

УДК 621.833: 519.004

## ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ МАШИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ В НЕЛИНЕЙНОЙ ВИБРОДИАГНОСТИКЕ МЕТОДОМ КАСКАДНОЙ ДЕМОДУЛЯЦИИ ВИБРАЦИИ

© Феликс Янович Балицкий, Ася Григорьевна Соколова,

Галина Владимировна Долаберидзе, Марина Анатольевна Иванова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

[fbalitsky@gmail.com](mailto:fbalitsky@gmail.com), [agsokolova@gmail.com](mailto:agsokolova@gmail.com)

**Аннотация.** Результаты диагностических испытаний сложного машинного оборудования, особенно при одновременном развитии нескольких неисправностей, не всегда легко интерпретируемы в рамках линейной теории колебаний. Это связано с тем, что деградация технического состояния узлов оборудования приводит к искажениям геометрии сопряженных деталей, появлению зазоров между ними, проскальзыванию и неравномерностью движения, появлению ударного возмущения, автоколебательного режима и т.п. Поэтому при диагностике развитых дефектов полезно опираться на нелинейную интерпретацию виброакустических процессов. В частотной области нелинейное взаимодействие элементов механизма проявляется в виде многочисленных трудно интерпретируемых комбинационных частот, маскирующих физически обусловленные основные частоты проявления дефектов. Метод «каскадной демодуляции», т.е. многократное повторение процедуры полосовой фильтрации вибросигнала с последующим детектированием вновь сформированного сигнала, позволяет выделить главные компоненты и представить в доступной форме диагностические признаки развитых дефектов. В статье приведены примеры применения «двойной демодуляции» для локализации источников возбуждения при диагностике подшипника качения в газотурбинном двигателе и селекции локальных и распределенных дефектов узлов вертолетного редуктора.

**Ключевые слова:** машинное оборудование, дефекты, вибродиагностика, вибрационный процесс, спектр, несущая частота, комбинационная частота, узкополосная фильтрация, демодуляция, огибающая, каскадная демодуляция, глубина модуляции

### 1 Введение

В статье предлагается к рассмотрению метод каскадной демодуляции вибрационных процессов и результаты его применения для диагностики сложного машинного оборудования, особенно при одновременном развитии нескольких неисправностей, не всегда легко интерпретируемых в рамках линейной теории колебаний. Характер изменения вибрационных процессов в машинах и механизмах, вызванных изменением технического состояния контактирующих поверхностей элементов кинематических пар между собой или с внешней средой можно описать с помощью спектральных характеристик параметров огибающих узкополосных вибрационных процессов в окрестности вынужденных и собственных частот механической системы [1-2].

В основе технологии диагностирования зарождающихся дефектов узлов машинного оборудования лежат математические соотношения, связывающие вид и глубину (индекс) модуляции (амплитудной или частотной) в окрестности частот вынужденных колебаний узла (гармоник частоты пересопряжения зубьев  $f_z$  в зубчатой передаче редуктора, лопаточной частоты  $f_l$  ступени турбины, компрессора и других машин роторного типа), модуляции в окрестности собственной частоты  $f_c$  узла.

Локальный дефект типа выкрашивания поверхностей (питтинг, эрозия, коррозия) модулирует амплитуду несущей частоты вынужденных колебаний  $f_z$  гармониками частоты мелькания дефекта  $f_d$ . Периодическое попадание дефекта в зону контакта (с частотой  $f_d$ ) приводит к появлению в спектре вибросигнала в окрестности вынужденной частоты комбинационных частот вида  $(f_z \pm kf_d)$ . В машинах роторного типа частота проявления дефекта  $f_d$  обычно совпадает с частотой вращения вала (роторной частотой  $f_p$ ) и ее гармониками. Развитие такого дефекта сопровождается изменением глубины амплитудной модуляции (АМ). Одновременно развивающиеся деградационные процессы в разных узлах механизма при нелинейном взаимодействии между ними могут приводить к многократной модуляции исходных вибрационных процессов на частотах вынужденных и собственных колебаний. Локальный дефект типа задира (заедания, схватывания) контактирующих поверхностей модулирует саму частоту вынужденных колебаний, при этом совместно с частотной (ЧМ) или фазовой модуляцией (ФМ) возникает и амплитудная модуляция (АМ).

Один из методов диагностирования зарождающихся дефектов состоит в выделении амплитудной огибающей вибросигнала на резонансных частотах самого механизма. Метод основан на том, что импульсная последовательность ударных возмущений, возникающих при попадании локального дефекта в зону контакта, вызывает отклик механической системы на собственных частотах дефектного узла в виде осциллирующих затухающих колебаний типа амплитудно-импульсной модуляции (АИМ), имеющих спектр отклика в виде комбинационных частот  $(f_c \pm kf_d)$  в окрестности собственной частоты узла  $f_c$ , где  $f_d$  – частота следования импульсов,  $k = 1, 2, \dots$ . При этом огибающая спектра имеет форму резонансной кривой гармонического осциллятора. Разновидностью резонансного метода является метод анализа ударных импульсов на резонансной частоте датчика.

