

УДК 629.7.03.018

О.Н. БЫЛИНКИНА, Б.Б. КОРОВИН, А.А. СТАСЕВИЧ, В.Т. ДЕДЕШ

*Федеральное государственное унитарное предприятие РФ  
«Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова», Россия*

## ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЛЕТНО-ПРОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ АВИАЦИОННЫХ ГТД НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Представлены результаты исследований ЛИИ им. М.М. Громова по разработке и апробации программно-аппаратных средств для летно-прочностных испытаний авиадвигателей нового поколения.

**безопасность, апробация, программно-аппаратный комплекс, результаты исследований, нагружение**

### Введение

Необходимость проведения летно-прочностных испытаний повышенного риска для ТРДД и винтовентиляторных ГТД сверхбольшой степени двухконтурности, для которых не имеется термобарокамер (ТБК) соответствующей мощности, а также современные требования к оперативности летно-прочностных испытаний при обеспечении безопасности полетов для ТРДДФ сверхзвуковых маневренных самолетов требуют применения адекватных программно-аппаратных средств. Результатам разработки и апробации таких средств и посвящена настоящая работа.

### Формулирование проблемы

**Типовая структура измерений, обработки и анализа данных при летно-прочностных испытаниях ГТД.** Общие представления о номенклатуре измерений, процедурах обработки и анализа данных при летно-прочностных испытаниях (ЛПИ) авиационных ГТД можно получить из рассмотрения структурной схемы (рис. 1) [1].

Одновременно с измерением переменных напряжений и вибраций в элементах конструкции двигателя регистрируются основные параметры полета

и работы силовой установки. Для выявления источников динамического нагружения элементов турбокомпрессора и оценки возбуждающего воздействия этих источников дополнительно обеспечивается измерение полей давления, температуры и пульсаций потока в газозводдушном тракте двигателя (ГВД).

При обработке вибропроцессов для всех исследуемых режимов работы двигателя определяются максимальный полуразмах, частота и интенсивность узкополосных составляющих переменных напряжений, а также кратность частот этих составляющих частоте вращения ротора (роторов) двигателя и (или) его агрегатов. Выявление природы колебаний осуществляется с использованием методов гармонического, спектрального и регрессионного анализа [1 – 4].

В результате совместного рассмотрения оценок спектральной плотности вибрационных процессов и пульсаций давления в ГВД, значений функции когерентности на совпадающих частотах спектров и корреляционных соотношений между уровнями процессов определяются источники вибрационного нагружения исследуемых деталей и взаимосвязь колебаний различных элементов конструкции [2 – 6]. Первичная обработка тензограмм и сопровождающей информации позволяет получать экспериментальные зависимости вибрационных напряжений в



Рис. 1. Структурная схема обработки и анализа данных, используемая при проведении лётных исследований вибрационного нагружения авиационных ГТД.

элементах конструкции от частоты вращения ротора (роторов), с помощью которых оценивается влияние компоновки летательного аппарата (ЛА) и условий полета на нагружение по сравнению со стендовыми данными. Одновременно определяются величины разброса напряжений в однотипных деталях, влияние переходных процессов при работе всех видов механизации компрессора, воздухозаборника, реактивного сопла, подтверждается отсутствие автоколебаний рабочих лопаток компрессоров, вентиляторов.

Следующая ступень анализа вибрационного нагружения элементов ГТД базируется на использовании оценок физических факторов, определяющих это нагружение. К таким факторам для вынужденных (резонансных) колебаний лопаток первых ступеней компрессоров авиационных ГТД можно отнести относительную амплитуду вызывающей резонанс  $k$ -й гармоники окружной неравномерности полного давления  $\bar{a}_k$  и относительную пульсацию этого давления  $\Delta P_1^* / P_1^*$  на характерном радиусе входного сечения двигателя.

Указанные факторы, определенные для режимов работы двигателя с  $N_\phi = N_{рез} = \text{const}$  во всех исследованных условиях полета, после оценки их парных коэффициентов корреляции друг с другом и с уровнем вибрационных напряжений в лопатках, ранжируются по степени взаимосвязи с интенсивностью анализируемого процесса и, в случае значимости этой связи, используются для построения регрессионных моделей вида

$$\sigma_v = k_1 + k_2 \bar{a}_k + k_2 \Delta P_1^* / P_1^* + k_3 n_{np}$$

Полученные модели используются при планировании летного эксперимента, а также для прогноза и контроля нагружения лопаток двигателя данного типа при его работе с другими вариантами входных устройств [1].

