

2. Черницер В.М., Кадух Б.Г. Преобразователи временного масштаба. М., "Советское радио", 1972.

П.П.Власов

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД СЛЕДЯЩЕГО АНАЛИЗА ВИБРАЦИЙ ГТД

Диагностические исследования газотурбинных двигателей (ГТД) по вибрационным параметрам в общем случае включают в себя 2 этапа: преобразование поступающей на вход диагностического анализатора суммы вибрационного шума и сигнала, соответствующего диагностируемому узлу двигателя, к виду, наилучшим образом обеспечивающему принятие решения; принятие решения о наличии или отсутствии полезного сигнала либо о значениях параметров сигнала. В соответствии с определенными правилами затем делается вывод о наличии или отсутствии неисправностей.

Второй этап решается методами распознавания образов и выходит за рамки данной работы. Ограничимся рассмотрением методов, которыми решаются задачи первого этапа.

Спектральный анализ в настоящее время является основным методом при решении задач выделения полезного сигнала. В то же время практика вибрационных исследований в ряде случаев показывает неоптимальность этого метода обработки и неадекватность его структуре вибрационного сигнала. Для пояснения данного положения рассмотрим кратко суть оптимальной и адекватной фильтрации.

В наиболее общей форме вопросы оптимальной обработки сигналов рассматриваются статистической теорией обнаружения сигналов [1]. Ограничимся тем случаем, когда форма полезного сигнала в основном заранее известна, а информация заключена в априорно неизвестных, в общем случае случайных параметрах этого сигнала. Такой вид сигнала характерен для вибрации ГТД, так как модель смеси частотно-модулированной синусоиды с вибрационным шумом во многих случаях ближе к реальным компонентам вибрационного сигнала, чем представление их в виде чисто случайного узкополосного процесса.

Для таких сигналов удобно разграничить два вида задач. К первому относятся задачи обнаружения сигналов. Методы решения этих задач находят применение в диагностике технического состояния ГТД для обнару-

жения сигнала, соответствующего развивающейся неисправности.

Ко второму типу задач относятся такие, которые требуют не только выделения сигнала в шумах, но и достаточно точное воспроизведение на выходе фильтра закона изменения полезного сигнала или некоторых его параметров (частота, амплитуда и т.д.) [2]. Такая постановка задачи характерна для диагностических исследований ГТД, где диагностическими параметрами являются, в основном, либо амплитуда компоненты, соответствующей данному узлу, либо закон ее изменения во времени на переходных или стационарных режимах двигателя. В качестве критерия точности принимается среднеквадратичная ошибка воспроизведения. Фильтр, имеющий оптимальную форму амплитудно-частотной характеристики, должен обеспечивать минимум среднеквадратичной ошибки, т.е.

$$\left[U_{\delta_{\text{вх}}} (t) - \delta S_{\delta_{\text{вх}}} (t) \right]^2 = \left[S_{\delta_{\text{вх}}} (t) + n_{\delta_{\text{вх}}} (t) - \delta S_{\delta_{\text{вх}}} (t) \right]^2, \quad (1)$$

где $S_{\delta_{\text{вх}}} (t)$ и $n_{\delta_{\text{вх}}} (t)$ - полезный сигнал и шум на входе фильтра;

$S_{\delta_{\text{вых}}} (t)$ и $n_{\delta_{\text{вых}}} (t)$ - полезный сигнал и шум на выходе фильтра;

$$U_{\delta_{\text{вых}}} (t) = S_{\delta_{\text{вых}}} (t) + n_{\delta_{\text{вых}}} (t) \quad ; \quad (2)$$

δ - нормирующий множитель.

До настоящего времени нет специальной формулировки условий оптимальной линейной фильтрации для этого типа задач в общем случае. Решение в каждом конкретном случае разное. Можно считать, что вибрационный сигнал имеет детерминированную основу: форма каждой компоненты приблизительно синусоидальная при известной с определенной точностью частоте $f_n = k_n f_{\text{ром}}$, где коэффициент k_n для данной гармоники определяется

из кинематического расчета двигателя, а частота вращения ротора двигателя $f_{\text{ром}}$ измеряется датчиком оборотов тахометрического или импульсного типа. Вся полезная диагностическая информация заключена, как правило, в параметрах амплитуды или энергии компоненты.