Нелинейные взаимодействия элементов механизма при одновременном развитии нескольких дефектов приводят к появлению в вибрационном сигнале многочисленных комбинационных частот, являющихся результатом взаимодействия различных источников возбуждения. В таком случае для идентификации вида повреждений элементов механизма целесообразно применять метод каскадной демодуляции сигналов, т.е. многократного проведения процедуры полосовой фильтрации с последующей демодуляцией вновь сформированного сигнала [2-3]. На практике даже двукратное повторение данной процедуры - двойная демодуляция – позволяет сформировать информативные диагностические признаки неисправностей, существенно дополняющие информацию, полученную при однократной демодуляции. Метод каскадной демодуляции оказывается особенно эффективным при использовании сигнала первичной демодуляции в области высоких частот за пределами основных частот вынужденных колебаний механизма. Тем не менее, использование технологии каскадной демодуляции достаточно узкополосного вибросигнала в окрестности одной из основных частот возбуждения оборудования (зубцовой, лопаточной и т.п.) также дает положительный эффект при выделении низкочастотных составляющих сигнала огибающей, не поддающихся анализу другими методами из-за плохого частотного разрешения.

## 2 Математические модели модулированных сигналов

Простейший амплитудно-модулированный сигнал [1] определяется выражением

$$\begin{aligned} x(t) &= A[1 + m\cos(\Omega t + \varphi)]\cos\omega_0 t = \\ &= A\cos\omega_0 t + (1/2)Am\cos[(\omega_0 - \Omega)t - \varphi] + (1/2)Am\cos[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi], \end{aligned} \quad (1)$$

где  $A$  – амплитуда синусоидального сигнала угловой несущей частоты  $\omega_0$ ,  $m$  – глубина амплитудной модуляции,  $\Omega$  - модулирующая частота. Функция  $A[1 + m\cos(\Omega t + \varphi)]$  описывает огибающую модулированного сигнала. Фазы боковых составляющих отличаются на

начальную фазу  $\varphi$ , которая при  $\Omega \ll \omega_o$  стремится к величине  $\varphi \leq \pi/2$  и вследствие малости в дальнейшем опущена.

Как следует из выражения (1), спектр простейшего амплитудно-модулированного сигнала состоит из трех компонентов: несущей частоты и двух боковых комбинационных частот. Глубину амплитудной модуляции простейшего сигнала по форме симметричного спектра в соответствии с выражением (1) можно оценить как удвоенное отношение спектральной амплитуды боковой составляющей к амплитуде несущей частоты.

При произвольном модулирующем сигнале  $A(t)$  амплитудно-модулированный сигнал можно представить выражением

$$x(t) = A(t)\cos\omega_o t = A[1 + m\gamma(t)]\cos\omega_o t = A\left[1 + \sum_{k=1}^n m_k \cos(k\Omega t + \varphi_k)\right]\cos(\omega_o t + \varphi_o) \quad (2)$$

где  $m_k$  – парциальный коэффициент амплитудной модуляции.

Этот сложный процесс может быть разложен на сумму простых синусоидальных колебаний:

$$x(t) = A\left\{\cos(\omega_o t + \varphi_o) + \sum_{k=1}^n \frac{m_k}{2} \cos[\omega_o + k\Omega)t + \varphi_o + \varphi_k] + \sum_{k=1}^n \frac{m_k}{2} \cos[(\omega_o - k\Omega)t + \varphi_o - \varphi_k]\right\} \quad (3)$$

где первый член – колебания несущей частоты  $\omega_o$ , второй член –  $n$  колебаний верхних боковых частот  $\omega_o + k\Omega$ , третий член –  $n$  колебаний нижних боковых частот  $\omega_o - k\Omega$ . Ширина спектра амплитудно-модулированного процесса равна удвоенной ширине полосы огибающей.

В общем случае амплитудно-модулированный случайный сигнал можно представить в виде

$$x(t) = \gamma(t)\eta(t), \quad (4)$$

где  $\gamma(t)$  – модулирующая медленно меняющаяся функция,  $\eta(t)$  – случайная высокочастотная составляющая. При этом спектр модулированного сигнала может быть достаточно сложным и несимметричным относительно несущей частоты, что может быть обусловлено как формой амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) механической системы, так и наличием частотной модуляции.

