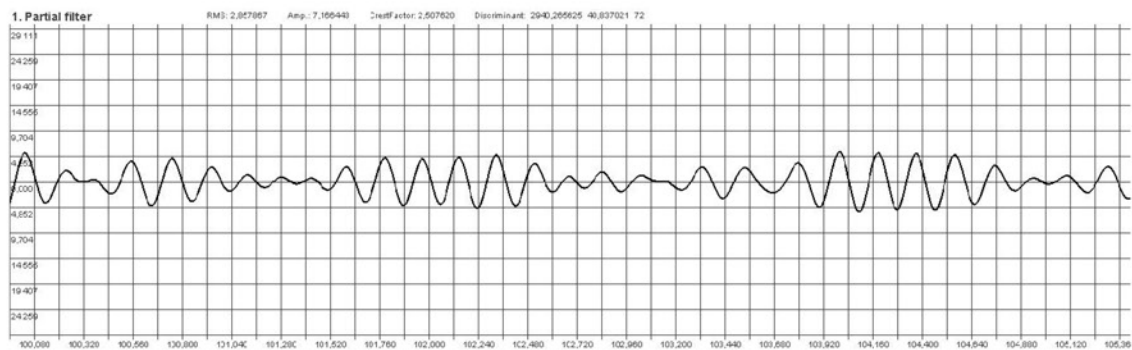


Рис. 16. Составляющая сигнала ЭЭГ в частотной полосе 4-6 Гц

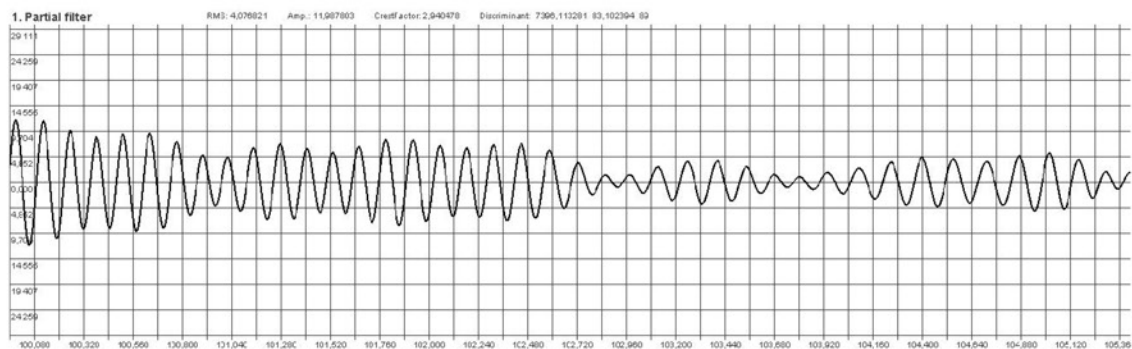


Рис. 17. Составляющая сигнала ЭЭГ в частотной полосе 6-8 Гц

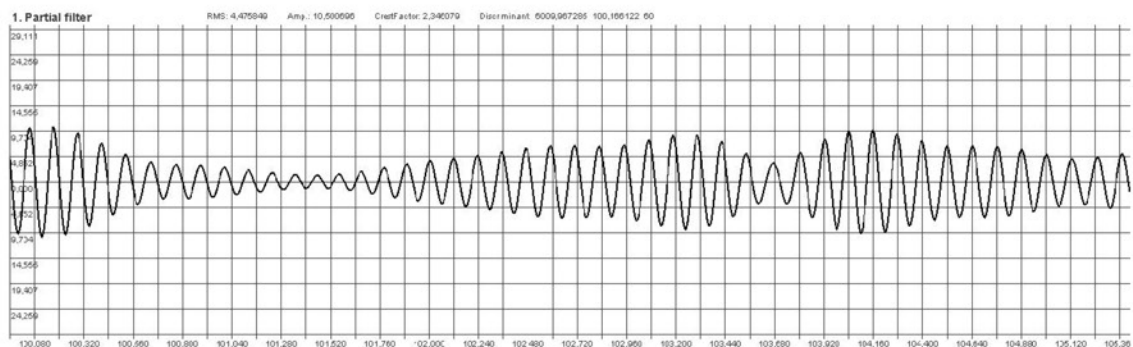


Рис. 18. Составляющая сигнала ЭЭГ в частотной полосе 8-10 Гц

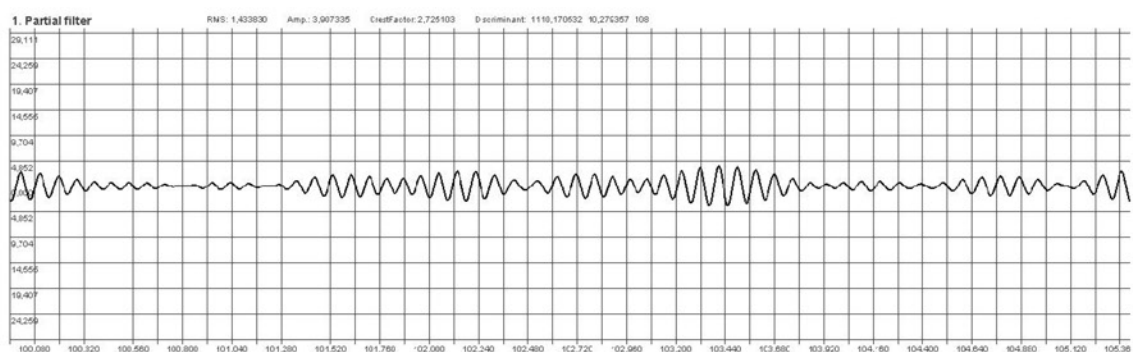


Рис. 19. Составляющая сигнала ЭЭГ в частотной полосе 10-12 Гц

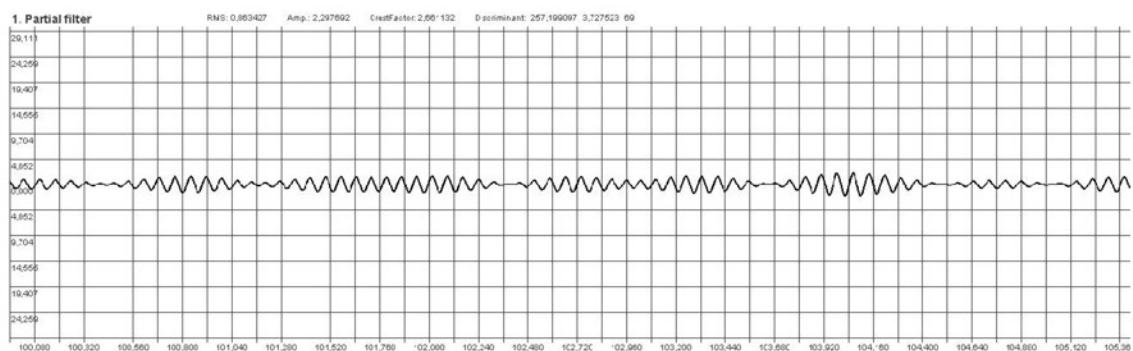


Рис. 20. Составляющая сигнала ЭЭГ в частотной полосе 12-14 Гц

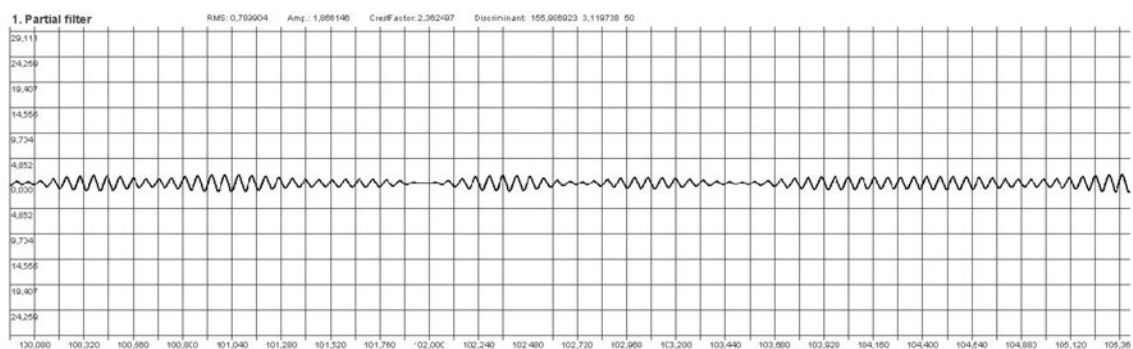


Рис. 21. Составляющая сигнала ЭЭГ в частотной полосе 14-16 Гц

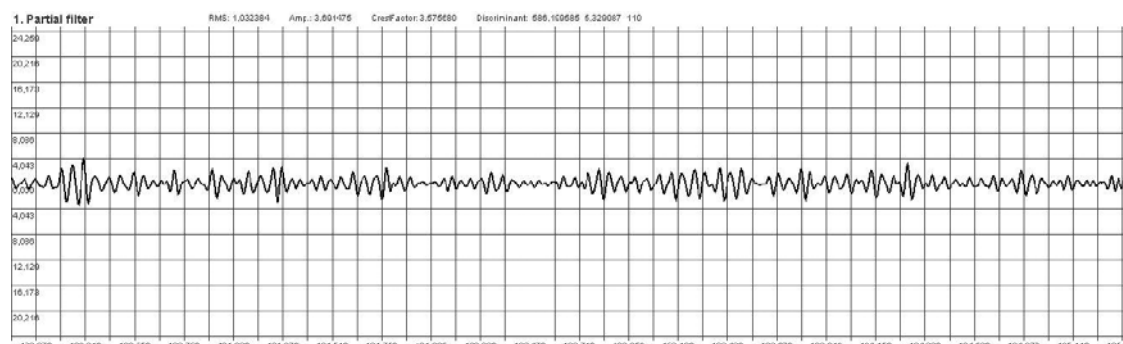


Рис. 22. Составляющая сигнала ЭЭГ в частотной полосе 16-35 Гц

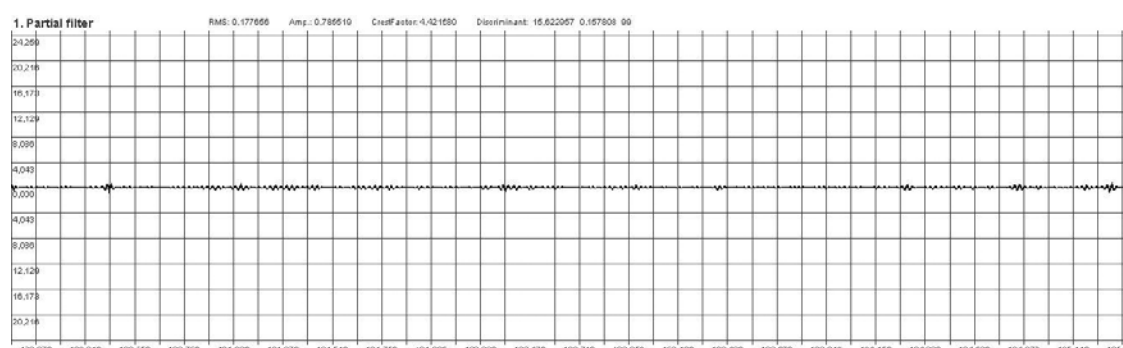


