

# Автоматизация анализа электрокардиографических сигналов: построение фазовых портретов на основе реальных данных

А. С. Иоронен<sup>1</sup>, Ю. О. Боброва<sup>2</sup>

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

<sup>1</sup>alisa\_io@mail.ru, <sup>2</sup>jobobrova@etu.ru

**Аннотация.** В работе представлен подход к автоматизации построения фазовых портретов на основе электрокардиографических (ЭКГ) сигналов. Фазовые портреты, как визуальное представление динамики сердечной активности, позволяют выявлять скрытые патологии и анализировать вариабельность сердечного ритма, что затруднительно при традиционном анализе ЭКГ во временной области. В рамках исследования был модернизирован алгоритм построения фазовых портретов, разработанный на основе моделирования основных параметров сигнала. Алгоритм адаптирован для работы с реальными данными из медицинских баз, что позволяет автоматически строить фазовые портреты для различных состояний пациентов.

**Ключевые слова:** электрокардиографические сигналы (ЭКГ); фазовые портреты; моделирование ЭКГ; анализ сердечной активности; диагностика сердечных заболеваний

## I. ВВЕДЕНИЕ

Электрокардиографический сигнал (ЭКГ) является ключевым инструментом для диагностики сердечно-сосудистых заболеваний, однако его интерпретация осложняется большим объемом данных и наличием шумов. Геометрический подход, такой как построение фазовых портретов, позволяет визуализировать сложные динамические процессы в сердечной деятельности и выявлять патологии, которые незаметны при традиционном анализе [1]. Этот подход особенно ценен в современной кардиологии, где точная и ранняя диагностика заболеваний сердца имеет критическое значение.

Фазовые портреты отображают динамику системы в фазовом пространстве, где каждая точка соответствует состоянию системы в определенный момент времени. При анализе ЭКГ они помогают выявить сложные закономерности сердечного ритма, которые трудно обнаружить во временных рядах. Этот метод особенно эффективен для диагностики аритмий, ишемических изменений и сердечной недостаточности [1].

Одним из преимуществ фазовых портретов является их способность учитывать нелинейные свойства сердечной деятельности. Сердечный ритм представляет собой сложную динамическую систему, которая демонстрирует как регулярные, так и хаотические

паттерны. Фазовые портреты позволяют изучать эти нелинейные эффекты. Например, аритмии, такие как фибрилляция предсердий или желудочковая тахикардия, визуализируются как изменения в структуре фазового портрета, что облегчает их идентификацию [2]. Такой нелинейный анализ крайне важен, поскольку традиционные линейные методы часто не способны уловить сложные взаимодействия в электрической системе сердца.

В последние годы проведены многочисленные исследования по применению фазовых портретов для анализа ЭКГ. В работе «Идентификация аритмий ЭКГ с использованием реконструкции фазового пространства» авторы использовали фазовые портреты для классификации аритмий, таких как мономорфная желудочковая тахикардия (MVT), полиморфная желудочковая тахикардия (PVT) и фибрилляция желудочков (VF). Для построения портретов применялись методы автоматической реконструкции фазового пространства, такие как выбор временных задержек и определение размерности с использованием метода ложных ближайших соседей (FNN). Эти подходы повышают точность классификации. Например, MVT отображается в виде эллиптической формы на фазовом портрете, PVT — как изменчивая морфология, а VF — как хаотичное распределение точек. Модель на основе нейронной сети достигла точности классификации 83%, что подтверждает эффективность метода [2]. Это демонстрирует потенциал сочетания фазовых портретов с методами машинного обучения для повышения точности диагностики.

В обзорной статье «Обзор анализа нелинейных динамических систем сигналов ЭКГ» авторы подчеркивают, что фазовые портреты выявляют скрытые закономерности, недоступные для линейных методов. Они акцентируют внимание на теоретических аспектах построения портретов, таких как выбор временных задержек и размерности на основе теоремы Такенса. Различные патологии, такие как аритмии и ишемия, имеют уникальные паттерны на фазовых портретах: регулярные ритмы отображаются как упорядоченные структуры, а хаотические — как размытые и неупорядоченные. Это делает фазовые портреты полезным инструментом для диагностики сердечных патологий [3]. Авторы также подчеркивают важность

оптимизации параметров, таких как временная задержка и размерность вложения, для обеспечения точной реконструкции фазового пространства.