При рассмотрении несимметричного спектра модулированного узкополосного процесса в окрестности несущей частоты  $f_o$  вида

$$S(f) = A(f_o) + \sum_{i=1}^k B_i(f_o - f_{mi}) + \sum_{i=1}^k C_i(f_o + f_{mi}), \quad (5)$$

когда амплитуды боковых спектральных составляющих  $B_i(f_o - f_{mi})$  и  $C_i(f_o + f_{mi})$  отличаются друг от друга ( $B_i \neq C_i$ ), глубину амплитудной модуляции сигнала  $f_o$  сигналом с частотой  $f_{mi}$  можно оценить по формуле:

$$m_i = [2(B_i^2 + C_i^2)]^{1/2} / A \quad (6)$$

Ниже приведена математическая модель дважды модулированного по амплитуде синусоидального сигнала с несущей частотой  $f_0$  и амплитудой  $A$  синусоидальными сигналами с частотами  $f_1$  и  $f_2$  с коэффициентами модуляции  $m_1$  и  $m_2$ :

$$X(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0) \{1 + m_1 \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1) [1 + m_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2)]\}. \quad (7)$$

Аналогично можно представить модель сигнала при многократной модуляции. Для идентификации модуляционных частот и, соответственно, источников повреждающих воздействий в данном случае необходимо реализовать процедуру каскадной демодуляции.

### 3 Демодуляция вибросигнала с использованием преобразования Гильберта

При анализе сигналов вибрации в дискретной форме, используются цифровые методы формирования огибающей. Цифровой детектор огибающей, как и его электронный аналог, может включать в себя последовательные операции: полосовой фильтрации, демодуляции, децимации, низкочастотной фильтрации. Затем производится операция спектрального анализа огибающей.

Наиболее эффективен метод выделения огибающей с помощью преобразования Гильберта [4], позволяющего получать не только амплитудную, но и частотную (фазовую) огибающие. С помощью преобразования Гильберта, устанавливается связь между вещественной и мнимой частями одностороннего сигнала, определяемого при  $t \geq 0$ , и равного нулю при  $t < 0$ .

Для сигнала  $x(t)$  сопряженный по Гильберту сигнал определяется выражением

$$H\{x(t)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \frac{1}{\tau - t} d\tau, \quad (8)$$

где  $\tau$  – независимая переменная;  $x(t)$  и  $H\{x(t)\}$  – вещественные сигналы.

Если случайный узкополосный процесс представить в общем виде выражением

$$x(t) = A(t) \cos \varphi(t), \quad (9)$$

где  $A(t)$  – его огибающая, а  $\varphi(t)$  – фаза, то эти параметры сигнала могут быть получены с помощью преобразования Гильберта.

Для разделения сигналов с амплитудной и фазовой модуляцией, имеющих общий вид (9), на простые составляющие, целесообразно воспользоваться его комплексным представлением в виде аналитического сигнала

$$z^*(t) = x(t) - j H\{x(t)\}. \quad (10)$$

При использовании представления сигнала в комплексной форме (10) амплитуду и фазу можно представить в виде

$$A(t) = [x^2(t) + H^2\{x(t)\}]^{1/2}, \quad (11)$$

$$\varphi(t) = \arctg [H\{x(t)\} / x(t)]. \quad (12)$$

При этом мгновенная частота сигнала определяется выражением

$$\omega(t) = d\varphi(t) / dt. \quad (13)$$

Преобразование Гильберта позволяет разделять модулирующие функции  $A(t)$  и  $\varphi(t)$  при любом виде этих сигналов, т.е. получать временные реализации сигналов амплитудной и частотной огибающих. Каждый из этих сигналов может быть представлен в частотной области в форме спектра с помощью преобразования Фурье для последующего анализа

спектральных составляющих и идентификации эксплуатационных повреждений машинного оборудования.

#### 4 Спектральный анализ параметров амплитудной и частотной огибающих

Для физической интерпретации сигналов амплитудной и частотной огибающих вибросигналов на вынужденных частотах механизма, когда составляющие сигналов огибающих привязаны к частотам возбуждения конкретного узла, процедуре демодуляции должна предшествовать процедура узкополосной фильтрации в полосе  $\Delta f$  в окрестности несущей частоты  $f_0$ . Ширина полосы узкополосного фильтра должна отвечать требованию:  $\Delta f / f_0 \ll 1$ .

Для снижения уровня высокочастотных помех после процедуры демодуляции, сигнал огибающей целесообразно пропустить через низкочастотный фильтр.

Увеличения частотного разрешения спектра огибающей можно добиться путем проведения операции децимации (прореживания) отсчетов временного сигнала огибающей перед операцией быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Алгоритм расчета индексов амплитудной модуляции (АМ) по спектру огибающей складывается из следующих операций:

- расчет значения математического ожидания амплитудной огибающей  $\bar{A}(t)$ ;
- деление значений амплитуд составляющих спектра амплитудной огибающей  $S_A(f_i)$

на поправочный коэффициент  $\bar{A}(t)$ .

