

УДК 622.012.2:621.31

Н.И. БУРАУ¹, А.М. ПАВЛОВСКИЙ¹, Л.Л. ЯЦКО², А.В. ИВАНЧЕНКО¹¹ *Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев*² *ПАО «НТК «Электронприлад», Киев*

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ СЛЕДЯЩИХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ВИБРАЦИИ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ

Для расширения функциональных возможностей систем контроля вибрации авиационных двигателей предлагается использование цифровых следящих фильтров на нестационарных режимах эксплуатации двигателей. Проведен синтез цифровых узкополосных фильтров, центральная частота полосы пропускания которых изменяется синхронно с изменением частот вращения ротора на режиме разгона, в качестве аналоговых фильтров – прототипов выбраны фильтры с бесконечной импульсной характеристикой. Проведен анализ эффективности цифровых фильтров, для чего использовались смоделированные сигналы вибрации ротора при его разгоне для случаев наличия и отсутствия повреждения вала. Показано, что все разработанные фильтры выделяют составляющую вибрации на роторной гармонике с изменяющейся частотой, что позволяет диагностировать повреждение вала ротора по наличию нелинейных субгармонических резонансов. Наиболее эффективным является использование цифрового узкополосного эллиптического фильтра.

Ключевые слова: *контроль вибрации двигателя, нестационарные режимы, повреждение вала, цифровой следящий фильтр с бесконечной импульсной характеристикой, моделирование.*

Введение

Существующие на сегодняшний день системы контроля вибрации (СКВ) авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) предназначены для оценивания уровня вибрационной скорости на первых роторных гармониках отдельных ступеней ГТД и определения их соответствия или несоответствия установленным нормам. В результате формируются интегральные признаки с помощью дискретных сигналов «Нормальная вибрация», «Повышенная вибрация» и «Опасная вибрация». Однако такие СКВ не обеспечивают выполнение диагностической функции – выявления начальных дефектов и повреждений роторных элементов в процессе эксплуатации двигателя. Начальные повреждения роторных элементов не приводят к повышению уровня вибрации на роторных гармониках в штатных стационарных режимах эксплуатации, поэтому в случае их зарождения и развития до критических размеров вибрационное состояние ГТД оценивается как «Нормальная вибрация». Повреждения критических размеров могут привести к увеличению уровней вибрации, а быстрое развитие повреждений и разрушение элемента конструкции – к состоянию «Опасная вибрация».

Кроме того, контроль вибрации существующими СКВ осуществляется на стационарных режимах эксплуатации в предположении постоянства частоты вращения ротора [1]. Флуктуации частоты вра-

щения или ее изменение на переходных режимах в значительной степени ограничивают применение последовательного анализа. Для построения синхронных следящих анализаторов спектра необходимо использовать перенастройку центральной частоты фильтра в зависимости от изменения частоты вращения, или использовать дополнительные средства для синхронизации спектрального анализа. Повышения эффективности следящего спектрального анализа можно достичь путем разработки и внедрения в СКВ цифровых систем обработки.

В работе [2] была предложена двухуровневая СКВ, разработана ее программная модель и обоснована возможность ее использования в перспективных разработках и исследованиях систем контроля ГТД. Использование в измерительных каналах цифровой электроники открывает возможности применения алгоритмов цифровой фильтрации для первого уровня СКВ. Это позволит не только усовершенствовать процедуры контроля вибрации на стационарных режимах ГТД, но и расширить возможности синхронного следящего анализа на переходные режимы, обеспечивая при этом и диагностику повреждений роторных элементов.

1. Формулирование проблемы

Контроль вибрации ГТД на стационарных режимах эксплуатации осуществляется в узких частотных диапазонах, для выделения которых

используются узкополосные фильтры. При синтезе или выборе фильтров необходимо учитывать следующие требования: по ширине полосы пропускания фильтров (для выделения из широкополосного вибрационного сигнала составляющих на роторных гармониках отдельных ступеней ГТД); по уровню сигнала в полосе подавления; линейности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра в полосе пропускания и заданного отношения ширины АЧХ фильтра на разных уровнях пропускания/подавления сигнала; симметричности формы АЧХ фильтра относительно центральной частоты; линейности фазо-частотной характеристики (ФЧХ) фильтра.

