

3. Методология отработки, основанная на обобщенной модели надежности изделия, должна быть эффективной как в части уровня отработанности изделий, так и в части ускорения отработки; при этом требуется интенсификация инженерных методических работ для планирования отработочных испытаний и проведение таких испытаний в обоснованных объемах.

### Л и т е р а т у р а

1. Белоусов А.И., Биргер И.А. Прочностная надежность деталей турбомашин: Учебное пособие. - Кушбышев: КуАИ, 1983. - 72 с.
2. Дружинин Г.В. Надежность устройства автоматики. - М.:Д.:Энергия, 1964. - 320 с.
3. Закигаев Л.С., Кишнян А.А., Романиков Ю.М. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. - М.:Атомиздат, 1978. - 230 с.
4. Хевилэнд Р. Инженерная надежность и расчет на долговечность: Пер. с англ. - М.:Д.:Энергия, 1966. - 231 с.
5. Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов. - М.:Советское радио, 1966. - 167 с.
6. Базовский И. Надежность. Теория и практика: Пер. с англ. - М.: Мир, 1965. - 375 с.

УДК 681.518.5

Н.А. Камынин, Н.Р.Крупец

#### МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВИБРАЦИИ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

При решении задач вибрационной диагностики и контроля ГТД широко используется метод спектрального анализа, позволяющий получать оценки параметров периодических и шумовых составляющих вибропроцессов. Применение цифровой техники обеспечивает возможность достижения высоких метрологических характеристик анализа. Однако некоторые особенности цифровой обработки периодических составляющих [1] создают ряд методических ограничений по точности измерения их частот и интенсивностей.

Эти погрешности возникают вследствие использования алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Причиной их возникновения является некрatность периода периодической составляющей вибросигнала интервалу времени его наблюдения.

По мнению авторов статьи, указанные ограничения наиболее эффективно устраняются последовательным применением метода умножения сигнала на весовую функцию (окно) [2], который используется для увеличения динамического диапазона анализа, и метода интерполяции коэффициентов Фурье [3]. Однако метод интерполяции, применяемый для повышения точности оценки частоты и амплитуды гармонических составляющих, разработан не в той мере, в которой это необходимо для использования его в системах цифрового спектрального анализа, построенных на базе малых ЭВМ.

Рассмотрим предлагаемый метод интерполяции, имеющий высокое быстродействие при незначительном снижении точности по сравнению с [3].

Известно [1], что цифровой спектральный анализ на основе БПФ можно представить как обработку сигнала  $y(t)$  параллельным спектральным анализатором, содержащим  $N/2$  полосовых фильтров с частотными характеристиками  $H(f - kf_0)$ , где  $k$  - номер фильтра;  $f_0 = F_{кВ}/N$ ;  $N$  - количество отсчетов сигнала. Частотная характеристика каждого фильтра однозначно определяется формой выбранного весового окна  $h(t)$ .

Так как преобразование Фурье является линейным, формирование весового окна может быть выполнено в частотной области после вычисления БПФ при  $h(t) = 1$  для  $0 \leq t < T_a$  ( $T_a$  - время анализа). При этом для каждого  $k$ -го отсчета спектра сигнала

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n) \exp\left(-j \frac{2\pi kn}{N}\right),$$

где  $y(n)$  -  $n$ -й дискретный отсчет сигнала  $y(t)$ , необходимо выполнить весовую обработку по формуле

$$\tilde{F}(k) = \alpha_0 F(k) + \sum_{\ell=1}^L \alpha_\ell (F(k-\ell) + F(k+\ell)),$$

где параметры  $L$ ,  $\alpha_\ell$  определяют соответствующее весовое окно.

По результатам работы [2] можно сделать вывод, что для целей вибродиагностики представляют интерес весовые окна Хэннинга, Хэмминга, Блэкмана и Блэкмана-Херриса. В табл. I приводятся параметры этих окон, максимальный уровень боковых лепестков окна  $H_{max}$ , который

определяет максимальный динамический диапазон при выделении "слабых" составляющих рядом с "сильными" составляющими спектра, относительная ошибка  $\delta A$  оценки амплитуды  $A$  составляющей.

Рассмотренный процесс обработки обеспечивает получение совокупности равномерных отсчетов спектра сигнала. Наиболее часто решаемой задачей при анализе спектров вибросигнала является выделение гармонических составляющих на фоне шума и оценка значений их амплитуд.