Полученные расчетные значения спектральных амплитуд являются оценками глубины (индексов) амплитудной модуляции  $m_i$  исходного сигнала на соответствующих модуляционных частотах  $f_i$ :

$$m(f_i) = S_A(f_i) / \bar{A}(t). \quad (14)$$

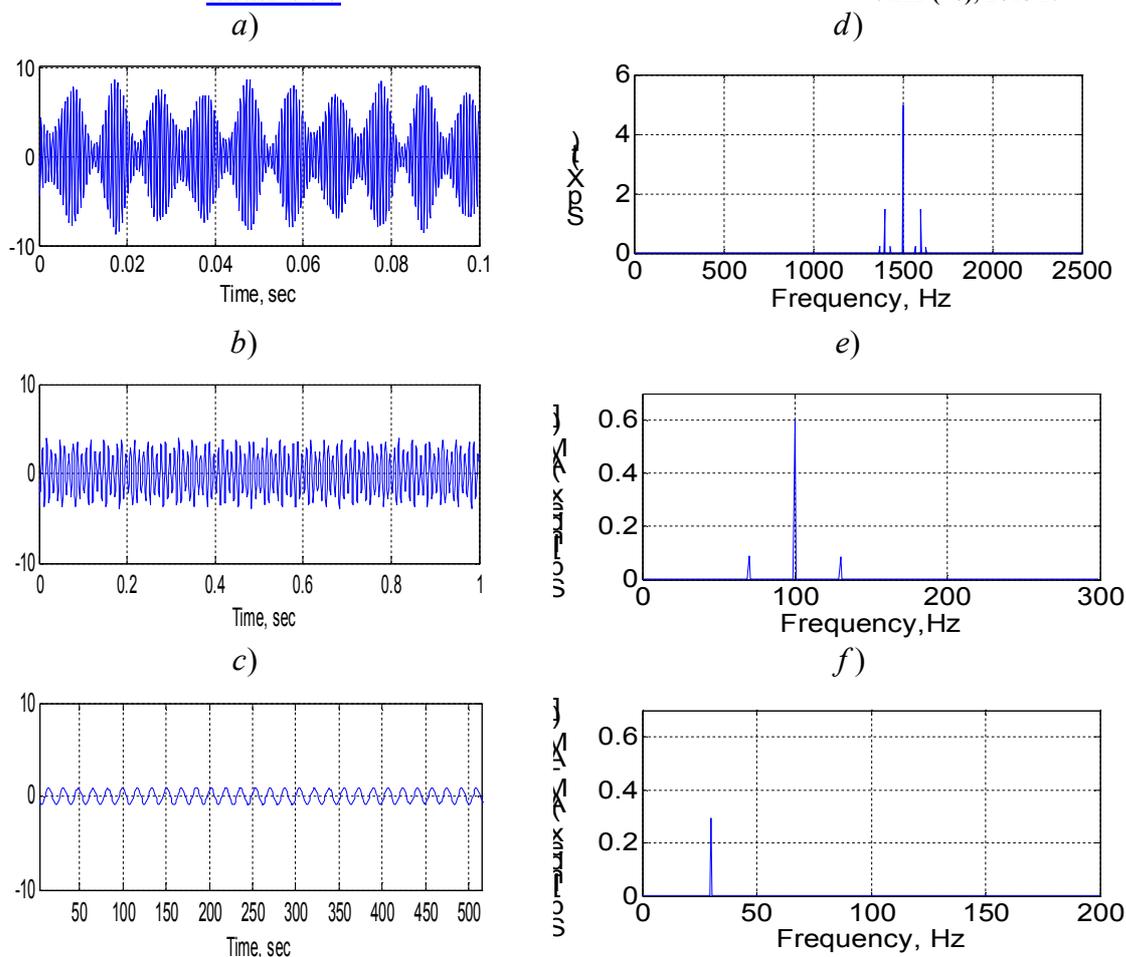
Оценка индексов частотной модуляции (девиации частоты) на характерных модуляционных частотах  $f_j$  производится непосредственно по спектру частотной (фазовой) огибающей  $S_\phi(f_j)$

$$M(f_j) = S_\phi(f_j). \quad (15)$$

#### 5 Результаты имитационного моделирования

Для отработки методики оценки индексов амплитудной модуляции вибросигнала по специально разработанной программе каскадной демодуляции была построена математическая модель (7) узкополосного процесса в виде синусоидального сигнала несущей частоты  $f_0=1500$  Гц и амплитуды  $A=5$ , дважды модулированного по амплитуде также синусоидальными сигналами с частотами:  $f_1=100$  Гц и  $f_2=30$  Гц с коэффициентами модуляции  $m_1=0.6$  и  $m_2=0.3$ . Параметры модели приблизительно отображают параметры реального узкополосного вибрационного процесса в окрестности частоты дефекта внутреннего кольца шарикового подшипника компрессора низкого давления газотурбинного двигателя ДГ-90.