Рис. 23. Составляющая сигнала ЭЭГ в частотной полосе 35-70 Гц

Предложенный подход разложения на компоненты сигнала ЭЭГ использован при сравнительном анализе ЭЭГ, полученных до и после процедуры ЭСТ. В таблицах 1-3 представлены вычисленные параметры исследованных ЭЭГ.

Данные, представленные в таблицах 1 и 2 получены для случаев, когда процедуры ЭСТ дали положительный результат, а в таблице 3, когда положительный лечебный эффект не был достигнут.

Можно заметить, что при положительном результате от процедуры ЭСТ наблюдаются существенные изменения относительных величин СКЗ частотных составляющих, а при отрицательном результате эти изменения незначительны. Однако зафиксированные изменения относительных величин частотных составляющих ЭЭГ не имеют однозначного характера, поэтому требуется проведение большего числа экспериментов для получения обоснованных заключений.

Табл. 1. Параметры составляющих ЭЭГ до и после процедуры ЭСТ. Эксперимент 1

Частотный диапазон, Гц	СКЗ, относительные единицы		Пик фактор	
	До процедуры	После	До процедуры	После
2–4	0,398	1,067	2,578	3,031
4–6	0,373	1,19	3,244	4,016
6–8	0,404	1,07	3,047	3,329
8–10	1	1	3,765	2,582
10–12	1,218	0,763	2,087	2,48
12–14	0,383	0,315	2,614	2,497
14–16	0,244	0,246	2,588	2,68

Табл. 2. Параметры составляющих ЭЭГ до и после процедуры ЭСТ. Эксперимент 2

Частотный диапазон, Гц	СКЗ, относительные единицы		Пик фактор	
	До процедуры	После	До процедуры	После
2–4	1,262	0,54	2,634	2,62
4–6	1,167	0,583	2,54	2,92
6–8	0,99	0,537	2,27	2,44
8–10	1	1	2,8	3,38
10–12	2,55	1,628	2,75	3,83
12–14	0,935	0,583	2,54	3,04
14–16	1,209	0,613	3,12	3,19