Запишем сигнал на входе фильтра, состоящий из компоненты вибрационного сигнала и шума, в следующем виде:

$$\begin{aligned} U_{\delta_{\text{вх}}} (t) &= S_{\delta_{\text{вх}}} (t) + n_{\delta_{\text{вх}}} (t) = A_{m_{\delta_{\text{вх}}}} (t) \cos \omega_{\text{oi}} (t) t + n_{\delta_{\text{вх}}} (t) = \\ &= A_{m_{\delta_{\text{вх}}}} (t) \cos \left[\omega_{\text{oi}} (t) + \omega_{\text{oi}} (t) \right] t + n_{\delta_{\text{вх}}} (t), \end{aligned} \quad (3)$$

где $A_{m_{\delta_{\text{вх}}}} (t)$ - амплитуда компоненты; $n_{\delta_{\text{вх}}} (t)$ - вибрационный шум; $\omega_{\text{oi}} (t)$ - детерминированная часть частоты компоненты, равная $2\pi n f_{\text{ром}} (t)$; n - номер гармоники; $\omega_{\text{oi}} (t)$ - случайная часть частоты компоненты.

Введение $\omega_{ci}(t)$ отражает степень незнания частоты компоненты, т.е. появление $\omega_{ci}(t)$ вызывается погрешностью ее измерения.

При любой форме амплитудно-частотной характеристики фильтра точность измерения диагностических параметров тем выше, чем уже полоса пропускания фильтра. В случае вибрационного сигнала сужению полосы пропускания препятствуют флуктуации оборотов ротора. Стационарный фильтр с неизменными параметрами не может быть уже, чем спектр компоненты, подверженной частотной модуляции из-за флуктуаций оборотов. Для измерения компоненты на переходных режимах стационарный фильтр вообще не пригоден. Таким образом, спектральный анализ решает задачу адекватной фильтрации сигнала вида

$$U_{sx}(t) = A_{msx}(t) \cos \omega_c t. \quad (4)$$

Даже подбирая коэффициент передачи фильтра оптимальным образом, трудно получить достаточную для диагностических исследований точность. Это связано с вынужденным расширением полосы фильтра из-за флуктуаций оборотов и с перекрытием спектром амплитудной и частотной модуляции компоненты.

Поэтому в практике вибрационных исследований все шире применяются узкополосные фильтры, снабженные блоком синхронной с изменениями частоты компоненты перестройки частотно-избирательной системы. При этом фильтр непрерывно следит за данной компонентой как на стационарных, так и на переходных режимах работы ГТД. Такой способ получил название следящего анализа.

В вибрационных исследованиях обычно диагностическими признаками являются параметры амплитуды компоненты, но для оптимального их измерения необходимо устранить влияние флуктуаций оборотов на стационарных режимах и изменений оборотов на переходных режимах. Последняя задача в свою очередь решается адекватной фильтрацией закона изменения частоты компоненты при наличии вибрационного шума. При устранении влияния частотной модуляции постановка задачи оптимального выделения амплитудных параметров компоненты не отличается от постановки задачи в общей теории оптимальной фильтрации. Поэтому применительно к диагностическим задачам газотурбинной техники представляют интерес методы фильтрации закона изменения частоты компоненты и степень их адекватности вибрационному сигналу.

В настоящее время в вибрационной диагностике применяют 2 вида следящего анализа: системы с внутренним и внешним управлением. Примером систем с внутренним управлением является акустический анализатор

для выявления повреждений во вращающихся частях высокоскоростных двигателей [3]. Структурная схема анализатора приведена на рис. 1. Информация об оборотах ротора в данный момент извлекается из вибрационного сигнала фильтрацией какой-либо сильной составляющей спектра вибраций $f_{\text{синх}}(t)$ и преимуществ таких систем следует отнести высокую точность отсле-



Р и с. 1. Система с внутренним управлением

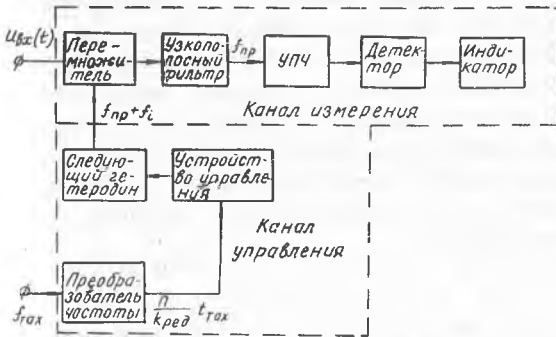
живания по частоте, а отсюда — узкую полосу анализа. Недостатками являются неинвариантность к режиму работы ГТД и необходимость априорного знания частоты синхронизирующего сигнала. Таким образом, системы с внутренним управлением решают задачу адекватной фильтрации сигнала вида

$$U_{\delta x}(t) = A_{\text{мбх}}(t) \cos [\omega_0 + \omega_c(t)]t + n_{\delta x}(t), \quad (5)$$

т.е. не учитывают изменение детерминированной части сигнала.