Фазовые портреты также используются для классификации сердечных сокращений, независимой от пациента. В работе «Использование реконструкции фазового пространства для классификации сердечных сокращений, независимой от пациента, в сравнении с некоторыми эталонными методами» авторы анализируют динамические характеристики сигналов ЭКГ для различения нормальных и аномальных сокращений. Нормальные сокращения отображаются как упорядоченные структуры, а аномальные — как сложные или хаотичные. Сравнение методов классификации, таких как GMM–Bayes, Bin–Bayes и TDNN, показало, что фазовые портреты обеспечивают высокую точность даже в условиях независимости от пациента [4]. Это особенно важно для разработки универсальных диагностических инструментов, применимых к различным группам пациентов.

Особый интерес представляет использование фазовых портретов для анализа фетальной ЭКГ. В одной из статей описан метод анализа псевдофазовых портретов, который позволяет выявлять фетальные аритмии даже при наличии сильных шумов. Псевдофазовые портреты строятся с использованием упрощенных данных, что делает их устойчивыми к шумам. Нормальный ритм отображается как упорядоченная структура, а аритмии — как хаотичные точки. Этот метод полезен для неинвазивной диагностики фетальных аритмий [1]. Возможность неинвазивного выявления патологий сердца плода представляет собой значительный прогресс в пренатальной диагностике, снижая риски для матери и ребенка.

Фазовые портреты также применяются в реальном времени для обнаружения комплексов QRS. В статье «Метод обнаружения QRS в реальном времени, основанный на фазовых портретах и вычислении бокс-скоринга» используется метод бокс-скоринга (box-scoring) для подсчета количества точек фазового портрета, попадающих в определенные области (боксы). Это позволяет идентифицировать комплексы QRS на фоне шума, что особенно полезно для носимых устройств мониторинга ЭКГ [5]. Интеграция фазовых портретов в носимые технологии представляет собой перспективное направление для непрерывного мониторинга сердечной деятельности в повседневной жизни.

В работе «Подход к реконструкции фазового пространства для характеристики желудочковых аритмий» фазовые портреты используются для характеристики желудочковых аритмий, таких как желудочковая тахикардия (VT) и фибрилляция желудочков (VF). VT отображается как эллиптическая форма, а VF — как хаотичное распределение точек. Это подчеркивает потенциал фазовых портретов для анализа сложных динамических процессов в сердечной деятельности [6]. Возможность визуального различия VT и VF критически важна для своевременного вмешательства, так как эти состояния требуют различных стратегий лечения.

## II. РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ

В исследовании используется методология построения фазовых портретов, описанная в работе «Моделирование электрокардиографического сигнала в линейной и векторной плоскости». Алгоритмы, изложенные в статье, реализованы в MATLAB и позволяют моделировать сигналы ЭКГ с заданными параметрами, а также строить фазовые портреты, наглядно иллюстрирующие изменения сердечного ритма. Для анализа используются как смоделированные данные, так и реальные записи из базы данных MIT-BIH Arrhythmia Database. Особое внимание уделяется сравнению фазовых портретов для нормального ритма и желудочковой тахикардии (VT), что помогает выявить характерные паттерны, связанные с патологиями.

Результаты исследования демонстрируют, что фазовые портреты являются эффективным инструментом для визуализации и классификации сердечно-сосудистых заболеваний. Хаотичные и фрагментированные контуры фазовых портретов для сигналов VT отражают нестабильность сердечного ритма, подтверждая потенциал этого метода для диагностики и мониторинга состояния пациентов. Эти выводы согласуются с предыдущими исследованиями, дополнительно подтверждая полезность фазовых портретов в клинической практике.

