

ИНФОРМАЦИОННОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
КРУПНОМАСШТАБНЫМИ ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.25728/mlsd.2023.346;

АНАЛИЗ ПОЧТИ-ПЕРИОДОВ ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Авхименко Г. М.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*  
geo76m@gmail.com

*Аннотация.* В данном докладе рассматривается анализ периодов вибрационного сигнала, взятого из общедоступного набора данных Machinery Fault Database (MAFAULDA). Приведен теоретический материал используемых методов для анализа периодичности во временном ряду. Дано определение почти-периода и описан математический аппарат сдвиговых функций для его поиска. Описаны исследование и поиск почти-периодов в вибрационном сигнале с применением сдвиговой функции.

*Ключевые слова:* обработка сигналов, вибродиагностика, почти-периоды.

**Введение**

Анализ вибрационных сигналов стал востребованной областью науки и техники в последние десятилетия. Это связано с развитием потребности в методах мониторинга состояний различных механизмов и агрегатов. Мониторинг состояния производится с целью раннего обнаружения процессов, ведущих к отказу и поломке агрегатов. Такой метод позволяет оптимизировать затраты на штатное техническое обслуживание, своевременно обнаружить неисправное состояние и принять меры к его устранению.

Для мониторинга состояния и раннего обнаружения неисправностей в подвижных агрегатах, таких как, электродвигатели, сервоприводы, насосы, ветрогенераторы, газовые и паровые турбины и т. д., часто используется анализ вибраций. Другое название этого комплекса методов - вибрационная диагностика. Данная область, как и другие методы технической диагностики, решает задачи поиска неисправностей и оценки технического состояния исследуемого объекта. В этой области на сегодняшний день существует множество методов, как обнаружения неисправного состояния, так и предобработки сигналов. Для вибродиагностики широко используются преобразование Фурье, Вейвлет-преобразование, их модификации, методы машинного обучения. Для применения алгоритмов машинного обучения необходимо поставить задачу и получить признаковое описание сигналов.

Постановок задачи существует две. Первая – это распознавание неисправного состояния, задача классификации. Она относится к классу задач обучения с учителем. Модель может обучиться на образцах сигналов исправного и неисправного состояния агрегата. То есть подразумевается, что существует конечный набор состояний агрегата, по которым можно заранее получить и обработать выборку сигналов. Это на практике не всегда возможно, так как требуется производить испытания партии исследуемых агрегатов с целью сбора данных. Вторая постановка задачи – это обнаружение аномалий. Она относится к классу задач обучения без учителя. Модель не получает на входе размеченную выборку из сигналов. Модель должна произвести распознавание во время редких данных, событий или наблюдений, которые вызывают подозрения ввиду существенного отличия от большей части данных. Главная причина сведения рассматриваемой проблемы именно к этой задаче: на практике основную часть времени оборудование работает в штатном режиме. Поломки выводят оборудование из этого режима: повышается температура отдельных узлов, понижается давление и т. п.

Для решения выше обозначенных задач существуют разные методы и алгоритмы. Для них нужно подготовить признаковое описание сигналов. Для этого существует ряд алгоритмов: преобразование Фурье, Вейвлет преобразование, спектральная плотность мощности, расчет статистических показателей и т. д. Они позволяют исследовать различные характеристики временных рядов (сигналов) и выявить наиболее пригодные признаки для классификации или выявления аномалий.

В данной работе представлено исследование периодов колебаний, составляющих сигнал. Для анализа применены методы, которые не основаны на предположении о виде колебаний, как

преобразование Фурье. Это позволяет определить наличие колебаний заданного периода в сигнале и после этого провести их сравнение.

## 1. Теоретическая часть

### 1.1. Предмет исследования

Предметом исследования в данной работе является вибрационный сигнал одного из акселерометров. В исследовании использован набор данных из открытых источников Machinery Fault Database (сокращенно MAFAULDA). Он содержит 1951 запись с восьми датчиков длительностью пять секунд. Данные были собраны в результате моделирования различных неисправностей на экспериментальной установке, содержащей электродвигатель, ротор, два подшипника и восемь датчиков. Один подшипник расположен между ротором и электродвигателем (в описании обозначен, как *underhang bearing*), другой подшипник расположен после ротора (в описании обозначен, как *overhang bearing*). Далее будем обозначать их, как подшипник до ротора и подшипник после ротора соответственно. Внешний вид установки представлен на рисунке 1.

