

## Оценка рисков возникновения акустической неустойчивости в камере сгорания РДТТ

*Р.А. Сидорец*

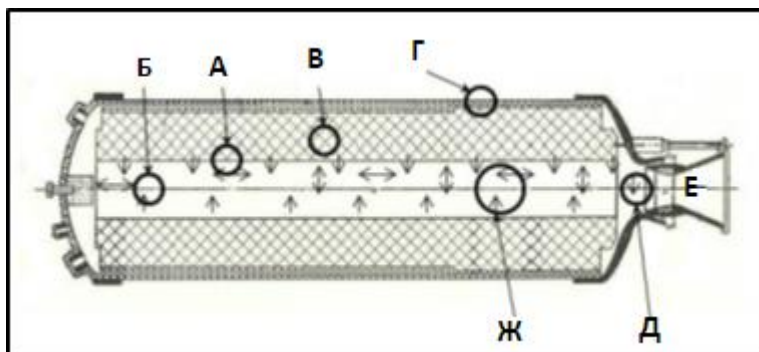
Московский физико-технический институт (государственный университет)

ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ)

### 1. Введение

Данная работа посвящена исследованию спектрального состава акустической неустойчивости рабочего процесса в РДТТ, разработке алгоритма анализа результатов измерений, а также оценке рисков возникновения акустической неустойчивости в камере сгорания РДТТ. Оценка риска включает анализ вероятности (или частоты), анализ последствий и их сочетания.

Повышение энергомассовых характеристик РДТТ в том числе за счёт применения перспективных высокоэнергетических безметалльных топлив требует детального анализу работы РД на режимах акустической неустойчивости [4]. В этих условиях возрастает роль теоретических и экспериментальных исследований. Внутри КС РД происходят сложные нестационарные волновые многофазные процессы течения продуктов сгорания. Схематично механизм акустического взаимодействия в колебательной системе, которой является РДТТ, приведен на рис. 1. Факторы, воздействующие на устойчивость работы РДТТ, обозначены буквами.



Факторы, воздействующие на устойчивость РДТТ: А - поверхность горения, связывающая давление и скорость газа; Б - тепловое излучение; В - вязкоупругие потери в топливе; Д - демпфирование в газовой полости, в том числе на частицах, вязкотермическое затухание, релаксационное затухание, остаточные химические реакции в потоке; Г-демпфирование стенками корпуса камеры сгорания; Е - демпфирование соплом; Ж - акустические источники турбулентного газового потока (обтекание конструктивных элементов, взаимодействие газовых потоков, вихреобразование и др. процессы в формировании потока газа по проточной части камеры сгорания).

Одна из проблем работы РДТТ - неустойчивость рабочего процесса течения продуктов сгорания в объеме КС. Более чем за пятидесятилетний период исследований в этом направлении актуальность проблемы не уменьшилась. Более того, в связи с разработкой РДТТ нового поколения с высокими энергомассовыми, эксплуатационными и другими характеристиками актуальность проблемы обострилась. Возникла острая необходимость в оценке и прогнозировании возможности возникновения рисков образования акустической неустойчивости в КС.

В КС РДТТ могут возникать регулярные колебания давления с частотой, близкой к собственной частоте колебаний газа в КС, и с нарастающей по времени амплитудой (которая может стабилизироваться на некотором уровне). Такой вид нестационарности (акустическая неустойчивость процесса течения продуктов сгорания в РДТТ) связан с возбуждением звуковых волн в КС.

Неустойчивость процесса течения продуктов сгорания в РД является автоколебательным процессом изменения рабочих параметров, количественные параметры которых выходят за установленные пределы. Неустойчивость процесса течения в РДТТ ухудшает внутрибаллистические характеристики РД, способствует возникновению демаскирующих шумов, способна вывести из строя бортовую аппаратуру и разрушить сам двигатель.

Это объясняется, прежде всего, сложностью процесса горения и течения продуктов сгорания в объеме КС. Камера сгорания РДТТ, как любой газовый объем, обладает характерными колебательными модами. В совокупности с прогрессивной по давлению плотностью тока продуктов сгорания это может приводить к установлению в камере сгорания автоколебательного процесса с конечной амплитудой. Данные колебания являются нежелательным явлением в работе РДТТ, так как могут приводить к превышению

внутрикамерного давления над расчётным, а также потенциально вызвать резонанс во вспомогательных системах двигателя и ракеты.

Ввиду несовершенства конструкции датчиков, снимающих значение напряжения, для этой области характерна проблема зашумленности получаемого на выходе графика функции  $P(t)$ .

Одной из важных задач, которую необходимо решать при обработке цифровых сигналов является фильтрация помех. Эта задача трудно разрешима, когда частотный спектр помех близок или совпадает со спектром частот полезного сигнала. Использование цифровых фильтров в таком случае приводит к искажению полезной составляющей сигнала, что может быть нежелательно. Для цифрового периодического сигнала произвольной формы с широкополосными помехами данная проблема может быть разрешена с помощью метода преобразование спектра функции, полученного с помощью Быстрого Преобразования Фурье (БПФ).

Будем понимать под цифровой фильтрацией такое преобразование сигнала, при которой связь между входной и выходной последовательностями является линейной.

С помощью фильтрации решают многочисленные задачи, возникающие на практике, в том числе:

- подавление шумов, маскирующих сигнал;
- устранение искажения сигнала, вызванного несовершенством канала передачи или погрешностью измерения;
- разделение двух или более различных сигналов, которые были преднамеренно смешены для того, чтобы в максимальной степени использовать канал;
- разложение сигналов на частотные составляющие;
- ограничение полосы частот, занимаемой сигналами.

