

УДК 681.586.773

Е.Ф. ФУРМАКОВ¹, Ю.Г. СТОЛЯРОВ¹, В.В. КАБАНОВ², В.Н. ХАРИТОНОВ³¹ОАО «Техприбор», Санкт-Петербург, Россия²ЗАО «СИЭЛ», Санкт-Петербург, Россия³ГП ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко, Запорожье, Украина

ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ МЕТОДОВ УЗКОПОЛОСНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ И ЦИФРОВОГО ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ФУРЬЕ В АППАРАТУРЕ ВИБРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ РОТОРОВ МНОГОВАЛЬНЫХ ГТД

Показана принципиальная эквивалентность и особенности применения в аппаратуре контроля вибрации ГТД аналоговых следящих фильтров и цифровых следящих гармонических анализаторов Фурье.

аппаратура контроля вибрации, перестраиваемые узкополосные фильтры, следящие фильтры на переключаемых конденсаторах, цифровой гармонический анализатор Фурье, оконные функции

Оценка состояния роторов многовальных авиационных ГТД по уровню вибрации в полосе частот, определяемой минимальной и максимальной скоростями их вращения, низкоинформативна и, как правило, даёт завышенную оценку из-за того, что оборотные частоты роторов лежат в близких или перекрывающихся полосах частот. Поэтому предпочтительным является выделение только оборотной составляющей вибрации каждого из роторов, что и положено в основу аппаратур контроля вибрации, разрабатываемых в последние десятилетия.

При этом качество оценки определяется, в основном, способом реализации следящих фильтров и механизмом их настройки на оборотную частоту.

Принимая во внимание ограниченное количество одновременных частот анализа, в том числе и анализ в переходных режимах, из многообразия технических решений в области перестраиваемых узкополосных фильтров [1...5] выделим два способа:

- дискретно-аналоговый с использованием фильтров на переключаемых конденсаторах;
- цифровой вариант гармонического анализа Фурье.

Первый способ подкупает простотой технической реализации, учитывая имеющиеся в электронной индустрии микросхемы, например, MF10 и

MAX 7490 / MAX 7491, ("Maxim"), LMF 100 ("National Semiconductor"), LTC 1067 ("Linear Technology"), представляющие собой функционально законченные звенья фильтров второго порядка, позволяющие реализовать, в том числе, и полосовой следящий фильтр с постоянной относительной полосой пропускания, перестраиваемый с помощью только тактовой частоты. Остальные параметры – добротность, усиление, характерная частота, определяются отношениями номиналов нескольких резисторов. Фильтры на переключаемых конденсаторах, являясь по сути дискретными, хорошо аппроксимируют классические аналоговые фильтры за счет высокого отношения тактовой и рабочей частот (50 – 200 раз).

Структура канала контроля одного ротора по композитным сигналам $x_1(t)$ и $x_2(t)$ от двух датчиков вибрации показана на рис. 1.

Генератор тактовых импульсов (ГТИ) обеспечивает формирование на основе измеренной частоты F_1 тактирующего сигнала, пропорционального частоте вращения ротора. Использование одного сигнала для тактирования как фильтра, так и АЦП, позволяет простейшим образом реализовать безинерционный синхронный выпрямитель с высоким подавлением пульсаций. Функции ГТИ могут выполняться

микроконтроллером (МК) при наличии в его составе соответствующих периферийных устройств. Тогда АЦП, ГТИ и МК интегрируются в одном кристалле.