В [3] на основе сравнительного анализа характеристик и методов синтеза цифровых фильтров с конечной и бесконечной импульсной характеристикой (соответственно КИХ - фильтров и БИХ - фильтров) для узкополосной фильтрации сигнала вибрации на стационарных режимах ГТД был предложен БИХ - фильтр Баттерворта 4 порядка. Синтез фильтра выполнен с удовлетворением требований по ширине полосы частот пропускания $\Delta f_p = 3$ Гц и уровню подавления сигнала вне полосы пропускания – на 30 дБ, центральная частота фильтра в полосе пропускания f_0 принималась постоянной, равной частоте роторной гармоники.

На переходных режимах ГТД частота вращения ротора изменяется, что усложняет процедуру контроля вибрации по роторным гармоникам. С другой стороны, переходные режимы ГТД являются наиболее информативными с точки зрения диагностики. Так, в работе [4] показана возможность диагностики трещины вала ротора ГТД на нестационарных режимах. Повреждение вала приводит к появлению нелинейных нестационарных вибрационных колебаний вала при его вращении с ускорением. Особенностью их является наличие нелинейных резонансов при отношении мгновенной частоты вращения ротора $\omega_p(t)$ к значению критической частоты вращения $\omega_{кр}$, равном 1/2, 1/3 и т.п. На рис. 1 представлены результаты анализа вибрации при ускоренном вращении вала без повреждения ($\Delta K = 0$) и с повреждением ($\Delta K = 0,05$), полученные в [4] для разных углов ψ ориентации трещины относительно вектора вибрации и углов β ориентации несбалансированной массы по отношению к срединной линии трещины. Графики иллюстрируют изменение относительных вибрационных перемещений вала z (относительно статического прогиба) в зависимости от безразмерного времени $\tau = \omega_{кр}t$.

Исследования показали, что чувствительность нелинейных эффектов к наличию трещины во много раз превосходит чувствительность собственных частот и форм колебаний. Однако для использования в

качестве диагностических признаков пиковых значений вибрации в окрестностях нелинейных субгармонических резонансов необходимо оценивать уровни вибрации на основных роторных гармониках в условиях существенного изменения частоты вращения ротора. Для выделения вибрационного сигнала на изменяющихся во времени роторных гармониках целесообразно использовать адаптивный (следающий) цифровой узкополосный фильтр с синхронно изменяющейся центральной частотой $f_0(t)$.