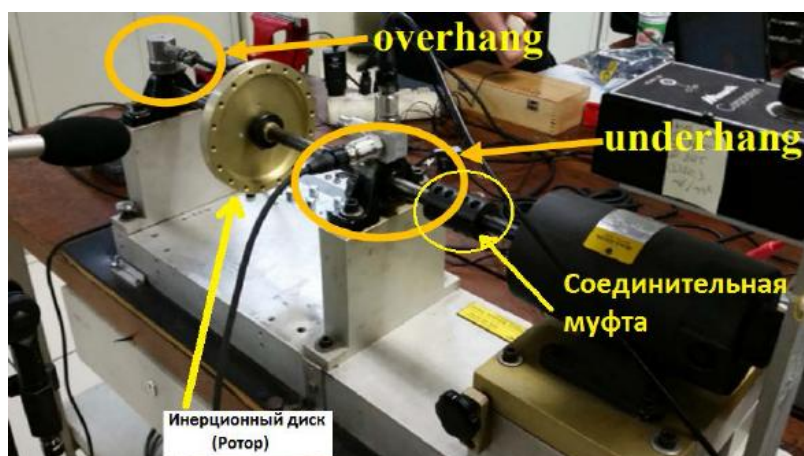


Рис. 1. Внешний вид установки

Для записи сигналов были использованы следующие датчики:

- Три акселерометра Model 601A01 (осевое, радиальное, тангенциальное направление) для записи вибраций подшипника до ротора
- Трёхосевой акселерометр Model 604B31 для записи вибраций подшипника после ротора
- Аналоговый тахометр Monarch Instrument MT-190 для снятия частоты вращений вала
- Микрофон Shure SM81 – для записи звука

Схема крепления датчиков представлена на рисунке 2. Ось X для акселерометра расположена параллельно валу двигателя. Ось Y направлена от наблюдателя (см. рисунок 2). Ось Z направлена вверх.



Рис. 2. Схема расположения датчиков

На данной установке смоделирован ряд неисправностей. Каждая из них смоделирована с разной частотой вращения вала, измеряемой количеством оборотов в минуту. Частота бралась в диапазоне от 737 до 3686 оборотов в минуту с шагом примерно в 60. Всего использовано 49 скоростей вращения. Перечень неисправностей с указанием количества записей дан в таблице 1.

Таблица 1. Перечень моделируемых неисправностей

Вид неисправности (состояния)	Количество записей
Нормальная работа (нет поломок)	49
Горизонтальное смещение вала	197
Вертикальное смещение вала	301
Дисбаланс ротора (с разной массой)	333
Подшипник до ротора	
Неисправность сепаратора (Cage fault)	188
Неисправность внешней обоймы (Outer race)	184
Неисправность шарика (Ball fault)	186
Подшипник после ротора	
Неисправность сепаратора (Cage fault)	188
Неисправность внешней обоймы (Outer race)	188
Неисправность шарика (Ball fault)	137

Источник: [https://www02.smt.uftrj.br/~offshore/mfs/page\\_01.html](https://www02.smt.uftrj.br/~offshore/mfs/page_01.html)

Подробное описание набора данных с учетом всех деталей сбора данных выходит за рамки данной работы. Поэтому необходимо дать пояснения по сигналам, которые были непосредственно исследованы. В данной работе проводится анализ трех сигналов следующих состояний:

- Нормальное состояние
- Дисбаланс ротора в 6 г
- Дисбаланс ротора в 35 г

При моделировании дисбаланса в ротор устанавливались грузы массой 6, 10, 15, 20, 25, 30, 35 граммов. Далее с грузом каждой массы моделировался дисбаланс с разной скоростью вращения. Процесс установки дисбаланса показан на рисунке 3.