### А. Локализованные особенности ЭКГ

В работе «Классификатор сердечно-сосудистых заболеваний на основе реконструкции фазового пространства с использованием локализованных особенностей» авторы предложили методологию классификации сердечно-сосудистых заболеваний (CVD) на основе локализованных особенностей ЭКГ. Эти особенности включают ключевые интервалы и сегменты ЭКГ, такие как интервал PR, комплекс QRS и интервал QT, которые содержат важную информацию о состоянии сердца и позволяют выявлять различные патологии. Например, инфаркт миокарда характеризуется искажениями в комплексе QRS, которые отражаются на фазовом портрете в виде нестабильных контуров. При фибрилляции предсердий фазовый портрет становится хаотичным и размытым, что указывает на нарушение нормального ритма. Патологии, соответствующие сегменты ЭКГ и визуальные особенности фазовых портретов для различных случаев представлены в табл. 1. Методология была протестирована на данных 65 пациентов с различными аномалиями ЭКГ. Была достигнута высокая точность классификации: 95,3% для интервала PR, 96,9% для комплекса QRS и 98,5% для интервала QT [7]. Такой высокий уровень точности свидетельствует о том, что локализованные особенности в сочетании с фазовыми портретами могут значительно улучшить диагностический процесс, предоставляя клиницистам надежные инструменты для выявления специфических сердечных патологий.

ТАБЛИЦА 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ФП ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СЕРДЕЧНЫХ ПАТОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ СЕГМЕНТОВ И КОМПЛЕКСОВ ЭКГ

Патология	Сегменты, Комплексы	Внешний вид фазового портрета
Инфаркт миокарда (MI)	QRS комплекс	Искаженные контуры, указывающие на нестабильность сердечного ритма
Фибрилляция предсердий (AF)	QT интервал и QRS комплекс	Хаотичный и размытый, что свидетельствует о нарушении нормального ритма
Блокада ножек пучка Гиса (BBB)	QRS комплекс	Наличие специфических искажений в QRS комплексе, что также отражено в виде характерных изменений на фазовом портрете
Аритмия	PR интервал и QT интервал	Наличие фрагментированных и нечетких контуров
Гипертрофия	QT интервал	Увеличенные или искаженные контуры

### В. Моделирование ЭКГ и алгоритм построения фазового портрета

Данная работа основана на алгоритме моделирования ЭКГ и построения фазового портрета, предложенном в статье «Моделирование электрокардиографического сигнала в линейной и векторной плоскости». Этот алгоритм был реализован в MATLAB и позволяет моделировать сигналы ЭКГ с заданными параметрами, такими как амплитуды и длительности волн P, Q, R, S и T. На основе смоделированных сигналов строится фазовый портрет, который визуализирует динамику сердечной деятельности.

Сигнал ЭКГ моделируется как сумма отдельных волн (P, Q, R, S, T) с заданными амплитудами и длительностями. Затем волны объединяются в единый сигнал, представляющий полный сердечный цикл.

Фазовый портрет строится путем отображения значений сигнала ЭКГ (на оси X) против их задержанной версии (на оси Y). Задержанная версия сигнала — это тот же сигнал, но сдвинутый во времени на определенное количество отсчетов. В данной работе используется задержка в 50 отсчетов (что соответствует 50 мс при частоте дискретизации 1000 Гц). Это значение было выбрано эмпирически и может варьироваться в зависимости от характеристик сигнала [8].

Математически это можно выразить следующим образом:

$$\text{ФП} = (\text{ECG\_signal}(t), \text{ECG\_signal}(t+\Delta t)) \quad (1)$$

где  $\Delta t$  — задержка в отсчетах.

### С. Анализ данных ЭКГ сигналов

Для анализа реальных данных ЭКГ использовалась база данных MIT-BIH Arrhythmia Database [9], которая содержит записи ЭКГ пациентов с различными типами аритмий. На основе этих данных были построены фазовые портреты для различных сегментов ЭКГ, что позволило выявить характерные изменения, связанные с различными патологиями. Были выбраны сегменты ЭКГ, классифицированные авторами базы данных как нормальный ритм, и сегменты, классифицированные как VT (желудочковая тахикардия). Пример графика сегмента ЭКГ, классифицированного авторами базы данных как нормальный, и соответствующего ему фазового портрета показан на рис. 1–2. Пример графика сегмента ЭКГ, классифицированного как VT, и соответствующего ему фазового портрета показан на рис. 3–4.