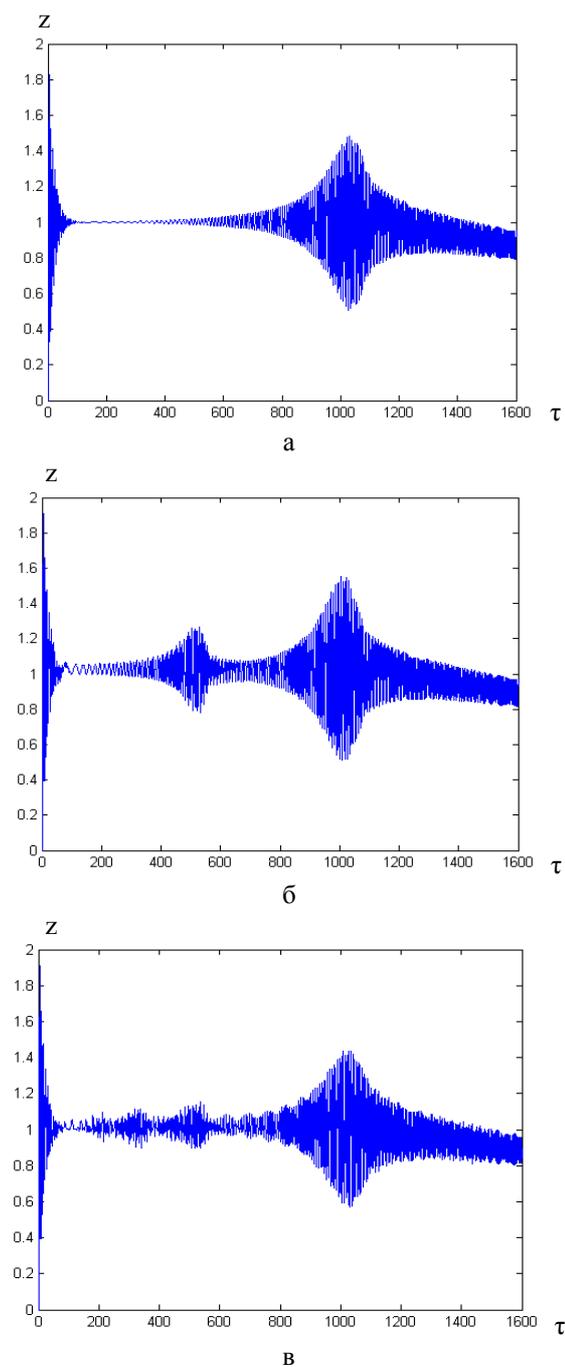


Рис. 1. Вибрация z_0 при вращении вала с ускорением: а – $\Delta K = 0$; б – $\Delta K = 0,1$ ($\psi = \beta = 0^0$); в – $\Delta K = 0,05$ ($\psi = 180^0$, $\beta = 135^0$)

Целью данной статьи является разработка и исследование эффективности алгоритмов адаптивной цифровой узкополосной фильтрации вибрационных сигналов на переходных режимах ГТД для обеспечения диагностики начальных трещин вала в процессе функционирования двигателя.

2. Решение проблемы

Для переходных режимов ГТД предлагается выполнять выделение составляющей вибрации на изменяющейся во времени роторной гармонике ($\omega_p(t)$ – мгновенное значение частоты вращения ротора) для дальнейшего контроля вибрации в соответствии с приведенной на рис. 2 упрощенной блок-схемой.

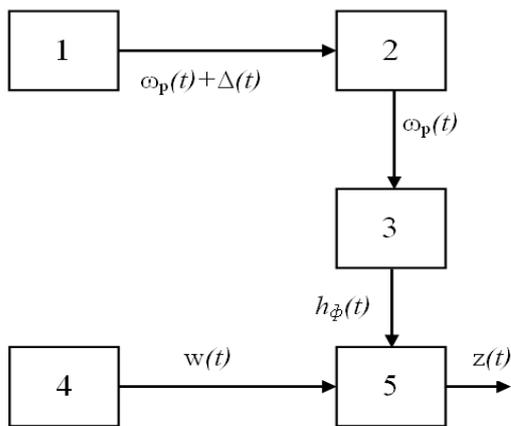


Рис. 2. Блок-схема процесса выделения роторной вибрации на переходных режимах: 1 – датчик частоты вращения; 2 – блок определения мгновенного значения частоты вращения; 3 – блок расчета коэффициентов цифрового фильтра; 4 – датчик вибрации; 5 – блок фильтрации

На рис. 2 использованы такие обозначения: $\Delta(t)$ – шум измерения частоты вращения; $h_{\hat{\phi}}(t)$ – импульсная характеристика фильтра; $w(t)$ – сигнал вибрации (ускорение); $z(t)$ – выделенная составляющая вибрации. В блоке 3 реализуется адаптивный алгоритм расчета коэффициентов фильтра.