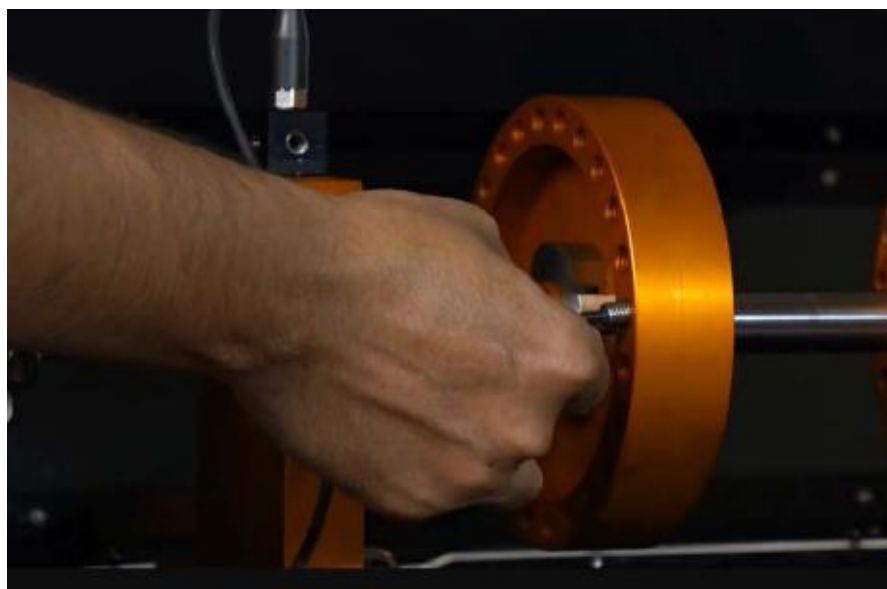


Рис. 3. Установка дисбаланса в ротор

Для анализа было выбрано по одному сигналу для каждой неисправности соответственно. Частота вращения была одинакова для всех трёх временных рядов.

В следующем разделе будет описан применяемый математический аппарат для анализа периодов в исследуемых временных рядах.

## 1.2. Определение почти-периода и методы его анализа

Периодические функции применяются в разных разделах прикладной математики. Основное свойство периода функции состоит в повторении значений через интервал изменения независимой переменной  $x$ , равный периоду  $\tau$  (формула (1)).

$$|f(x + \tau) - f(x)| = 0. \quad (1)$$

В реальных данных обычно имеют дело с нелинейными колебаниями, поэтому чистые периоды встречаются крайне редко. Поэтому при анализе выявляют значения, близкие к периодам. Они называются почти-периодами. Почти-периодической называется функция, значения которой при добавлении к аргументу надлежащим образом выбранных постоянных  $\tau$  приближённо повторяются:

$$|f(x + \tau) - f(x)| < \varepsilon. \quad (2)$$

Задача определения периодов колебаний во временном ряду  $Y$  с количеством наблюдений  $N$  решается следующим образом. Берется исследуемый период  $\tau$ . Далее из временного ряда берут две последовательности длиной  $N - \tau$ , называемых лагами. Далее при помощи различных функций близости оценивают их схожесть. В качестве функции близости обычно выступает коэффициент корреляции, измеряющий линейную связь между лагами. Явление, когда лаги сильно связаны между собой, называют автокорреляция.

Почти-периоды можно выявлять, используя их свойство из формулы (2). Для этого используется сдвиговая функция:

$$\alpha(\tau) = \frac{1}{N-\tau} * \sum_{t=1}^{N-\tau} |Y(t + \tau) - Y(t)|. \quad (3)$$

Она вычисляет среднее расстояние между наблюдением в точке  $t$  и наблюдением в точке  $t + \tau$ . В качестве функции близости здесь выступает метрика Минковского из функционального анализа:

$$\rho(X, Y) = \left( \sum_{k=1}^N (|X_k - Y_k|)^p \right)^{\frac{1}{p}}. \quad (4)$$

Чаще всего используются значения  $p$ , равные единице (расстояние городских кварталов) и двойке (Евклидова метрика). С учетом этого сдвиговая функция из формулы (3) примет вид:

$$\alpha(\tau) = \frac{1}{N-\tau} * \left( \sum_{t=1}^{N-\tau} (|Y(t + \tau) - Y(t)|)^p \right)^{\frac{1}{p}}. \quad (5)$$

То есть сдвиговая функция интерпретирует лаги, как точки в пространстве  $\mathbb{R}^{(N-\tau)}$  и вычисляет расстояние между ними, нормированное на размерность  $(N - \tau)$ .

В качестве функций близости можно рассматривать и другие меры сходства двух последовательностей чисел. Это могут быть нормы из метрического пространства, для которых выполняются свойства, такие как, условия неотрицательности, неравенство треугольника, аксиомы тождества и симметричности. Также можно использовать другие меры сходства с поведением отличным от нормы из метрического пространства. Самое главное, чтобы получаемые при анализе значения сдвиговой функции давали осмысленную интерпретацию поведения периодических компонент во временном ряду.

В практической части будет описан анализ трёх временных рядов, с применением сдвиговой функции (формула (3)).

## 2. Практическая часть

### 2.1. Анализ сигнала нормального состояния электродвигателя

Исходный сигнал нормального состояния представлен на рисунке 4. Из графика видно, что сигнал имеет периодические компоненты.



Рис. 4. График исходного сигнала

К исходному временному ряду была применена сдвиговая функция, результат представлен на рисунке 5. На нём отмечены заметные почти-периоды.