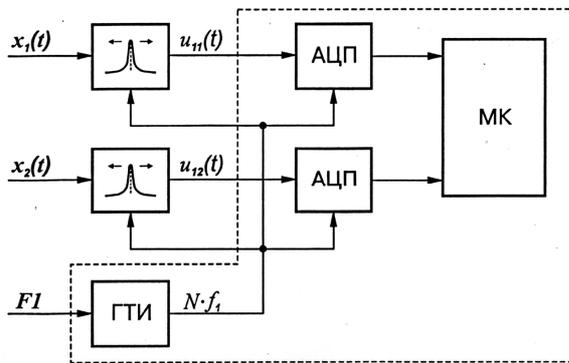


Рис. 1. Структура канала контроля

Амплитудно-частотная характеристика следящего фильтра, синтезированного в соответствии с типовыми требованиями (полоса пропускания по уровню 0,707 – 3,57% от центральной частоты, добротность $Q = 28$) представлена на рис. 2.

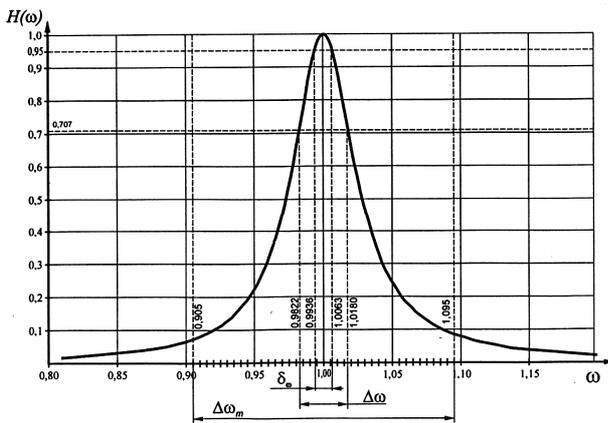


Рис.2. Амплитудно-частотная характеристика следящего фильтра

Как видно из АЧХ, для обеспечения пульсаций амплитуды сигнала на выходе не более 5%, требования к точности задания центральной частоты достаточно высоки ($\delta_\omega = \pm 0,6\%$), что необходимо обеспечить при разработке системы синхронизации фильтра, т.к. при изменении скорости вращения ротора ГТИ воспроизводит новое значение частоты с неизбежной задержкой, что приводит к рассогласованию оборотной частоты сигнала и центральной частоты фильтра и возможной паразитной амплитудной модуляции выходного сигнала при "попадании" гармо-

нической компоненты сигнала на скат частотной характеристики фильтра при переходных режимах работы ГТД.

Основные недостатки данного способа связаны с высокой добротностью фильтра и особенностями поведения высокодобротного резонансного звена в переходных режимах.

Кроме того, рассмотренная структура работоспособна только при исправном канале датчика оборотов ротора и не позволяет в ходе работы изменять параметры и алгоритмы фильтрации.

Таким образом, метод анализа с помощью следящих фильтров, по сути классический, ни по какому критерию не является оптимальным.

Если поставить задачу оптимальной среднеквадратичной оценки параметров первой гармоники сигнала $x_1(t)$ на интервале, кратном периоду T , то в качестве решения получим известные соотношения для коэффициентов Фурье:

$$a_1 = \frac{2}{PT} \int x_1(t) \cos \omega t dt ; \quad (1)$$

$$b_1 = \frac{2}{PT} \int x_1(t) \sin \omega t dt , \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi/T$; P – целое.

Указанные коэффициенты связаны с параметрами гармонического сигнала $A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$ следующим образом:

$$A_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} ; \quad (3)$$

$$\varphi_1 = \arctg \left(-\frac{b_1}{a_1} \right) . \quad (4)$$

Применяя для вычисления (1) и (2) квадратурную формулу прямоугольников, получим:

$$\bar{a}_1 = \frac{2}{PN} \sum_{n=0}^{PN-1} x_1(n) \cos \frac{2\pi n}{N} ; \quad (5)$$

$$\bar{b}_1 = \frac{2}{PN} \sum_{n=0}^{PN-1} x_1(n) \sin \frac{2\pi n}{N} , \quad (6)$$

где N – количество отсчетов (частичных отрезков), приходящееся на период T .

В соответствии с (5) и (6) измерительный канал виброконтроля будет выглядеть как показано на рис. 3.