Т а б л и ц а 1

Параметры весовых окон

Весовое окно	L	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$H_{max}$ , дБ	$\delta A$ , %
Хэнинга (ХН)	1	0,5	-0,5	0	0	-32	14,9
Хэмминга (ХМ)	1	0,54	-0,49	0	0	-43	16,8
Точное							
Блэкмана (ТБ)	2	0,42	-0,5	0,08	0	-58	11,9
Блэкмана-Хэрриса (БХ1)	2	0,42324	-0,49755	0,07922	0	-67	11,9
Блэкмана-Хэрриса (БХ2)	2	0,44959	-0,49364	0,05677	0	-61	13,6
Блэкмана-Хэрриса (БХ3)	3	0,35875	-0,48829	0,14128	-0,01168	-92	8,7
Блэкмана-Хэрриса (БХ4)	3	0,40217	-0,49703	0,09392	-0,00183	-74	10,8

Однако из-за дискретности спектра вибросигнала по частоте с шагом  $\Delta f = F_{KB}/N$  максимальная погрешность оценки частоты  $f_c$  составляющей спектра равна  $\Delta f_0 = F_{KB}/2N$ . При этом относительная  $\delta A$  ошибка оценки амплитуды  $A_c$  составляющей в зависимости от применяемого весового окна может быть определена по табл. 1, из которой видно, что для любого из указанных окон эта ошибка составляет примерно 10%.

В работе [3] рассмотрен метод интерполяции, обеспечивающий повышение точности оценки  $A_c$  и  $f_c$ . Для этого, исходя из интерпретации БПФ как набора полосовых фильтров, рассматривают отклики на выходах двух фильтров, центральные частоты амплитудно-частотных характеристик которых - ближайшие к частоте анализируемой гармоники. Значения  $A_n$

и  $A_{n+1}$  являются откликами фильтров с номерами  $n$  и  $n+1$  на гармонике сигнала с частотой  $f_c = (n+\beta)f_0$ , где  $0 \leq \beta \leq 1$ , и амплитудой  $A_c$ . Для нахождения точной оценки величины  $f_c$  и  $A_c$  предлагается решать трансцендентное уравнение

$$A_{n+1} |H(f_c - n f_0)| = A_n |H(f_c - (n+1) f_0)|.$$

Для обработки вибросигналов такой подход оказывается малоэффективным. Так как число спектральных составляющих велико, то решение множества трансцендентных уравнений потребует больших затрат времени. Кроме того, в спектре вибросигнала присутствуют узкополосные шумовые составляющие, для которых данный метод (в силу отсутствия процедуры исключения их из анализа) будет давать систематическую ошибку.

Поэтому предлагается следующий метод, свободный от указанных выше недостатков.

Во-первых, выделяются не два, а три значения ( $A_n, A_{n+1}, A_{n-1}$ ) откликов фильтров с номерами  $n, n+1, n-1$ .

Во-вторых, уточнение частоты и амплитуды составляющей выполняется по безразмерному коэффициенту

$$\gamma = \frac{A_{n+1} A_{n-1}}{A_n}.$$

В-третьих, точная оценка частоты и амплитуды составляющей определяется в виде

$$f_c = \Delta f_0 \left( n + \sum_{k=1}^{M_f} \mu_{fk} \gamma^k \right);$$

$$A_c = A_n \left( 1 + \sum_{k=1}^{M_a} \mu_{ak} |\gamma|^k \right),$$

где  $\mu_{fk}, \mu_{ak}, M_f, M_a$  - параметры интерполяции, получаемые с помощью численного моделирования.

Параметры интерполяции найдены методом последовательного подбора. Величина максимальной ошибки оценки частоты  $\delta_f$  и амплитуды  $\delta A$  составляющей спектра сигнала приведены в табл. 2. Погрешность по частоте оценивалась относительно  $\Delta f_0$ .

Сравнение величины погрешности оценок (см. табл. I и 2) показывает, что разработанный метод интерполяции обеспечивает существенное уменьшение максимальной ошибки оценки амплитуды и частоты гармонического

Т а б л и ц а 2

Параметры интерполяции оценок и величина погрешности

Весовое окно	$\mu_{f1}$	$\mu_{f2}$	$\mu_{a1}$	$\mu_{a2}$	$ \delta f , \%$	$ \delta A , \%$
ХН	0,672	-0,056	0	0,28	0,24	0,1
ХМ	0,665	-0,08	0,009	0,29	0,14	0,1
ТБ	0,801	-0,073	0	0,305	0,1	0,07
БХ1	0,812	-0,099	0	0,305	0,3	0,07
БХ2	0,75	-0,076	0,006	0,295	0,1	0,06
БХ3	0,951	-0,064	0	0,335	0,1	0,067
БХ4	0,825	-0,062	0	0,305	0,1	0,085

сигнала. В то же время при обработке узкополосных шумовых составляющих погрешность оценки интенсивности лежит в пределах погрешности оценки амплитуд периодических составляющих, так как значение  $\gamma$  в этом случае равно нулю.

Таким образом, разработанный метод позволяет преодолеть методические ограничения по точности измерения частоты и амплитуды гармонического сигнала и значительно повысить точность цифрового спектрального анализа вибросигналов в существующих и разрабатываемых системах.

#### Л и т е р а т у р а

1. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. - М.: Мир, 1978. - 848 с.
2. Хэррис Ф. Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье. - ТИИЭР, 1978, № 1, с. 60-96.
3. Еранов В.М., Коршевер И.И., Лобастов В.М. О повышении точности спектрального анализа периодических сигналов при дискретном преобразовании Фурье. - Автометрия, 1973, № 3, с. 11-17.