Фильтрацию можно представить, как процесс изменения частотного спектра сигнала в некотором желаемом направлении. Этот процесс может привести к усилению или ослаблению частотных составляющих в некотором диапазоне частот, к подавлению или выделению какой-либо конкретной частотной составляющей и т.п.

Основным этапом в решении данной проблемы является разработка математической модели алгоритма, который бы позволил осуществить анализ частотных характеристик конструктивных элементов РДТТ, а также анализ вероятности (или частоты)

возникновения акустической неустойчивости в процессе выгорания топливного заряда, с последующим удалением побочных частот.

## **Глава 1. Постановка задачи**

### **1.1.1 Цель работы**

Цель работы — провести исследование спектрального состава пульсаций давления в камере РДТТ и разработать алгоритм анализа результатов измерений пульсаций давления.

### **1.1.2. Задачи**

- Выявить помехи, создаваемые внешними источниками, и удалить их без потери данных из имеющегося спектра. Иными словами, избавиться от помех, имея функцию  $P'(t)$ , получить функцию  $P(t)$ , наиболее близкую к истинной.
- Произвести подавление шумов, маскирующих сигнал, а также устранить искажение сигнала, вызванного несовершенством канала передачи или погрешностью измерения
- Разделить различные сигналы, которые были преднамеренно смешены, разложить сигнал на частотные составляющие.

### **1.1.3 Исходные данные**

Данные о рабочем процессе в РДТТ могут быть получены при его огневом стендовом испытании. При этом среди прочих измерений происходит запись давления в ряде точек газового тракта. С точки зрения анализа акустической неустойчивости особый интерес представляет давление вблизи переднего и заднего дна камеры двигателя, где располагаются пучности давления первой моды продольных колебаний. Измерения выполняются с частотой дискретизации, которая по теореме Найквиста должна как минимум вдвое превышать частоту физического процесса. Так как тарировочные характеристики датчиков как правило линейные, то в качестве исходных данных может выступать не собственно давление, а первичная информация опроса датчиков, например, напряжение. С выхода датчика снимается напряжения с частотой дискретизации порядка

100 Гц. Затем по напряжению вычисляется давление. На практике возникают помехи (связанные как с конструкцией датчика, так и с влиянием случайных факторов), вследствие чего давление, рассчитанное по выходному сигналу  $P_2 = kU$ , отличается от истинного давления  $P$ .

## 1.2. Обзор литературы

В данном разделе описан ряд работ, подтверждающих существование проблемы существования акустической неустойчивости в РДГТ.

Так в работе [3], не обнаруживалось неустойчивости при испытании модельных двигателей (половина длины и четверть длины камеры натурального двигателя для сокращения расходов), однако, впоследствии, при испытании натуральных двигателей после увеличения размеров частиц для получения желаемой скорости горения возникли сильные продольные колебания.

Были предложены некоторые изменения геометрии двигателя, которые не привели к устранению неустойчивости. Было выдвинуто два предложения

- 1) уменьшение размеров частиц алюминия;
- 2) тщательная очистка камеры сгорания от потенциальных источников неустойчивости, чтобы избежать генерации колебаний при их прохождении через сопло.

Полностью неустойчивость работы двигателя удалось устранить при использовании мелкодисперсного алюминия (в итоговой компоновке содержание алюминия было увеличено с 10% до 14,5: 10% 10 мкм, 4,5% 35 мкм). В дальнейшем с неустойчивостью не сталкивались. Продольная многочастотная неустойчивость сопровождалась значительным увеличением среднего давления (3447378 паскалей), а также колебания свыше 2757902 паскалей в размахе от пика до пика.

С неустойчивым горением сталкивались в многочисленных испытаниях оригинального двигателя MANPADS во время спада. Колебания достигали давления 12410563 паскалей в размахе от пика до пика с характеристической частотой 700 Гц. Для устранения неустойчивости было взято топливо из другой программы. Новое топливо содержало 18 % алюминия, перхлорат аммония с бимодальным распределением (два пика) и увеличенным содержанием твердой фазы.

На этом топливе наблюдалась более высокая амплитуда колебаний, давление более чем на 100% превышало уровень давления на разгонном этапе. Колебания с частотой 700 Гц продолжались и на марше. Таким образом, смена топлива была шагом назад. Топливо было опять изменено: уменьшена доля алюминия (16%), трехвершинное распределение для перхлората аммония, также вернулись к 86% заправке топлива. Только пять двигателей с последними изменениями были испытаны при температуре от  $-40^{\circ}$  до  $+60^{\circ}$ , при этом не наблюдалось никакой неустойчивости на разгонной фазе, Истинные механизмы обеспечения устойчивости до сих пор не определены.

В течение всего периода эксплуатации ракетный двигатель на твердом топливе (РДТТ) испытывает воздействие механических и тепловых нагрузок, различающихся характером нагружения, продолжительностью и интенсивностью. Механические нагрузки определяются давлением внутри камеры; тягой; силами и моментами, действующими со стороны внешней среды и летательного аппарата; массовыми силами и инерционными нагрузками (диссипацией энергии конструктивных элементов РДТТ); вибрациями и др. Тепловые нагрузки обусловлены суточным и сезонным изменением температуры окружающей среды; изменением температуры в технологическом процессе изготовления топливного заряда; кинетическим нагревом в процессе полета ракеты; тепловым ударом при резком изменении температуры внешней среды и др. Большая часть перечисленных механических и тепловых нагрузок, как правило, определяется при разработке общей компоновки ракеты и указывается в техническом задании на разработку двигателя. Серьезную опасность для бортовой аппаратуры и силовых элементов ракеты, а также для элементов конструкции двигателя представляют неустойчивые колебания давления и тяги РДТТ.

