

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВОЙСТВ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ

Данияров Н.А.
(Корпорация Казахмыс)

Кушалиев Д.К., Жалгасбеков А.З., Ильясова А.С., Кушербаев К.Х.
(Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева)

Представлен анализ свойств и математических моделей акустического сигнала, позволяющий проводить контроль транспортной техники с использованием методов виброакустической диагностики.

Теория и практика повышения эффективности технической эксплуатации транспортной техники развивается на основе принципов неразрушающего контроля технического состояния подвижного состава, универсальности методов и средств, обеспечения высокой оперативности и эффективности их использования. В этом направлении большие возможности предоставляют методы виброакустической диагностики, базирующиеся на широком использовании информации, заложенной в колебательных процессах, сопровождающих функционирование механизмов и машин.

Благодаря быстрому развитию вычислительной техники приобретают большое значение оснащение машин встроенными системами контроля их состояния, оснащение машин и их механизмов автоматизированными диагностическими системами на базе микропроцессоров. Это позволяет использовать в качестве диагностических признаков не только спектральные характеристики виброакустических процессов, содержащие информацию об амплитудно-частотных свойствах колебательных процессов и лежащие в основе построения современных систем акустической диагностики, но и характеристики, учитывающие фазовые соотношения между сигналами, их вероятностные, модуляционные и другие свойства.

Физическим носителем информации о техническом состоянии элементов механической системы в акустической диагностике является акустический сигнал - собирательное понятие, включающее в себя информацию не только акустического шума механизма в окружающей среде, но и других колебательных процессах (вибрационных, гидро- или газодинамических и др.), сопровождающих нормальное функционирование технического объекта. Установлено, что характеристики акустического сигнала, содержащие информацию о параметрах технического состояния объекта, называют диагностическими признаками.

Совокупность параметров механизма $z = \{z_1^{(t)}, z_2^{(t)}, \dots, z_n^{(t)}\}$, характеризующих возможное отклонение функционирования механизма от нормального, приводящее к потере работоспособности, определяет состояние механизма в момент времени t . Функционирующий механизм можно рассматривать как некий преобразователь A параметров технического состояния z_i в параметры акустического сигнала u_j

$$u = Az, \quad (1)$$

где $U = \{u_1^{(t)}, u_2^{(t)}, \dots, u_n^{(t)}\}$ - вектор признаков технического состояния в n -мерном пространстве признаков. Задачей акустической диагностики является получение зависимости, обратной (1)

$$z=A^{-1}*U, \quad (2)$$

где A^{-1} - оператор, обратный преобразователь A . На основании имеющихся данных об акустическом сигнале необходимо сделать заключение о параметрах технического состояния объекта. В простейшем случае зависимость (2) может быть функциональной

$$z_i=F_i(u_1, u_2, \dots, u_n), \quad (3)$$

где $i=1, 2, \dots, m$.

Конкретный вид этой зависимости устанавливается в период тарировки. В общем случае постановки распознавание технических состояний функционирования объекта при высоком уровне помех, источниками которых являются непостоянство внешних условий, неполнота описания классов состояний, неопределенность границ между классами и соответствующие им диагностическими признаками.

Для облегчения решения задач диагностирования машин по виброакустическим показателям прибегают к расчленению агрегатов на блоки и СЕ, для каждого из которых составляют свои уравнения вида (3). Наибольшие упрощения достигаются тогда, когда каждому параметру технического состояния z_i удается поставить в соответствие только один диагностический признак $u_i=F_i(z_i)$, инвариантный и другим параметрам состояния. Диагностические признаки в этом случае выбираются на основе математического моделирования динамики агрегата. При отсутствии четких границ между классами состояний и диагностическими признаками задачи акустической диагностики решаются методами технической кибернетики, занимающейся распознаванием образов безотносительно к их физической реализации.

Существуют два основных подхода к задаче распознавания образов: вероятностный и детерминированный. Задача, таким образом, сводится к установлению взаимно-однозначного состояния между пространством признаков и пространством состояний.

