

Использование быстрого преобразования Фурье для анализа сигналов электропоезда «Сапсан»

С. Г. Подклетнов

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

podklet@yandex.ru

Аннотация.

Цель: Рассмотреть вопрос о необходимости улучшить выявление признаков дефектов электропоезда «Сапсан» на ранних стадиях. Разработать и усовершенствовать методы тестовой и функциональной диагностики поездов. Предложить методы цифровой обработки сигналов. Разработать правильную интерпретацию результатов обработки сигналов.

Методы: Применяется метод цифровой обработки сигналов преобразования Фурье. Показана возможность его успешного применения для обработки сигналов. Указана необходимость совершенствования параметров данной методики.

Результаты: Показано успешное применение преобразования Фурье для анализа стационарных сигналов.

Практическая значимость: преобразование Фурье позволяет успешно выявлять изменение характера колебаний. Метод преобразования Фурье прост в использовании.

Ключевые слова: преобразование Фурье, быстрое преобразование Фурье, цифровая обработка сигналов, транспортные сигналы.

Для цитирования: Подклетнов С. Г. Использование быстрого преобразования Фурье для анализа сигналов электропоезда «Сапсан» // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 6. С. 58–64. doi: 10.32603/2071-8985-2024-18-6-58-64.

Original article

Using Fast Fourier Transform to Analyze Signals of the Sapsan Electric Train

S. G. Podkletnov

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

podklet@yandex.ru

Abstract.

Objective. To consider the need to improve the detection of signs of defects in the Sapsan electric train at an early stage. To develop and improve methods of test and functional diagnostics of trains. To propose methods of digital signal processing. Develop a correct interpretation of the signal processing results.

Methods. The digital signal processing method is applied: Fourier transforms. The possibility of its successful application for signal processing is shown. The need to improve the parameters of this technique is indicated.

Results. The successful application of the digital signal processing method: Fourier transforms – for the analysis of stationary signals is shown.

Practical. The Fourier transform successfully allows us to detect a change in the nature of the oscillations. The Fourier transform method is easy to use. Today, the most common method of digital signal processing is the Fourier transform method due to its technical simplicity and a longer period of technical use. This article should confirm the success of the technical application of the Fourier transform and its variant Fast Fourier transform.

Keywords: Fourier transform, Fast Fourier transform, digital signal processing, transport signals

For citation: Podkletnov S. G. Using Fast Fourier Transform to Analyze Signals of the Sapsan Electric Train // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 6. P. 58–64. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-6-58–64.

Введение. Методы цифровой обработки сигналов используются сейчас в самых разных областях – от обработки изображений и различных видов медицинской диагностики до задач обработки данных космического масштаба. Для грамотного использования методов цифровой обработки сигналов и правильной интерпретации их результатов нужно представлять, «что внутри?» [1]. Рассмотрим вариант цифровой обработки сигналов на примере транспортных сигналов от высокоскоростного поезда «Сапсан». Для цифровой обработки сигналов выберем Фурье-преобразование и его разновидность – быстрое преобразование Фурье (БПФ). В 1994 г. Гилберт Стрэнг охарактеризовал БПФ как «самый важный численный алгоритм нашего времени», и он был включен в список 10 лучших алгоритмов XX в. [1], [2].

Преобразование Фурье разлагает функции по другому базису ортонормированных функций. Берется такой набор функций, в котором скалярное произведение двух разных функций равно 0, норма каждой функции или функционал, заданный на векторном пространстве, равен 1, или другими словами вектор в N -мерном пространстве просто раскладывается по базису функций, исходя из свойств разлагаемой функции. Тригонометрические функции с разными частотами в сумме дают любую периодическую функцию. Тем самым мы определяем все частоты, встречающиеся в данной функции, и делаем полный амплитудно-частотный анализ функции. Большинство сигналов, как правило, имеют периодические пространственные структуры: звук, радиосигналы и др.

