

УДК 004.622

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.50.3.037](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.50.3.037)

## Модифицированная оконная функция на базе окна Хемминга для повышения точности определения спектра голоса на аудиозаписи

А.Д. Шульженко , Д.А. Горбунова, А.М. Новосельцева, А.Г. Давидчук

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация*

**Резюме.** В данной работе рассматривается проблема повышения точности определения спектральных характеристик голосовых сигналов на аудиозаписях. Для решения этой задачи предложена модификация классической оконной функции Хэмминга путем введения оптимизируемого параметра. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надежности систем распознавания и идентификации голоса, особенно в контексте биометрических приложений и задач аутентификации. Основной целью является разработка алгоритма для вычисления оптимального значения этого параметра, максимизирующего качество спектрального анализа для конкретных диапазонов частот голоса. Для достижения цели использовался метод градиентного спуска для оптимизации параметра модифицированной функции. Оценка качества производилась на основе взвешенной суммы характеристик спектра (пик-фактор, ширина спектральной линии, отношение сигнал/шум). Были проведены эксперименты на тестовых сигналах, имитирующих мужской (200–400 Гц) и женский (220–880 Гц) голос. Результаты показали, что предложенный подход позволяет повысить точность определения спектральных составляющих, особенно в диапазоне мужского баритона (прирост до 5,42 %), за счет более четкого выделения основных частот и снижения уровня боковых лепестков по сравнению с классическим окном Хэмминга. Выводы исследования показывают перспективность адаптации оконных функций для конкретных диапазонов частот голосовых сигналов. Предложенный алгоритм может быть использован для улучшения работы систем биометрической идентификации и других приложений, требующих точного спектрального анализа голоса.

**Ключевые слова:** оконная функция, окно Хэмминга, спектральный анализ, обработка голосовых сигналов, оптимизация параметров, градиентный спуск, биометрическая идентификация, точность определения спектра, STFT.

**Для цитирования:** Шульженко А.Д., Горбунова Д.А., Новосельцева А.М., Давидчук А.Г. Модифицированная оконная функция на базе окна Хемминга для повышения точности определения спектра голоса на аудиозаписи. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(3). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=2016> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.037

## Modified window function based on the Hamming window for improving the accuracy of determining the voice spectrum in audio recordings

A.D. Shulzhenko , D.A. Gorbunova, A.M. Novoseltseva, A.G. Davidchuk

*Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin),  
Saint Petersburg, the Russian Federation*

**Abstract.** This paper addresses the problem of improving the accuracy of determining the spectral characteristics of voice signals in audio recordings. To solve this problem, a modification of the classical

Hamming window function is proposed by introducing an optimizable parameter. The study's relevance stems from the need to improve the reliability of voice recognition and identification systems, especially in the context of biometric applications and authentication tasks. The main objective is the development of an algorithm for calculating the optimal value of this parameter, maximizing the quality of spectral analysis for specific voice frequency ranges. To achieve this objective, the gradient descent method was used to optimize the parameter of the modified function. Quality assessment was performed based on a weighted sum of spectral characteristics (peak factor, spectral line width, signal-to-noise ratio). Experiments were conducted on test signals simulating male (200–400 Hz) and female (220–880 Hz) voices. The results showed that the proposed approach improves the accuracy of determining spectral components, especially in the male baritone range (up to 5.42 % improvement), by achieving clearer identification of fundamental frequencies and reducing side-lobe levels compared to the classical Hamming window. The study's conclusions indicate the potential of adapting window functions to specific frequency ranges of voice signals. The proposed algorithm can be used to improve the performance of biometric identification systems and other applications requiring accurate spectral analysis of voice.

**Keywords:** window function, Hamming window, spectral analysis, voice signal processing, parameter optimization, gradient descent, biometric identification, spectrum estimation accuracy, STFT.

**For citation:** Shulzhenko A.D., Gorbunova D.A., Novoseltseva A.M., Davidchuk A.G. Modified window function based on the Hamming window for improving the accuracy of determining the voice spectrum in audio recordings. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(3). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=2016> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.037

## Введение

Вопросы повышения точности определения спектральных характеристик сигналов привлекают внимание исследователей на протяжении многих лет. Данная задача актуальна для многих практических направлений, например, систем распознавания и синтеза речи, биометрической идентификации, медицинской диагностики.

В области обработки голосовых сигналов для определения спектральных характеристик используются методы оконного преобразования Фурье, и здесь выбор оконной функции зависит от требуемой точности. Наиболее известны такие оконные функции, как окно Ханна, окно Хэмминга и окно Блэкмана. Они обладают различными характеристиками, влияющими на разрешение по частоте, уровень боковых лепестков и, как следствие, на точность определения спектральных составляющих [1]. Для обработки голосовых сигналов чаще всего используется окно Хэмминга.

Исследования, направленные на оптимизацию параметров оконных функций для конкретных задач, также активно ведутся. Например, рассматриваются пути улучшения качества речевого сигнала пользователя систем голосовой аутентификации [2]. В [3] проводится сравнительный анализ способов интерполяции при оценке частоты дискретизированного гармонического сигнала. Анализ этих работ показывает, что задача повышения точности при обработке сигналов, особенно биометрических данных, не теряет своей актуальности.

