

2. Гусев А.С., Светлицкий В.А. Расчет конструкций при случайных возмущениях. - М.: Машиностроение, 1984. - 240 с.
3. Макеев В.П., Гриненко Н.И., Павлюк Ю.С. Статистические задачи динамики упругих конструкций. - М.: Наука, 1984. - 232 с.
4. Гусев А.С., Илинич Н.М. Использование корреляционных функций в расчетах на выносливость при случайном нагружении. - Машиноведение, 1983, № 3, с. 69-74.
5. Волков И.И., Семеничев В.К., Мотов В.В. Устройство для определения отношения энергетических характеристик двух вибрационных сигналов. - В сб.: Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. Куйбышев: КуАИ, 1977, с. 131-134.

УДК 621.452.3:534

И.К.Сидоренко

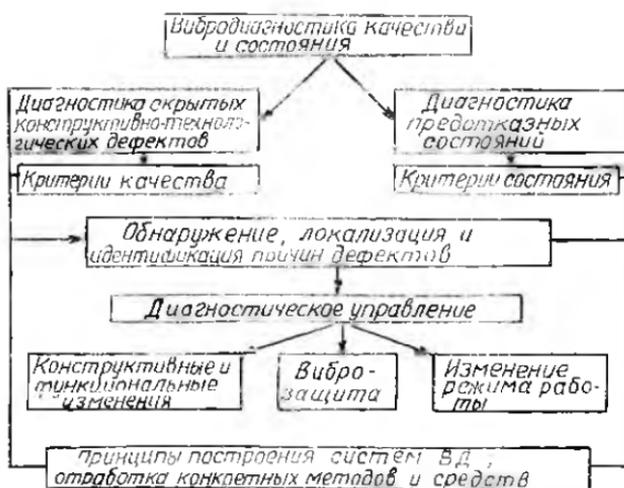
#### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ПРИ ДОВОДКЕ И СЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ГТД

Диагностика обычно рассматривается как метод оценки текущего состояния объектов в эксплуатации. В последнее время диагностика используется в качестве эффективного инструмента доводки и производства объектов, т.е. как средство повышения вибрационными методами качества, темпа и экономичности их создания.

Цели и задачи вибродиагностики качества определяются из системного анализа. Систему диагностирования можно рассматривать как специфическую систему управления процессами создания и эксплуатации объектов, в которой диагноз используется для выработки управляющего воздействия объект или на технологический процесс его создания. Согласно принципу единства критериев, эффективность системы должна учитываться по ее вкладу в конечный результат применения объекта. Поэтому в диагностике качества должны использоваться при создании ГТД все возможные пути повышения основных характеристик двигателей - надежности, долговечности и экономической эффективности эксплуатации (рис.1).

Конкретные задачи вибродиагностики качества вытекают из проблем создания двигателей (большая доля динамических дефектов, длительность и дороговизна доводки и т.п.) и из принципа диагностического управления процессом их создания.

**И. О т р а б о т к а д и н а м и к и ГТД.** Динамическая прочность конструкций и газодинамическая устойчивость протекания рабочих процессов в двигателях являются важнейшими условиями обеспечения



Р и с. 1. Функции и задачи вибродиагностики

их надежности. Возможности расчетных методов решения проблем динамики весьма ограничены, поэтому при ее отработке доминирует эксперимент. При этом перспективны расчетно-экспериментальные методы вибродиагностики.

Важное значение приобрела задача своевременного выявления скрытых конструктивных и технологических дефектов (СКТД) двигателей, большинство которых связано с их динамикой. Скрытые дефекты не выявляются обычными методами контроля на стадиях доводки и серийного производства ГТД. Проникновение СКТД в эксплуатацию обуславливает потенциальную ненадежность двигателей и значительную долю их отказов.