При обычной обработке приходилось бы сканировать все частоты или весь диапазон частот, а это неточно и долго, да и для образца такие интенсивные облучения могут быть бесполезны.

На физическом приборе это можно показать так – подается импульс, а потом измеряется его отклик. Фурье-преобразование разлагает его на некоторую сумму гармоник. Гармоники представляются в виде частотного спектра гармоник, т. е. как резонансный спектр, снятый на данном приборе.

Постановка задачи. Провести цифровую обработку транспортных сигналов от высокоско-

ростного поезда «Сапсан» с помощью быстрого преобразования Фурье с целью использования в дальнейшем результатов для тестовой и функциональной диагностики поездов.

1. Выбор сигналов для обработки. Сначала проанализируем конкретную задачу и ее возможное эффективное решение.

Исторически первым было предложено разложение сигнала на синусоиды или косинусоиды (гармоники).

Для решения хорошо подходят сигналы с дискретным временем, которые могут принимать конкретные значения только в определенные моменты. Конкретные требования задач исследования требуют выбора сигналов для преобразования Фурье.

Преобразование Фурье позволяет получить из временной зависимости сигнала его частотные компоненты, или спектр сигнала. Сигнал разлагается на синусоиды или гармоники с различными частотами.

Само преобразование Фурье в чистом виде используется редко, применяется его аналог, значительно более быстрый алгоритм – быстрое преобразование Фурье (БПФ).

БПФ работает эффективнее за счет:

- 1) использования для аппроксимации первых членов разложения;
- 2) выбора эффективного математического алгоритма;
- 3) использования только простых операций типа операций сложения.

Пример разложения по гармоникам сигнала показан на рис. 1 (кривая 1 – дополнительная гармоника, большая частота и небольшая амплитуда; кривая 2 – основная гармоника, небольшая частота и большая амплитуда сигнала; кривая 3 – итоговая сумма гармоник, видна аппроксимация прямоугольного сигнала).

Добавление новых гармоник сигнала и улучшенная аппроксимация сигнала показаны на рис. 2 (кривая – третье слагаемое в сумме гармоник; прямая – более точное описание прямоугольного сигнала).

По оси абсцисс показано время снятия сигнала, по оси ординат – значение амплитуды сигнала ($S(t)$).

