



Стендовый комплекс диагностики авиационных двигателей

Сергей Звонарёв, Валерий Поклад, Алексей Потапов

В настоящей статье рассмотрены вопросы, связанные с особенностями построения стендового комплекса вибрационной диагностики авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и его использования при проведении испытаний двигателей на серийном заводе.

ВВЕДЕНИЕ

Специфика анализа вибраций авиационных газотурбинных двигателей заключается в том, что для правильной оценки качества изготовления двигателей необходимо оценить их вибрационное поведение на различных режимах: на прогреве, ступенчатом выходе с малого газа до максимальных оборотов, приемистости и выбеге. При этом детальный анализ вибрационного состояния двигателя проводится обычно после завершения испытаний, которые повторять, если не хватает каких-либо данных, нежелательно.

Хорошо известно, что специализированные средства автоматизации испытаний, хотя и имеют более узкую область применения, чем системы общего назначения, гораздо более эффективно решают поставленные перед ними задачи.

Совершенствование технологии испытаний авиадвигателей на ММПП «Салют» выдвинуло к средствам измерения и анализа вибраций новые требования. Кроме требований по точности измерений, надежности, использованию современных цифровых технологий обработки вибрационных сигналов, выдвигается ряд требований, связанных с автоматизацией процесса контроля, регистрации и обработки вибрационных сигналов.

Этим требованиям в большей степени отвечает универсальный стендовый комплекс вибрационной диагностики авиационных газотурбинных двигателей, разработанный АО «Динамика» и адаптированный для всей гаммы двигателей, производимых на ММПП

«Салют» непосредственно в процессе его опытной эксплуатации в тесном и плодотворном сотрудничестве специалистов этих двух фирм.

Опыт применения

Более чем трехлетний опыт применения стендового комплекса вибрационной диагностики ГТД на ММПП «Салют» (рис. 1) показал высокую эффективность его использования для поиска источников повышенных вибраций и снижения вибрационной активности двигателей в целом.

В первую очередь с использованием комплекса решалась задача снижения общей вибрации двигателей, то есть выработки диагностических признаков, указывающих на одну или несколько сборочных единиц или деталей, воздействие на которые могло значительно улучшить вибрационное поведение двигателя.

Вибрационная диагностика авиационных газотурбинных двигателей на стендовых испытаниях имеет характерные особенности, связанные с тем, что диагностируется не износ двигателя или возникновение и развитие дефекта, а технологические отклонения при изготовлении и сборке двигателя. В связи с этим вибрационная диагностика при стендовых испытаниях для каждого типа двигателей индивидуальна. В процессе решения поставленной задачи была построена статистически усредненная спектральная модель двигателя, которая фактически определила диагностические нормативы на амплитуды вибраций отдельных узлов и агрегатов дви-

гателя. Параллельно с созданием модели активно велся поиск и накопление диагностических признаков — характерных особенностей вибрационных сигналов, связанных с особенностями сборки конкретного экземпляра двигателя.

Использование комплекса позволило также внести ряд уточнений в технологию изготовления двигателей. Так, например, введен дополнительный контроль дисбаланса отдельных шестерен и агрегатов.

Вибрационное состояние всех двигателей, проходящих предъявительские и приемо-сдаточные испытания, контролируется и регистрируется с использованием стендового комплекса вибрационной диагностики.

В процессе эксплуатации комплекса по мере необходимости наращивались функциональные возможности. Для того чтобы отличать форсажные режимы от бесфорсажных, в конфигурацию измерительной системы комплекса был введен канал измерения $\alpha_{руд}$ — угла положения рычага управления двигателем. Когда была поставлена задача создания статистически усредненного спектра двигателя, в программное обеспечение спектроанализатора была добавлена функция передачи набора спектральных амплитуд в EXEL. В последней версии программного обеспечения добавлена возможность автоматизированного протоколирования результатов испытаний. Этот программный компонент очень полезен в случае, когда необходимо контролировать одну или несколько спектральных амплитуд.