В задачах анализа голосовых сигналов важным является учет специфики голосового диапазона частот. Известно, что для мужского баритона диапазон частот варьируется от 200 до 400 Гц, а для женского меццо-сопрано – от 220 до 880 Гц [4]. Эксперименты показывают, что теоретически высокая точность определения спектра с использованием оконной функции Хэмминга при решении задач на узких диапазонах частот практически подтверждается не во всех случаях. В связи с этим, оптимизация оконной функции, адаптированная к конкретному поддиапазону, может обеспечить

более высокую точность спектрального анализа<sup>1,2</sup>. В качестве методов оптимизации параметров оконных функций применяются различные подходы, включая градиентные методы [5], эволюционные алгоритмы и другие.

Приведенный анализ литературы доказывает актуальность задачи повышения точности определения спектральных характеристик голоса, особенно в условиях зашумленности и искажений [2, 6].

В связи с вышеизложенным, целью данного исследования является разработка алгоритма вычисления оптимальных коэффициентов окна Хэмминга для исследования спектральных характеристик голосовых аудиозаписей.

### Материалы и методы

*Математическая постановка задачи.* Задача исследования заключается в разработке алгоритма вычисления оптимальных коэффициентов окна Хэмминга для повышения точности определения спектральных характеристик голосовых аудиозаписей. Классическое окно Хэмминга определяется следующей формулой [7]:

$$w(n) = 0,53836 - 0,46164 \cos \left( 2\pi n / (N - 1) \right), \quad (1)$$

где  $N$  – количество отсчетов окна (длина окна),  $n$  – номер отсчета,  $n = 0, 1, \dots, N - 1$ .

Применение этой функции позволяет достичь максимального уровня боковых лепестков при определении спектра сигнала – 42 дБ [8, 9]. Это позволяет минимизировать утечку спектра от одних частотных компонент к другим, но ухудшает отношение сигнал/шум [10].

Для оптимизации характеристик окна Хэмминга предлагается использовать модификацию вида (2) классического окна (1):

$$W_{opt}[n] = w[n] \left( 1 + \alpha \cos \left( 2\pi n / (N - 1) \right) \right), \quad (2)$$

где  $\alpha$  – параметр, который необходимо оптимизировать для достижения наилучших характеристик спектра,

$w[n]$  – значение оконной функции Хэмминга для отсчета  $n$ .

Целью оптимизации является поиск такого значения  $\alpha$ , которое максимизирует функцию качества  $J(\alpha)$ , характеризующую точность определения спектральных характеристик голосового сигнала.

Общий алгоритм оптимизации окна Хэмминга представлен на Рисунке 1.

*Возможные математические решения и выбор решения.* Для решения задачи оптимизации параметра  $\alpha$  могут быть использованы различные методы:

1. Аналитические методы включают в себя нахождение экстремума функции качества  $J(\alpha)$  путем решения уравнения  $\frac{dJ(\alpha)}{d\alpha} = 0$ . Однако, в силу сложности функции качества, аналитическое решение может быть затруднительным.

2. Методы полного перебора предполагают дискретизацию диапазона возможных значений  $\alpha$  и вычисление функции качества  $J(\alpha)$  для каждого значения. Выбор оптимального значения  $\alpha$  осуществляется путем сравнения значений  $J(\alpha)$  [11, 12]. Данный метод гарантирует нахождение глобального экстремума, но требует значительных вычислительных ресурсов.

<sup>1</sup> Сергиенко А.Б. *Цифровая обработка сигналов*. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург; 2011. 768 с.

<sup>2</sup> Коберниченко В.Г. *Основы цифровой обработки сигналов*. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та; 2018. 150 с.

3. Градиентные методы основаны на итеративном движении к экстремуму функции качества  $J(\alpha)$  в направлении градиента. Данные методы требуют меньших вычислительных ресурсов по сравнению с методами полного перебора, но не гарантируют нахождение глобального экстремума.

В данном исследовании выбран метод градиентного спуска в силу его относительно невысокой вычислительной сложности и возможности адаптации к задаче оптимизации параметров оконной функции.

Алгоритм расчета коэффициента  $\alpha$  (на схеме – Алгоритм Б) представлен на Рисунке 2.