В работе [5] отмечается, что на практике могут возникать различные колебательные процессы с изменяющимися во времени частотами и амплитудами. Аналитическая оценка реальных процессов неустойчивых автоколебаний представляет значительную трудность, так как отсутствие полных представлений о механизме возбуждения автоколебаний затрудняет разработку строгих математических моделей. Проблемы вызывают необходимость учета нестационарности многих процессов внутри камеры, изменение объема и геометрии камеры при выгорании заряда, неоднородность продуктов сгорания в объеме камеры, переменность массы заряда, колебания стенок камеры двигателя и т. д. Таким образом, возникает необходимость оценивать и учитывать диссипацию энергии

конструктивных элементов РДТТ. Даже незначительные пульсационные повышения давления у поверхности горения усиливают тепловой поток к поверхности заряда, вызывая увеличение скорости горения, что, в свою очередь, ведет к новому повышению давления и увеличению скорости горения.

Высокочастотная неустойчивость РДТТ проявляется в виде акустических колебаний со значительными, соизмеримыми с уровнем рабочего давления в камере амплитудами и частотами различных мод, появляющимися, исчезающими и возникающими вновь. Часто это сопровождается временным увеличением средней скорости горения топлива. Камера двигателя работает как резонатор, обладающий рядом различных резонансных частот, и потому может реагировать на любые малые возмущения, если приход акустической энергии при виброгорении топлива будет превышать потери этой энергии в камере сгорания.

## Глава 2. Разработка алгоритма решения задачи

### 2.1. Общая структура модели

Так как процесс периодический, с постоянной частотой, в данной задаче предлагается использовать анализ спектра сигнала для удаления помех. Основная идея в том, чтобы определить частоту процесса  $p_0$ , и принять составляющие спектра, частота которых существенно отличается от  $p_0$ , за помехи, и удалить их.

Сигнал ( $P_2(t)$ ) и спектр ( $A(n)$ ) будут храниться в виде таблицы значений. Для получения спектра предлагается использовать преобразование Фурье, для восстановления функции по изменённому спектру – обратное преобразование Фурье.

Для устранения помех предлагается применить несколько методов.

- **Удаление частот.** Имея спектр, как вектор значений  $A(n)$ , удаляем некоторые частоты. Например, т.к. сигнал имеет частоту порядка  $10^3$  Гц, можно удалить низкие частоты, ниже 100 Гц, просто положив для них  $A=0$ . Для полученного массива  $A$  запустить обратное преобразование Фурье и получить новую функцию  $P(t)$ . Этот метод предлагается сделать ручным: пользователь указывает, какие частоты необходимо удалить, и видит, как в результате меняется сигнал.
- **Использование цифровых фильтров.** Этот метод помогает эффективно бороться с высокочастотными помехами, амплитуда которых меньше, чем амплитуда полезного сигнала. Можно использовать, например, фильтр Баттерворта [2]. При этом, частоту полезного сигнала можно узнать с помощью преобразования Фурье.
- **Кластерный анализ.** Этот метод устраняет широкополосные помехи, если они имеют место на отрезке сигнала. Суть метода состоит в сравнении соседних участков сигнала, отстоящих друг от друга на расстоянии, кратном периоду процесса. Подробно метод изложен в [1].



## 2.2 Предполагаемый подход

### 2.2.1 Быстрое Преобразование Фурье

На входе имеем график некоторой функции, в которой имеются помехи с определенной частотой. Имеется два основных метода избавления от шумов — сглаживание самой функции и преобразование спектра.

В программе используется преобразование спектра функции, полученного с помощью Быстрого Преобразования Фурье (БПФ)

Прямое преобразование:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N}kn} \quad k = 0, \dots, N - 1$$

Обратное преобразование:

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{2\pi i}{N}kn} \quad n = 0, \dots, N - 1$$

### 2.2.2. Расчет нерекурсивных цифровых фильтров при помощи методов взвешивания.

Также одним из наиболее эффективных и простых подходов при расчете нерекурсивного ЦФ сводится к получению импульсной характеристики конечной длины путем усечения импульсной характеристики бесконечной длины.

Фильтр, полученный путем простого усечения числа отсчетов импульсной характеристики, в нашем случае не применим, из-за явления Гиббса. АЧХ такого фильтра имеет выбросы и пульсации большого уровня до и после точки разрыва аппроксимируемой частотной характеристики.

Возможным вариантом решения сложившейся проблемы является способ устранения влияния явления Гиббса посредством взвешивания исходной функции при помощи оконной функции  $w(n)$ .

Оконная функция является симметричной функцией, медленно спадающей к краям. Центральной отсчет оконной функции нормируется к единице. Так как все оконные

функции являются симметричными относительно  $n = (N - 1)/2$ , то ФЧХ фильтра оказывается линейной.

В нашем случае будет уместно применить наиболее часто используемую оконную функцию – прямоугольное (равномерное) окно.

