

М. К. Сидоренко

ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ПАСПОРТ ДВИГАТЕЛЯ

В решении проблемы повышения надежности и ресурса двигателей значительное место занимает вибрационная диагностика. Разработка и внедрение методов вибродиагностики требуют усовершенствования методологии исследований и использования их результатов.

Сложность и недостаточная изученность вибрации двигателей обуславливают сложность вибрационных исследований. Они выливаются в научный эксперимент с применением сложных методов и средств. Разнообразие применяемых методов и средств виброисследований и критериев оценки их результатов часто не позволяет сопоставлять результаты и нередко не обеспечивают их повторяемость. Недостаточная изученность диагностических свойств вибрации усугубляет проблему использования ее для диагностирования.

Вибродиагностика, как наиболее важная область практического применения вибрационной информации, требует строгого упорядочения объема и методов диагностических исследований и оценок их результатов. С этой целью целесообразно ввести в практику вибродиагностические паспорта (ВДП) двигателей.

Вибродиагностический паспорт двигателя — это технический документ, содержащий необходимые и достаточные для диагностических целей сведения о его вибрации. ВДП содержит оценки заданных вибрационных характеристик, полученные в оговоренных условиях работы двигателя с помощью оговоренных методов и средств измерений, и характеристики диагностических свойств этих оценок.

В отличие от других паспортов, ВДП определяется периодически, через заданные интервалы наработки двигателя. Эта особенность создает предпосылки для прогнозирования состояния двигателя. ВДП вновь изготовленного двигателя позволяет оценить качество его изготовления и дает исходные виброхарактеристики для контроля состояния в эксплуатации. Содержание ВДП может пересматриваться, особенно на начальном этапе внедрения паспортизации, по мере накопления новых сведений о вибрации двигателей данного типа и о возможности использования их в диагностике.

Техническая возможность паспортизации закладывается при проектировании и обеспечивается при доводке двигателя. На этих этапах должна быть разработана диагностическая модель двигателя и обеспечена его контролепригодность. Физическая диагностическая модель — это соотношение, устанавливающее связь между значениями информативных диагностических параметров и параметрами, определяющими работоспособность и функционирования двигателя [1]. Диагностическая модель позволяет определить те элементы (детали или узлы) двигателя, которые можно и целесообразно диагностировать по вибрации. Возможность определяется диагностическими свойствами вибрации, а целесообразность — по системному критерию эффективности или по характеристикам технической диагностики [2].

По диагностической модели должны быть определены: измеряемые диагностические вибрационные характеристики (признаки) и количественная связь их с параметрами состояния диагностируемых элементов, условия диагностирования (режимы испытания); типы, число и места установки вибропреобразователей; методы и средства измерений и обработки; критерии состояния диагностируемых элементов и правила принятия решений (оценок состояний). Основу для решения этих задач предоставляет физическая диагностика — наука о способах, методах и средствах измерения (контроля) физических величин для установления причин и характера (свойств) процессов и явлений, ухудшающих качество объектов [1].

Уровень обеспечиваемой контролепригодности целесообразно устанавливать с учетом возможности некоторого развития диагностики в процессе эксплуатации двигателей данного семейства и реализации принципа избыточности информации. Избыточная информация используется для повышения достоверности оценок текущего и прогнозирования будущего состояния двигателя и решения некоторых других задач.

По результатам физической диагностики, опискам целесообразности диагностирования различных элементов по вибрации и обеспечиваемому уровню контролепригодности определяется конкретное содержание ВДП. Обобщенной оценкой содержания ВДП является доставляемое им количество диагностической информации I_n . В качестве критерия полноты ВДП можно принять отношение

$$\eta = \frac{I_n}{I_{\max}}, \quad (1)$$

где I_{\max} — максимальное количество потенциально полезной для диагностики вибринформации.

Критерий (1) учитывает то обстоятельство, что для каждого типа двигателей требуемый объем диагностирования индивидуальный. Он зависит от уровня его надежности, назначения и т. п. Для уточнения понятия потенциально полезной информации можно сформулировать гипотезу о существовании оптимума используемой в данном методе информации. Оптимальное количество используемой информации обеспечивает максимум эффективности диагностирования данным методом (рис. 1).

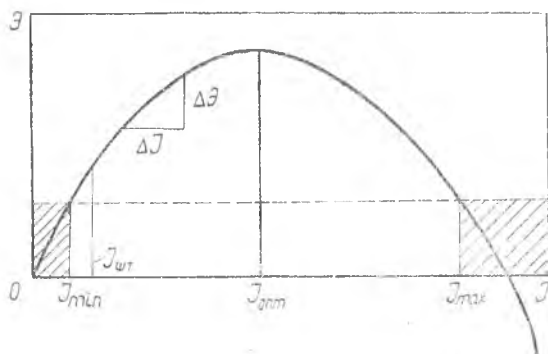


Рис. 1. Зависимость эффективности вибродиагностики от количества получаемой диагностической информации

Наличие оптимума обусловлено нелинейной зависимостью между затратами на получение информации C и эффектом от ее использования \mathcal{E} . До оптимума приращение эффекта диагностирования превышает затраты на приращение информации $\Delta I: \Delta \mathcal{E} > \Delta C$. После оптимума имеет место обратное соотношение. При низкой эффективности данного метода диагностирования предпочтительным окажется какой-либо другой метод технической диагностики (заштрихованные области на рис. 1).

Диагностическая информация потенциально полезна в области $I_{\min} \div I_{\max}$, где возможно повысить эффективность диагностирования (повысить достоверность, глубину или объем диагностирования, обеспечить более раннее обнаружение неисправности и др.). Хотя максимальная эффективность дости-

гается при $I_{\text{опт}}$, целесообразно стремиться к получению $I_{\text{пик}}$ с целью обеспечения необходимой избыточности информации и расширения объема диагностирования за счет элементов, частная эффективность диагностирования которых данным методом низка.