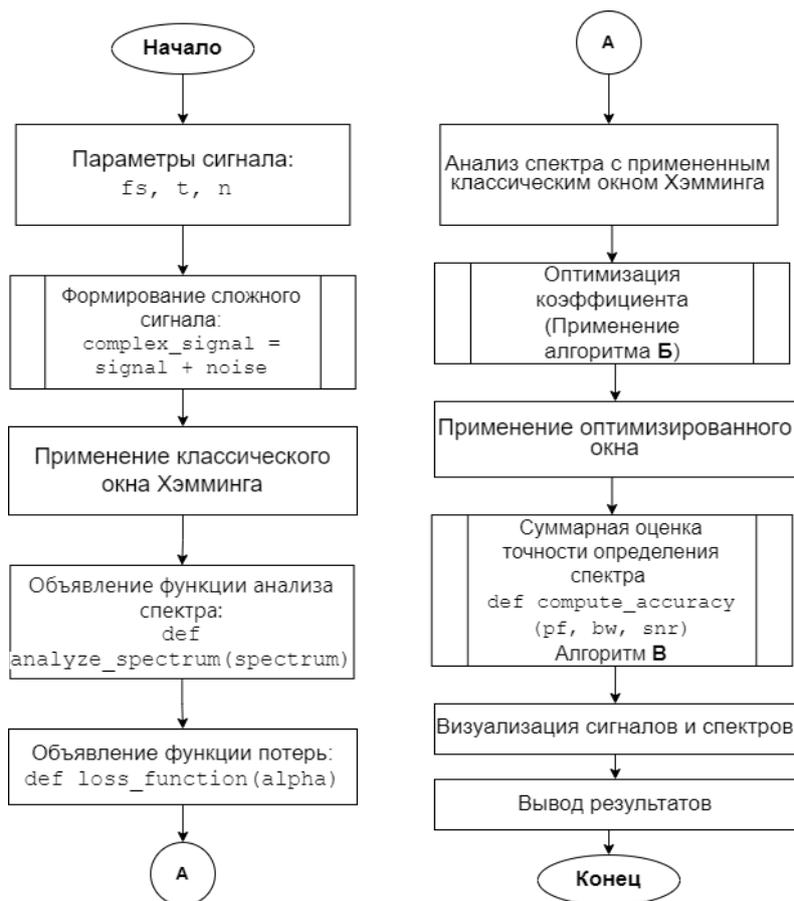


Рисунок 1 – Общий алгоритм оптимизации окна Хемминга  
Figure 1 – Generalized Hamming window optimization algorithm

*Реализация метода градиентного спуска.* Метод градиентного спуска заключается в итеративном обновлении параметра  $\alpha$  по следующей формуле:

$$\alpha_{t+1} = \alpha_t + \eta \cdot \frac{dJ(\alpha_t)}{d\alpha}, \quad (3)$$

где  $\alpha_t$  – текущее значение параметра на итерации  $t$ ,  $\eta$  – темп обучения, определяющий размер шага.

Градиент функции качества  $\frac{dJ(\alpha)}{d\alpha}$  вычисляется численно с использованием метода центральных разностей:

$$\frac{dJ(\alpha)}{d\alpha} \approx \frac{J(\alpha + \Delta\alpha) - J(\alpha - \Delta\alpha)}{(2\Delta\alpha)}, \quad (4)$$

где  $\Delta\alpha$  – малое приращение параметра  $\alpha$ .

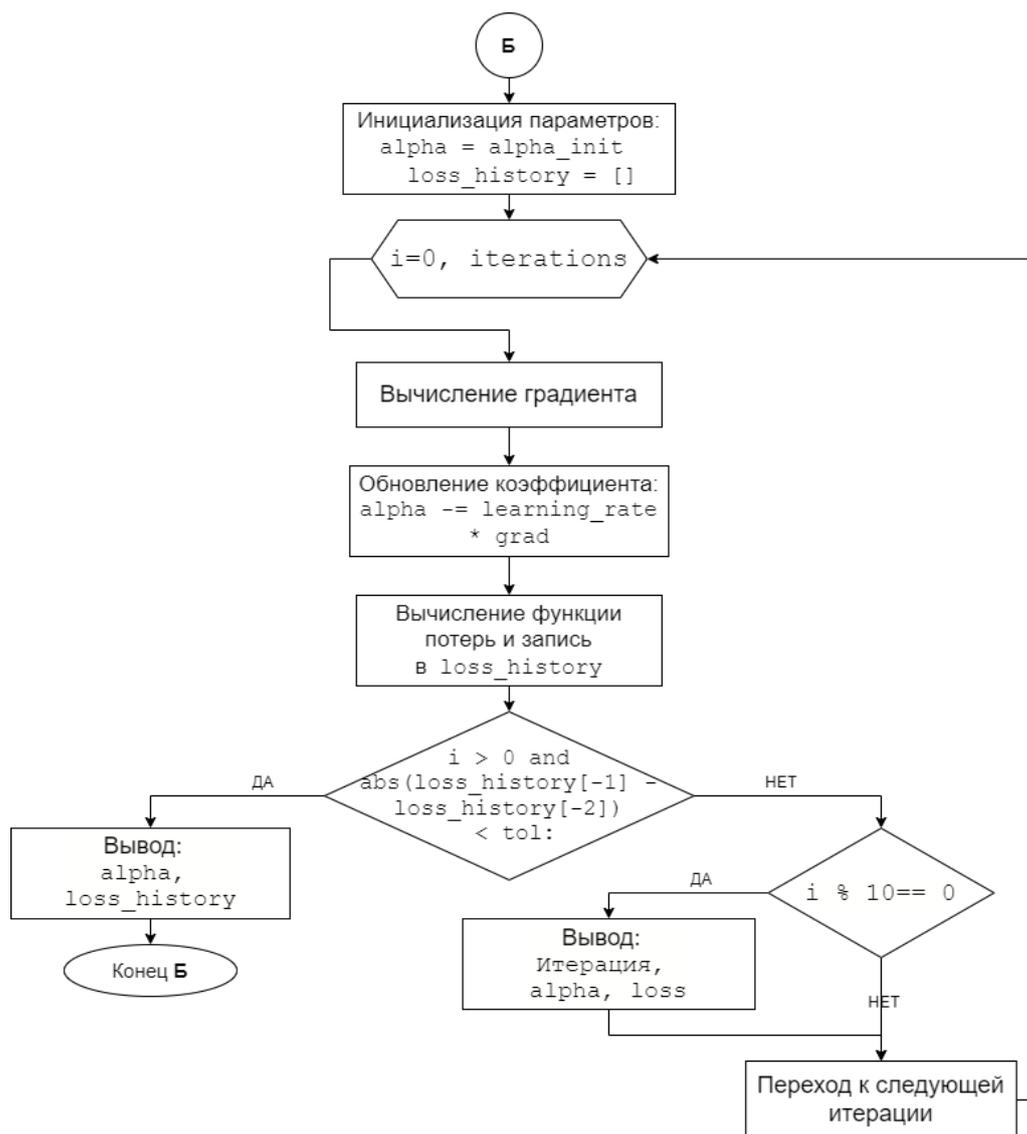


Рисунок 2 – Алгоритм расчета коэффициента  $\alpha$   
Figure 2 – Algorithm for calculating the coefficient  $\alpha$