Прямоугольное окно соответствует простому усечению ряда Фурье. Оно описывается функцией

$$w(n) = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq N - 1, \\ 0, & n < 0 \text{ и } n \geq N. \end{cases}$$

### 2.2.3. Алгоритм Быстрого Преобразование Фурье

```
public static Complex[] fft(Complex[] x)//faster realization FFT
{
    Complex[] X;
    int N = x.Length;
    //Решение для входного массива из 2-х элементов
    if (N == 2)
    {
        X = new Complex[2];
        X[0] = x[0] + x[1];
        X[1] = x[0] - x[1];
    }
    else
    {
        //Разбиваем входной массив на 2 массива - с четными и нечетными
        индексами
        Complex[] x_even = new Complex[N / 2];
        Complex[] x_odd = new Complex[N / 2];
        for (int i = 0; i < N / 2; i++)
        {
            x_even[i] = x[2 * i];
            x_odd[i] = x[2 * i + 1];
        }
    }
}
```

```

    }

    //Для каждого из которых рекурсивно вызываем FFT
    Complex[] X_even = fft(x_even);
    Complex[] X_odd = fft(x_odd);

    //На основе полученного преобразования для массивов с четными
    и нечетными индексами вычисляем спектр исходного массива

    X = new Complex[N];

    for (int i = 0; i < N / 2; i++)
    {
        X[i] = X_even[i] + w(i, N) * X_odd[i];
        X[i + N / 2] = X_even[i] - w(i, N) * X_odd[i];
    }
}

return X;
}

```

Анализ частотного спектра сигнала основан на Дискретном Преобразовании Фурье (ДПФ). В данной программе предполагается реализация алгоритма Быстрого Преобразования Фурье (БПФ). Данный алгоритм принимает на вход значения дискретной функции и вычисляет ДПФ. Преобразование раскладывает сигнал на синусоидальные составляющие (которые называются гармониками) с частотами от  $N$  колебаний за период до одного колебания за период. Поскольку частота дискретизации сама по себе равна  $N$  отсчётов за период, то высокочастотные составляющие не могут быть корректно отображены — возникает муаровый эффект. Это приводит к тому, что вторая половина из  $N$  комплексных амплитуд, фактически, является зеркальным отображением первой и не несёт дополнительной информации.

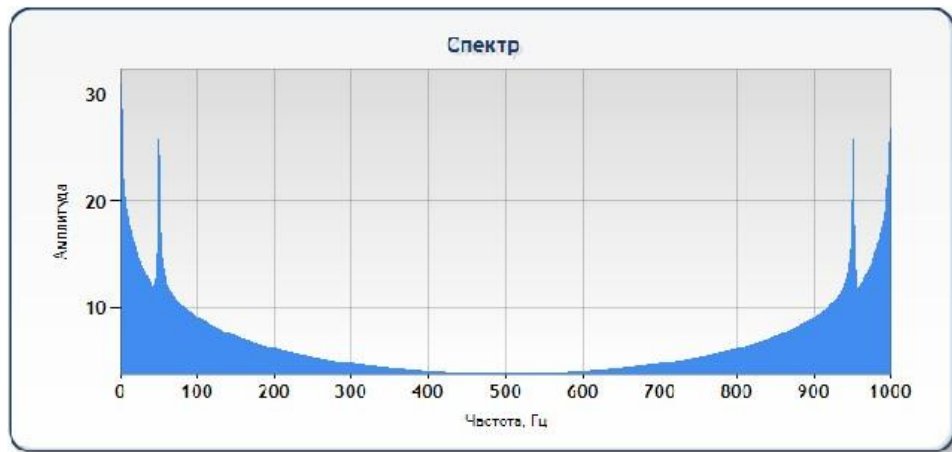


Рисунок 2. Зеркальное отображение комплексной амплитуды

Дискретное преобразование Фурье является линейным преобразованием, которое переводит вектор временных отсчётов  $\vec{x}$  в вектор спектральных отсчётов той же длины. Таким образом преобразование может быть реализовано как умножение симметричной квадратной матрицы на вектор:

$$\vec{X} = \hat{A}\vec{x}$$

матрица  $\hat{A}$  имеет вид:

$$\hat{A} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & e^{-\frac{2\pi i}{N}} & e^{-\frac{4\pi i}{N}} & e^{-\frac{6\pi i}{N}} & \dots & e^{-\frac{2\pi i}{N}(N-1)} \\ 1 & e^{-\frac{4\pi i}{N}} & e^{-\frac{8\pi i}{N}} & e^{-\frac{12\pi i}{N}} & \dots & e^{-\frac{2\pi i}{N}2(N-1)} \\ 1 & e^{-\frac{6\pi i}{N}} & e^{-\frac{12\pi i}{N}} & e^{-\frac{18\pi i}{N}} & \dots & e^{-\frac{2\pi i}{N}3(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & e^{-\frac{2\pi i}{N}(N-1)} & e^{-\frac{2\pi i}{N}2(N-1)} & e^{-\frac{2\pi i}{N}3(N-1)} & \dots & e^{-\frac{2\pi i}{N}(N-1)^2} \end{pmatrix}$$

Реализация алгоритма БПФ отличается от непосредственного вычисления преобразования тем, что вычисление результата матричного умножения имеет сложность  $O(n^2)$ , и тем самым не применимо к большим массивам входных данных.