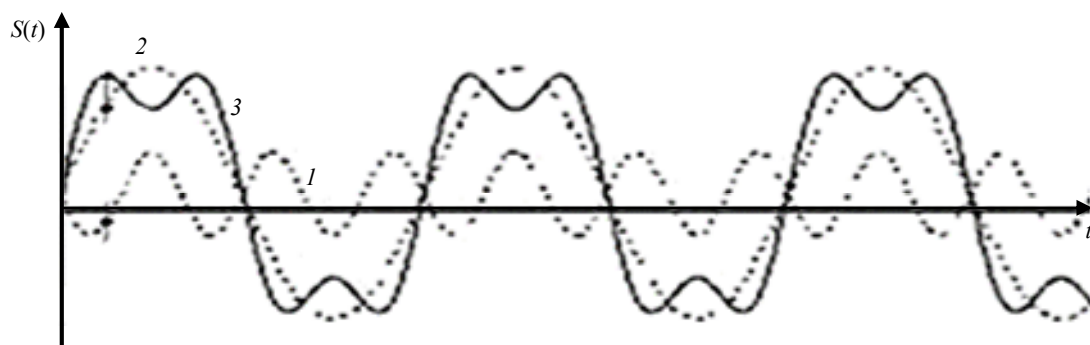


Рис. 1. Гармоники сигнала
Fig. 1. Harmonics of the signal

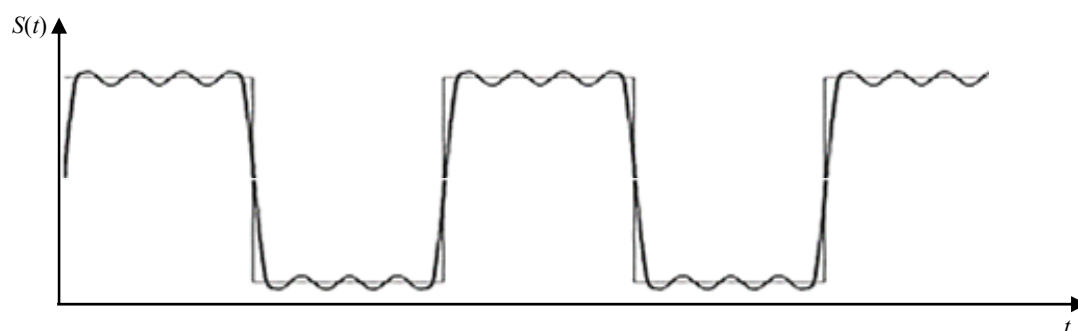


Рис. 2. Добавление новой гармоники к сумме гармоник, представленных на рис. 1
Fig. 2. Adding the fifth harmonic to the sum of the harmonics shown in fig. 1

В результате БПФ значительно ускоряет весь процесс расчетов. Отдельные составляющие дискретного преобразования Фурье могут быть вычислены с помощью алгоритма Гертцеля или перестановки с обращением битов [2]. Если сравнивать эти методы преобразования, то можно наблюдать существенные различия в скорости вычислений сигналов. Аргументы функции БПФ – временные отсчеты из элементов, кратные степени 2, т. е. в результате получаются массивы действительной и мнимой частей преобразования Фурье длиной 2^n . Для БПФ, в отличие от простого преобразования Фурье, входной сигнал должен быть периодичным с интервалом 2^n . Использование свойств симметрии предложили Дж. В. Кули и Дж. В. Тьюки в [2] в 1965 г. Время обработки стало значительно меньше за счет рекурсии и симметрии вычислений [3].

БПФ – это хороший метод для вычислений при небольшом расходе памяти. Он позволяет по амплитудным отсчетам во временной области реконструировать амплитудный и фазовый спектры сигнала в частотной области

Алгоритм быстрого преобразования Фурье имеет дело с обратимыми вычислениями и обладает следующими особенностями и проблемами:

1. Разрешающая способность, своего рода «дискретная пикселизация» наподобие гистограммы.

2. Если частоты не попадают точно на деления дискретной частотной решетки, то возникает растекание информации по столбикам гистограммы.

Проблема 1 связана с интерполяцией сигнала во временной и одновременно в частотной областях. Для сигналов с незначительными шумами подобная проблема невозможности одновременного получения точного результата в двух областях существует, но во многих ситуациях можно получить вполне надежные и приемлемые результаты вычислений.

Проблема 2 связана с погрешностью метода и необходимостью исправлять и дополнять формулы в процессе решения.

2. Подготовка к обработке преобразованием Фурье сигнала электропоезда «Сапсан».

После успешных испытаний, проведенных в 2009 г., электропоезд «Сапсан» был допущен к использованию на РЖД. Предметом исследования в данной статье служит предоставленный ОАО РЖД сигнал электропоезда «Сапсан», состоящий из 577 точек. Программа для обработки написана на языке СИ++. Применяются прямое и обратное преобразования Фурье. Для дальнейшей обработки быстрым преобразованием Фурье сигнал необходимо подготовить, выбрав необходимый его диапазон. Поскольку метод БПФ работает только с числами, кратными степени 2, т. е. 2^n