Адаптивные фильтры отличаются изменяющимися (регулируемыми или модифицируемыми) характеристиками, как правило такие фильтры реализуются на основе схемы КИХ – фильтров [5]. Для настройки коэффициентов фильтра используются адаптивные алгоритмы, в которых в соответствии с некоторым критерием минимизируется сигнал ошибки фильтрации. Синтезируемый в данной работе фильтр не относится к классическим адаптивным, так как пересчет коэффициентов (собственно адаптивный алгоритм) выполняется при изменении центральной частоты полосы пропускания в соответствии с изменением частоты вращения ротора. В

этом случае необходимо обеспечить пересчет коэффициентов с периодом определения текущей частоты вращения ротора (штатные средства регистрации параметров двигателя обеспечивают период регистрации 0,25 с при летных испытаниях). Поэтому кроме указанных ранее требований при расчете цифровых фильтров необходимо учитывать ограничения, связанные с изменением частоты вращения и периодом регистрации. Для исключения задержки в расчетах коэффициентов фильтра будем использовать фильтры с бесконечной импульсной характеристикой и наименьшим оптимальным порядком.

2.1. Синтез цифровых фильтров

Передаточная функция цифрового БИХ-фильтра является дробно-рациональной функцией [3]:

$$H(z) = \sum_{i=0}^P b_i z^{-i} / (1 + \sum_{k=0}^Q a_k z^{-k}),$$

где b_i – коэффициенты для точек входного сигнала; P – порядок фильтра; Q и a_k – соответственно порядок и коэффициенты обратной связи.

Методика синтеза цифровых частотно-избирательных БИХ - фильтров основывается на математическом аппарате расчета аналоговых фильтров-прототипов с последующим преобразованием полученной передаточной функции к дискретному виду. Основными требованиями при этом являются сохранение существующих свойств АЧХ прототипа в АЧХ цифрового фильтра и обеспечение преобразования устойчивого прототипа в устойчивый цифровой фильтр.

Спецификация полосового фильтра задает граничные частоты полосы пропускания f_{p1} и f_{p2} , граничные частоты полос подавления f_{s1} и f_{s2} , уровни сигналов на частотах пропускания A_p и подавления A_s . Так как для синтезируемого фильтра центральная частота полосы пропускания $f_0(t)$ будет переменной, то и граничные частоты полос пропускания и подавления также изменяются, при этом должны сохраняться неизменными ширина полосы частот пропускания Δf_p и ширина переходных полос частот Δf_{ps} (от частот пропускания к частотам подавления). Синтез узкополосного адаптивного фильтра проводился для таких значений: $f_0(t)$ изменялась от 10 Гц до 100 Гц; $\Delta f_p=3$ Гц; $\Delta f_{ps}=1,5$ Гц; $A_p=-3$ дБ; $A_s=-30$ дБ; частота дискретизации $F_s=1024$ Гц. Учет потенциальные значения неравномерности АЧХ фильтров в полосе частот пропускания δ_p и полосе частот подавления δ_s , которые связаны с уровнями A_p и A_s выражениями [5]:

$$A_p = -20 \lg(1 - \delta_p); \quad A_s = -20 \lg \delta_s$$

и определим минимальный порядок аналоговых фильтров – прототипов с бесконечной импульсной характеристикой по следующим выражениям:

– фильтр Баттерворта:

$$N_B \geq \lg \left[\left(\frac{A_s}{10^{10} - 1} \right) / \left(\frac{A_p}{10^{10} - 1} \right) \right] / 2 \lg(f_{s^*}/f_{p^*}),$$

где f_{p^*} и f_{s^*} соответствуют частотам f_{p2} и f_{s2} аналогового фильтра – прототипа.

– фильтры Чебышева 1 и 2 рода

$$N_q = \text{ch}^{-1} \left[\left(\frac{A_s}{10^{10} - 1} \right) / \left(\frac{A_p}{10^{10} - 1} \right) \right] / \text{ch}^{-1}(f_{s^*}/f_{p^*}).$$

– эллиптический фильтр

$$N_{\mathcal{E}} = \frac{K(\sqrt{1-k_1^2})K(k)}{K(\sqrt{1-k^2})K(k_1)},$$

где $K(\cdot)$ – полный эллиптический интеграл;

$$k = f_{p^*}/f_{s^*}; \quad k_1 = \left(\frac{A_p}{10^{10} - 1} \right)^{1/2} / \left(\frac{A_s}{10^{10} - 1} \right)^{1/2}.$$