Для опережающей отработки технологии автоматизированного контроля нагружения исследуемого рабочего колеса в эксплуатации для режимов ра-

боты двигателя с  $n_\phi = n_{рез} = \text{const}$  и  $\max n_\phi \neq n_{рез}$  получают модели динамического нагружения II вида, которые, в случае необходимости, применяются и для обеспечения безопасности проведения летного эксперимента, что особенно актуально при тензометрировании винтовентиляторов ТВВД.

**Общие требования к программно-аппаратному комплексу.** Предварительный обзор состояния рынка серийно выпускаемых систем показал, что, как правило, все системы ориентированы на выполнение трех-четырёх стандартных функций над входными данными, например, расчет СКЗ, отображение осциллограммы, расчет БПФ. Такой подход исключает возможность оперативного изменения жестко заложенных в систему алгоритмов, форматов отображения, изменения логики регистрации входных значений. Кроме того, отсутствует возможность приема, обработки, регистрации и отображения в удобной для пользователя форме сопроводительной низкочастотной информации, получаемой от других систем бортовых измерений (СБИ) (например, типа ГАММА).

Учитывая задачи ЛПИ и необходимость выполнения большого объема измерений виброакустических процессов с частотами до 10 кГц и выше, бортовые и наземные программно-аппаратные средства должны отвечать высоким требованиям в части объемов памяти, количества входных высокочастотных каналов, быстродействия, обеспечения возможности регистрации ВЧ данных в течение всего полета (1 – 2 часа) при оптимальном распределении бортовых и наземных функций контроля, отображения, обработки и анализа данных.

### Решение проблемы

**Бортовая часть комплекса.** Разработанный программно-аппаратный комплекс состоит из бортовой и наземной части.

Бортовая часть включает в себя твердотельный накопитель ТН1АЦ, разработки ЛИИ, а также ана-

логово-цифровой преобразователь на базе ПЭВМ IBM PC/XT с универсальным интерфейсом, позволяющий осуществлять:

- прием и регистрацию ВЧ информации;
- визуальный контроль текущих уровней вибрационных напряжений по 16 (32) каналам;
- отображение осциллограмм;
- расчет спектров;
- допусковый контроль;
- отображение на экране оператора текущих уровней сигналов;
- прием и регистрацию низкочастотной сопроводительной информации;
- выдачу на внешние согласующие устройства (СУ) результатов работы алгоритмов допускового контроля.

На рис. 2 представлена компоновка бортовой части программно-аппаратного комплекса.

Программно-аппаратный комплекс состоит из интерфейсных плат и системного программного обеспечения [7], предназначенного для взаимодействия с интерфейсными платами, адаптера последовательного интерфейса, блока отображения на экране монитора результатов расчета текущих уровней сигналов и блока управления. Поступающие на вход интерфейсных плат данные подвергаются аналого-цифровому преобразованию и в цифровом виде через шину PCI или USB ПЭВМ поступают в блоки управления работой внешних интерфейсных модулей. Указанные блоки предназначены для приема данных, поступающих от плат, взаимодействия с пользовательской библиотекой и регистрации полученных данных на жесткий диск ПЭВМ. Блоки управления не зависят друг от друга и работают автономно.

Число задействованных блоков управления определяется числом загруженных интерфейсных модулей. Для корректного задания параметров работы интерфейсных модулей (частота дискретизации, число каналов, тип подключения и т.д.) пред-

назначен блок инициализации.

Система бортовых измерений Гамма предназначена для сбора и регистрации информации, поступающей от датчиков, установленных как на опытном двигателе, так и на летающей лаборатории (ЛЛ). Для корректной обработки ВЧ параметров необходима точная временная привязка к параметрам высотно-скоростной группы (высота и скорость полета, углы атаки и скольжения, и т.д.). Поэтому в процессе регистрации создается единая база данных, состоящая как из высокочастотных параметров, так и низкочастотных параметров, полученных от системы бортовых измерений Гамма. Прием цифровой информации по каналу связи RS-232C производится на стандартный порт ПЭВМ "COM1" или "COM2". Параллельный 12-ти разрядный код СБИ Гаммы предварительно преобразуется в последовательный формата RS-232C в специально доработанном штатном блоке УсС-28. Далее производится декодирование цифрового потока данных формата RS-232C, поступающего от системы бортовых измерений Гамма, и формирование единого кадра для последующей регистрации всех поступающих данных на жесткий диск ПЭВМ.