Результаты последовательной каскадной демодуляции модельного сигнала приведены на рисунке 1 во временной и частотной областях.



**Рис.1.** Параметры модели дважды амплитудно-модулированного (АМ-АМ) синусоидального сигнала. Слева – временные реализации: *a*) – исходной модели сигнала  $x(t)$ ; *b*) – центрированного сигнала амплитудной огибающей (АМ) при первичной демодуляции; *c*) – центрированного сигнала амплитудной огибающей (АМ-АМ) при вторичной демодуляции. Справа – спектры: *d*) – исходной модели сигнала  $Sp(X)$ ; *e*) – индекса первичной демодуляции  $Sp [Index (AM)]$ ; *f*) – индекса вторичной демодуляции  $Sp [Index (AM-AM)]$ .

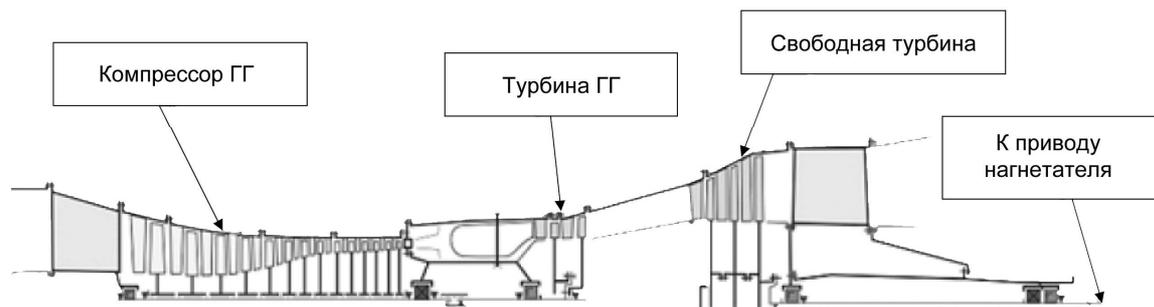
В спектре модели узкополосного вибросигнала, имитирующей повреждение внутреннего кольца шарикового подшипника (Рисунок 1, *d*), в окрестности несущей частоты 1500 Гц отчетливо видны триады комбинационных частот. Комбинационные частоты первого порядка отстоят от основной частоты на 100 Гц (1400 Гц и 1600 Гц). В свою очередь они модулированы частотными составляющими, отстоящими от боковых частот 1400 Гц и 1600 Гц на 30 Гц. Спектр индекса первичной демодуляции содержит в окрестности частоты 100 Гц две комбинационные частоты  $(100 \pm 30)$  Гц. При вторичной демодуляции модельного сигнала в качестве анализируемого сигнала используется сигнал амплитудной огибающей первичного преобразования Гильберта. Спектр индекса вторичной амплитудной модуляции содержит только частоту 30 Гц (Рисунок 1, *f*).

## 6 Результаты применения метода каскадной демодуляции для идентификации эксплуатационных повреждений узлов машинного оборудования

Ниже приведен пример применения «двойной демодуляции» для локализации источников возбуждения при диагностике подшипника качения в газотурбинном двигателе (ГТД). На рисунке 2 приведена конструктивная блок-схема газотурбинной установки (ГТУ) компрессорной газоперекачивающей станции на базе трехвального ГТД судового типа ДГ-90Л2 с различными, не синхронизованными между собой оборотами валов входного

компрессора низкого давления (КНД), компрессора высокого давления (КВД) с турбиной газогенератора, и свободной (силовой) турбины (СТ), соединенной через муфту сцепления с центробежным нагнетателем. Один из двигателей компрессорной установки был снят с эксплуатации из-за внезапно возникшего эксплуатационного повреждения, как выяснилось при разборке двигателя в условиях ремонтного завода, - шарикового подшипника передней опоры (ПО) КНД. При этом контролируемые вибрационные показатели на корпусе двигателя не вышли за пределы допустимых значений, установленных заводом-изготовителем.

При разборке двигателя на ремонтном заводе было установлено наличие развитого эксплуатационного повреждения внутреннего кольца шарикового подшипника.