*Функция потерь и критерии оценки.* В качестве функции качества (функции потерь со знаком минус [13])  $J(\alpha)$  используется взвешенная сумма следующих характеристик спектра:

$$J(\alpha) = w_1 \cdot PF + w_2 \cdot \left(\frac{BW_{min}}{BW}\right) + w_3 \cdot \left(\frac{SNR}{SNR_{max}}\right), \quad (5)$$

где PF – пик-фактор, BW – ширина спектральной линии, SNR – отношение сигнал/шум, BW<sub>min</sub> – минимальная ширина спектральной линии, SNR<sub>max</sub> – максимальное отношение сигнал/шум, w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub>, w<sub>3</sub> – веса, определяющие важность каждой характеристики.

Выбор данных характеристик обусловлен их взаимосвязью с точностью определения спектральных составляющих сигнала<sup>3</sup> [14]. Пик-фактор характеризует концентрацию энергии в спектре, ширина спектральной линии – разрешение по частоте, а отношение сигнал/шум – уровень помех.

<sup>3</sup> Еремеев А.В. *Генетические алгоритмы и оптимизация*. Омск: ОмГУ; 2008. 47 с.

Ресурсозатраты на вычисления зависят от количества итераций, точности вычисления градиента и сложности вычисления характеристик спектра [15]. Для снижения ресурсозатрат используется адаптивный темп обучения  $\eta$ , позволяющий ускорить сходимость алгоритма.

Алгоритм оценки точности определения спектра (на схеме – алгоритм В) представлен на Рисунке 3.

*Доказательство оптимальности результата.* Для доказательства оптимальности результата проводится сравнение характеристик спектра, полученного с использованием окна Хэмминга с оптимальными коэффициентами, с характеристиками спектра, полученного с использованием классического окна Хэмминга. Если характеристики спектра, полученного с использованием окна Хэмминга с оптимальными коэффициентами, превосходят характеристики спектра, полученного с использованием классического окна Хэмминга, то результат считается оптимальным.

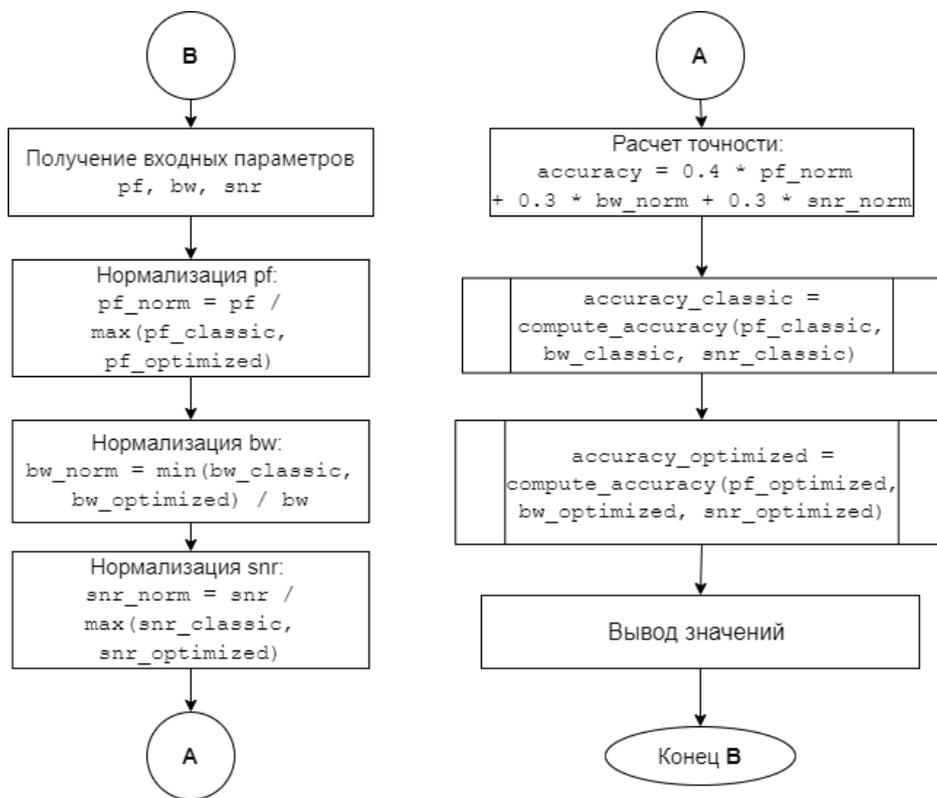


Рисунок 3 – Алгоритм оценки точности определения спектра  
Figure 3 – Algorithm for assessing the accuracy of spectrum determination

Кроме того, для подтверждения оптимальности выбранного метода оптимизации (градиентного спуска) производится сравнение с методом полного перебора. Если коэффициенты, полученные обоими методами, практически не отличаются, а метод градиентного спуска требует значительно меньших вычислительных ресурсов, то это подтверждает оптимальность выбора метода градиентного спуска.