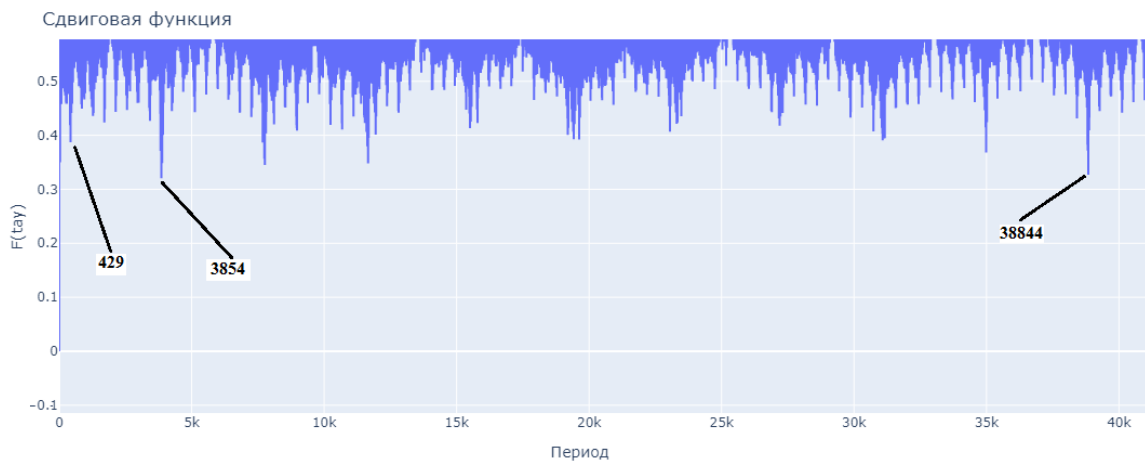


Рис. 5. График сдвиговой функции для исходного сигнала

Из графика видно, что визуальный анализ затруднителен из-за большого количества кратных почти-периодов. Для детализации почти периодов была произведена децимация (уменьшение частоты дискретизации) сигнала путём оставления каждого K-ого отсчёта. После этого преобразованному сигналу применялось сдвиговая функция. Пример применения для децимации с параметром представлен на рисунке 6.

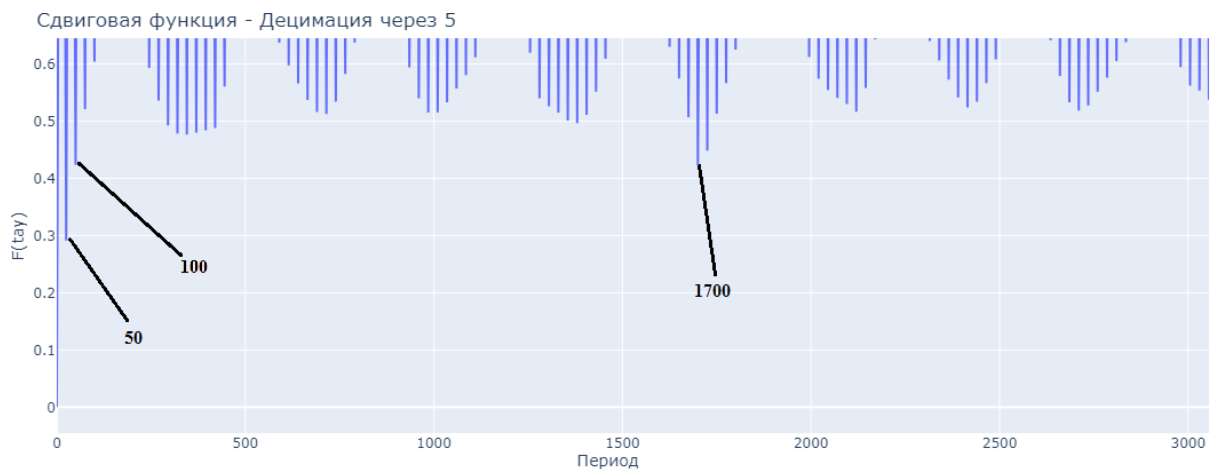


Рис. 6. График сдвиговой функции для сигнала с децимацией 5



Рис. 7. График сдвиговой функции для сигнала с децимацией 429

Децимация позволяет детализировать почти периоды большей величины (как на рисунке 7), а также те, которые менее заметны на сдвиговой функции исходного сигнала. Полученные почти-периоды перечисленные в таблице 2. Первый столбец - это параметр децимации. При равенстве параметра единице брался исходный сигнал. Второй столбец - это найденные почти-периоды, выраженные в количестве отсчетов. Далее найденные почти-периоды переводятся в секунды. Количество отсчетов умножается на частоту дискретизации (50 кГц или 0.00002 с).