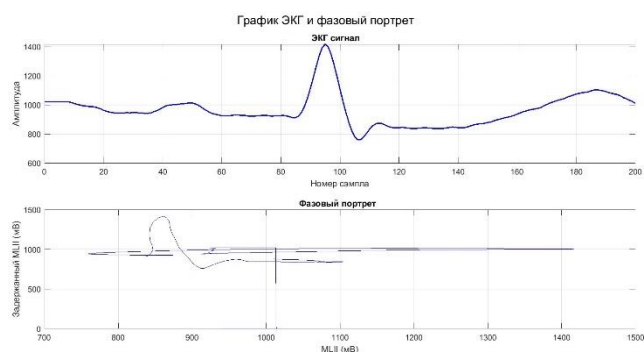


Рис. 1. График ЭКГ и ФП для первого фрагмента нормального сигнала

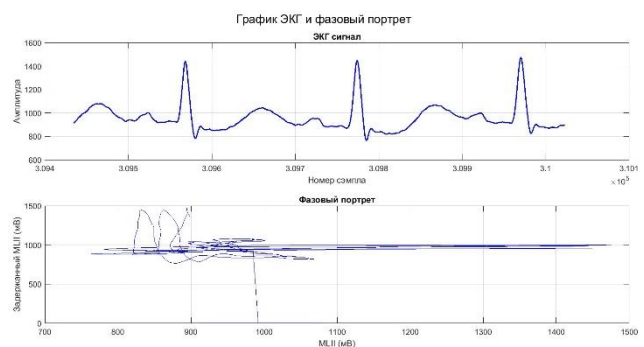


Рис. 2. График ЭКГ и ФП для второго фрагмента нормального сигнала

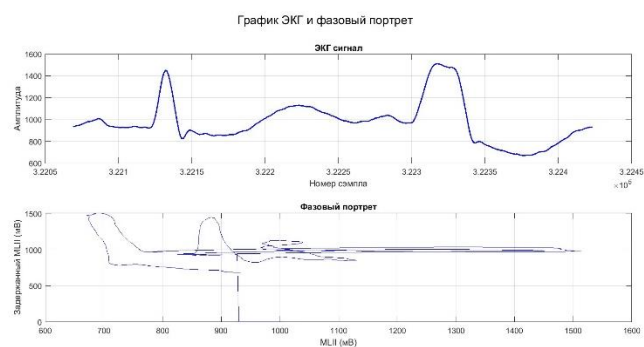


Рис. 3. График ЭКГ и ФП для первого фрагмента сигнала с патологией VT

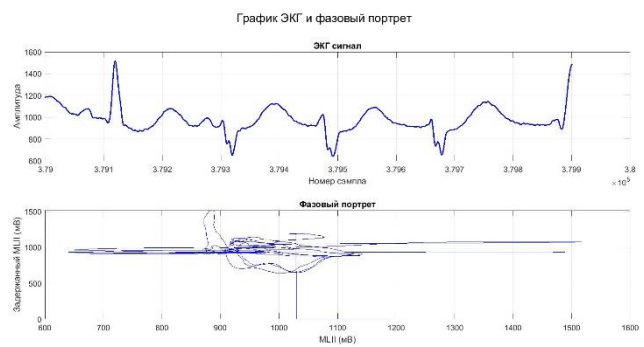


Рис. 4. График ЭКГ и ФП для второго фрагмента сигнала с патологией VT

#### D. Результаты анализа

Хаотичные или размытые контуры указывают на нестабильность сердечного ритма и патологические изменения. На фазовых портретах сигналов с VT эти изменения во внешнем виде фазового портрета более заметны по сравнению с фазовыми портретами нормального сигнала. На рис. 3–4 петли фазового портрета более фрагментированы. Хаотичность фазового портрета связана с тем, что при VT желудочки сокращаются с высокой частотой, что приводит к нарушению нормальной электрической активности сердца.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Результаты демонстрируют эффективность использования фазовых портретов для анализа сигналов ЭКГ, особенно в выявлении и визуализации патологических изменений в сердечной деятельности. Предложенный алгоритм построения фазовых портретов, реализованный в MATLAB, успешно генерирует фазовые портреты, которые наглядно иллюстрируют динамику сердечного ритма. Анализ реальных записей ЭКГ из базы данных MIT-BIH Arrhythmia Database выявил паттерны на фазовых портретах, связанные с нормальным ритмом и желудочковой тахикардией (VT).