Рис. 1. Бокс, оснащённый стендовым комплексом вибрационной диагностики газотурбинных двигателей

литуд во время испытаний. Также расширены возможности конфигурирования измерительной системы, позволяющие не только установить параметры регистрации вибраций по каналу измерений, но и сразу определить набор контролируемых во время проведения испытаний амплитуд спектров вибраций двигателя.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Стендовый комплекс вибрационной диагностики авиационных ГТД предназначен для контроля вибраций газотурбинных двигателей во время испытаний, а также для регистрации вибрационного состояния двигателей с целью последующего анализа и выработки рекомендаций для вибрационной доводки двигателя. Большая часть функциональных возможностей комплекса обеспечивается в автоматическом режиме без участия оператора, поэтому для работы с комплексом практически нет необходимости иметь специально подготовленный персонал. Минимально от оператора требуется запустить программное обеспечение на выполнение, задать номер двигателя, вид испытаний. Далее обеспечивается автоматический запуск средств контроля вибраций и регистрации ши-

рокополосных вибрационных сигналов одновременно с запуском двигателя. Также автоматически прекращается работа средств контроля и регистрации вместе с остановом двигателя.

На экране дисплея постоянно ведется отображение вибрационного состояния двигателя и режима его работы. В графической и цифровой форме показаны уровни вибраций двигателя, частоты вращения роторов (рис. 2). При необходимости можно непосредственно следить за конкретными спектральными составляющими по любому каналу измерений. Обеспечена выдача сообщений, характеризующих степень превышения контролируемых вибрационных параметров по сравнению с допустимым уровнем.

Автоматизированная регистрация вибрационных сигналов является отличительной особенностью данного комплекса. Хорошо известно, что не-

прерывная запись оцифрованных широкополосных вибрационных сигналов по 10-12 каналам измерения за полчаса — час испытаний потребует сотен мегабайтов дисковой памяти и при этом сильно замедлит дальнейшую обработку. Естественно, реально использована в анализе вибрационного состояния двигателя будет незначительная часть этих данных. Заставлять оператора включать регистрацию широкополосного буфера в определенные моменты времени, по нашему мнению, неправильно, поскольку это может привести к сильному влиянию субъективного фактора и в результате неверным результатам анализа.

Наиболее эффективным оказался режим полуавтоматической регистрации. В процессе испытаний ведется непрерывная регистрация значений частот вращения роторов двигателя и вибрационных характеристик в соответствии с техническими условиями на вибрации двигателя для каждого канала измерения, то есть циклограмма испытаний. Просмотр этой информации по окончании испытаний позволяет интегрально оценить вибрационную активность двигателя, принять решение о необходимости дальнейшего анализа вибраций для проведения диагностики. Регистрация широкополосных вибрационных сигналов ведется в автоматизированном режиме, обеспечивающем сохранение данных только на стационарных режимах работы двигателя в объеме, достаточном для проведения достоверного анализа. Таким образом, удается получить всю необходимую информацию для проведения спектрального анализа и диагностики и оптимизировать объем данных, регистрируемый в процессе проведения испытаний.

Дополнительно автоматически включается режим непрерывной регистрации («цифровой магнитофон») в двух случаях: во-первых, при превышении каких-либо контролируемых вибрационных характеристик двигателя, во-вторых — на режиме выбега, начиная с момента падения частот вращения роторов ниже малого газа и до полной остановки роторов двигателя.

Оператор имеет право дать команду включить-выключить режим непрерывной регистрации или зарегистрировать один буфер. Однако в большинстве случаев он этого не делает, поскольку во время испытаний всегда включен режим автоматической регистрации.