**Рис. 2.** Блок-схема газотурбинной установки на базе ГТД судового типа ДГ-90Л2

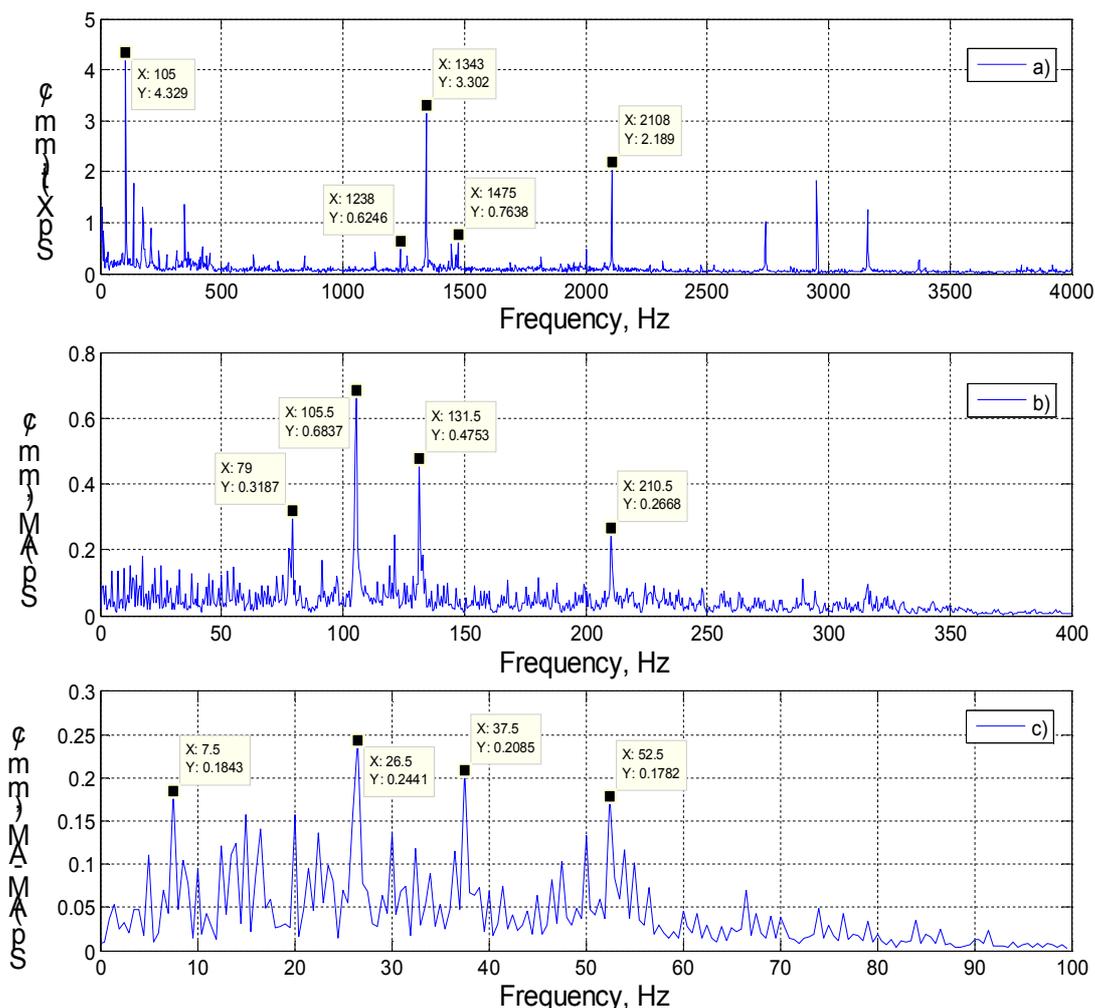
При проведении диагностических исследований вибраций корпусных конструкций газотурбинного двигателя для идентификации частот возбуждения колебаний, связанных с данным повреждением подшипника, а возможно, и источников этих колебаний, был применен метод каскадной демодуляции корпусных вибраций двигателя в сечении, близком к расположению подшипника передней опоры КНД.

Дело в том, что по данным обычного спектрального анализа вибрации и даже спектрального анализа сигнала амплитудной огибающей при однократной демодуляции иногда трудно оценивать значения частот спектральных составляющих. При низком спектральном разрешении и несимметричном расположении боковых составляющих спектра амплитудной огибающей вибросигнала затруднительно (а в ряде случаев и невозможно) идентифицировать частоты вынужденных колебаний других узлов механизма, нелинейно взаимодействующих между собой и имеющих отношение к развитию деградационных процессов в диагностируемом узле.

На рисунке 3 представлены результаты применения каскадной демодуляции корпусной вибрации двигателя ДГ-90 при обнаружении дефекта внутреннего кольца шарикового подшипника передней опоры компрессора низкого давления.