Известны методы и средства оперативного выявления потенциально ненадежных экземпляров в партии эксплуатируемых ГТД /1/. Очевидна актуальность методов диагностирования скрытых дефектов и на стадиях доводки и производства, в заводских условиях. Особого внимания заслуживает применение методов вибродиагностики при газодинамической доводке двигателей. Они способствуют раннему обнаружению и изучению чрезвычайно сложных и многообразных газодинамических явлений и ускоренной отработке эффективных методов повышения устойчивости ГТД.

Перспективно также использование полученных в вибродиагностике результатов с целью профилактики скрытых конструктивных динамических

дефектов ГТД при их проектировании. Так, уже сейчас опасные биения роторной и лопаточной вибрации можно предотвращать путем управления вынуждающими частотами; связанные резонансные и некоторые авторезонансные колебания, а также аэродисбаланс рабочих колес — путем управления допусками на геометрические и динамические характеристики лопаток. По мере успехов в изучении физических причин дефектов и их проявлений в вибросигналах профилактика будет приобретать все большее практическое значение.

2. Ускорение вибрационной доводки. Динамические дефекты (вибропрочностные и газодинамические) часто проявляются на завершающей стадии доводки (при достаточной наработке опытных двигателей). Устранение таких дефектов нередко затягивается из-за сложности локализации дефектных узлов, идентификации причин дефектов и неоднозначности оценок эффективности проводимых мероприятий по их ликвидации и т.п. Вибродиагностика обладает значительными резервами по ускорению и удешевлению вибропрочностной и газодинамической доводки. С помощью диагностических моделей ГТД можно выявлять некоторые динамические дефекты и устанавливать их причины на начальной стадии доводки, получать достоверные оценки эффективности проводимых мероприятий по ограниченному числу испытаний двигателей или их узлов.

3. Выходной виброконтроль качества опорных узлов ГТД. Качество многих ответственных узлов ГТД определяется не только условиями изготовления их конструктивных элементов, например лопаток, но и технологией сборки узла в целом. Возможно также взаимодействие лопаточных или зубцовых колес. Поэтому осуществляемый сейчас контроль изготовления отдельных деталей и выполнения операций сборки узла недостаточен для оценки исходного качества узла и его работоспособности в составе объекта. Необходим комплексный контроль качества серийно производимых узлов в рабочих или имитирующих их условиях.

Как показал опыт, эффективен технологический виброконтроль качества узлов. В настоящее время по вибрации контролируются практически лишь роторные узлы. Внедрение виброконтроля всех ответственных узлов при статических и контрольных испытаниях позволило бы оценивать как динамическую надежность ГТД, так и совершенство и стабильность технологии их производства (соответственно по уровню вибрации и по дисперсии и тенденции изменения уровня /2/). Комплексный виброконтроль узлов создает также предпосылки для профилактики скрытых технологических дефектов на стадии производства и для разработки вибропаспортов ГТД /3/.

#### 4. Виброзащита двигателя и стенда.

При опасных дефектах и повреждениях необходимо предотвратить вторичные разрушения. При этом, кроме сохранения материальной части и уменьшения временных затрат на ее восстановление, обеспечивается получение ценной информации при дефектации двигателя. Решение этой задачи возможно путем диагностического управления процессом испытания двигателя, включая быстрореагирующую защиту его в критических ситуациях по диагностическим вибросигналам. Необходим прогноз развития дефектов с упреждением, достаточным для изменения режима работы двигателя, а при быстроразвивающихся дефектах или непрогнозируемых повреждениях - возможность практически мгновенного отключения его. При решении этой задачи одновременно отрабатываются методы и средства бортовой вибродиагностики, включая отработку контролепригодности двигателя (см. рис. I).

Очевидна специфика изложенных задач диагностики исходного качества ГТД и существенное их отличие от основной задачи диагностики состояния ГТД в эксплуатации - распознавания их текущего состояния. Методы и средства вибродиагностики в общем не обладают свойством инвариантности не только по отношению к объекту диагностирования, но и к его жизненному циклу (например, к стадиям доводки и эксплуатации). Это предопределяет специфические особенности методов решения задач диагностики качества и соответственно средств диагностирования.