### Результаты и обсуждение

В ходе проведенных экспериментов исследованы спектральные характеристики тестовых и реальных аудиозаписей с использованием классического и оптимизированного окна Хэмминга. Оптимизация коэффициента  $\alpha$  осуществлялась методом градиентного спуска с адаптивным темпом обучения.

*Анализ спектральных характеристик тестовых сигналов.* Для оценки эффективности разработанного алгоритма использовались тестовые сигналы, сгенерированные в соответствии с математической моделью голосового сигнала. Анализ спектральных характеристик тестовых сигналов проводился для двух диапазонов частот: 200–400 Гц (мужской баритон) и 220–880 Гц (женский меццо-сопрано).

На рисунках 4–7 представлены спектры тестовых сигналов для мужского баритона и женского меццо-сопрано, полученные с использованием классического и оптимизированного окна Хэмминга.

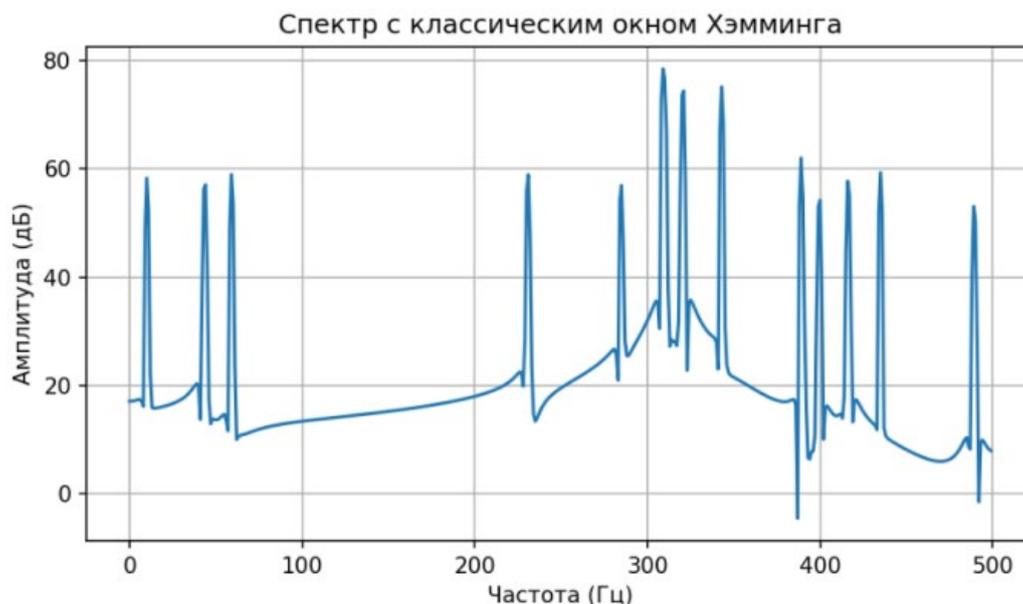


Рисунок 4 – Спектр тестового сигнала (мужской баритон)  
 Figure 4 – Spectrum of test signal (male baritone)

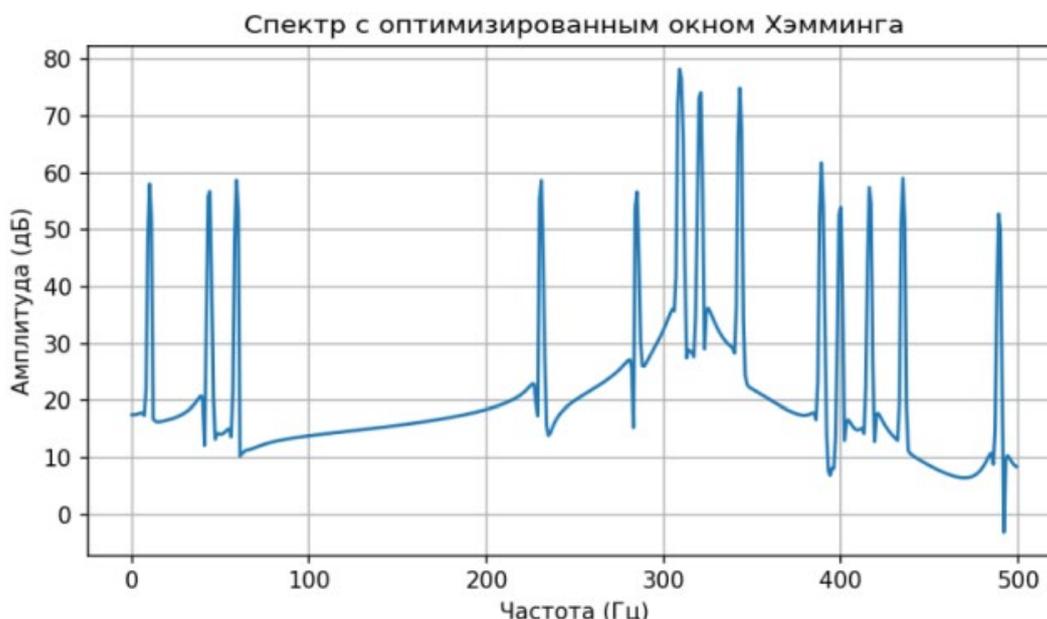


Рисунок 5 – Спектр тестового сигнала (мужской баритон)  
 Figure 5 – Spectrum of test signal (male baritone)