В результате упрощений, обозначив ДПФ четных индексов через (англ., even — четный) и ДПФ нечетных индексов через (англ., odd — нечетный), для получаем:

$$\begin{aligned} X_m &= E_m + e^{-\frac{2\pi i}{N}m} O_m \\ X_{m+\frac{N}{2}} &= E_m - e^{-\frac{2\pi i}{N}m} O_m \end{aligned}$$

Данная запись является базой алгоритма Кули-Тьюки с основанием 2 для вычисления БПФ. То есть ДПФ от вектора, состоящего из  $N$  отсчетов, приведено к линейной композиции двух ДПФ от  $\frac{N}{2}$  отсчетов, и если для первоначальной задачи требовалось  $N^2$  операций, то для полученной композиции  $\frac{N^2}{2}$  (за счет повторного использования промежуточных результатов вычислений  $E_m$  и  $O_m$ ). Если  $N$  является степенью двух, то это разделение можно продолжать рекурсивно до тех пор, пока не дойдем до двухточечного преобразования Фурье, которое вычисляется по следующим формулам:

$$\begin{cases} X_0 = x_0 + x_1 \\ X_1 = x_0 - x_1 \end{cases}$$

При рекурсивном делении ДПФ от входных значений на сумму 2 ДПФ по входным значениям сложность алгоритма становится равной  $O(N \log(N))$ .

#### 2.2.4. Интерполяция спектрального распределения

Линейная интерполяция — интерполяция алгебраическим двучленом  $P_1(x) = ax + b$  функции  $f$ , заданной в двух точках  $x_0$  и  $x_1$  отрезка  $[a, b]$ . В случае, если заданы значения в нескольких точках, функция заменяется кусочно-линейной функцией.

Геометрически это означает замену графика функции  $f$  прямой, проходящей через точки  $(x_0, f(x_0))$  и  $(x_1, f(x_1))$ .

Уравнение такой прямой имеет вид:

$$f(x) \approx y = P_1(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} (x - x_0)$$

Это и есть формула линейной интерполяции, при этом

$$f(x) = P_1(x) + R_1(x)$$

где  $R_1(x)$ — погрешность формулы.

## Глава 3. Верификации

### 3.1. Функция с наложенным синусоидальным шумом.

Так как у нас помехи определенной частоты, то оперируя полученным спектром мы можем убрать гармоники шума, тем самым сгладив сигнал.

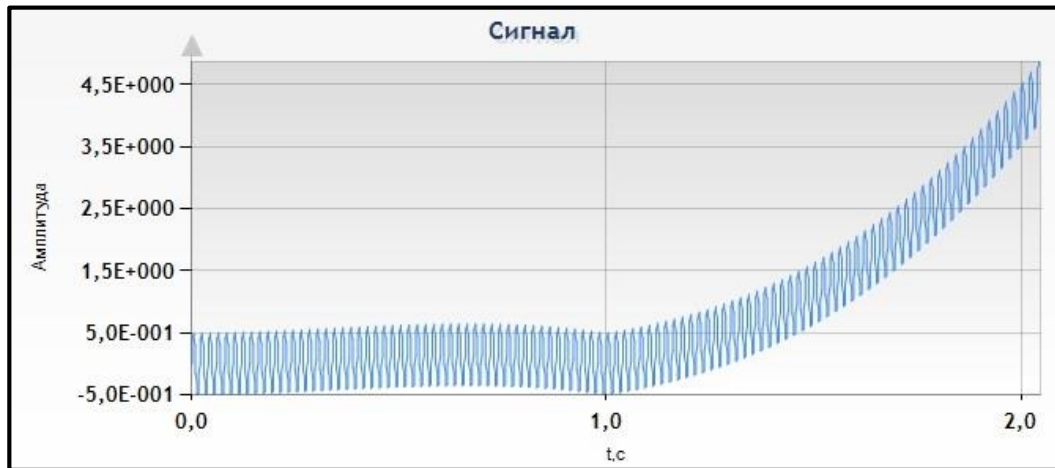


Рисунок 3 График параболы с наложенным синусоидальным шумом.  $y = x^2 - x^3 + 0.5 * \sin(100 * \pi * x)$

После разложения исходного сигнала, получаем спектр следующего вида:

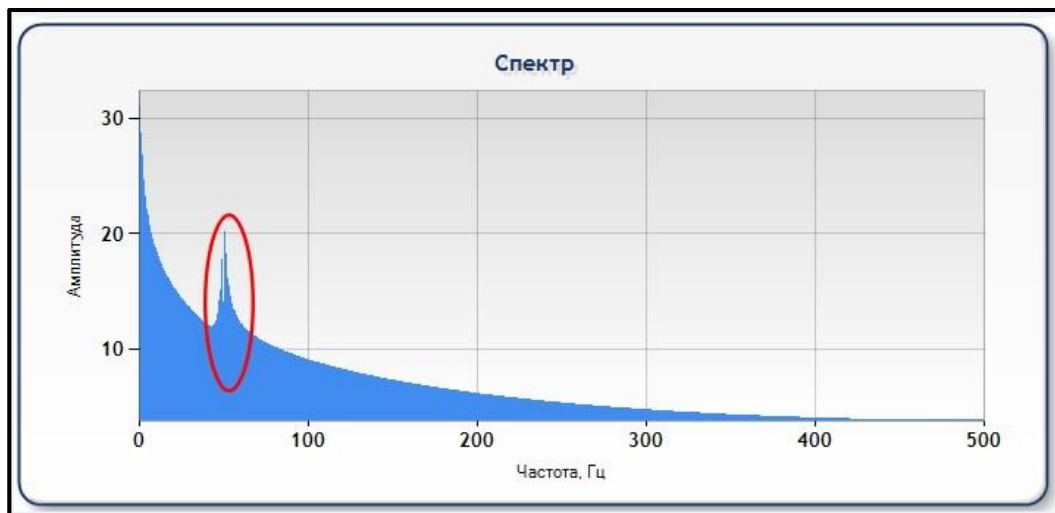


Рисунок 4 Спектр данного графика в логарифмическом масштабе, выделена гармоника шума

После линейной интерполяции той части спектра, в которой были гармоники шума, восстанавливается приблизительный вид спектра исходной функции, после чего применяется обратное БПФ.