Хотя диагностику качества формально можно рассматривать как диагностику состояния при нулевой наработке, фактически эта особенность имеет принципиальное значение. При диагностике состояния используют информацию об изменении параметров по наработке и индивидуальные статистики, полученные на начальном этапе эксплуатации каждого двигателя. При диагностике качества подобной информации нет. Использование же статистик по партиям новых двигателей серьезно затруднено большой неинвариантностью вибропараметров ГТД /4/, которые весьма чувствительны к типоразмеру, технологии производства и условиям испытаний. Так, разброс уровней вибрации новых двигателей при одинаковых условиях испытаний достигает по роторным, зубцовым и лопаточным гармоникам 30 крат. Значителен также разброс при повторных испытаниях данного экземпляра и при изменении условий испытаний (влияние стенда на винтовую вибрацию, частот вращения роторов на флуктуацию роторных и лопаточных гармоник и др.).

По изложенным причинам неизбежны отличия в подходах к диагностике качества на стадиях доводки и серийного производства ГТД. Прежде всего необходима разработка вибрационных критериев качества двигателей и на

их основе - поиск инвариантных вибропризнаков качества. Это возможно при наличии теории диагностических вибросигналов (ТДВС), учитывающей конструктивные и функциональные особенности ГТД.

Создаваемая ТДВС имеет ряд особенностей. При разработке методов диагностирования моделируются как генерируемые вибросигналы, так и их связи с техническим состоянием двигателя, т.е. разрабатываются вибродиагностические модели (ВДМ). Широко используются упрощенные модели с ограниченной областью применения (для данного случая), которые постепенно уточняются до требуемой степени адекватности.

Вибросигналы анализируются на уровне первичных вибронгрузок /5/. Для ГТД характерны элементарные импульсные нагрузки, создаваемые узлами с поворотной (циклической) симметрией: лопаточными узлами, подшипниками качения, зубчатыми передачами. Анализ импульсных нагрузок позволил качественно описать частотную структуру вибросигналов, а также процессы их возбуждения, распространения и суммирования в точках измерения. Выделение детерминированной основы вибросигналов со средними значениями параметров позволяет аналитически описывать ВДМ. При этом характеристики случайных флуктуаций параметров модели оцениваются эмпирически.

Анализ вибросигналов производится в двух аспектах соответственно дуальности их свойств: энергетическом (для выработки критериев интенсивности вибрации) и информационном (для разработки алгоритмов диагностирования).

При разработке систем вибродиагностики качества ГТД используются следующие вытекающие из ТДВС свойства вибросигналов.

**I. Большая диагностическая ценность вибросигналов и широкий диапазон их возможного использования:**

высокая чувствительность вибросигналов к дефектам, включая скрытые, что позволяет обнаруживать их на ранних стадиях развития;

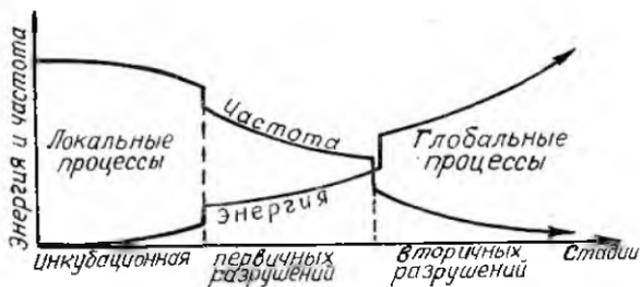
наличие функциональной связи частот вибросигналов с частотами вращения соответствующих узлов-источников их, что позволяет локализовать дефектный узел, а проявление скрытых дефектов в характерных спектральных картинах дает возможность определять причину дефекта;

возможность безразборной диагностики объектов в рабочих условиях;

быстродействие реакций вибросигналов на проявление дефекта, что незаменимо в системах виброзащиты ГТД, включая защиту от быстротекущих автоколебательных процессов в компрессорах и камерах сгорания;

универсальность, т.е. возможность диагностирования многих первичных дефектов практически всех ответственных узлов ГТД.