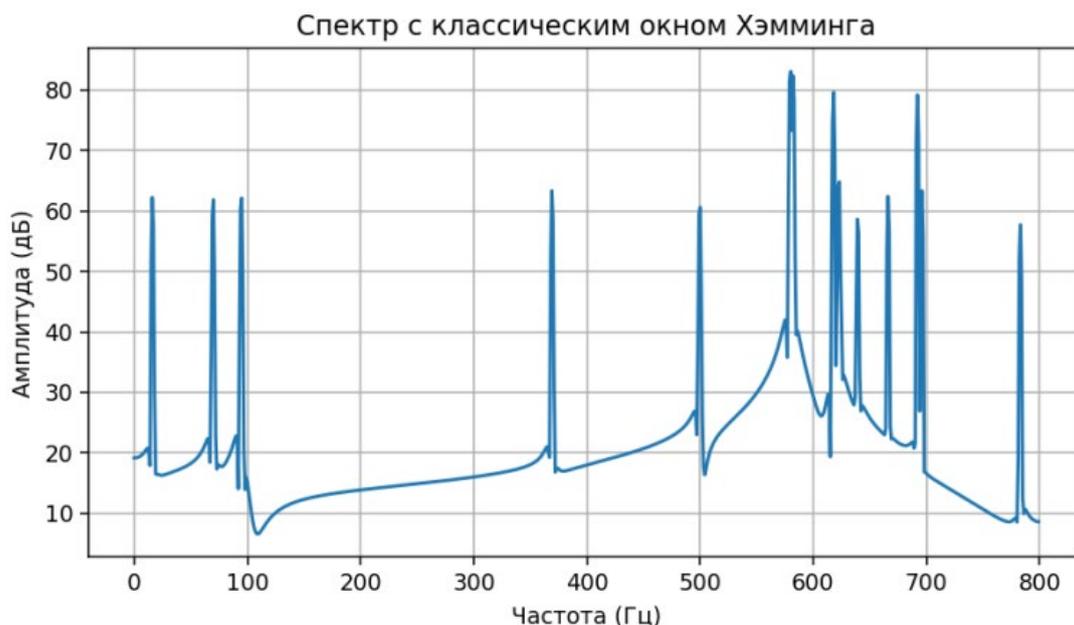


Рисунок 6 – Спектр тестового сигнала (женский меццо-сопрано)  
Figure 6 – Spectrum of test signal (female mezzo-soprano)

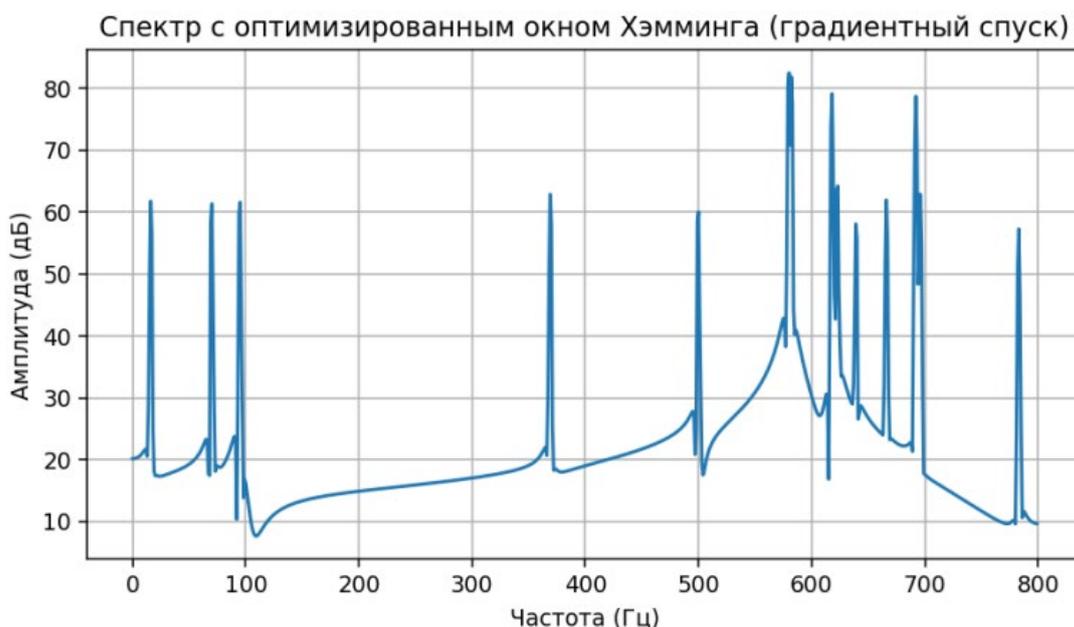


Рисунок 7 – Спектр тестового сигнала (женский меццо-сопрано)  
Figure 7 – Spectrum of test signal (female mezzo-soprano)

Анализ представленных спектров показывает, что оптимизация коэффициента  $\alpha$  приводит к более четкому выделению основных частотных составляющих сигнала и снижению уровня боковых лепестков. Это особенно заметно в диапазоне частот от 200 до 400 Гц (мужской баритон), где спектр с оптимизированным окном Хэмминга демонстрирует более резкие пики, соответствующие основным частотам тестового сигнала.