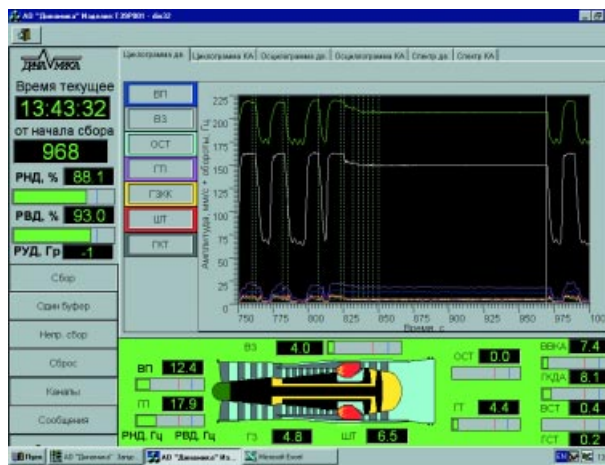


Рис. 2. Циклограмма испытаний двигателя

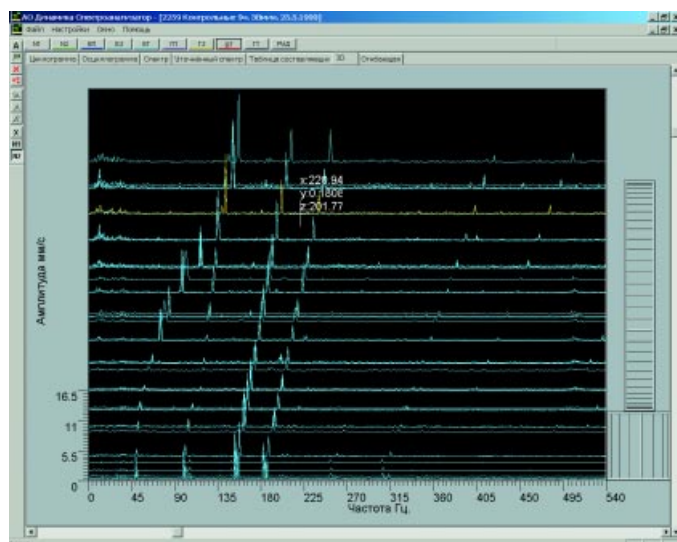


Рис. 3. Каскадная диаграмма спектров вибраций двигателя

Стендовый комплекс оснащен встроенными средствами спектрального анализа и просмотра осциллограмм. На отображаемом спектре отмечаются амплитуды основных гармоник и максимально допустимые их уровни (если определены). Дополнительно при соответствующих настройках программного обеспечения спектральный анализ в автоматическом режиме ведется непрерывно с целью вычисления и контроля заданных спектральных характеристик, описывающих техниче-

ское состояние и качество изготовления отдельных узлов и агрегатов двигателя. Использование функций спектроанализатора в стендовом комплексе дополнительно позволяет в процессе испытаний диагностировать такие явления, как, например, отказ датчика вибраций или обрыв линии связи.

По окончании испытаний двигателя оператор может получить протокол. Протокол испытаний — одно из средств автоматизации, он позволяет в ряде случаев сократить время на обра-

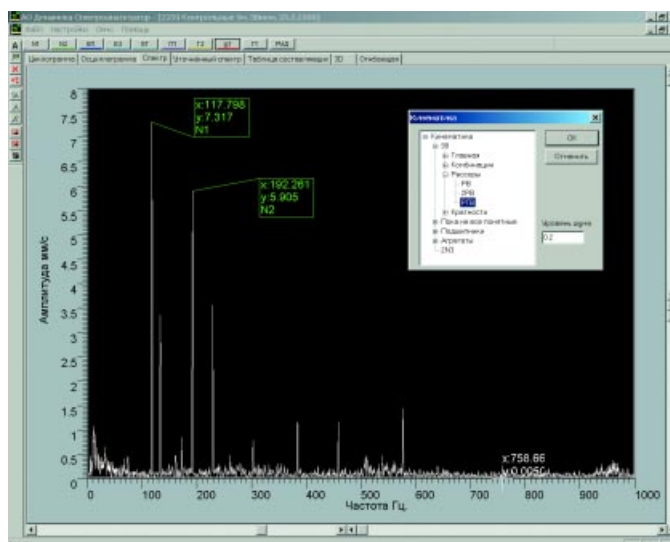


Рис. 4. Спектр вибраций двигателя с идентификацией амплитуд

ботку и анализ результатов испытаний. Протокол испытаний формируется в автоматическом режиме и представляет собой таблицу усредненных значений вибрационных характеристик двигателя для всех режимов его работы. Формат таблицы — набор вибрационных характеристик, входящих в нее, — определяется заранее. Может быть подготовлено несколько вариантов различных форматов, один из которых загружается перед подготовкой протокола.