Как для описания классов состояний, так и для описания диагностических признаков используются вероятностные меры, отображающие свойства целого класса. Характеристикой центра области служит образ данного класса, или эталонная степень близости вектора диагностических признаков к одному из эталонных оценивается с помощью классифицирующих функций и определенных решающих правил распознавания.

Совокупность последовательных действий при постановке диагноза является алгоритмом диагностирования. Алгоритм распознавания в акустической диагностике частично основывается на диагностических моделях, устанавливающих связь между состоянием агрегата и их отображением в пространстве диагностических признаков. На основании предварительного тестирования разрабатываются алгоритмы диагностирования, включающие формирование системы информативных диагностических признаков, соответствующих появлению предельного износа, построение эталонных изображений для каждого класса технических состояний и разработки правил принятия решения о принадлежности к тому или иному классу. Эффективность процессов диагностирования определяется не только качеством алгоритма диагноза, но и в не меньшей степени качеством средств диагноза.

Система акустической диагностики технического состояния машин и агрегатов состоит из объектов исследований с набором технических состояний подлежащих распознаванию; блока измерения акустического параметра, поставляющего исходящую информацию о состоянии объекта и включающую преобразователи виброакустических процессов в их электрические эквиваленты, усилители, фильтры и другие преобразователи первичной информации, а также многоканальные магнитные регистраторы для долговременного хранения информации и ее последовательной обработки; блока формирования диагностических признаков; блока эталонных значений, назначением которого является постановка диагноза в соответствии в определенными правилами распознавания и выдачи исходной информации для реализации алгоритмов упреждения

потенциальных отказов; блока связи с объектом диагностирования выполняющего функции управления объектом в соответствии с принятым решением о его фактическом состоянии: аварийное включение, перевод на щадящий режим, включение резервов и т. д.

Акустический сигнал имеет довольно сложную структуру, зависящую от его динамики и взаимодействия комплектующих его сборочных единиц (СЕ). Отделение сигнала, полученного от диагностируемой СЕ, сопряжено с определенными трудностями, тем большими, чем меньше каналов измерительной информации используются в эксперименте. Виброакустические процессы, сопровождающие функционирование агрегата можно рассматривать как многополосник с n входами и m выходами, к входам которого приложены обобщенные возмущающие силы. Реакция $Y_k(t)$ на одном из выходов системы (акустический сигнал) является сложной функцией возмущающих сил $P_i(t)$ и динамических характеристик системы L_{ik} . В линейной постановке

$$Y_k(t) = \sum_{i=1}^n L_{ik} \cdot P_i(t) \quad (4)$$

При описании динамических свойств многомерной системы в частотной области оператор преобразования представляют в виде матрицы $H = \|H_{ik}\|$ частотных характеристик $H_{ik}(\omega)$ порядка $n \cdot m$. При некоррелированных воздействиях спектральная плотность сигнала на выходе системы $S_{yk}(\omega)$ равна суперпозиции спектральных плотностей сигналов на выходе k от возмущений на каждом входе $S_{xi}(\omega)$

$$S_{yk}(\omega) = \sum_{i=1}^n |H_{ik}(\omega)|^2 \cdot S_{xi}(\omega) \quad (5)$$

К задаче акустического диагностирования выражение (5) имеет лишь косвенное отношение, поскольку ее конечной целью является оценка изменений параметров технического состояния (степень износа зубчатых колес редуктора, изменение геометрической формы тел подшипнике качения и т. п.), приводящих к изменению возмущающих сил и передаточных функций динамической системы на основании динамической оценки изменения свойств акустического сигнала.

Акустический сигнал u_i соответствующий определенному техническому состоянию объекта диагностирования z_i на пути к вибродатчику не только искажается помехой, характерной для канала i , но суммируется с сигналами от других узлов, также искаженными помехами. Уменьшить влияние помех, возникающих из-за внутриагрегатных связей, можно путем разбиения агрегата на более простые СЕ с установкой датчиков в самых информативных токах конструкции, позволяющих оценить работоспособность данного узла, с максимальным приближением к потенциальным источникам возбуждения колебаний [2,3].