В диагностике учитывается смысловое содержание информации (семантика) и полезность ее для достижения конкретной цели (прагматика). В связи с отсутствием количественной меры диагностической информации критерий (1) можно оценить лишь приближенно косвенными методами. Известно, что бортовая система контроля вибрации авиадвигателей, включающая 2—3 индукционных вибропреобразователя и измеряющая общий уровень вибрации, позволяет выявить около 30% неисправностей. Система вибродиагностики газотурбинной установки [3] включает 16 индукционных и 2 пьезоэлектрических стационарных вибропреобразователя и один переносный пьезоэлектрический для измерений в 15 точках. Измеряется спектр вибрации. Эта система обеспечивает выявление 90% неисправностей.

Учитывая, что количество диагностической информации увеличивается с расширением частотного диапазона измерений (применение пьезоакселерометров), с применением спектрального анализа и с увеличением числа некоррелированных точек измерений, можно утверждать, что эта система выдает во много раз больше информации, чем система бортового контроля (рис. 1). Количество выдаваемой ею информации, по-видимому, близко к оптимальному. Следовательно, ВДП должен содержать количество информации, близкое к выдаваемой вибродиагностической системой ГТУ, рассмотренной выше.

На количество диагностической информации оказывают существенное влияние, кроме отмеченных факторов, степень неопределенности (разброс) результатов измерений и чувствительность измеряемых параметров вибрации к изменению параметров состояния диагностируемых элементов. Анализ причин разброса данных показал, что значительная доля его обусловлена недостаточно строгой фиксацией условий диагностирования, включающих условия испытаний, методику измерений и обработки. Другая существенная причина разброса — неоднозначная связь параметров состояния с выбранными параметрами вибрации. Так, при обрыве лопатки уровень роторной вибрации может увеличиться, уменьшиться или не измениться. Можно высказать предположение о суще-

ствовании других вибрационных признаков, однозначно связанных с параметрами состояния. Например, глубина модуляции составляющей с частотой следования лопаток соответствующей ступени — однозначный признак обрыва лопатки.

Информативность признака связана также с его чувствительностью. Так, уровень роторной вибрации является не только неоднозначным, но и сложным признаком, поскольку он определяется суммарным дисбалансом от множества причин. При любой неисправности уровень вибрации изменится пропорционально суммарному дисбалансу, т. е. в меньшей степени, чем дисбаланс от этой неисправности. Тот же эффект уменьшения чувствительности имеет место при попадании в полосу фильтра составляющих вибрации, не связанных с диагностируемой неисправностью. В обоих случаях происходит потеря диагностической информации.

Чувствительность существенно зависит от типа двигателя. Так, чувствительность корпусной вибрации в штатных точках измерения к дисбалансу изменяется для различных типов ГТД в десятки раз. К тому же связь роторной вибрации с дисбалансом может быть нелинейной. ВДП должен включать измеряемые параметры вибрации, однозначно связанные с неисправностями и обладающие достаточной чувствительностью. Условия диагностирования должны строго оговариваться.

В качестве основных исходных вибрационных характеристик для ВДП целесообразно принять спектры вибрации в форме сигнатур (зависимостей уровней от порядка гармоник соответствующего ротора), дополненные непрерывными значениями уровней основных гармоник в режиме приемистости.

ВДП целесообразно использовать на всех этапах «жизни» двигателя, причем не только для оценки состояния конкретного двигателя, но и для получения обобщенных характеристик по множеству двигателей данного типа. Эти характеристики составят содержание обобщенного вибродиагностического паспорта (ОВДП).

На этапе производства ОВДП позволит контролировать технологический процесс, выявить его тенденции, прогнозировать технологические дефекты, достоверно оценивать результаты технологических мероприятий. Аналогичную информацию ОВДП предоставит в эксплуатации. Наиболее трудно, хотя и весьма полезно, получить ОВДП на этапе проектирования. Возможно использование, с известными ограничениями, ОВДП, полученных на этапе доводки по недостаточным

статистикам, и ОВДП прототипов. Эти, по существу прогнозируемые, ОВДП позволят более обоснованно определить диагностическую модель двигателя, выбрать оптимальные методы диагностики, оценить требуемую контролепригодность. Содержание ОВДП, получаемых на этапе проектирования, должно быть шире, чем на этапах производства и эксплуатации. Они должны включать данные специальных диагностических исследований для оценок возможностей, эффективности и перспективности вибродиагностики.

Разработка и внедрение ВДП представляется необходимым условием развития вибродиагностики и решения сопутствующих организационных вопросов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубицкий Л. Г. Физическая диагностика. В сб.: «Измерение, контроль, автоматизация», вып. 2. М., 1974.
2. Сидоренко М. К. Характеристики технической диагностики. В сб.: «Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов», вып. 3. КуАИ, 1976.
3. Вибрационная диагностика. Экспресс-информация «Испытательные приборы и стенды», 1975, № 31, реф. 218.

УДК 620.178.3:519.24

Е. В. Сундуков

О РАСЧЕТЕ СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ПРОГРАММНОЙ НАГРУЗКИ

Требование совершенствования методов расчета усталостных характеристик деталей и узлов привело к увеличению объема усталостных испытаний на нагрузки, в той или иной мере имитирующие эксплуатационные. При этом воспроизводится или случайная нагрузка, или программная, полученная путем схематизации эксплуатационной.

В качестве параметра, характеризующего нагруженность образца при случайной нагрузке, часто используют среднеквадратическое значение процесса.

При выборе параметров эквивалентных испытаний используют величину коэффициента эквивалентности, которую