После вычислений по приведенным выше выражениям были получены такие значения минимальных порядков аналоговых прототипов БИХ – фильтров, при которых удовлетворяются требования спецификации: $N_B=5$; $N_q=4$; $N_{\mathcal{E}}=3$. Для вычислений использовалось максимальное в рассматриваемом диапазоне значение центральной частоты полосы пропускания фильтра $f_{0\max}=100$ Гц. Так как центральная частота полосы пропускания изменяется во времени, будет изменяться и отношение частот f_{p^*} и f_{s^*} , входящее в выражения для определения порядка фильтра. Как показали расчеты, при увеличении f_0 от 10 до 25 Гц происходит увеличение порядков

фильтров до указанных выше значений, дальнейшее увеличение частоты f_0 не приводит к изменению N .

Порядок фильтра наряду с параметрами спецификации входит в расчет передаточных функций аналоговых фильтров-прототипов, которые с использованием билинейного z-преобразования были преобразованы в дискретные передаточные функции эквивалентных цифровых фильтров [5]. При преобразовании порядок цифровых фильтров увеличивается в 2 раза по сравнению с порядком их аналогового фильтра-прототипа. На рис. 3 представлены АЧХ синтезированных цифровых узкополосных БИХ – фильтров для $N_B=10$, $N_q=8$, $N_{\mathcal{E}}=6$ (указан частотный диапазон в окрестностях $f_{0\max}=100$ Гц).

Синтезированные фильтры удовлетворяют требованиям спецификации и имеют при этом минимальные порядки.

2.2. Анализ эффективности цифровых фильтров

Для анализа эффективности работы синтезированных цифровых фильтров были использованы результаты моделирования вибрационных сигналов при ускоренном вращении вала без повреждения ($\Delta K=0$) и с повреждением ($\Delta K=0,05; 0,1; 0,15; 0,2$), полученные в [4] для разных углов ψ ориентации трещины относительно вектора вибрации и углов β ориентации несбалансированной массы по отношению к серединной линии трещины (некоторые результаты представлены на рис.1). Эти сигналы были зашумлены аддитивным белым шумом различной интенсивности и гармоническими высокочастотными сигналами помех, после чего использовались в