Таблица 2. Перечень моделируемых неисправностей

Параметр децимации	Почти-периоды (количество отсчетов)
1	7, 9, 25, 429, 3854, 38844
2	34, 404, 438, 1700, 3854, 3888, 38844
3	9, 84, 429, 3879, 3888, 38844
4	16, 404, 1276, 1700, 38844
5	345, 1700, 11630, 11655, 34990
7	84, 833, 3829, 3913
8	16, 320, 488, 1296, 3888
11	429, 38819
429	42471
513	27189

Итого в сигнале нормального состояния работы были обнаружены почти-периоды (в секундах): 0.00014, 0.00018, 0.00032, 0.0005, 0.00068, 0.00168, 0.0064, 0.0069, 0.00808, 0.00858, 0.00876, 0.00976, 0.01666, 0.02552, 0.02592, 0.034, 0.07658, 0.07708, 0.07758, 0.07776, 0.07826, 0.2326, 0.2331, 0.54378, 0.6998, 0.77638, 0.77688, 0.84942.

Следующим был проанализирован сигнал состояния дисбаланса ротора в 6 г.

## 2.2. Анализ сигнала состояния «Дисбаланс ротора в 6 г»

Дисбаланс ротора вносит значительные изменения в вибрацию электродвигателя. Это видно на графике исходного временного ряда на рисунке 8.

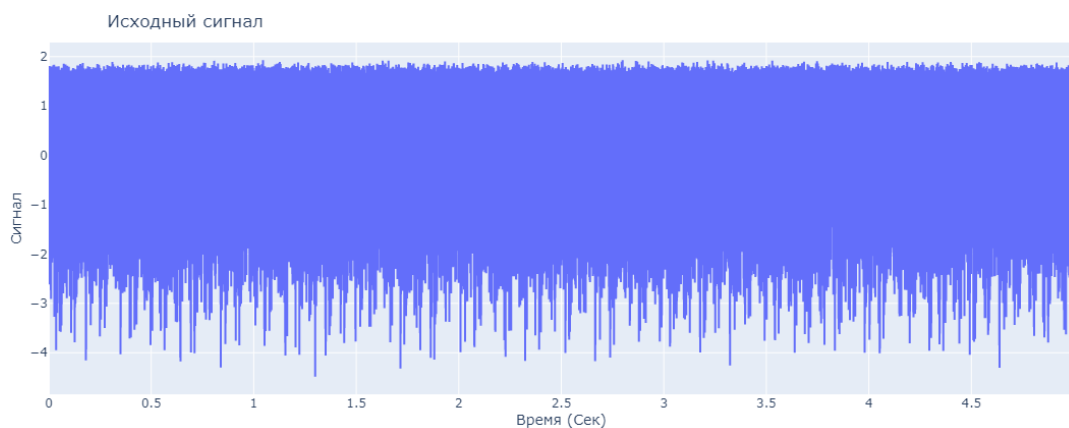


Рис. 8. График исходного сигнала

Для детализации почти-периодов к сигналу применялась децимация с параметрами 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 13, 19, 20, 25, 27, 40, 41, 43, 45, 270, 574. На рисунке 9 приведен график сдвиговой функции для исходного сигнала. Графики сдвиговых функций для сигналов разных состояний отличаются (для сравнения см. рисунок 5).

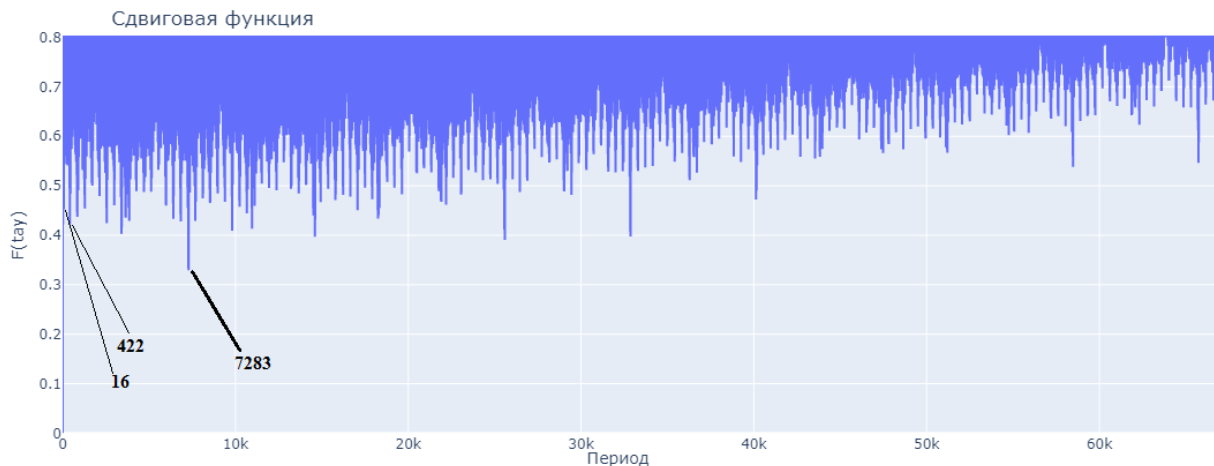


Рис. 9. Сдвиговая функция исходного сигнала

Для примера на рисунке 10 представлен график сдвиговой функции для сигнала с децимацией в 4.