Для синхронизации регистрации ВЧ данных и выдачи на внешние согласующие устройства СБИ результатов работы алгоритмов работы допускового контроля интерфейсные платы и СБИ Гамма соединены линиями передачи и приема сигналов TTL уровней.

Предлагаемый комплекс прошел проверку в 2003 году при испытаниях двигателя НК-93 на стенде СНТК (г. Самара) и подтвердил свою работоспособность.

В настоящее время программно-аппаратный комплекс активно используется при проведении ЛПИ перспективных ТРДДФ. В дальнейшем планируется его установка и использование при летно-прочностных испытаниях опытных двигателей на ЛЛ.

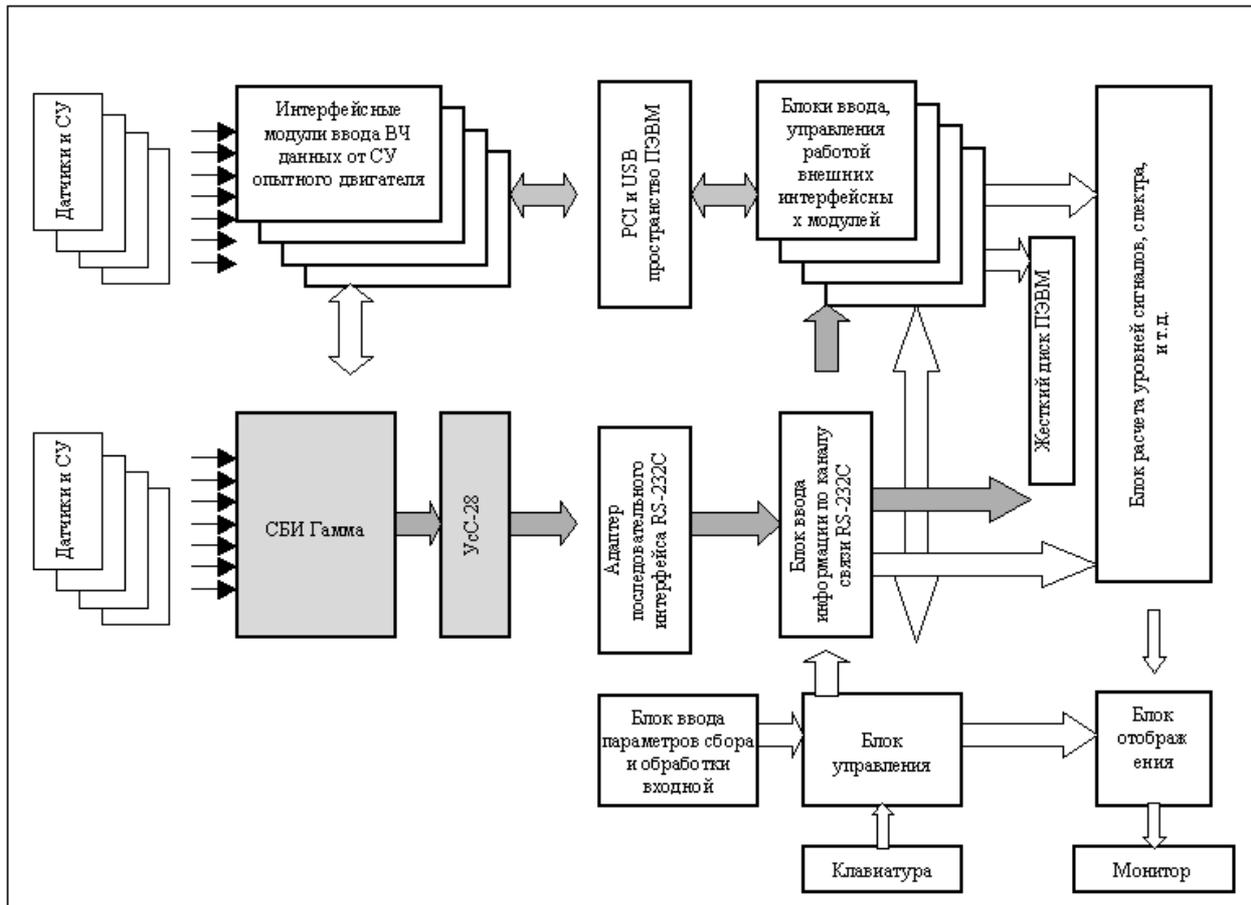


Рис. 2. Структура программно-аппаратного комплекса

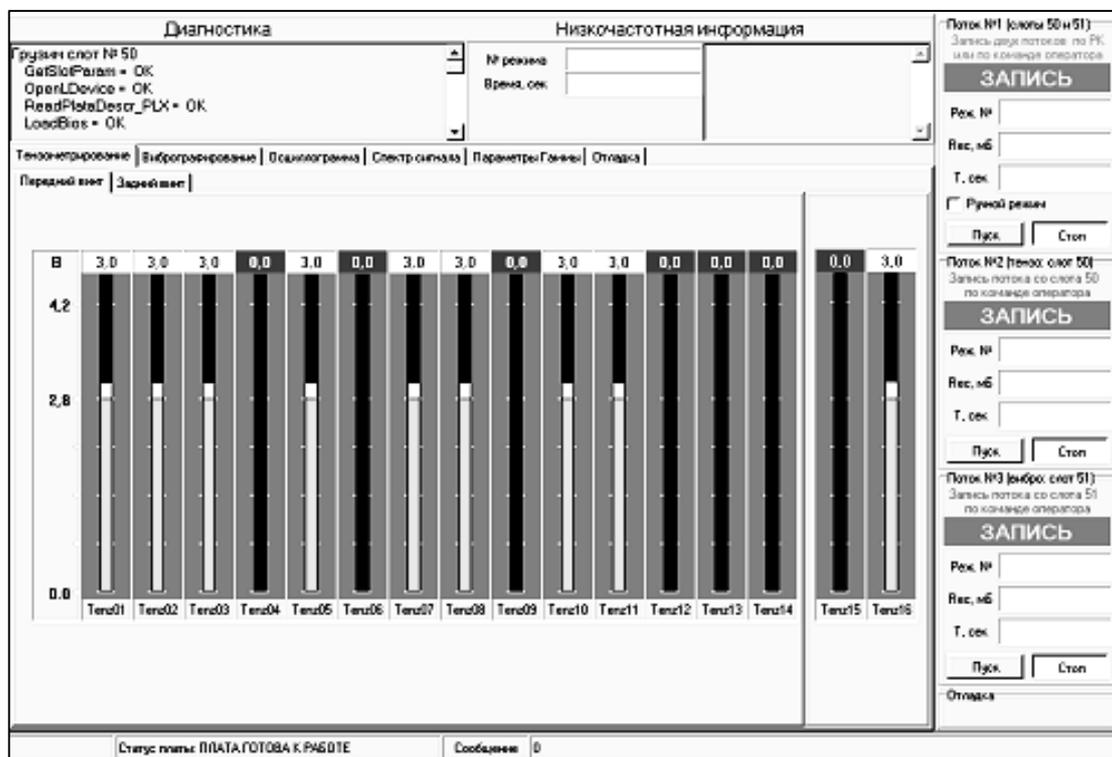


Рис. 3. Рабочее окно пульта оператора – экспериментатора

На рис. 3 представлен вариант рабочего окна пульта оператора-экспериментатора для контроля уровней напряжений по 16 измерительным каналам.

На экране в графическом виде реализовано отображение физических значений вибронпряжений (относительной деформации) по 16 каналам. Параметры отображены в виде столбиков, над каждым столбиком высвечивается значение среднеквадратического отклонения переменной деформации в текущий момент времени.

Заложенный в программу алгоритм обеспечивает контроль допустимого уровня относительной деформации в течение всего времени полета.

В программе визуального контроля заложены два порога предупреждения:

- “предельно-допустимые напряжения” (желтый цвет);
- ”опасные напряжения” (красный цвет).