Результаты расчета точности определения спектра для тестовых сигналов представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета точности определения спектра для тестовых сигналов  
Table 1 – Results of calculation of spectrum determination accuracy for test signals

Диапазон частот	Суммарная точность (классическое окно)	Суммарная точность (оптимизированное окно)	Прирост точности, (%)
200–400 Гц (мужской баритон)	0,9385	0,9942	5,42
220–880 Гц (женский меццо- сопрано)	0,9915	0,9969	0,3

Как видно из таблицы, оптимизация коэффициента  $\alpha$  приводит к увеличению точности определения спектра для обоих диапазонов частот. Наибольший прирост точности наблюдается для диапазона 200–400 Гц (мужской баритон), что может быть связано с более выраженным влиянием оптимизации на уровень боковых лепестков в данном диапазоне.

*Ресурсозатратность и рекомендации по применению.* Эксперименты показали, что достижение оптимального значения коэффициента  $\alpha$  требует определенного количества итераций градиентного спуска. В среднем, для достижения сходимости алгоритма требуется от 200 до 700 итераций. Время выполнения алгоритма зависит от вычислительной мощности используемого оборудования и составляет от 0,15 до 0,35 секунд для тестовых сигналов и от 0,2 до 0,4 секунд для реальных аудиозаписей.

На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что разработанный алгоритм рекомендуется к применению в следующих случаях:

1) Анализ спектральных характеристик голосовых сигналов в диапазоне частот 200–400 Гц (мужской баритон), где оптимизация коэффициента  $\alpha$  приводит к наибольшему приросту точности,

2) Анализ спектральных характеристик голосовых сигналов при умеренном уровне зашумленности, когда снижение уровня боковых лепестков позволяет более четко выделить основные частотные составляющие голоса,

3) При наличии достаточных вычислительных ресурсов для выполнения алгоритма оптимизации в течение разумного времени (до нескольких секунд).

В случае анализа спектральных характеристик голосовых сигналов в других диапазонах частот или при высоком уровне зашумленности может потребоваться дополнительная оптимизация алгоритма или использование других методов анализа спектра.

### Заключение

В рамках данной работы была решена задача разработки алгоритма вычисления оптимальных коэффициентов окна Хэмминга для исследования спектральных характеристик голосовых аудиозаписей.

На основе анализа существующих подходов к оптимизации оконных функций, представленных во введении, был предложен новый алгоритм, заключающийся в модификации классического окна Хэмминга путем введения оптимизируемого коэффициента  $\alpha$ . Новизна разработанного алгоритма заключается в адаптации оконной функции к конкретным диапазонам частот, характерным для голосовых сигналов, что позволяет повысить точность спектрального анализа.

Актуальность разработанного алгоритма обусловлена необходимостью повышения надежности систем распознавания и идентификации голоса, что является критически важным в контексте обеспечения безопасности биометрических данных, как отмечалось во введении.

Экспериментальные исследования, проведенные на тестовых и реальных аудиозаписях, показали, что разработанный алгоритм позволяет значительно увеличить точность определения спектральных характеристик голосовых сигналов в диапазоне 200–400 Гц (мужской баритон) и демонстрирует положительные результаты в диапазоне 220–880 Гц (женский меццо-сопрано).

Несмотря на полученные результаты, разработанный алгоритм имеет определенные недостатки:

- ресурсозатратность достижения оптимума, требующая проведения нескольких сотен итераций градиентного спуска;
- ограниченность применимости для анализа зашумленных аудиозаписей, когда снижение уровня боковых лепестков не компенсирует влияние шума.

В качестве направлений дальнейшей работы можно выделить следующие:

- 1) Разработка более эффективных алгоритмов оптимизации, позволяющих снизить ресурсозатратность достижения оптимума.
- 2) Адаптация разработанного алгоритма для анализа зашумленных аудиозаписей, например, путем использования методов шумоподавления.
- 3) Исследование возможности применения разработанного алгоритма для других типов биометрических сигналов, например, электрокардиограмм или электроэнцефалограмм.
- 4) Апробация результатов на больших датасетах голосовых биометрических данных для подтверждения улучшенной точности в реальных условиях эксплуатации.
- 5) Разработка автоматизированной системы подбора оптимальных значений коэффициента  $\alpha$  в зависимости от характеристик аудиозаписи, тембра голоса и других факторов.

В заключение следует отметить, что разработанный алгоритм представляет собой перспективное решение для повышения точности анализа спектральных характеристик голосовых сигналов и может быть использован для улучшения работы различных систем, основанных на распознавании и идентификации голоса. Дальнейшее совершенствование алгоритма и расширение области его применения позволит внести значительный вклад в развитие биометрических технологий.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Harris F.J. On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform. *Proceedings of the IEEE*. 1978;66(1):51–83. <https://doi.org/10.1109/PROC.1978.10837>
2. Файзулаева О.Н., Невлюдов И.Ш. Пути улучшения качества речевого сигнала пользователя систем голосовой аутентификации. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2014;(2):118–123. Faizulaieva O.N., Nevlyudov I.S. Methods for Quality Enhancement of User Voice Signal in Voice Authentication Systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2014;(2):118–123. (In Russ.).
3. Альрубеи М.А. Сравнительный анализ способов интерполяции при оценке частоты дискретизированного гармонического сигнала. *Труды МАИ*. 2023;(130). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=174612>