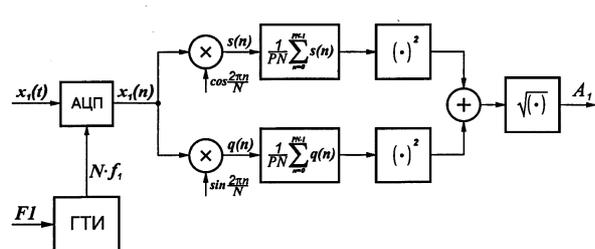


Рис. 3. Измерительный канал виброконтроля

После аналого-цифрового преобразования (АЦП) последовательность $x_1(n)$ умножается на отсчеты гармонических функций в синфазном $s(n)$ и квадратурном $q(n)$ каналах. Результаты суммируются и усредняются по PN отсчетам. На схеме присутствует генератор тактовых импульсов (ГТИ), обеспечивающий синхронную выборку N отсчетов на периоде T для всех анализируемых сигналов отдельного ротора.

Преимуществом такой реализации, в отличие от приведенной на рис. 1, является возможность управления параметрами фильтрации в ходе работы. Например, принципиальное изменение алгоритмов обработки сигналов при отказе датчика оборотов ротора.

На практике использование анализа Фурье связано с обоснованным выбором N и P . Число N определяет количество отсчетов, приходящихся на период сигнала анализируемой частоты, и выбирается из условия обеспечения требуемой величины относительной погрешности преобразования. Подчеркнем, что в случае синхронного анализа, N – постоянное число для всех частот в диапазоне от f_{\min} до f_{\max} .

Параметр P задает количество периодов, в течение которых наблюдается сигнал. Очевидно, что увеличение P приводит к увеличению разрешающей способности анализа по частоте [1, 2].

Принимая во внимание, что и АЦП, и ГТИ могут быть интегрированы в едином с вычислительным ядром в кристалле, получаем возможность реализации функций контроля вибрации одного ротора с помощью однокристалльного микроконтроллера или

сигнального процессора. Для сравнения методов фильтрации вибросигнала на рис.4 приведены графики АЧХ фильтра на переключаемых конденсаторах с добротностью 28 и фильтра Фурье со значениями $N = 64$ и $P = 28$.

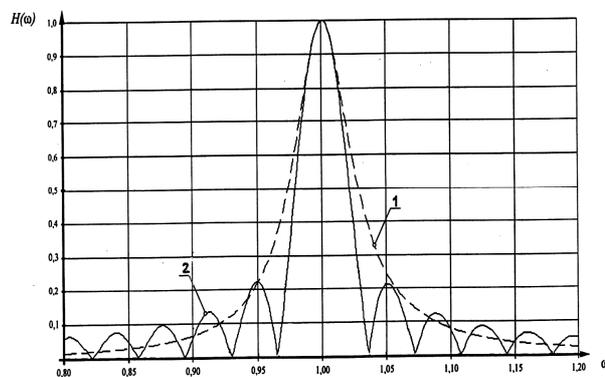


Рис. 4. Модуль АЧХ:

1 – фильтра на переключаемых конденсаторах;
2 – фильтра Фурье

Из графиков (рис. 4) можно сделать следующие выводы:

1. С приемлемой для практических расчетов точностью количество периодов интегрирования P следует принимать равным требуемой добротности фильтра.

2. В области центральной частоты оба метода эквивалентны.

3. В приведенной полосе частот при эквивалентных добротностях селективные свойства фильтра Фурье лучше, чем фильтра на переключаемых конденсаторах, что следует из сравнения площадей под АЧХ.

К недостаткам характеристики фильтра Фурье, рис. 4, следует отнести высокий уровень боковых лепестков модуля АЧХ и скорость затухания их уровня: 6 дБ на октаву. Указанные особенности АЧХ фильтра с прямоугольным временным окном могут привести к искажению оценок параметров первой гармоники из-за присутствия в сигнале компонент, не укладывающихся в гармоническую схему на интервале PT .