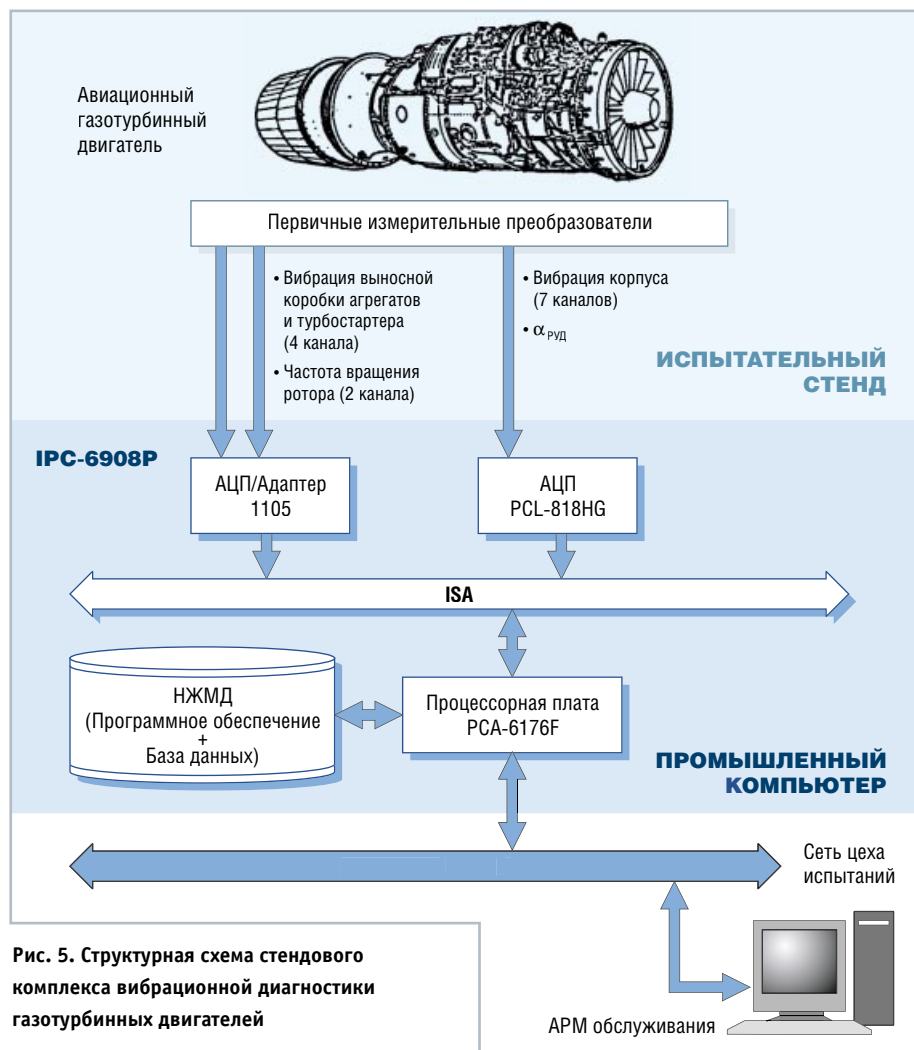


Рис. 5. Структурная схема стендового комплекса вибрационной диагностики газотурбинных двигателей

Часто анализа протокола испытаний недостаточно для полноценной диагностики двигателя. В таком случае используется анализатор спектров, работающий автономно с базами данных, полученными при проведении испытаний. Поскольку база данных содержит полную картину вибрационного поведения двигателя на всех режимах работы, инженер-исследователь, используя анализатор спектров, может довольно быстро принять решение о комплексе необходимых мероприятий с целью снижения вибраций. Анализ циклограммы испытаний, каскадных диаграмм спектров вибраций (рис. 3), автоматизированная идентификация спектральных амплитуд (рис. 4) с кинематически привязанными к ним источниками вибраций позволяют быстро выявить источники повышенных вибраций, а обработка и систематизация статистических данных о вибрационных свойствах двигателей, проходивших испытания, позволяют вести диагностику с точностью до детали. Использование при проведении диагностики архива баз данных дает возможность выяв-

лять повторы в спектральных характеристиках различных двигателей, что сокращает время на проведение диагностики двигателя.

