

КОНТРОЛЬ УРОВНЯ ВИБРАЦИЙ ЦИФРОВЫМИ МЕТОДАМИ МНОГОСТУПЕНЧАТОГО ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ПРИ РАБОТЕ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Аделя Юрьевна Бузова, старший преподаватель,
Юрий Михайлович Кочетков, профессор, д.т.н.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования (ФГБОУ ВО)
"Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)" (МАИ)

Рассмотрены вопросы, связанные с надёжностью двигательных установок ракет. Описаны принципы оценки уровня вибраций ракетного двигателя цифровыми методами многоступенчатого дискретного преобразования Фурье. Приведены формулы такого преобразования разностными цифровыми фильтрами.

The issues related to the reliability of rocket propulsion systems are considered. The principles of estimating the vibration level of a rocket engine using digital methods of multi-stage discrete Fourier transform are described. Formulas for such a transformation using difference digital filters are given.

Ключевые слова: коэффициенты фильтрации, преобразование Фурье, разностная фильтрация, ракетный двигатель, цифровой сигнал.

Keywords: filtration coefficients, Fourier transform, difference filtering, rocket engine, digital signal.

Вибрации ракетных двигателей (РД) снижают надёжность двигательных установок ракет [1]. Возникновение вибраций РД в полёте приводит к усугублению прочностного состояния конструкции двигательных установок и, следовательно, к разрушению как самих установок, так и деталей корпусов ракет. В зависимости от уровня вибраций РД могут возникать такие нежелательные эффекты, как, например, ухудшение теплового состояния с последующими прогаром стенок камеры сгорания и сопла РД.

Опасность возникновения этих эффектов обуславливает актуальность повышения качества диагностики вибраций РД и увеличения информативности используемых методов контроля уровня этих вибраций.

Такой контроль можно обеспечить цифровыми методами дискретного преобразования Фурье (ДПФ) [2]. Методы многоступенчатого ДПФ (МДПФ) на основе алгоритмов разностной цифровой фильтрации и CORDIC (Coordinate Rotation Digital Computer) успешно реализуются на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) и были верифицированы и апробированы в радиотехнических системах [3-4]. Эти методы предлагается использовать для решения задач контроля уровня вибраций РД, поскольку такие вибрации являются сложными колебаниями, которые могут быть представлены суммой гармонических колебаний (гармоник).

Цель настоящего исследования - формализация условия автоматического контроля вибраций РД цифровыми методами МДПФ без выполнения аппаратно затратных операций умножения. Исследование проводилось методами программного моделирования алгоритма контроля уровня вибраций РД цифровыми методами МДПФ. Сущность моделирования заключается в программной реализации методов оценки уровней гармоник цифровых сигналов с датчика амплитуды колебаний путём их МДПФ многополосной фильтрацией разностными цифровыми фильтрами (ЦФ).

На базе ПЛИС был разработан и исследован модифицированный алгоритм МДПФ, в основу которого положен анализ замеров параметров амплитудно-частотных характеристик вибраций в процессе работы двигательной установки. При этом анализируются показания датчика.

Результаты исследования подтвердили возможность использования методов МДПФ цифрового сигнала с датчика $x(nT)$ с периодом дискретизации T путём его L -полосной фильтрации разностными ЦФ $K+M$ -го порядка с k_M -ми коэффициентами M -го порядка разности $h_p(M, k_M, l)$ для расчёта значений $y_l(nT)$ оценок уровней l -ых гармоник этого сигнала по формуле (1) при $k_M=0, 1, 2, \dots, K+M-1, l=1, 2, 3, \dots, L$ и $n=0, 1, 2, \dots, N-1$:

$$y_l(n \cdot T) = \sum_{k=0}^{K+M-1} \sum_{k_0=0}^k \dots \sum_{k_{M-1}=0}^{k_{M-2}} \sum_{k_M=0}^{k_{M-1}} h_p(M, k_M, l) \cdot x(n \cdot T - k_M \cdot T). \quad (1)$$

Причём, k -ые коэффициенты l -ой полосовой фильтрации $h(k, l)$ при $k=0, 1, 2, \dots, K-1$ и $l=1, 2, 3, \dots, L$ формируются на основе k_m -ых коэффи-

циентов m -ых порядков разности $h_p(m, k_{mv}, l)$ по формуле (2) при $km=0, 1, 2, \dots, K+m-1$ и $m=1, 2, 3, \dots, M$ [4]:

$$h(k, l) = \sum_{k_0=0}^k \sum_{k_1=0}^{k_0} \dots \sum_{k_{M-1}=0}^{k_{M-2}} \sum_{k_M=0}^{k_{M-1}} h_p(M, k_M, l). \quad (2)$$

Поэтому, условием выполнения МДПФ такого сигнала только сложениями его временных отсчётов является тривиальность коэффициентов $h_p(M, k_M, l)$, поскольку по формуле (3) при $l=1, 2, 3, \dots, L$:

$$h_p(M, k_M, l) \cdot x(n \cdot T - k_M \cdot T) = \begin{cases} x(n \cdot T - k_M \cdot T) & \text{при } h_p(M, k_M, l) = 1; \\ 0 & \text{при } h_p(M, k_M, l) = 0; \\ -x(n \cdot T - k_M \cdot T) & \text{при } h_p(M, k_M, l) = -1. \end{cases} \quad (3)$$

Такая формализация условия автоматического контроля вибраций РД цифровыми методами МДПФ без выполнения операций умножения позволяет снижать аппаратные затраты на ПЛИС-реализацию вычислительных алгоритмов такого контроля [5].

Литература

1. Перфильев А.С., Султанов А.Э., Герасименко С.Ю. Условия возникновения высокоамплитудных низкочастотных колебаний корпуса ракеты-носителя, снижающих надёжность агрегатов двигательных установок // Известия Тульского государственного университета. - 2018. - №7.
2. Залманзон Л.А. Преобразование Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. - М.: Наука, 1989.
3. Щербак М.А., Стешенко В.Б., Губанов Д.А. Цифровая полиномиальная фильтрация в реальном масштабе времени: алгоритмы и пути реализации на ПЛИС // Цифровая обработка сигналов. - 2000. - № 1.
4. Бузов Ю.Я., Бузова А.Ю. Дедуктивная обработка цифровых сигналов на основе метода конечных разностей и методов разностной цифровой фильтрации и многоступенчатого дискретного преобразования Фурье, не требующего выполнения арифметических операций умножения // Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи имени А.С.Попова: 65 Научная сессия, посвященная Дню радио: Доклады. - М.: РНТОРЭС, 2010.
5. Стешенко В.Б. ПЛИС фирмы ALTERA: элементная база, система проектирования и языки описания аппаратуры. - М.: ДО-ДЭКА-XXI, 2007.

Связь с авторами: frambe@mail.ru