Такие компоненты могут появляться в композитном сигнале вибрации за счет вклада вибрации со-

седних роторов, а так же за счет расстройки частоты дискретизации и оборотной частоты в переходных режимах работы двигателя. В этом случае общепринятой практикой является использование взвешивания во временной области с помощью функций специального вида – оконных функций [1, 2].

Одним из самых распространенных на практике является окно Ханна. Максимальный уровень его боковых лепестков составляет минус 31,4 дБ при скорости затухания 18 дБ на октаву. На рис 5 приведены АЧХ фильтра Фурье с окном Ханна для $N=32$ и значений P : 4 и 16.

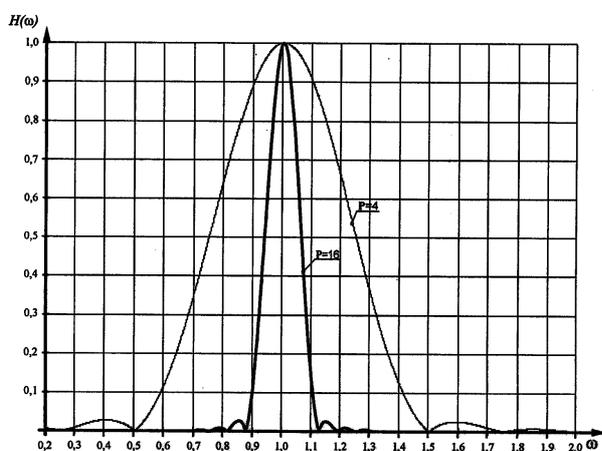


Рис. 5. АЧХ фильтра Фурье с окном Ханна

Следует отметить, что использование взвешивающих оконных функций, отличных от прямоугольного окна, позволяет добиться существенного уменьшения боковых лепестков частотной характеристики только за счет расширения главного лепестка, и, следовательно, ухудшения избирательности фильтра [2].

Таким образом, всего два параметра эквивалентного фильтра Фурье – количество периодов интегрирования (время интегрирования) и тип оконной функции определяют характеристики стандартного фильтра – добротность, полосу пропускания, затухание вне полосы.

Выбирая тип оконной функции, мы фактически задаем форму амплитудно-частотной характеристики, а при заданном уровне подавления вне полосы

пропускания требуемая добротность достигается с помощью увеличения периодов интегрирования (длительности окна).

Следует отметить, что стремление к обеспечению высокого значения добротности при синхронном анализе Фурье с применением оконных функций является спорным, так как полученное в результате обработки подавление вне полосы пропускания допускает расширение главного лепестка частотной характеристики, снижая тем самым требования к точности синхронизации и повышая устойчивость работы аппаратуры.

Рассмотренный выше метод цифрового синхронного анализа Фурье был положен в основу разработанной аппаратуры контроля вибрации Ив-42СФ-4М, основные параметры которой должны быть окончательно программно оптимизированы при стендовой отработке с двигателем Д-18Т.

Литература

1. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Пер. с англ. – М.: Мир, 1978.
2. Цифровая обработка сигналов: Справочник / Л.М. Гольденберг и др. – М.: Радио и связь, 1985.
3. Петровский А.А. Методы и микропроцессорные средства обработки широкополосных и быстропротекающих процессов в реальном времени / Под ред. Г.В. Римского. – Минск: Наука и техника, 1985.
4. Каппелини В., Константинодис А. Дж, Эмилиани П. Цифровые фильтры и их применение / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат,
5. Abed A.H.M., Chain G.D. The host windowing technique for FIR digital filter design // IEEE Trans. On ASSP. – 1984. – Vol. 32, № 4. – P. 683 – 694.

Поступила в редакцию 29.04.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.Т. Хвощ, ЗАО «Элкус», Санкт-Петербург, Россия.