Самой распространенной моделью акустического сигнала, несущего информацию о параметрах технического состояния агрегата, является полигармоническая модель, в наиболее общем виде отображающая физические свойства периодического возбуждения колебаний в агрегате [2]

$$x_i = \sum_{k=1}^n A_k \cdot \cos(k\omega t - \varphi_k), \quad (6)$$

согласно этой модели результаты измерений удобно рассматривать лишь на определенных частотах $k\omega$ кратных основной частоте возбуждения колебаний ω .

В редукторных механизмах такой основной частотой возбуждения является роторная частота

$$f_0 = \omega_0 / 2\pi,$$

где ω_0 - угловая частота вращения ротора.

Амплитуды колебаний на роторных (оборотных) частотах определяется в основном частотой дисбаланса ротора и отношением критической частоты вращения к рабочей.

Помимо роторных частот в спектре акустического сигнала роторного механизма присутствуют такие характерные частоты, как

$$f_z = K \cdot f_0 \cdot z_{ш},$$

где $K=1,2,3,\dots$, $z_{ш}$ - число зубьев шестерни (для зубчатого зацепления редукторного механизма), или

$$f_n = K \cdot f_0 \cdot z_n,$$

где z_n - число лопастей узла механизма (винта, вентилятора, компрессора, турбин), или где $K=1,2,3,\dots$, D_0 - диаметр окружности, проходящий по центрам тел качения; d - диаметр тел качения; z_m - число тел качения, β - угол контакта (для внешней обоймы

$$f_n = K \cdot \frac{D_0 - d \cdot \cos \beta}{2 \cdot D_0} \cdot f_0 \cdot z_m,$$

подшипникового узла вследствие разномерности тел качения и т.д.).

Аналогичная картина наблюдается в механизмах ударного циклического действия поршневого типа (перфораторы, поршневые компрессоры). Большая доля диагностической информации о структурных и функциональных дефектах механизма содержится не в колебательной энергии основных частот возбуждения, а в их окраске, т. е. в модуляционных характеристиках, в соотношении между шумовой и детерминированной составляющими кратных частотных компонент.

Ряд неисправностей, связанных с явлением износа сопровождаются шумовой составляющей, что приводит к модели "полигармонический сигнал + шум", а в узкой полосе - "синус + шум".

При грубых дефектах типа обрыва лопатки в турбине или поломки зуба в редукторе модель сигнала имеет вид амплитудно-модулированных колебаний вида [4]"

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} [A_k \cdot \cos(k \cdot \omega_z \cdot t - \varphi_k)](1 + m \cdot \cos \omega_0 t), \quad (7)$$

где ω_z - лопаточная (или зубцовая) частота; m - глубина модуляции с оборотной частотой ω_0 . При дефектах типа питтинга зубчатых колес возникает возмущающая сила, представляющая собой последовательность импульсов, следующих с зубцовой частотой и модулированных по амплитуде квазидетерминированной функции вида

$$\xi(e) = \sum_{n=1}^{\infty} x_n(t - nT_0), \quad (8)$$

где T_0 - период оборотной частоты.

Спектр возмущающей силы можно представить в виде

$$S(f) = A^2(f) \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \delta(f - kfz) + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sigma_n^2 \cdot \delta[f - (kfz \pm nf_0)] \right\}, \quad (9)$$

где первый член характеризует возмущающую силу нормально функционирующего зубчатого зацепления; второй член - при появлении раковин в зоне контакта зубчатой пары.

Список использованных источников

1. Горяинов, А.Н. Транспортная диагностика. Книга 1. Научные основы транспортной диагностики (диагностический подход в системах транспорта) [Текст]: монография / А.Н. Горяинов. – Харьков: НТМТ, 2014. – 291 с
2. Вибрационная диагностика газотурбинных двигателей. /Карасев В.А., Максимов В.П., Сидоренко М.К.- М.: Машиностроение, 2018.
3. Коллакот Р.А. диагностирование механического оборудования. - Л.: Судостроение, 2020.