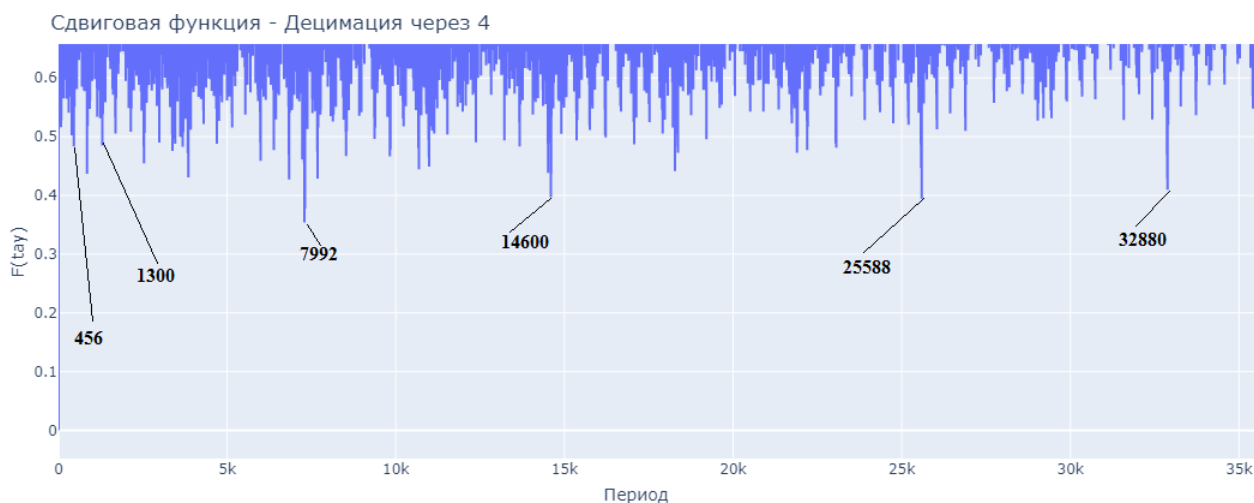


Рис. 10. График сдвиговой функции для сигнала с децимацией 4

Алгоритм нахождения почти-периодов и конвертации их в секунды такой же, как и в случае сигнала нормального состояния. Итого в сигнале состояния дисбаланса ротора в 6 г были обнаружены почти-периоды (в секундах): 0.00032, 0.00068, 0.00104, 0.00286, 0.00304, 0.00522, 0.0054, 0.00912, 0.00962, 0.01148, 0.01806, 0.02296, 0.02592, 0.026, 0.06802, 0.07714, 0.07758, 0.07776, 0.14498, 0.14516, 0.14534, 0.21318.

Следующим этапом является анализ сигнала состояния дисбаланса ротора в 35 г.

### 2.3. Анализ сигнала состояния «Дисбаланс ротора в 35 г»

Повышение дисбаланса ротора вносит более значительные изменения в вибрацию электродвигателя. Это видно на графике исходного временного ряда на рисунке 11 (для сравнения см. рисунок 8).

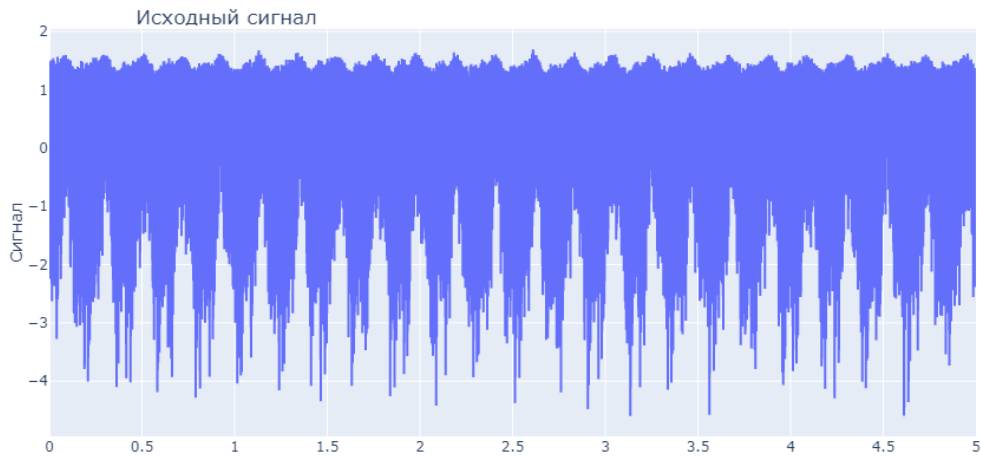


Рис. 11. График исходного сигнала

Для детализации почти-периодов к сигналу применялась децимация с параметрами 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 13, 19, 20, 25, 27, 40, 41, 43, 45, 270, 574. На рисунке 12 приведен график сдвиговой функции для исходного сигнала. Пример сдвиговой функции для сигнала с децимацией представлен на рисунке 13.