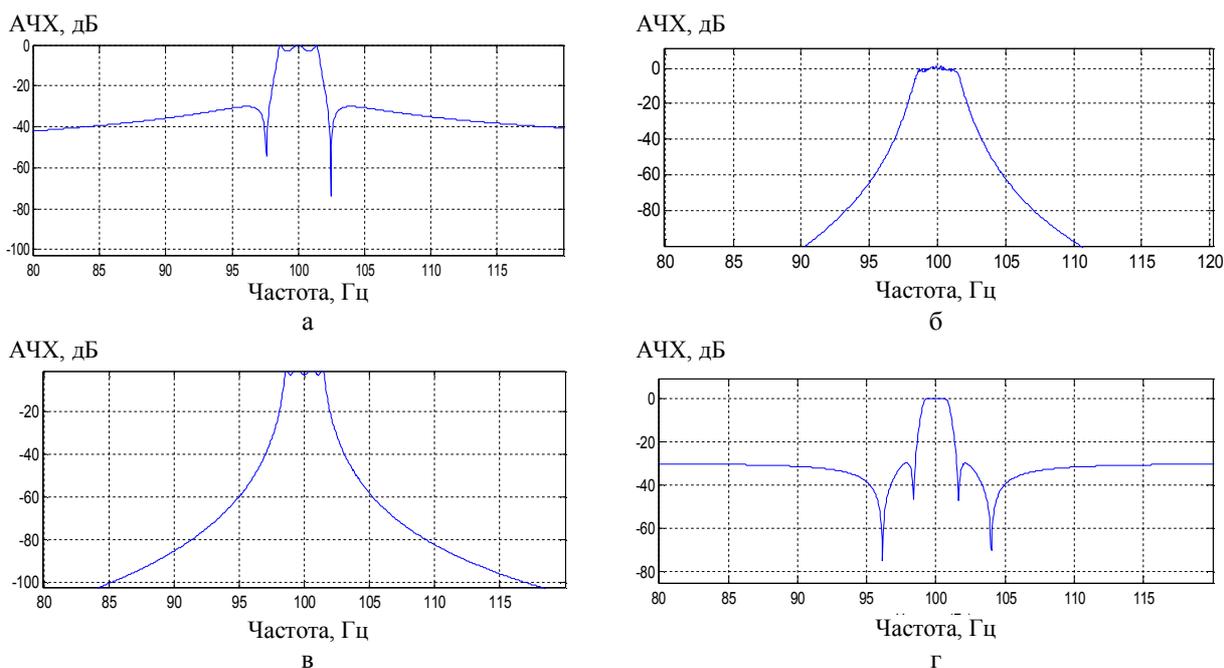


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики цифровых фильтров: а – эллиптического ($N_{\mathcal{E}} = 6$); б – Баттерворта ($N_B = 10$); в – Чебышева 1 рода ($N_q = 8$); г – Чебышева 2 рода ($N_q = 8$)

качестве входных сигналов вибрации $w(t)$ на блок фильтрации (рис. 2). Для оценки качества следящей цифровой фильтрации для каждого значения параметров $\Delta K \neq 0$, ψ и β находились разности $\Delta z(t)$ значений амплитуд вибрационных сигналов на выходе фильтров для случаев наличия $z_{\Delta K}$ ($\Delta K \neq 0$) и отсутствия z_0 ($\Delta K = 0$) повреждения вала, затем проводилась аппроксимация разностных амплитуд. Характер изменения разностей относительных амплитуд $\Delta z(t)$ и их аппроксимаций $\Delta z_{\text{ап}}(t)$ несут информацию о качестве цифровой следящей фильтрации. На рис. 4 приведен пример определения Δz и $\Delta z_{\text{ап}}$ в зависимости от безразмерного времени $\tau = \omega_{\text{кр}} t$ при использовании фильтра Баттерворта для $\Delta K=0,05$ и $\psi = \beta = 0$.

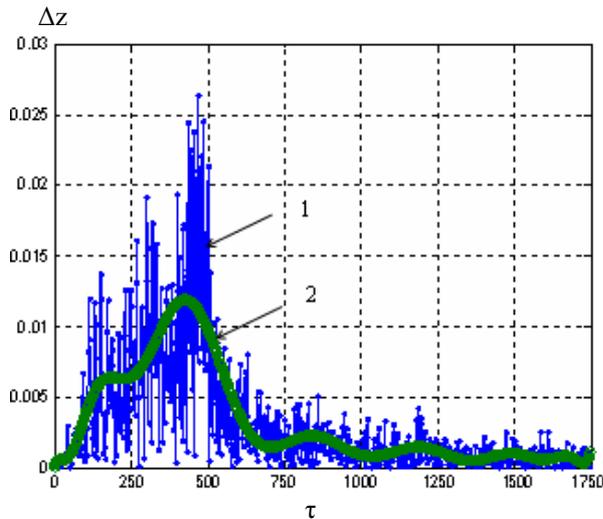


Рис. 4. Разности относительных амплитуд сигналов вибрации при отсутствии и наличии повреждения вала (1) и аппроксимация (2) для результатов фильтрации нестационарных сигналов с использованием фильтра Баттерворта

Как видно из представленных результатов, наименьшие значения разностей относительных амплитуд наблюдаются для $\tau = 1000$ и при дальнейшем увеличении τ . Как было показано на рис. 1, на указанном значении τ при разгоне ротора наблюдается переход через критическую скорость вращения. Наличие повреждения вала практически не оказывает влияние на амплитуды вибрации на рассмотренном участке вибрации ротора, поэтому разности относительных амплитуд вибрации незначительны. Максимальные отличия вибрационные сигналы после цифровой фильтрации имеют при отношении мгновенной частоты вращения ротора $\omega_p(t)$ к значению $\omega_{\text{кр}}$, равном $1/2$ или $1/3$, поэтому разности относительных амплитуд Δz для $\tau = 500$ (отношение частот равно $1/2$) имеют максимальное значение.