СТРУКТУРА И СОСТАВ КОМПЛЕКСА

Структурная схема комплекса приведена на рис. 5. Комплекс использует ПЭВМ в промышленном исполнении класса Intel Pentium III/IV, адаптер аналого-цифрового преобразования и тахометрии 1105 (АО «Динамика»), адаптер аналого-цифрового преобразования PCL-818HG (Advantech), программное обеспечение. Основные технические характеристики комплекса приведены в таблице 1.

Аппаратура

Комплекс базируется на ПЭВМ в промышленном исполнении фирмы Advantech. Один из вариантов комплекса использует системную плату PCA-6176F, оснащенную процессором Pentium III/ 500МГц и 64 Мбайт оперативной памяти. Использование высокоинтегрированной системной платы, содержащей в себе видеоконт-

Таблица 1. Основные технические характеристики комплекса

Количество каналов измерения вибраций	до 12
Разрядность АЦП	12-16
Диапазон частот измерения вибраций	5-40000 Гц
Количество каналов измерения частоты вращения роторов	3
Диапазон измеряемых частот	5-15000 Гц

роллер, Ethernet-контроллер и SCSI-контроллер позволило сэкономить на количестве системных разъемов и использовать достаточно компактный корпус IPC-6908P (рис. 6). Необходимость использования компьютера в промышленном исполнении обусловлена уровнем внешних воздействий, которые он испытывает. Основное из них — вибрация. Корпус IPC-6908P обеспечивает надежную защиту установленного в нем оборудования от вибрации и звукового давления, которые в данном случае являются факторами, требующими применения оборудования в промышленном исполнении. Организована связь по сети Ethernet (10 Мбит/с) с рабочим местом группы обслуживания, на котором проводится обработка и архивирование зарегистрированных данных. Измерительное ядро комплекса составляют два адаптера: PCL-818HG и 1105, устанавливаемые в соединители шины ISA персонального компьютера, быстродействия которой вполне достаточно, чтобы обеспечить передачу потоков данных от АЦП в оперативную память для обработки.

Измерение широкополосной вибрации требует установки гарантированного шага дискретизации, то есть интервала времени, с которым проводятся измерения, поэтому на адаптеры АЦП, применяемые для измерения широкополосных вибраций, накладываются дополнительные условия аппаратной установки шага дискретизации измерений и наличия достаточно большого буфера данных, который гарантирует отсутствие по-

Рис. 6. Аппаратура стендового комплекса

терь данных при передаче их в оперативную память компьютера.

Особенностью измерения вибраций газотурбинных двигателей является обязательное, синхронное с измерением вибрационных сигналов измерение частот вращения роторов, поскольку в противном случае спектры вибраций чрезвычайно сложно интерпретировать.

Примененные в комплексе адаптеры PCL-818HG и 1105 обеспечивают аппаратную установку шага дискретизации и буферизацию данных. Адаптер 1105, кроме этого, еще имеет встроенные фильтры низкой частоты и три канала измерения частоты сигнала, используемые для измерения частот вращения роторов.

Адаптер PCL-818HG обрабатывает дифференциальные входные сигналы и обеспечивает аналого-цифровое преобразование по 7 каналам измерения вибраций корпуса двигателя, а также измерение угла рычага управления двигателем — $\alpha_{руд}$ в качестве сопроводительной информации. Адаптер PCL-818G содержит:

- 12-разрядное АЦП, чего вполне достаточно для взаимодействия его с датчиками вибраций типа MB-27,

используемыми для измерения вибраций корпуса двигателя;

- таймер, обеспечивающий аппаратную установку частоты опроса (дискретизации);
- FIFO-буфер памяти 1000 слов, позволяющий обеспечить передачу данных без потерь в оперативную память компьютера.