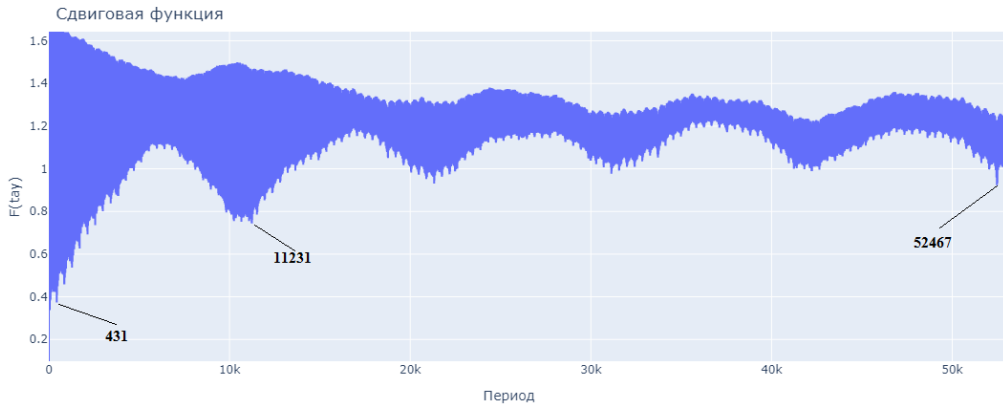


Рис. 12. График исходного сигнала



Рис. 13. График исходного сигнала

Алгоритм нахождения почти-периодов и конвертации их в секунды такой же, как и в случае сигнала нормального состояния. Итого в сигнале состояния дисбаланса ротора в 35 г были обнаружены почти-периоды (в секундах): 0.00068, 0.00844, 0.00862, 0.025, 0.0255, 0.20688, 0.2155, 0.216, 0.2209, 0.22462, 0.2248, 0.2284, 1.04934, 1.0669, 2.329.



## 2.4. Сравнение найденных почти-периодов

На рисунке 14 представлены почти-периоды сигналов нормального состояния и дисбаланса ротора в 6 г. Перед визуализацией набор почти-периодов каждого сигнала был отсортирован по возрастанию.

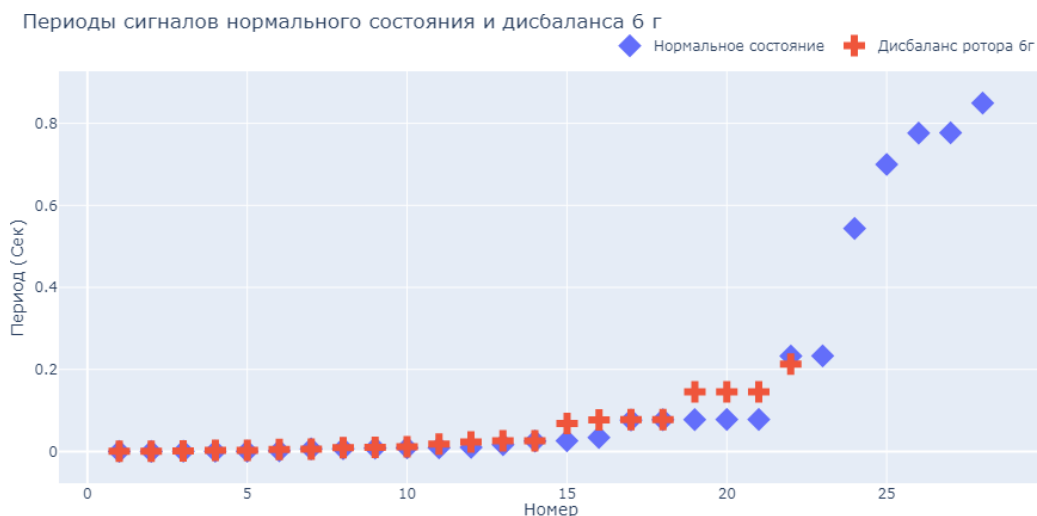


Рис. 14. График исходного сигнала

Из графика видно, что периоды на первых позициях достаточно близки по значению. Разница в наборе почти-периодов начинает проявляться с 15-го номера. Важное отличие сигнала дисбаланса заключается в том, что он имеет часть более длинных периодов, чем сигнал нормального состояния.