Для сравнительного анализа эффективности синтезированных цифровых БИХ - фильтров на рис. 5 представлены графики аппроксимаций $\Delta z_{\text{ап}}(t)$ разностей относительных амплитуд вибрации, полу-

ченных в результате цифровой следящей фильтрации нестационарных вибрационных сигналов для случаев отсутствия и наличия повреждения вала ($\Delta K = 0,05$ и $\psi = \beta = 0$).

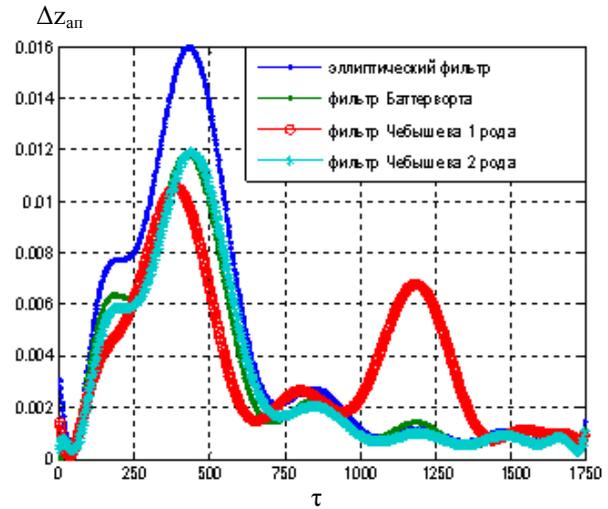


Рис. 5. Аппроксимации разностей относительных амплитуд сигналов вибрации на выходах цифровых следящих фильтров при отсутствии и наличии повреждения вала

Приведенные результаты показывают, что для одних и тех же условий задания повреждения вала, наибольшее отличие вибрационных сигналов в области нелинейных субгармонических резонансов при наличии и отсутствии повреждения наблюдается при использовании эллиптического фильтра. Значения аппроксимаций разностей амплитуд при использовании фильтров Баттерворта и Чебышева 2 рода практически совпадают для всех значений τ , а использование фильтра Чебышева 1 рода приводит к значительным погрешностям фильтрации в области $\tau > 1000$.

Таким образом, полученные результаты показали возможность и эффективность использования цифрового эллиптического фильтра для фильтрации нестационарного вибрационного сигнала и выделения составляющей вибрации на изменяющейся частоте вращения ротора. Цифровой эллиптический фильтр имеет наименьший порядок среди синтезированных БИХ – фильтров и наименьшую ошибку фильтрации.

Заключение

Выполнен синтез цифровых узкополосных фильтров с изменяющейся центральной частотой полосы пропускания для использования в системах контроля вибрации авиационных ГТД на нестационарных режимах эксплуатации. В качестве аналоговых фильтров – прототипов использовались фильтры с бесконечной импульсной характеристикой. Определены минимальные порядки фильтров, при которых выполняются требования спецификации, установлено, что

порядок фильтров, рассчитанный для максимального значения центральной частоты полосы пропускания $f_{0\max} = 100$ Гц, сохраняется и при изменении частоты.

Исследование эффективности алгоритмов адаптивной цифровой узкополосной фильтрации вибрационных сигналов проведено с использованием смоделированных сигналов вибрации при разгоне ротора с учетом наличия малого повреждения вала ротора, что приводит к появлению в вибрационном сигнале нелинейных субгармонических резонансов. Эффективность фильтрации оценивалась в окрестностях субгармонических резонансов по значениям разностей относительных амплитуд сигналов вибрации на выходах цифровых фильтров при отсутствии и наличии повреждения. Как показали исследования, оптимальным для выделения составляющих вибрации на нестационарных режимах является цифровой эллиптический фильтр.

Полученные результаты являются новыми и могут быть использованы при разработке новых систем контроля вибрации авиационных ГТД.