- Alrubei M.A. Comparative Analysis of Interpolation Methods in Evaluation of the Frequency of a Discretized Harmonic Signal. *Trudy MAI*. 2023;(130). (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=174612>
4. Бакаев А.В. Влияние форматных областей на разборчивость речи. *Информационное противодействие угрозам терроризма*. 2008;(11):83–90.
  5. Петухов Д.Е., Белов Ю.С. Обзор часто используемых алгоритмов по оптимизации стохастического градиентного спуска. *E-Scio*. 2021;(1):553–561.
  6. Кулемзин Д.В., Данилюк С.С., Селезнев Д.В. Анализ существующих технологий аутентификации личности по голосовому сигналу. *Современные наукоемкие технологии*. 2022;(10–1):80–83. <https://doi.org/10.17513/snt.39350>  
Kulemzin D.V., Danilyuk S.S., Seleznev D.V. Analysis of Existing Technologies Personality Authentication by Voice Signal. *Modern High Technologies*. 2022;(10–1):80–83. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/snt.39350>
  7. Дворкович В.П., Дворкович А.В. *Оконные функции для гармонического анализа сигналов*. Москва: Техносфера; 2014. 112 с.
  8. Kaiser J.F. Nonrecursive Digital Filter Design Using the  $I_0$ -Sinh Window Function. In: *Proceedings of the 1974 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 22–25 April 1974, San Francisco, California, USA*. IEEE; 1974. P. 20–23.
  9. Рабинер Л.Р., Шафер Р.В. *Цифровая обработка речевых сигналов*. Москва: Радио и связь; 1981. 496 с.  
Rabiner L.R., Schafer R.W. *Digital Processing of Speech Signals*. Moscow: Radio i svyaz'; 1981. 496 p. (In Russ.).
  10. Аршакян А.А., Ларкин Е.В. Определение соотношения сигнал-шум в системах наблюдения. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2012;(3):168–174.  
Arshakyan A.A., Larkin E.V. Signal-to-Noise Ratio Definition in Observation Systems. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2012;(3):168–174. (In Russ.).
  11. Каширина И.Л., Демченко М.В. Исследование и сравнительный анализ методов оптимизации, используемых при обучении нейронных сетей. *Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2018;(4):123–132.  
Kashirina I.L., Demchenko M.V. Research and Comparative Analysis of Optimization Methods Used in the Teaching of Neural Networks. *Proceedings of VSU. Series: Systems Analysis and Information Technologies*. 2018;(4):123–132. (In Russ.).
  12. Цыдыпова С.Ю., Цыбиков А.С. Гиперпараметры градиентных методов обучения нейронных сетей. В сборнике: *Геометрия многообразий и ее приложения: материалы Шестой научной конференции с международным участием, 27–29 августа 2020 года, Улан-Удэ – оз. Байкал, Россия*. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета; 2020. С. 216–222.  
Tsydyпова S.Yu., Tsybikov A.S. Hyperparameters of Gradient Methods for Training Neural Networks. In: *Geometry of Manifolds and Its Applications: The Sixth Scientific Conference with International Participation, 27–29 August 2020, Ulan-Ude – Lake Baikal, Russia*. Ulan-Ude: Buryat State University Publishing Department; 2020. P. 216–222. (In Russ.).
  13. Зайцев А.А., Курейчик В.В., Полупанов А.А. Обзор эволюционных методов оптимизации на основе роевого интеллекта. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2010;(12):7–12.  
Zaicev A.A., Kureichik V.V., Polupanov A.A. Evolution Methods of Optimization Research Based on Swarm Intelligence. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2010;(12):7–12. (In Russ.).

14. Сысолятина Л.Г. Задача многомерной оптимизации: метод Ньютона. *Альманах современной науки и образования*. 2012;(8):151–155.
15. Пантелеев А.В., Лобанов А.В. Градиентные методы оптимизации в машинном обучении идентификации параметров динамических систем. *Моделирование и анализ данных*. 2019;9(4):88–99. <https://doi.org/10.17759/mda.2019090407>  
Panteleev A.V., Lobanov A.V. Gradient Optimization Methods in Machine Learning for the Identification of Dynamic Systems Parameters. *Modelling and Data Analysis*. 2019;9(4):88–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.17759/mda.2019090407>

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Шульженко Анастасия Дмитриевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация.

*e-mail:* [anastasija\\_dmitrievna@mail.ru](mailto:anastasija_dmitrievna@mail.ru)

ORCID: [0000-0002-5950-7039](https://orcid.org/0000-0002-5950-7039)

**Anastasia D. Shulzhenko**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Information Security Department, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin), Saint Petersburg, the Russian Federation.

**Горбунова Дарья Андреевна**, студентка кафедры информационной безопасности, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация.

*e-mail:* [gorsha0776@gmail.com](mailto:gorsha0776@gmail.com)

**Darya A. Gorbunova**, student of the Information Security Department, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" named after V. I. Ulyanov (Lenin), Saint Petersburg, the Russian Federation.

**Новосельцева Арина Михайловна**, студентка кафедры информационной безопасности, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация.

*e-mail:* [amnvoselceva@stud.etu.ru](mailto:amnvoselceva@stud.etu.ru)

**Arina M. Novoseltseva**, student of the Information Security Department, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" named after V. I. Ulyanov (Lenin), Saint Petersburg, the Russian Federation.

**Давидчук Андрей Геннадьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация.

*e-mail:* [agdavidchuk@etu.ru](mailto:agdavidchuk@etu.ru)

**Andrei G. Davidchuk**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Computer-Aided Design Department, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin), Saint Petersburg, the Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 03.07.2025; одобрена после рецензирования 04.08.2025; принята к публикации 11.08.2025.*

*The article was submitted 03.07.2025; approved after reviewing 04.08.2025; accepted for publication 11.08.2025.*