Для идентификации частот, модулирующих колебания подшипника на частоте дефекта подшипника (эксплуатационного повреждения дорожки качения внутреннего кольца) приведены результаты обработки вибрационного процесса при сильном повреждении шарикового подшипника (от 15.12.08). В окрестности частоты дефекта внутреннего кольца шарикового подшипника ( $F_{\text{вк-штп}}=1350$  Гц) на графике рисунка 3, (а) спектра вибрации  $S_p [X(t)]$  видны боковые комбинационные частоты, отстоящие от несущей частоты на частоту вращения вала компрессора низкого давления ( $F_{\text{р-кнд}} \approx 105$  Гц), имеющие вид размытых пиков с несимметрично расположенными боковыми составляющими неизвестного происхождения. Размытость пиков можно объяснить малой разрешающей способностью спектрального анализа исходного короткой выборки ( $N=8096$  отсчетов)

широкополосного вибрационного процесса (в диапазоне частот 0-4.0 кГц) при частоте дискретизации временного сигнала  $F_d=10240$  Гц.



**Рис. 3.** Параметры каскадной демодуляции вибрации ГТД ДГ-90 в точке корпуса КНД-верт на фланце передней опоры компрессора низкого давления от 15.12.2008 – при максимальном повреждении внутреннего кольца шарикового подшипника:

- a) - спектр виброскорости в широкой полосе частот 0 – 4000 Гц;
- b) – спектр индекса первичной амплитудной модуляции  $Sp[Index (AM)]$  в полосе частот 0 - 400 Гц;
- c) - спектр индекса вторичной амплитудной модуляции  $Sp[Index (AM-AM)]$  в полосе частот 0 - 100 Гц

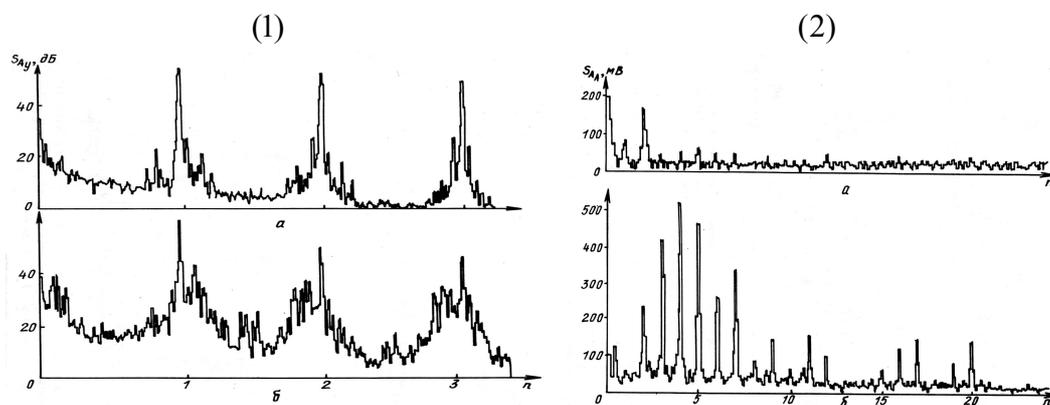
В спектре индекса амплитудной модуляции  $Sp[Index (AM)]$  узкополосного вибросигнала в окрестности частоты дефекта внутреннего кольца  $F_{\text{вк-шп}}$ , представленного на рисунке 3, б), присутствуют гармоники частоты вращения вала компрессора  $F_{\text{р-кнд}} \approx 105$  Гц, что является характерным диагностическим признаком наличия вращающегося вместе с валом компрессора (перемещающегося в пространстве с частотой вращения вала) дефекта внутреннего кольца шарикоподшипника при измерении вибрации в неподвижной точке корпуса двигателя.

В спектре индекса вторичной амплитудной модуляции  $Sp[Index(AM-AM)]$  вибросигнала в окрестности частоты  $F_{\text{р-кнд}}$  при максимальном повреждении подшипника (от 15.12.08) присутствуют такие комбинационные частоты, как например,  $26.6 \text{ Гц} \approx 2(F_{\text{р-кнд}} - F_{\text{р-ст}})$ ,  $32 \text{ Гц} \approx F_{\text{р-кнд}} - F_{\text{р-кнд}}$ ,  $53 \text{ Гц} \approx 4(F_{\text{р-кнд}} - F_{\text{р-ст}})$ , и другие частоты, обусловленные нелинейным взаимодействием колебаний компрессоров низкого и высокого давления (КНД

и КВД) и силовой турбины (СТ) трёхвального газотурбинного двигателя. Это явление может быть обусловлено несоосностью валов агрегатов вследствие угловых или поперечных смещений, т.е. дефектами формы линии вала двигателя, в том числе из-за дефекта подшипника передней опоры КНД. Таким образом, применение метода каскадной демодуляции вибрации корпуса ГТД позволило выявить наличие нелинейного взаимодействия колебаний различных узлов двигателя, связанных между собой общим корпусом и газодинамическими процессами, сопровождающими работу двигателя.