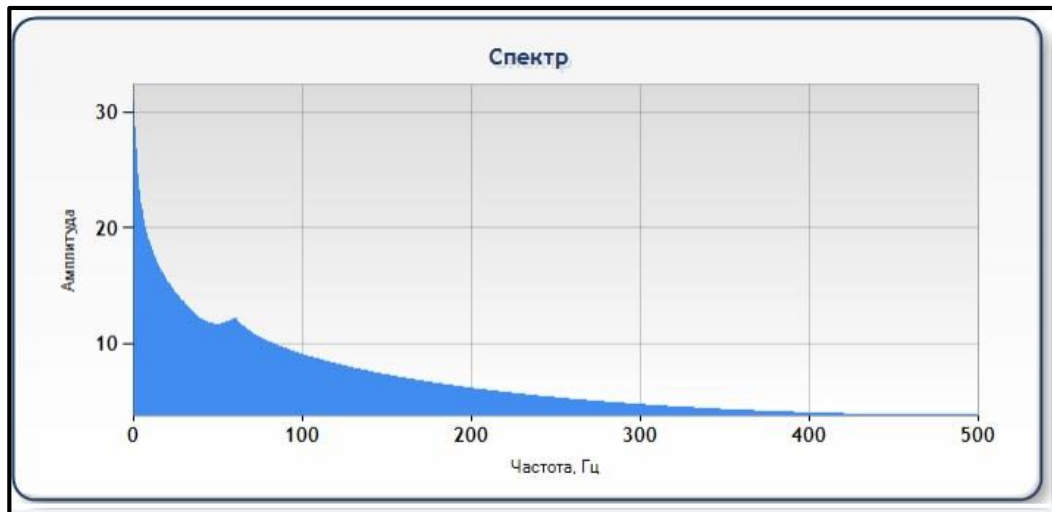


Рисунок 5 График спектра, после линейной интерполяции выделенного фрагмента. (Примечание: в логарифмическом масштабе прямая выглядит как логарифм).

В результате получаем график функции:

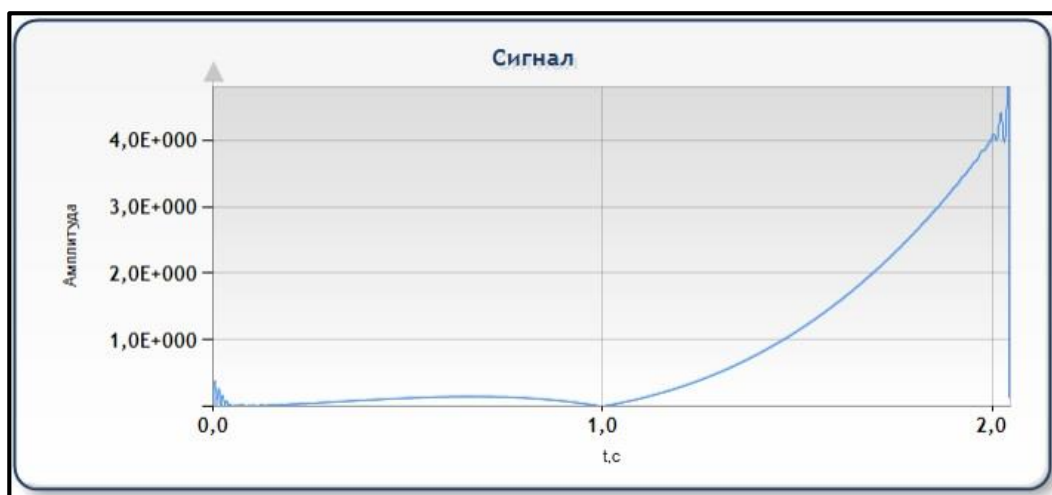
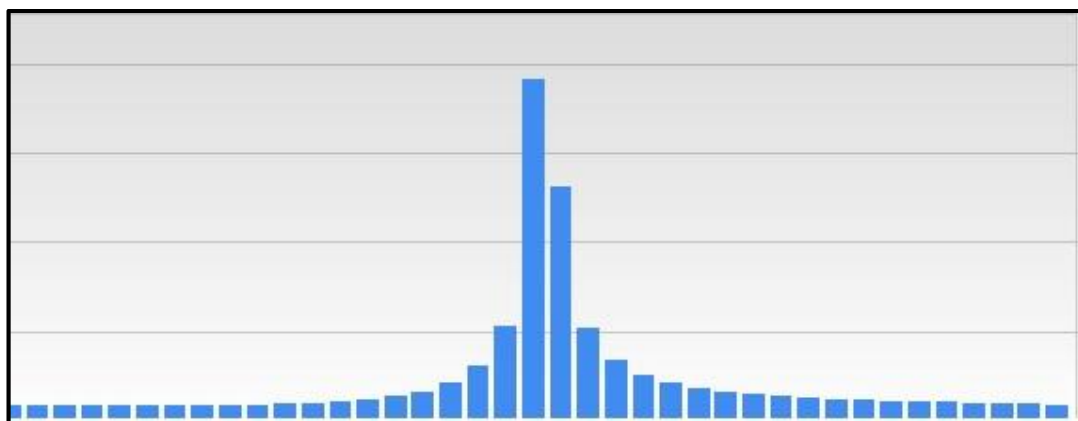