2. Тенденции развития диагностических вибросигналов. Во многих случаях с развитием дефекта энергия диагностического сигнала увеличивается, средняя частота его спектра снижается, а процесс из локального превращается в глобальный (рис.2). Эта тенденция является ценным ориентиром при поиске диагностических вибропараметров: в ранней диагностике необходимо использовать изменения тонкой структуры вибросигналов в высокочастотной области и свойство локализации их вблизи источника.



Р и с. 2. Тенденции развития диагностического сигнала

3. Концепция энергетических и структурных признаков. До последнего времени в диагностике использовались преимущественно абсолютные значения вибропараметров, характеризующих энергию колебаний (рис.3): амплитуды основных гармоник  $A$  или различные интегральные параметры  $A_{\Sigma}$ , обобщенные по частоте параметры широкополосной виброскорости  $A_{\Sigma}$ , обобщенные по режимам работы амплитуды гармоник  $A_{\Sigma}$ , эквивалентные амплитуды узкополосных случайных процессов  $A_{\Sigma KB}$ , учитывающие случайный характер узкополосной вибрации  $|b|$ , и др. Однако эти энергетические признаки позволяют диагностировать лишь развитие дефекты (согласно тенденции 2) и не инвариантны к многим внешним факторам, не характеризующим состояние узла, что обуславливает большой разброс этих признаков. В то же время многие дефекты, особенно на ранних стадиях их развития, проявляются в параметрах, которые непосредственно не связаны с энергией колебаний, а характеризуют внутреннюю структуру и взаимосвязи сигналов. Параметры  $P_{\Sigma H}$  характеризуют внутриспектральные связи частотных составляющих: коэффициент амплитуд  $K_A$ , коэффициент модуляции  $M_A$ , огибающая спектра  $\psi_K$ , отношение сигнал-шум узкополосного процесса  $\alpha_{\Sigma}$ , отношение параметров составляющих с различными час-

## Источники виброинформации

О качестве  
( $\tau = 0$ )

Энергия колебаний

- амплитуда  $A$   
- интегральные параметры  
 $A_f: A_\Sigma, A_{\text{экв}}, A_R$

Структура сигнала

- внутренние связи  $\Pi_{вн}$ :  
 $K_A, m_A, a_f, a_{ff}, \bar{f}, C(\tau), \psi_K, \varphi_K$   
- взаимные связи  $\Pi_{вз}$ :  
частот  $\eta_f$ , фаз  $\eta_\varphi$ , амплитуд  
 $dA/dR, d\Pi/dR, \delta A_{кр}, \delta \Pi_{кр}, \delta f_{кр}$

О состоянии  
( $0 < \tau < \tau_p$ )