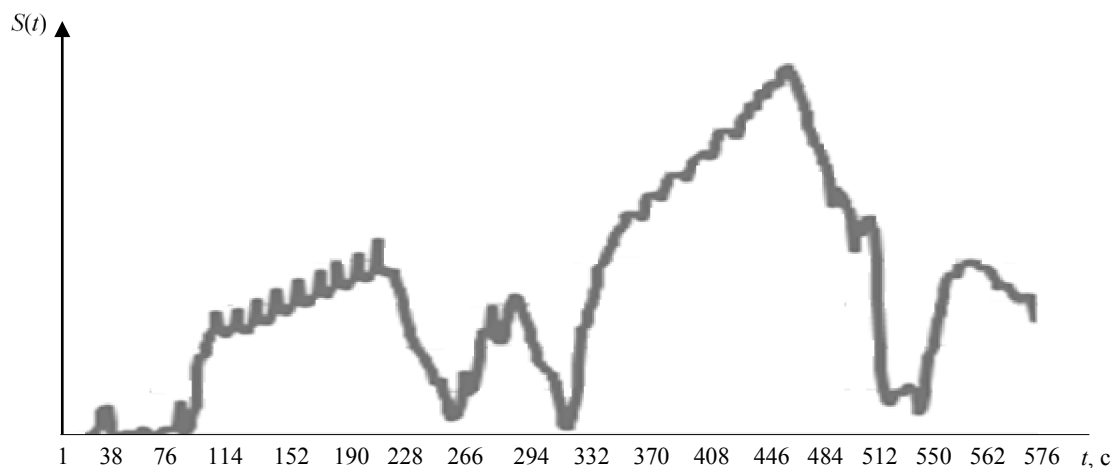


Рис. 3. Исходный массив из 577 точек
 Fig. 3. The original array of 577 points

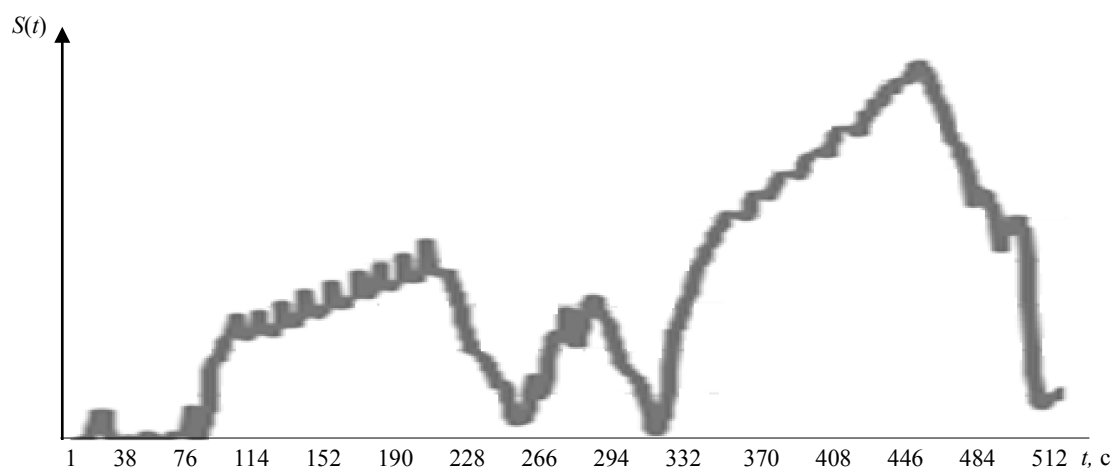


Рис. 4. Выбранный массив для обработки из 512 точек
 Fig. 4. Selected array for processing 512 points

[5], из предложенного ОАО РЖД массива из 577 точек использовались первые 512 точек (в этом случае показатель степени n равен 9).

Графики исходного и используемого массивов показаны на рис. 3 и 4 соответственно (изменение амплитуды сигнала ($S(t)$) в зависимости от времени).

3. Характеристика сигналов. Все сигналы можно разделить на:

- 1) периодические;
- 2) непериодические.

Периодические, в свою очередь, делятся на два больших класса:

- а) гармонические,
- б) негармонические.

Гармонический сигнал – это сигнал, который можно разложить на синусоиды или описать следующей функцией:

$$y = A (\sin wt + f),$$

где A – амплитуда сигнала; w – циклическая частота; f – начальная фаза.

Гармонический сигнал можно успешно обрабатывать преобразованием Фурье, что мы и используем в настоящей задаче.