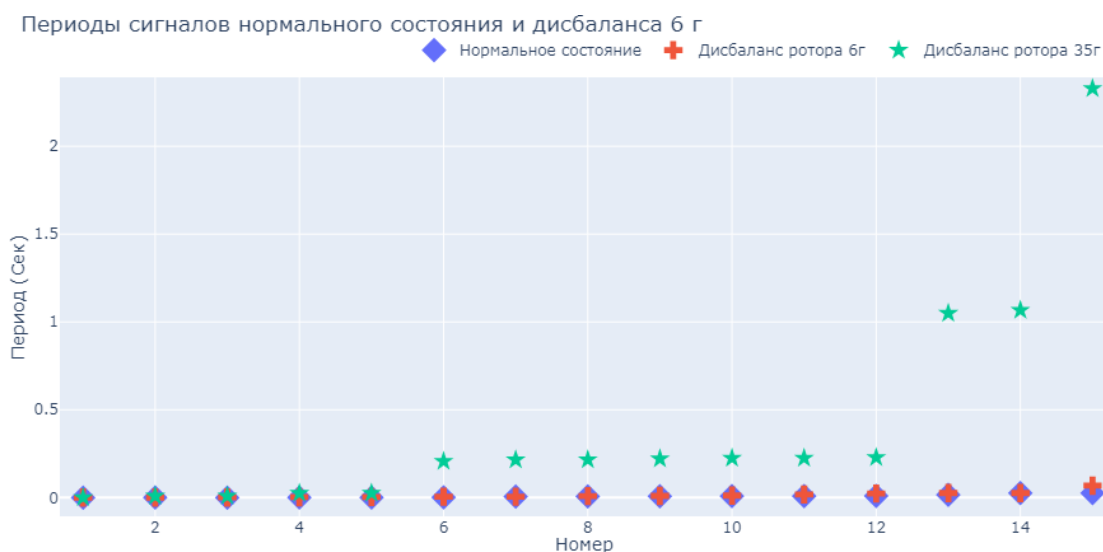


Рис. 15. График исходного сигнала

На рисунке 15 представлены наборы почти-периодов сигналов всех трёх состояний. Из графика видно отличие сигналов всех трёх состояний. Оно заключается в том, что при появлении дисбаланса ротора в сигнале появляются более длинные почти-периоды. С увеличением массы груза длительность почти-периодов увеличивается.

Основной вывод из сравнения наборов периодов заключается в том, что при дисбалансе ротора при вибрации по оси X период колебаний увеличивается. Информация о распределении длительностей периодов в сигнале может стать источником идей для создания признаков при решении задач обнаружения аномалий или классификации.

## 3. Заключение

При помощи аппарата сдвиговых функций был произведен анализ почти-периодов в трёх вибрационных сигналах разных состояний работы электродвигателя. Получены характерные наборы

почти-периодов для каждого состояния. Эти данные могут использоваться для построения диагностических признаков.

Один из возможных вариантов признаков для сигнала - это набор периодов, отсортированный по возрастанию. Из рисунков 14 и 15 видно, что периоды на одинаковых местах отстают друг от друга. То есть в данном пространстве признаков сигналы будут отличаться и разные состояния возможно распознавать.

Но у поиска почти-периодов методом сдвиговых функций имеется следующий недостаток. Процесс анализа трудно автоматизировать, то есть свести к пошаговому алгоритму. Поскольку поиск почти-периодов заключается в анализе локальных минимумов сдвиговой функции. При этом если во временном ряду присутствует период  $\tau$ , то по свойству периодических функций в ряду будет фигурировать и период, кратный  $\tau$ . Это делает визуальный анализ графика сдвиговой функции более трудоёмким. Необходимо разработать алгоритм, который будет учитывать глубину минимумов функции и отсеивать кратные периоды.

## Литература

1. *Кузьмин В. И.* Методы построения моделей по эмпирическим данным / В.И. Кузьмин, А.Ф. Гадзаов. – М.: МГТУ МИРЭА, 2012. – 96 с.
2. *Кузьмин В. И.* Дискретность и непрерывность в свойствах физико-химических систем / В.И. Кузьмин, А.Ф. Гадзаов, Д.Л. Тытик, М.А. Абатуров. – М.: Физматлит, 2013. – 191 с.
3. *Кузьмин В.И.* Подход к анализу ритмов в кардиологии // Клиническая физиология кровообращения. 2008. № 1. – С. 5–10.