Внешнее управление заключается в использовании информации об оборотах от штатного датчика оборотов. Сигнал датчика преобразуется соответствующим образом для получения в канале управления сигнала частоты $f_i(t) = n f_{\text{пор}}(t)$. Если частота сигнала датчика оборотов $f_{\text{датч}}(t) = k_{\text{ред}} f_{\text{пор}}(t)$, где $k_{\text{ред}}$ передаточное отношение привода датчика оборотов, то преобразование сигнала в канале управления заключается в умножении частоты $f_{\text{датч}}(t)$ на коэффициент $n/k_{\text{ред}}$ (рис. 2). В ГТД датчик оборотов может устанавливаться через редуктор с несколькими парами шестерен. Это приводит к очень сложному аппаратному решению указанного преобразования. Отсюда неизбежны ошибки формирования опорного сигнала. Другим источником ошибок является непосредственно сам привод датчика оборотов в связи с возникающими в нем крутильными колебаниями, кинематическими ошибками

и т.д. С выхода блока умножения сигнал поступает в устройство формирования сигнала для управления частотой следящего гетеродина. Функции остальных блоков системы не отличаются от функций этих блоков в систе-



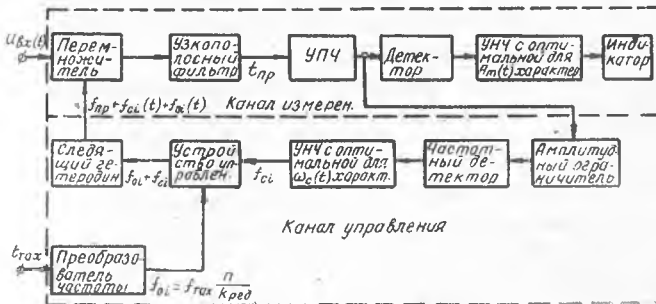
Р и с. 2. Система с внешним управлением

мах с внутренним управлением. К преимуществам систем с внешним управлением относится независимость от режима работы двигателя, и недостаткам — меньшая точность слежения по частоте. Очевидно, такие системы решают задачу адекватной фильтрации сигнала вида

$$U_{вх}(t) = A_{вх}(t) \cos \omega_0(t)t + n_{вх}(t),$$

т.е. учитывается лишь детерминированная часть.

Полную адекватную фильтрацию вибрационного сигнала можно осуществить совмещением обоих принципов управления. Структурная схема такой системы с комбинированным управлением представлена на рис. 3.



Р и с. 3. Система с комбинированным

ЭМ

Перемножитель, узкополосный фильтр, УПЧ и детектор выполняют те же функции, что и в предыдущих системах. С умножителя частоты в $n/k_{ред}$ сигнал частоты $f_c = f_{max} n/k_{ред}$ поступает в устройство формирования управляющего сигнала. С выхода УПЧ сигнал ответвляется на амплитудный ограничитель и частотный детектор, на выходе которого имеем сигнал, пропорциональный случайной части частоты компоненты f_{ci} , с наложенным на нее шумом. Далее с помощью устройства с оптимальным по критерию зависимости (I) коэффициентом передачи осуществляется с минимальной ошибкой выделение закона изменения случайной части частоты компоненты $f_{ci}(t)$. Устройство формирования управляющего сигнала суммирует $f_{ci}(t)$ и $f_{ci}(t)$ и изменяет частоту опорного сигнала на выходе следующего гетеродина по нужному закону.

Для правильной работы системы необходимо, чтобы полоса захвата петли самосинфазирования включала диапазон погрешности измерения частоты компоненты с помощью внешнего управления. В результате осуществляется адекватная фильтрация закона изменения частоты компоненты.

Для выделения оптимальным образом диагностических параметров амплитуды необходимо осуществить следующий шаг: подобрать нужную форму коэффициента передачи в канале измерения амплитуды. Это осуществляется блоком с оптимальным коэффициентом передачи, на выходе которого имеем с минимальной ошибкой закон изменения амплитуды компоненты. Поскольку влияние флуктуаций оборотов устранено, то задачу можно рассматривать в обычной постановке теории оптимальной линейной фильтрации сигналов.

Л и т е р а т у р а

1. В а й н ш т е й н Л.А., З у б а к о в Б.Д. Выделение сигналов на фоне случайных помех. М., "Советское радио", 1960.
2. В и н и ц к и й А.С. Модулированные фильтры и следящий прием ЧМ сигналов. М., "Советское радио", 1969.
3. Акустический анализатор для выявления повреждений во вращающихся частях высокоскоростных двигателей. Патент США № 3400578.