Фазовые портреты нормальных сигналов ЭКГ (рис. 1–2) демонстрируют упорядоченные и стабильные контуры, отражающие регулярность электрической активности сердца. В то же время фазовые портреты сигналов ЭКГ с VT (рис. 3–4) показывают фрагментированные и хаотичные петли, что указывает на нестабильность и нерегулярность сердечного ритма при VT. Это визуальное различие соответствует физиологическому пониманию VT, при котором желудочки сокращаются с высокой частотой, нарушая нормальные пути электрической проводимости. Хаотичность фазового портрета в случаях VT является прямым отражением лежащей в основе патологии, что делает фазовые портреты ценным инструментом для диагностики и мониторинга таких состояний.

Способность фазовых портретов визуализировать сложные динамические процессы в сердечной деятельности имеет важное значение для клинической практики. Предоставляя четкое и интуитивно понятное представление сердечного ритма, фазовые портреты могут помочь клиницистам в раннем выявлении и диагностике сердечно-сосудистых заболеваний. Этот метод особенно ценен для идентификации аритмий,

ишемических изменений и сердечной недостаточности, которые часто трудно обнаружить с помощью традиционного анализа ЭКГ во временной области. Кроме того, интеграция фазовых портретов с методами машинного обучения, как показано в предыдущих исследованиях [2, 4], открывает перспективы для повышения точности диагностики и разработки автоматизированных диагностических инструментов.

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В будущем необходимо устранить существующие ограничения, чтобы полностью реализовать потенциал фазовых портретов в клинической практике. Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на: оптимизации выбора временной задержки и параметров вложения, валидации алгоритма на более крупных и разнообразных наборах данных, а также интеграции машинного обучения для улучшения диагностики. Решение этих задач позволит утвердить фазовые портреты как мощный инструмент для точной диагностики сердечных заболеваний и улучшения результатов лечения пациентов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Старченкова К.С., Манило Л.А. Выявление фетальной аритмии плода по неинвазивной ЭКГ с помощью анализа псевдофазового портрета // Материалы XXVII Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2024). 2024. С. 547–550.
- [2] Alwan M.A., et al. Identification of ECG arrhythmias using phase space reconstruction // Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. 2005. Pp. 5942–5945.
- [3] Banerjee S., Mitra M. A review on the nonlinear dynamical system analysis of electrocardiogram signal // J. Med. Syst. 2018. Vol. 42, no. 5. Pp. 1–15.
- [4] Osowski S., Markiewicz T. Using phase space reconstruction for patient independent heartbeat classification in comparison with some benchmark methods // Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Sci. Autom. Eng. 2011. Pp. 1–5.
- [5] Zhang Y., et al. A real-time QRS detection method based on phase portraits and box-scoring calculation // IEEE Access. 2018. Vol. 6. Pp. 4098–4104.
- [6] Martínez J.P., et al. Phase space reconstruction approach for ventricular arrhythmias characterization // Proc. IEEE Comput. Cardiol. 2007. Pp. 629–632.
- [7] Ghosh S.K., et al. Phase space reconstruction based CVD classifier using localized features // IEEE Access. 2019. Vol. 7. Pp. 137–155.
- [8] Georgiev G. Electrocardiographic signal modeling in a linear and vector plane // Proc. Int. Conf. Autom. Inform. 2020. Pp. 1–4.
- [9] Moody G., Mark R. MIT-BIH Arrhythmia Database // PhysioNet. 2005. URL: <https://physionet.org/content/mitdb/1.0.0/> (дата обращения: 01.03.2024).