4. Прямое и обратное преобразования Фурье для сигнала. Для обработки сигналов электропоезда «Сапсан» используются прямое и обратное преобразования Фурье. Преобразованием Фурье называется совокупность операций, позволяющих находить спектральную характеристику $F(i_\omega)$ по заданной функции FFT.

Преобразование Фурье разлагает сигнал, заданный на отрезке $\{0, T\}$ (T – означает период), на сумму бесконечного ряда тригонометрических функций или синусоид либо косинусоид с определенными амплитудами и фазами, также рассматриваемых на том же отрезке $\{0, T\}$ [4]. Такой ряд называется рядом Фурье.

shortFFT – это функция быстрого преобразования Фурье FFT:

shortFFT(short intdir, longqm, double $\cdot$ x double y).

Параметры функции:

x – массив *real* – действительные числа,

y – массив *imaginary* – мнимые числа (функция FFT имеет дело только с комплексными числами).

При запуске функции FFT все четные числа входного массива поступают в качестве мнимого массива (Im), а нечетные – действительного (Re).

После запуска функции FFT для каждой гармоники рассчитываются параметры: $A = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2}/n$; $f = \arctan(\text{Im}/\text{Re})$.

На языке C++ эти выражения вычисляются с использованием следующих функций:

$$A = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2}/n,$$

$$f = \arctan2(\text{Im}/\text{Re}).$$

Умножая переменную t на некоторый коэффициент $2p/T$, мы растягиваем график по горизонтали, увеличивая период до T , значение амплитуды сигнала в этом случае будет

$$A = 2(\sin 2\pi t/T).$$

Сигналы для обработки снимаются в виде функции времени и после дискретного преобразования Фурье в виде набора частот направляются на цифровую обработку [5].

Применяя дискретное преобразование Фурье, получаем $n = 257$ или $n/2 + 1$ пар коэффициентов $\text{Re}[n]$, $\text{Im}[n]$ из 512 последовательных значений амплитуды сигнала.

Преобразование Фурье в итоге получает амплитуды, фазы и частоты: $n/2$ частоты и отдель-

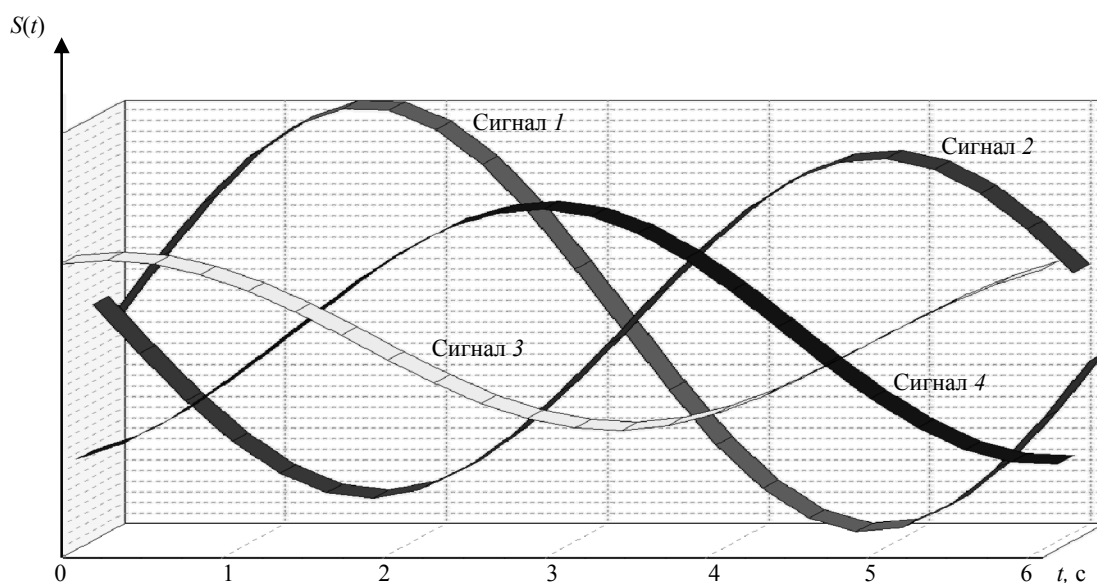


Рис. 5. Гармоники обрабатываемого сигнала
Fig. 5. Harmonics of the processed signal