Изменение энергии

- амплитуд  $\Delta A(\tau)$   
- интегральных  
параметров  $\Delta A_f(\tau)$

Изменение структуры

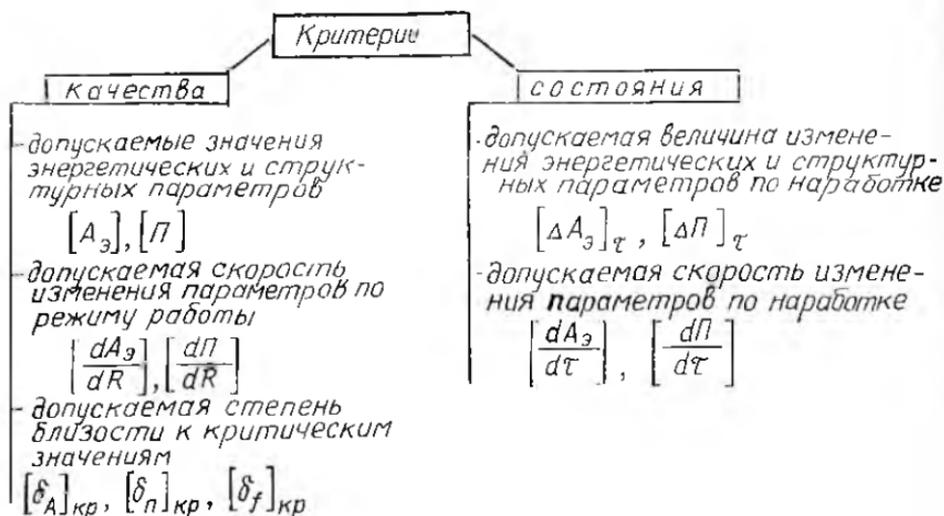
- изменение  
параметров  $\Delta \Pi(\tau)$   
- корреляция кривых  
 $r(\tau_1, \tau_2)$   
- скорость изменения пара-  
метров по наработке  
 $dA_3/d\tau, d\Pi/d\tau$

Р и с. 3. Источники виброинформации

метами  $a_{ff}$ , средняя частота сигнала  $\bar{f}$ , кепстр  $C(\tau)$ , скорость изменения параметров по режиму работы  $d\Pi/dR$  и др. Возможны подобные параметры и для фаз  $\varphi_K$ . Параметры  $\Pi_{вз}$  характеризуют взаимосвязи вибросигналов, различающихся по физической природе, месту измерения или времени регистрации: взаимосвязь частот  $\eta_f$ , амплитуд  $\eta_A$  или фаз  $\eta_\varphi$ . Эти структурные признаки позволяют выявлять многие СКТД. Дополнительная ценность структурных признаков обусловлена их практической инвариантностью (коэффициент вариации  $\nu_A \ll 0,05$ ) к внешним факторам (атмосферные условия, режим испытаний, чувствительность аппаратуры и т.п.), поскольку они характеризуют отношения различных параметров сигналов. По этим причинам используем в диагностике концепцию энергетических признаков целесообразно дополнить концепцией структурных признаков /5/.

Изложенные диагностические свойства вибросигналов позволяют разработать вибрационные критерии качества ГТД и выбирать эффективные вибропризнаки качества. Если вибрационные критерии состояния отражают изменения по наработке информативных вибропараметров, вызванные измене-

нием текущего состояния объекта, то вибрационные критерии качества должны отражать вызванные несовершенством конструкции и ее функционирования исходные отклонения информативных вибропараметров от значений, характеризующих нормальное состояние (рис.4).



Р и с. 4. Вибрационные критерии качества и состояния

Оценка исходного вибросостояния производится как по критериям интенсивности вибрации, так и по структурным параметрам (например, по коэффициенту модуляции вентиляторной вибрации). Такие же параметры могут быть рекомендованы и для оценки интенсивности пульсаций давления и динамических напряжений. Проблемой является отмеченная выше неинвариантность энергетических параметров. Она может быть уменьшена путем строгой регламентации условий диагностических испытаний и измерений /3/.

Оценка газодинамической устойчивости узлов также может производиться по критериям интенсивности характерных колебаний, например возникающих при виброгорении /7/. Однако более перспективны структурные параметры. Например, при уменьшении запаса газодинамической устойчивости компрессора уменьшается средняя частота сигнала  $\bar{f}$ . Возможны также критерии, характеризующие скорость изменения вибропараметров

при изменении режимов или условий работы объекта (см. рис. 4). Эти структурные признаки потенциально пригодны и для обнаружения предельного состояния с целью диагностического управления и виброзащиты в процессе испытаний ГТД.