Поступила в редакцию 1.06.2013, рассмотрена на редколлегии 17.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., декан ФЛА С.Р. Игнатович, Национальный авиационный университет, Киев.

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИФРОВИХ СЛІДКУЮЧИХ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ВІБРАЦІЇ АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА НА НЕСТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМАХ

Н.І. Бурау, О.М. Павловський, Л.Л. Яцко, А.В. Іванченко

Для розширення функціональних можливостей систем контролю вібрації авіаційних двигунів пропонується використання цифрових слідкуючих фільтрів на нестационарних режимах експлуатації двигуна. Проведено синтез вузько смугових цифрових фільтрів, у яких центральна частота смуги пропускання змінюється синхронно зі зміною частоти обертання ротора, як аналогові фільтри – прототипи обрано фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою. Проведено аналіз ефективності цифрових фільтрів за сигналами вібрації при розгоні ротора і наявності та відсутності пошкодження валу ротора. Показано, що найбільш ефективним є використання цифрового еліптичного фільтру.

Ключові слова: контроль вібрації двигуна, нестационарні режими, пошкодження вала, цифровий слідкуючий фільтр з нескінченною імпульсною характеристикою, моделювання.

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF THE DIGITAL TRACKING FILTERS FOR THE VIBRATION CONTROL SYSTEM OF AVIATION ENGINE AT THE NON-STEADY-STATE MODES

N.I. Bouraou, A.M. Pavlovskij, L.L. Yatsko, A.V. Ivanchenko

This work is devoted to the development digital tracking filters for the enhancement of the vibration control system of aviation gas-turbine engines at the non-steady-state modes. The synthesis of the narrow-band digital filters are carried out, the central frequency of pass band is changing according the rotor rotation frequency. The infinite impulsive response filters are selected as the analog filters prototypes. The analysis of efficiency of the digital filters is carried out by using the vibration signals of acceleration rotor at the presence and absence of shaft damage. The usage of the elliptical filter is the most efficiency.

Key words: vibration control of engine, non-steady-state modes, shaft damage, digital tracking filters with the infinite impulsive response, simulation.

Бурау Надежда Ивановна – д-р техн. наук, проф., зав. каф. приборов и систем ориентации и навигации НТУУ «КПИ», Киев, Украина; e-mail: burau@pson.ntu-kpi.kiev.ua, nburaou@ukr.net.

Павловский Алексей Михайлович – аспирант, ассистент каф. приборов и систем ориентации и навигации НТУУ «КПИ», Киев, Украина, e-mail: a_pav@ukr.net.

Яцко Ласло Ласлович – канд. техн. наук, заместитель Главного конструктора ОАО «НТК «Электрон-прилад», Киев, Украина, e-mail: iatsko@mail.ru.

Иванченко Андрей Викторович – магистрант кафедры приборов и систем ориентации и навигации НТУУ «КПИ», Киев, Украина.

Литература

1. Дорошко, С.М. *Контроль и диагностирование технического состояния газотурбинных двигателей по вибрационным параметрам [Текст]* / С.М. Дорошко. – М.: Транспорт, 1984. – 128 с.

2. Бурау, Н.И. *Моделирование двухуровневой системы контроля вибрации авиационного двигателя в системе NI LabView [Текст]* / Н.И. Бурау, А.М. Павловский, Л.Л. Яцко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 9 (96). – С. 257 – 261.

3. Бурау, Н.И. *Цифровая фильтрация в системе контроля вибрации авиационных двигателей [Текст]* / Н.И. Бурау, А.М. Павловский // *Вісник Інженерної академії України*. – 2012. – № 3-4. – С. 18 – 24.

4. Яцко, Л.Л. *Диагностика трещины вала по уровню нелинейности вибрации при субгармонических резонансах [Текст]* / Л.Л. Яцко, Н.И. Бурау, Ю.В. Сопилка // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 10 (57). – С. 179 – 183.

5. Сергиенко, А.Б. *Цифровая обработка сигналов [Текст]: учебник для вузов / А.Б. Сергиенко. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2006. – 751 с.*