Кроме того, оператор, не выходя из главного окна, может оценить качество сигнала на верхнем (контрольном) экране отображения осциллограммы любого из контролируемых каналов.

Справа и слева от контрольного экрана в цифровом виде выдается информация о частоте вращения роторов и сопроводительная информация (с СБИ Гамма).

Главное меню имеет несколько закладок, с помощью которых можно более тщательно сделать просмотр осциллограммы или спектра по каждому из регистрируемых каналов. Для этого необходимо выйти из главного меню и войти в нужное окно (“осциллограмма”, “спектр”).

Все значимые события:

- время включения и выключения регистрации;
- момент времени выхода за допуски по уровню;
- его продолжительность по каждому каналу и т.д.)

фиксируются в протокол, который просматривается после завершения работы.

При испытаниях двигателя НК-93 на стенде СНТК регистрация относительных деформаций в элементах винтовентилятора производилась каждые 250 мсек. На этом временном интервале определялось максимальное значение размаха (2A) сигнала с тензодатчика и вычислялось физическое значение динамического нагружения в относительных единицах деформации.

Каждые 500 мсек расчетные параметры заносились в протокол визуального контроля, а текущие значения первичной информации непрерывно регистрировались на жесткий диск.

**Наземная часть комплекса.** Основная задача наземного комплекса – оперативная обработка вибрационных процессов во временной и частотной областях с функциональной увязкой параметров высокочастотных процессов динамического нагружения элементов ГТД с параметрами полета самолета и работы двигателя.

Наземная часть программного комплекса, в частности, обеспечивает:

- построение обзорных графиков изменения величины вибропараметров и параметров, характеризующих работу двигателя и условия полета;
- идентификацию структурных составляющих спектров посредством использования кинематической модели двигателя, а также диагностических признаков, позволяющих идентифицировать развитие дефекта или технологического нарушения, допущенного при сборке двигателя;
- построение каскадов спектров, позволяющих проводить оценку перераспределения энергии колебаний вибропроцессов по времени, при изменении режима работы двигателя и (или) полета;
- идентификацию источников колебаний с одновременной визуализацией их интенсивности помощью модифицированной диаграммы Кемпбелла;