Рисунок 6 График функции после применения алгоритма



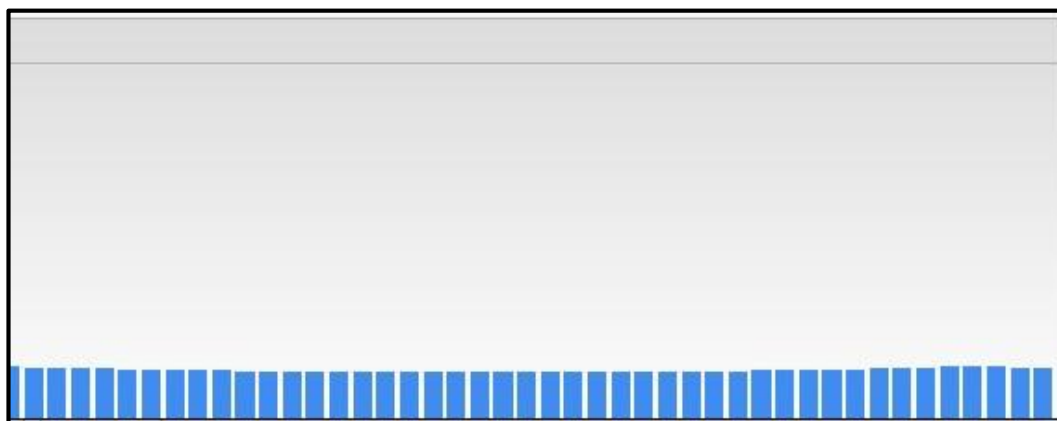
### 3.2. Замена графика функции прямой, проходящей через точки

В процессе обработки сигнала возникает необходимость замены графика функции прямой, проходящей через точки, посредством линейной интерполяции.



*Рисунок 6 Замена графика функции прямой, проходящей через точки*

Результатом такой замены является график следующего вида:



*Рисунок 7 Результат замены графика функции прямой, проходящей через точки*

### 3.3. Применение алгоритма обработки на модели РДГТ

Для подавления шумов известной частоты мы не можем ограничиться приравнением соответствующих им элементов спектра к 0. Так как спектр исходной функции представляет собой функцию, которая потом складывается с шумовым спектром, то перед нами стоит задача восстановления исходного спектра и последующего вычисления искомой функции.

Предполагая, что спектр незашумленной функции представляет собой кусочно-гладкую кривую (в силу предположения о непериодичности функции), для удаления из спектра шумовой составляющей и уменьшения искажений исходной функции используем линейную интерполяцию той части спектра, которая содержит частоты шума.

Интерполяция многочленом первого порядка вида  $y = kx + c$  удовлетворяет требованиям точности расчетов.

При восстановлении функции из измененного спектра происходят неизбежные потери, а также вносятся дополнительные помехи, причинами которых могут быть:

1. Дискретность обрабатываемого сигнала, а значит все точность всех преобразований ограничена частотой дискретизации.
2. Потери при удалении шумовой составляющей из спектра — вместе с ней пропадает и часть полезных данных.
3. При несовершенстве алгоритмов, работающих со спектром сигнала — изменение гармоник может создать сильные искажение вблизи границ функции, а потому желательно исключить их из последующей обработки.

Алгоритм обработки был применен на данных сигнала полученных с РДТТ

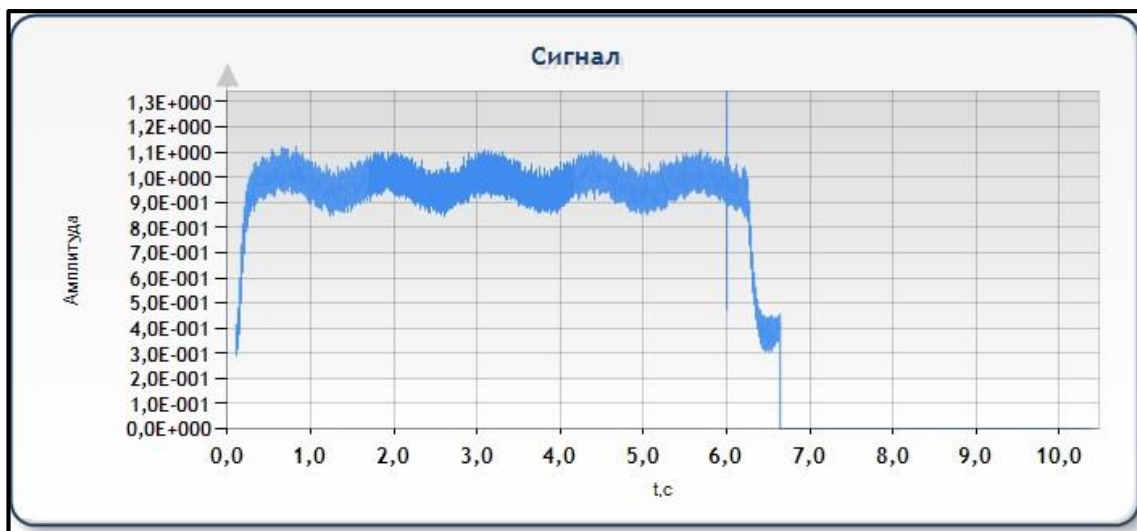


Рисунок 8 Сигнал до обработки

Спектр полученного сигнала выглядит следующим образом:

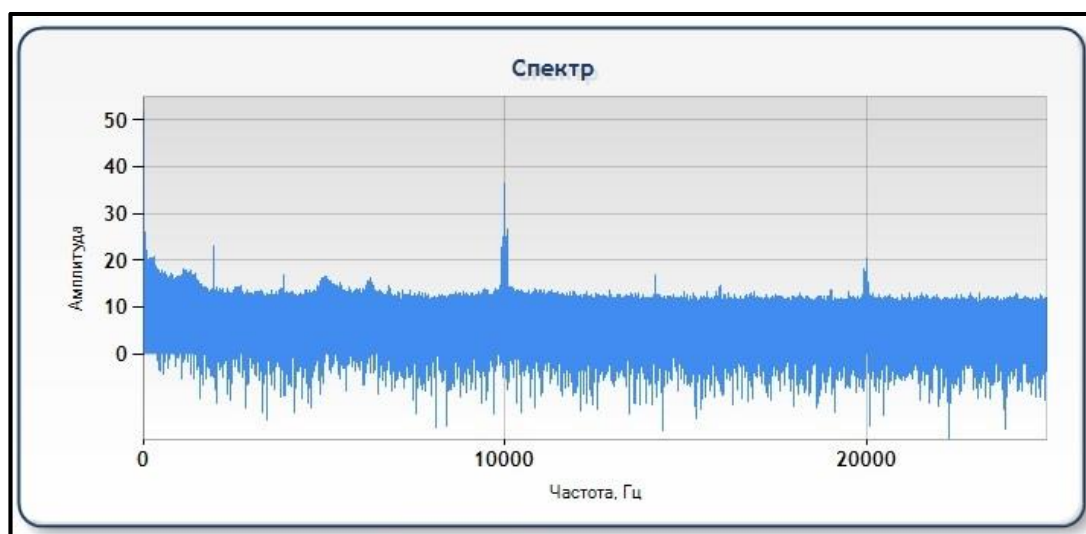
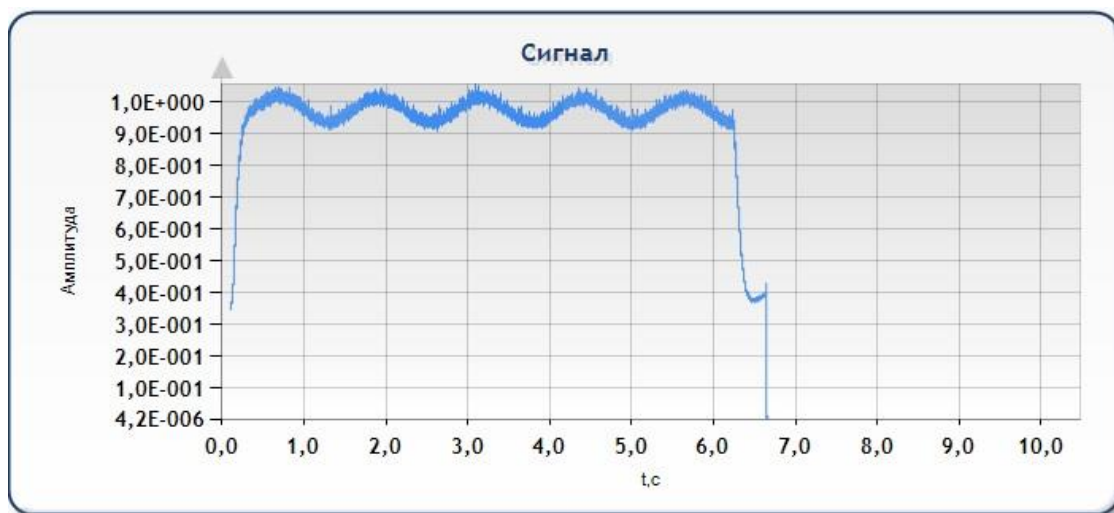


Рисунок 9 Спектр полученного сигнала

Так как сигнал дискретный, то шум частотой 50 Гц изменяет диапазон спектральных гармоник вблизи 50 Гц, поэтому удаление частот с 49 по 51 Гц не позволяет полностью избавиться от шума.

Линейная аппроксимация части спектра с 40 Гц по 60 Гц позволила практически полностью избавиться от шума 50 Гц, при этом наилучшие результаты достигаются в средней части функции. Вблизи границ наблюдаются сильные артефакты, которые проблематично удалить методами спектрального анализа.



*Рисунок 10 Сигнал после обработки алгоритмом*

## **Заключение**

В результате решения поставленных задач:

1. Произведен анализ литературы по акустической устойчивости;
2. Разработан алгоритм анализа результатов измерения пульсаций давления, основанный на БПФ, позволяющий физически корректно производить анализ существенно непериодических сигналов с выделением помех и физически обусловленных компонент спектра;
3. Проведена его верификация с использованием аналитически заданных сигналов;
4. Проведен спектральный анализ измерений давления, полученных на огневых стендовых испытаниях модели РДТТ.

## **Список использованной литературы**

1. В.Ю. Чернышев, А.С. Чепайкин, С.В. Жернаков, Р.А. Мунасыпов, И.Т. Губайдуллин, Т.П. Андреева, Методика обработки цифрового периодического сигнала произвольной формы с широкополосными помехами – Вестник УГАТУ
2. О.С.Вадутов, Аналоговые фильтры – Лекции ТПУ.
3. Dr. Fred S. Blomshield, Historical Perspective of Combustion Instability in Motors: Case Studies
4. А.В. Алиев, Внутренняя баллистика – Машиностроение
5. И.А. Кашина, А.Ф. Сальников, Исследование влияния диссипативных свойств конструктивных элементов ракетных двигателей на твердом топливе – Пермский национальный исследовательский политехнический университет