На рисунке 4 приведены результаты применения метода каскадной демодуляции для обнаружения и идентификации эксплуатационных повреждений конического хвостового редуктора вертолет МИ-8.

Проблема идентификации различного типа повреждений даже одной пары зубчатых колес – непростая. Для ее решения необходимо привлекать разнообразные характеристики вибросигнала, с разных сторон описывающие изменения в сигнале при появлении того или иного дефекта. При распознавании локального и распределенного повреждений зубчатого зацепления редукторного механизма хороший результат был получен при использовании метода каскадной (двойной) демодуляции вибросигнала в высокочастотной зоне механизма за пределами основных частот вынужденных колебаний [2-3].



**Рис.4.** Изменение формы спектров амплитудной модуляции высокочастотной вибрации (в окрестности  $f_1=50$  кГц) хвостового редуктора вертолета при повреждении нескольких зубьев ведущего и ведомого колес в нормальном состоянии - (а) и при распределенном дефекте – (б):

(1) – спектры огибающих Sp-AM ( $f_1=50$  кГц,  $\Delta f = 1/3$  октавы) при однократной амплитудной демодуляции высокочастотного вибросигнала;

(2) - спектры огибающих Sp-AM-AM ( $f_1=50$  кГц,  $f_2 = 4$  кГц,  $\Delta f = 1/3$  октавы) при двукратной амплитудной демодуляции.

На рисунках 4-(1) и 4-(2) приведены спектры огибающих виброускорения в точке на корпусе хвостового редуктора вертолета в высокочастотной резонансной зоне в окрестности 50 кГц при нормальном состоянии редуктора (а) и при наличии распределенного дефекта зацепления (локального повреждения нескольких зубьев ведущего и ведомого колес редуктора) – (б). Слева на рисунке 4-(1) приведены спектры амплитудных огибающих Sp-AM ( $f_1=50$  кГц,  $\Delta f = 1/3$  октавы) при однократной демодуляции вибросигнала, справа на рисунке 4-(2) - спектры амплитудных огибающих Sp-AM-AM ( $f_1=50$  кГц,  $f_2 = 4$  кГц,  $\Delta f = 1/3$  октавы) при двукратной демодуляции виброускорения с центральной частотой вторичной каскадной демодуляции  $f_2$ , совпадающей с третьей гармоникой частоты зацепления зубчатой передачи (см.рисунк.4-(1), б).

Сравнение спектров амплитудных огибающих AM и AM-AM (однократно и двукратно демодулированного вибросигнала), приведенных на рисунке 4 (слева при

однократной демодуляции и справа при каскадной двукратной демодуляции), позволяет сделать заключение о том, что спектры двойной демодуляции гораздо информативнее спектров стандартных амплитудных огибающих. Совместное использование этих характеристик позволяет различить локальный и распределенный дефекты зубчатых колес при их одновременном развитии.

### Заключение

В статье рассмотрен метод каскадной демодуляции вибрационных сигналов и приведены примеры его использования для диагностирования эксплуатационных повреждений узлов машинного оборудования. Показано, что локальный дефект контактирующих поверхностей модулирует колебательный процесс на частотах вынужденных и собственных колебаний машины, при этом возникает амплитудная модуляция сигнала (АМ), глубина которой характеризует степень развития дефекта. Одновременное воздействие нескольких источников на развитие деградационного процесса в узле машины при нелинейном взаимодействии её элементов приводит к появлению в вибрационном сигнале многочисленных комбинационных частот, трудно идентифицируемых по спектру обычной амплитудной огибающей из-за низкого частотного разрешения. Исследование параметров огибающих сигналов с двойной амплитудной модуляцией при компьютерном моделировании и вибросигналов, измеренных в полевых условиях на реальных машинах, показали, что использование преобразования Гильберта для анализа огибающих при каскадной демодуляции позволяет с большей вероятностью обнаруживать повреждения машинного оборудования и идентифицировать неисправность в условиях сложного нелинейного взаимодействия его узлов. Для оценки глубины амплитудной модуляции и, соответственно, степени развития неисправности, целесообразно использовать предложенный в статье индекс амплитудной модуляции, сформированный из нормированного спектра огибающей при однократной или каскадной демодуляции узкополосного вибрационного процесса в информативной полосе частот.

### Список литературы

1. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф.Я. Балицкий, М.А.Иванова, А.Г.Соколова, Е.И.Хомяков / Под ред. М.Д.Генкина. – М.: Наука, 1984. 120 с. (in Russian)
2. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с. (in Russian)
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В.Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн.2: Ф.Я.Балицкий, А.В. Барков, Н.А.Баркова и др. Вибродиагностика. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с. (in Russian)
4. Michael Feldman. Hilbert Transformation Applications in Mechanical Vibration. A John Wiley and sons, Ltd. Publication, 2011. - 292 p.