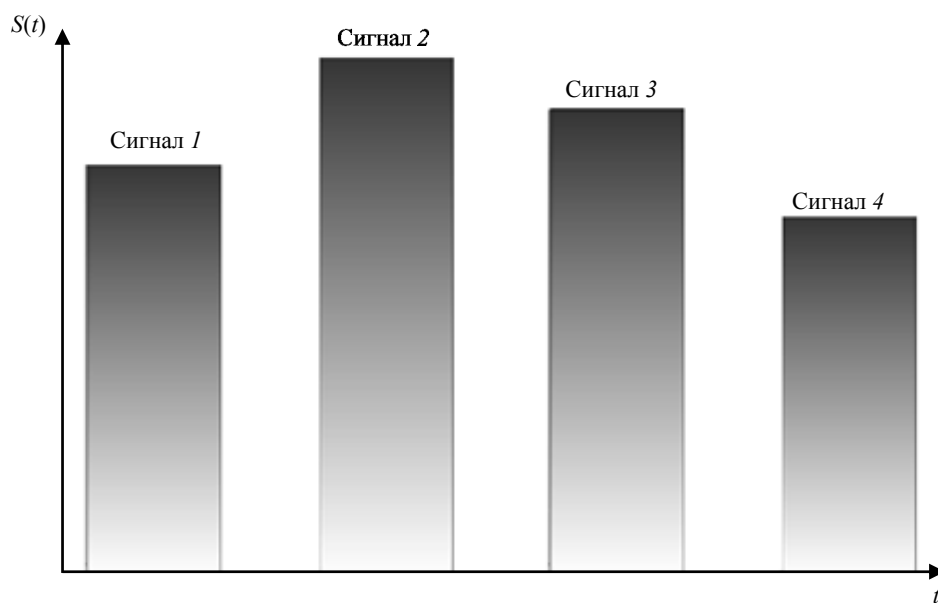


Рис. 6. Спектр обрабатываемого сигнала
Fig. 6. The spectrum of the processed signal

ные частоты с амплитудами $A[n]$ и фазами $f[n]$ из N значений амплитуд.

5. Итоговая обработка сигнала. Данные ($2^9 = 512$ значений) скомпилированы в 200 Гц. Требуется получить частотное разложение. В результате у нас получаются синусоиды с частотами 200, 400, 600, 800 Гц и т. д. Нулевая гармоника прибавляется при обратном преобразовании и здесь не учитывается.

Исходный сигнал таким образом разлагается на синусоиды и частоты.

Взяв 512 отсчетов после преобразования Фурье получим 256 частот, шаг между ними составляет 200 Гц. Изобразим начальные значения четырех сигналов на рис. 5. По оси абсцисс показано время снятия сигнала в секундах, по оси ординат – значение амплитуды сигнала.

Итоговый спектр обрабатываемого сигнала показан на рис. 6. По оси абсцисс показано время снятия сигнала. По оси ординат значение амплитуды сигнала в сантиметрах. Градациями серого показаны значения частоты сигнала в герцах: белый цвет – 0; максимальные значения частот сигнала: 80 – для первого сигнала, 100 – для второго, 90 – для третьего, 70 – для четвертого.

6. Обсуждение результатов. Проведенная обработка сигналов от поезда «Сапсан» подтверждает тот факт, что транспортные сигналы могут быть успешно обработаны достаточно несложным быстрым преобразованием Фурье. Полученные частоты сигнала или спектр обрабатываемого

сигнала после обработки показывают частоты сигнала без существенного дефекта конструкции электропоезда. Результаты можно в дальнейшем использовать для тестовой и функциональной диагностики поездов. Следует отметить, что смысл быстрого преобразования Фурье состоит в том, что дискретный сигнал – это сумма синусоид, которая вычисляется обратным преобразованием Фурье, а параметры каждой синусоиды – прямым преобразованием Фурье [6].