Табл. 3. Параметры составляющих ЭЭГ до и после процедуры ЭСТ. Эксперимент 3

Частотный диапазон, Гц	СКЗ, относительные единицы		Пик фактор	
	До процедуры	После	До процедуры	После
2–4	0,331	0,453	2,432	2,625
4–6	0,303	0,443	2,918	2,863
6–8	0,323	0,366	3,245	2,553
8–10	1	1	2,84	2,553
10–12	0,363	0,42	2,69	2,897
12–14	0,297	0,234	3,401	3,806
14–16	0,176	0,202	2,545	3,075

Заключение

Применение электроэнцефалографии в медицинской практике позволяет получить различные новые данные о работе нейронной сети головного мозга человека, оценить эффективность применяемых методик лечения. Вычислительные мощности современных малогабаритных компьютеров, смартфонов, встроенных систем позволяют реализовать различные трудоёмкие алгоритмы цифровой обработки ЭЭГ для определения их информативно значимых параметров и характеристик. В данной работе представлены результаты исследований, проводимых с целью получения новых информативно-значимых параметров для сравнительного анализа ЭЭГ. Следует отметить, что полученные результаты требуют подтверждения на большом объеме реальных данных.

Литература

1. Электроэнцефалография: руководство / М.В. Александров [и др.]. Под ред. М.В. Александрова. 3-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: СпецЛит, 2020. – 224 с.
2. Зенков, Л.Р. Клиническая электроэнцефалография (с элементами эпилептологии). – 2-е изд., испр. и доп. – М.: МЕДпресс-информ, 2002. – 368 с.
3. Докукина, Т.В. Визуальная и компьютерная ЭЭГ в клинической практике / Т.В. Докукина, Н.Н. Мисюк. – Минск: Книгасбор, 2011. – 187 с.
4. Павлова Л.П. Доминанты деятельного мозга человека. Системный психофизиологический подход к анализу ЭЭГ. СПб.: Информ-навигатор; 2017. – 430 с.
5. Татум, У.О. Клиническая интерпретация электроэнцефалографии. Пер. с англ. / У.О. Татум, А.М. Хусейн, С.Р. Бенбадис, П.В. Каплан. – М.: Издательский дом «БИНОМ». 2020. – 264 с
6. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. – 656 с.
7. Кулаичев, А.П. Компьютерная электрофизиология и функциональная диагностика. Москва: ИНФРА-М; 2018. – 469 с.
8. Бранцевич, П.Ю. Цифровая обработка вибрационных сигналов. – Минск: Бестпринт, 2022. – 297 с.

9. Бранцевич, П.Ю. Сравнительный анализ электроэнцефалограмм. BIG DATA и анализ высокого уровня = BIG DATA and Advanced Analytics: сборник научных статей IX Международная науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 1 (Республика Беларусь, Минск, 17–18 мая 2023 года). Редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск: БГУИР, 2023. – с. 132–144.
10. Бранцевич, П.Ю. Информативные параметры электроэнцефалограмм. Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы седьмой Международная науч.-практ. конф., Минск, 18-19 мая 2023 г. / М-во образования Республики Беларусь, НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А. Н. Севченко» Белорус. Гос. ун-та; редкол.: Ю.И. Дудчик (гл. ред.) и [и др.]. – с. 137–139.
11. Бранцевич, П.Ю. Цифровая обработка электроэнцефалограмм / П.Ю. Бранцевич // Science and innovation. – Ташкент: LLC «Science and innovation», 2023. – Special Issue 3. – с. 930–934.
12. Бранцевич, П.Ю. Цифровая обработка сигналов и сравнительный анализ электроэнцефалограмм / П.Ю. Бранцевич // BIG DATA и анализ высокого уровня = BIG DATA and Advanced Analytics : сборник научных статей X Международная научно-практическая конференция (Республика Беларусь, Минск, 13 марта 2024 года). В 2 ч. Ч. 1 / редкол.: В.А. Богуш [и др.]. – Минск: БГУИР, 2024. – С. 101–112.
13. Бранцевич, П.Ю. Информативные признаки и характеристики электроэнцефалограмм / П.Ю. Бранцевич Т.В. Докукина, Н.Н. Мисюк, П.П. Королевич / Медэлектроника – 2024. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии: сборник научных статей XIV Международная науч.-техн. конференция (Республика Беларусь, Минск, 5-6 декабря 2024 года). – Минск: БГУИР, 2024. – С. 63-69.
14. Метод лечения резистентных форм психических и поведенческих расстройств с использованием электросудорожной терапии. Инструкция по применению / Докукина Т.В. [и др.]. Утвержден Министерством здравоохранения Республики Беларусь 20.01.2015. – Минск: Министерство здравоохранения Республики Беларусь, 2015. – 11 с.

Дата поступления 21.04.2025