Адаптер 1105 обеспечивает аналого-цифровое преобразование по 4 каналам измерения вибраций выносной коробки агрегатов и турбостартера, а также измерения частот вращения роторов двигателя по двум каналам. Адаптер был разработан АО «Динамика» специально для высокоточных измерений вибраций авиационных газотурбинных двигателей. Адаптер содержит:

- 16-разрядное АЦП с широким диапазоном коэффициентов усиления входного измеряемого сигнала (до 160);
- таймер, обеспечивающий аппаратную установку частоты опроса (дискретизации);
- программируемые фильтры низкой частоты;
- 2 FIFO-буфера памяти по 1000 слов каждый;
- три канала измерения частоты входного сигнала.

Такой функциональный набор позволяет использовать его при решении практически любых задач измерения вибраций газотурбинных двигателей.

Программное обеспечение

Программное обеспечение (ПО) комплекса разработано на языке программирования C++ и работает под управлением ОС Windows NT/2000. Использование ОС Windows для подобного рода систем вполне оправданно, поскольку, с одной стороны, отсутствуют жесткие требования к реакции системы в реальном времени, с другой стороны, обеспечиваются привычные для пользователей ПЭВМ приемы работы, а также не требуется специальной подготовки персонала, обслуживающего ПО комплекса, как, например, в UNIX-системах.

ПО реализует описанные ранее функциональные возможности комплекса по контролю и регистрации вибраций газотурбинных двигателей. Структура ПО позволяет быстро настраивать его для решения различных задач вибрационной диагностики. Так, например, по мере отработки в стендовый комплекс могут быть установлены различные диагностические

процедуры, а ПО спектроанализатора может дополняться любыми алгоритмами цифровой обработки сигналов.

Сертификация

Сертификация стендового комплекса проведена Российским Авиационно-Космическим Агентством. Полученные в результате проведения сертификационных испытаний характеристики отражены в табл. 2.

Заключение

Стендовый комплекс вибрационной диагностики ГТД используется на ММП «Салют» для решения различных задач, а именно для измерения и контроля вибраций двигателей на предъявительских и приёмо-сдаточных испытаниях в соответствии с ОТУ-2000, для отработки диагностических признаков, используемых для диагностики двигателей и их агрегатов при проведении стендовых испытаний и в эксплуатации, для поиска источников повышенных вибраций, снижения вибрационной активности двигателей. Комплекс прост в эксплуатации как для оператора, так и для персонала сопровождения. Применяемая аппаратура работает безотказно. ●

Таблица 2. Основные характеристики стендового комплекса, полученные в результате сертификационных испытаний

Наименование параметра	Значение параметра, не более
Погрешность определения среднеквадратичного значения входного сигнала, измеренного адаптером 1105 в частотном диапазоне: 5-40 Гц 40-5000 Гц 5000-40000 Гц	2% 1% 1%
Погрешность определения амплитуды входного сигнала, измеренного адаптером 1105 в частотном диапазоне: 5-40 Гц 40-5000 Гц 5000-40000 Гц	4% 1% 1%
Погрешность определения среднеквадратичного значения входного сигнала, измеренного адаптером PCL 818HG в частотном диапазоне: 5-40 Гц 40-5000 Гц	4% 1%
Погрешность определения амплитуды входного сигнала, измеренного адаптером PCL-818HG в частотном диапазоне: 5-40 Гц 40-5000 Гц	5% 1%
Неравномерность частотной характеристики адаптера 1105	1%
Неравномерность частотной характеристики адаптера PCL-818HG	1%
Погрешность определения частоты входного сигнала для частот: до 500 Гц свыше 500 Гц	1 Гц 0,2%

Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам АО «Динамика», внесшим большой вклад в разработку стендового комплекса вибрационной диагностики ГТД, и сотрудникам ММП «Салют», участвовавшим в работах по

его внедрению и адаптации для двигателей, производимых предприятием.

**Авторы — сотрудники АО «Динамика» и ФГУП ММП «Салют»
Телефоны: (095) 452-1685, 369-8002**