Закключение. Если вы имеете дело только с выраженными стационарными процессами, то преобразования Фурье или быстрого преобразования Фурье вполне достаточно для обработки сигналов. Компьютер за минимальное время обработает сигналы с помощью анализа Фурье. Обработка транспортных сигналов вполне подходит под этот вид анализа. Данная статья подтверждает успешность технического применения быстрого преобразования Фурье. Рекомендованная область применения данного вида обработки – это обработка несложных видов сигналов. Более сложные виды цифровой обработки транспортных сигналов, например вейвлет-анализ, – применяются для обработки транспортных сигналов с более ярко выраженной нестационарностью. Процессы, протекающие в данных сигналах, имеют, как правило, сложный математический характер, и спектр вычислительного процесса очень сильно меняется с течением времени.

Список литературы

1. Dongarra J., Sullivan F. Guest Editors Introduction to the top 10 algorithms // *Comp. in Sci. & Engin.* 2000. Vol. 2. P. 22–23. doi: 10.1109/MCISE.2000.814652.
2. Cooley J. W., Tukey J. W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series // *Math. of Computation.* 1965. Vol. 19, no. 90. P. 297–301.
3. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов / пер. с англ. И. И. Глушко. М.: Мир, 1989. 448 с.

4. Макаров А. В. Применение алгоритма быстрого преобразования Фурье в широкополосных системах радиомониторинга // *Молодой ученый.* 2021. № 50 (392). С. 31–33.
5. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток / пер. с англ. Ю. Ф. Касимова, И. П. Пчелинцева; под ред. В. М. Амербаева, Т. Э. Кренкеля. М.: Радио и связь, 1985. 248 с.
6. Харкевич А. А. Спектры и анализ, 4-е изд. М.: ЛКИ, 2007. 236 с.

Информация об авторе

Подклетнов Сергей Георгиевич – канд. техн. наук, доцент кафедры вычислительной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Email: podklet@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6617-5901>

References

1. Dongarra J., Sullivan F. Guest Editors Introduction to the top 10 algorithms // *Comp. in Sci. & Engin.* 2000. Vol. 2. P. 22–23. doi: 10.1109/MCISE.2000.814652.

2. Cooley J. W., Tukey J. W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series // *Math. of Computation.* 1965. Vol. 19, no. 90. P. 297–301.

3. Blejhut R. Bystrye algoritmy cifrovoj obrabotki signalov / per. s angl. I. I. Glushko. M.: Mir, 1989. 448 s. (In Russ.).

4. Makarov A. V. Primenenie algoritma bystrogo preobrazovaniya Fur'e v shirokopolosnyh sistemah radio-monitoringa // Molodoj uchenyj. 2021. № 50 (392). S. 31–33. (In Russ.).

5. Nussbaumer G. Bystroe preobrazovanie Fur'e i algoritmy vychisleniya svjortok / Per. s angl. Ju. F. Kasimova, I. P. Pchelinceva; pod red. V. M. Amerbaeva, T. Je. Krenkelja. M.: Radio i svjaz', 1985. 248 s. (In Russ.).

6. Harkevich A. A. Spektry i analiz, 4-e izd. M.: LKI, 2007. 236 s. (In Russ.).

Information about the author

Sergei G. Podkletnov – Cand. Sci. (Eng.), Assistant of the Department of Computer Engineering of the Saint Petersburg Electrotechnical University

Email: podklet@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6617-5901>

Статья поступила в редакцию 13.02.2025; принята к публикации после рецензирования 29.05.2025; опубликована онлайн 30.06.2025.

Submitted 13.02.2025; accepted 29.05.2025; published online 30.06.2025.