Поиск структурных признаков качества практически возможен лишь по разработанным ВДМ, описывающим связь вибрационных характеристик диагностируемого узла с параметрами, определяющими качество ГТД. Наличие ВДМ необходимо также и для выбора оптимальных методов выделения вибрационных диагностических сигналов. Это требование приобретает принципиальное значение, так как часто представляющие интерес диагностические сигналы на два порядка слабее основных гармоник и их можно не обнаружить.

На примере лопаточных узлов рассмотрим дополнительные ориентиры поиска структурных признаков, вытекающие из ТДВС. По характеру содержащейся диагностической информации вибросигналы можно разделить на элементарные (первичные), возбуждаемые отдельными лопатками, и интегральные (вторичные), являющиеся результатом суммирования элементарных сигналов по всем элементам узла. Элементарные вибросигналы несут информацию о локальных дефектах отдельных лопаток (угловое или осевое смещение, вмятина, трещина или обрыв), а интегральные — о распределенных по лопаткам дефектах, определяющих дефект узла в целом: скрытый (вращающийся срыв) или явный, т. е. развитый (помпаж), когда диагностический сигнал значительно превосходит по интенсивности исходный.

Итак, вибрационными критериями качества ГТД могут быть как инвариантные энергетические вибропризнаки, так и множество структурных признаков, а также скорость изменения признаков по режиму работы двигателя или степень близости их значений к критическим (см. рис. 4).

Диагностика скрытых дефектов немыслима без специализированных виброакустических информационно-диагностических систем (ВАИДС). Энергетическая слабость диагностических сигналов, сложность методов их селекции и вторичной обработки требуют автоматизации всех видов обработки вибросигналов с применением ЭВМ [8]. Диагностическая информация должна накапливаться, систематизироваться и храниться в форме, удобной для использования. Наличие ВАИДС позволяет также формализовать и автоматизировать процедуру поиска признаков: задавшись решающим правилом, оценивать информативность первичных признаков и отбрасывать малоинформативные признаки, минимизируя их число; оценивать степень адекватности диагностических моделей и др.

Внедрение методов вибродиагностики качества способствует повышению надежности и темпа создания ГТД.

### Библиографический список

1. Карасев В.А., Ройтман А.Б. Предупреждение прочностных отказов машин вибродиагностическими методами. - Проблемы прочности, 1982, № 12, с.78-81.
2. Динамика авиационных газотурбинных двигателей /Под ред. И.А.Биргера и Б.Ф.Шорра. - М.:Машиностроение, 1981. - 232 с.
3. Сидоренко М.К. Вибродиагностический паспорт двигателя. - В сб.: Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. Куйбышев:КуАИ, 1978, вып. 5, с.141-146.
4. Карасев В.А., Максимов В.А., Сидоренко М.К. Вибрационная диагностика газотурбинных двигателей. - М.:Машиностроение, 1978. - 132 с.
5. Сидоренко М.К. Отражение технического состояния циклически симметричных узлов машин в спектрах вибросигналов. - В сб.:Вибротехника. Каунас:КПТИ, 1984, № 4.
6. Сидоренко М.К. Оценка интенсивности квазигармонических нагрузок в турбомашинах. - Проблемы прочности, 1979, № 8, с.20-24.
7. Плутенко Н.И., Сирченко Г.Т., Всинский В.М. Автоматическая система защиты ГТД при возникновении виброгорения. - В сб.: Конструкционная прочность двигателей: Тез. докл. Всесоюз. конференции. Куйбышев:КуАИ, 1980, с. 60.
8. Варжицкий Л.А., Камынин Н.А., Сидоренко М.К. Система автоматизированной обработки и распознавания виброакустических сигналов на базе М-6000/ Куйбышев. авиац.ин-т.- Куйбышев, 1980. - 19 с. - Рукопись деп. в ГОСИНТИ 15.05.80, № 77-80.

УДК 621.831

А.А.Тройников

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ  
НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛА МР

Применение цельнометаллических виброизоляторов из материала МР наиболее эффективно в виброзащитных системах машин и сооружений, ра-