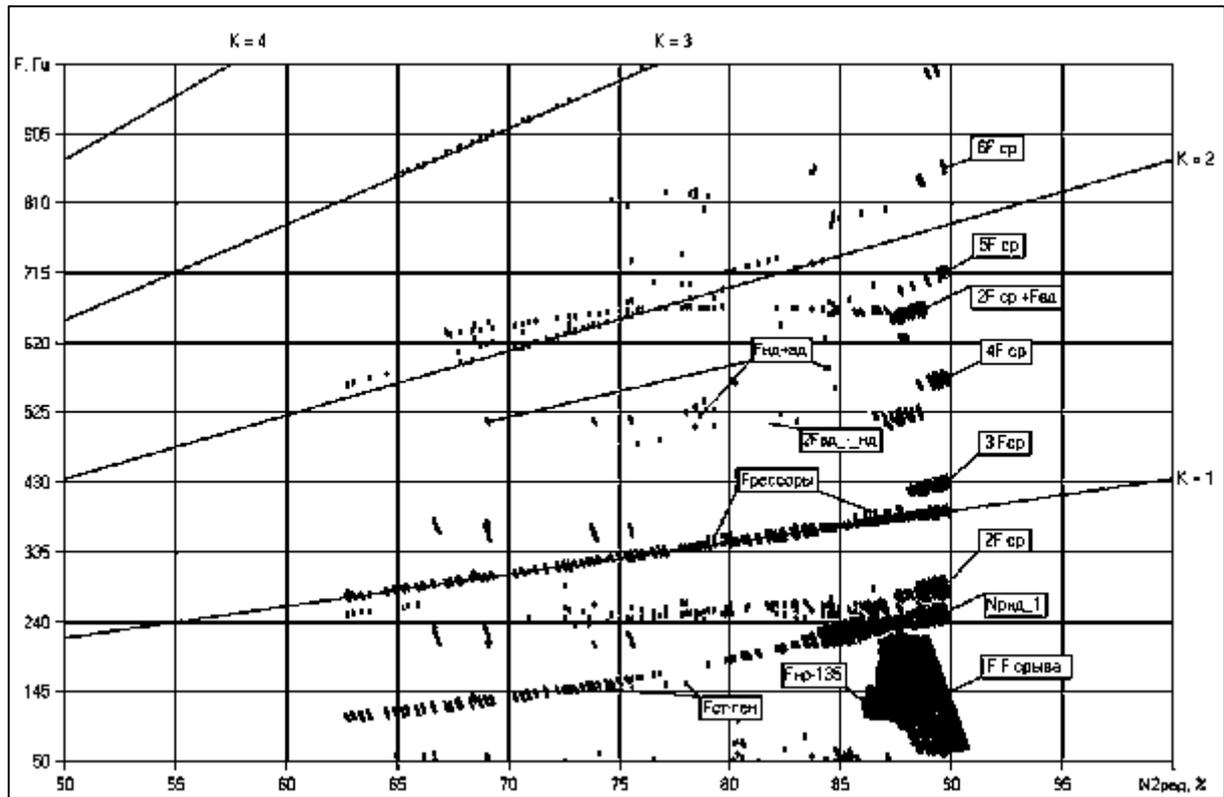


Рис. 4. Пример графического представления результатов вибрографирования в виде модифицированной диаграммы Кемпбелла с одновременным нанесением интенсивности вибраций для всех составляющих вибропроцесса.

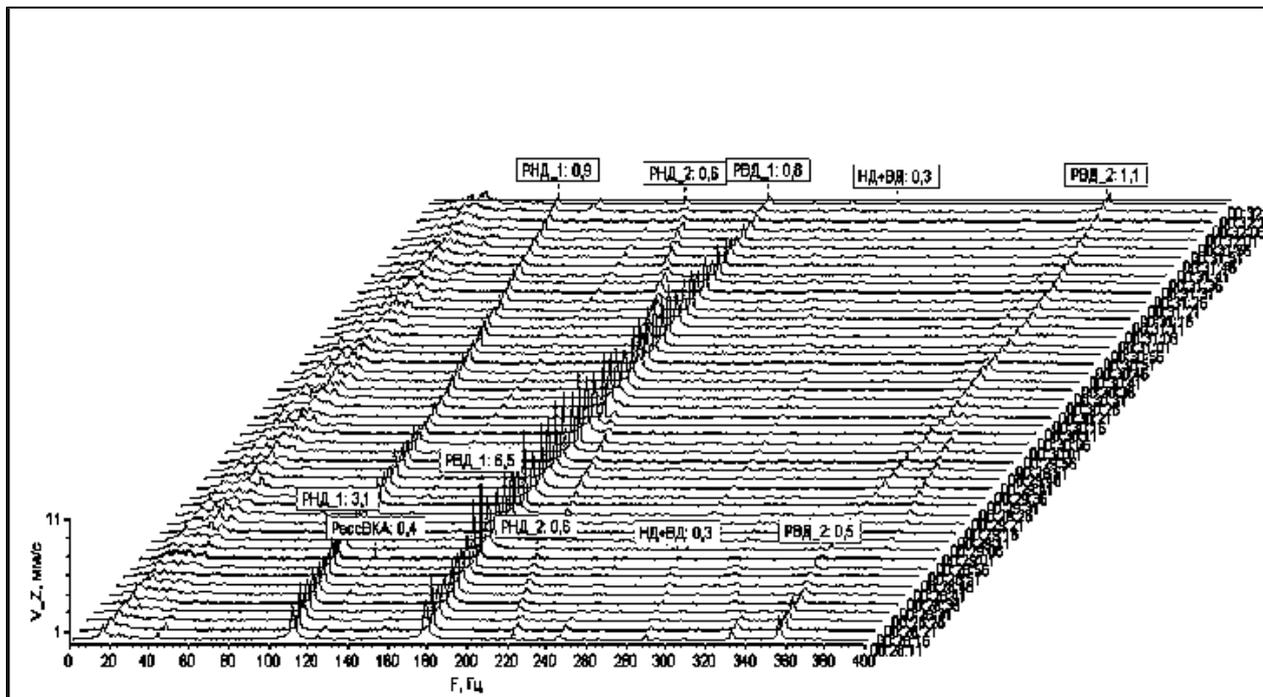
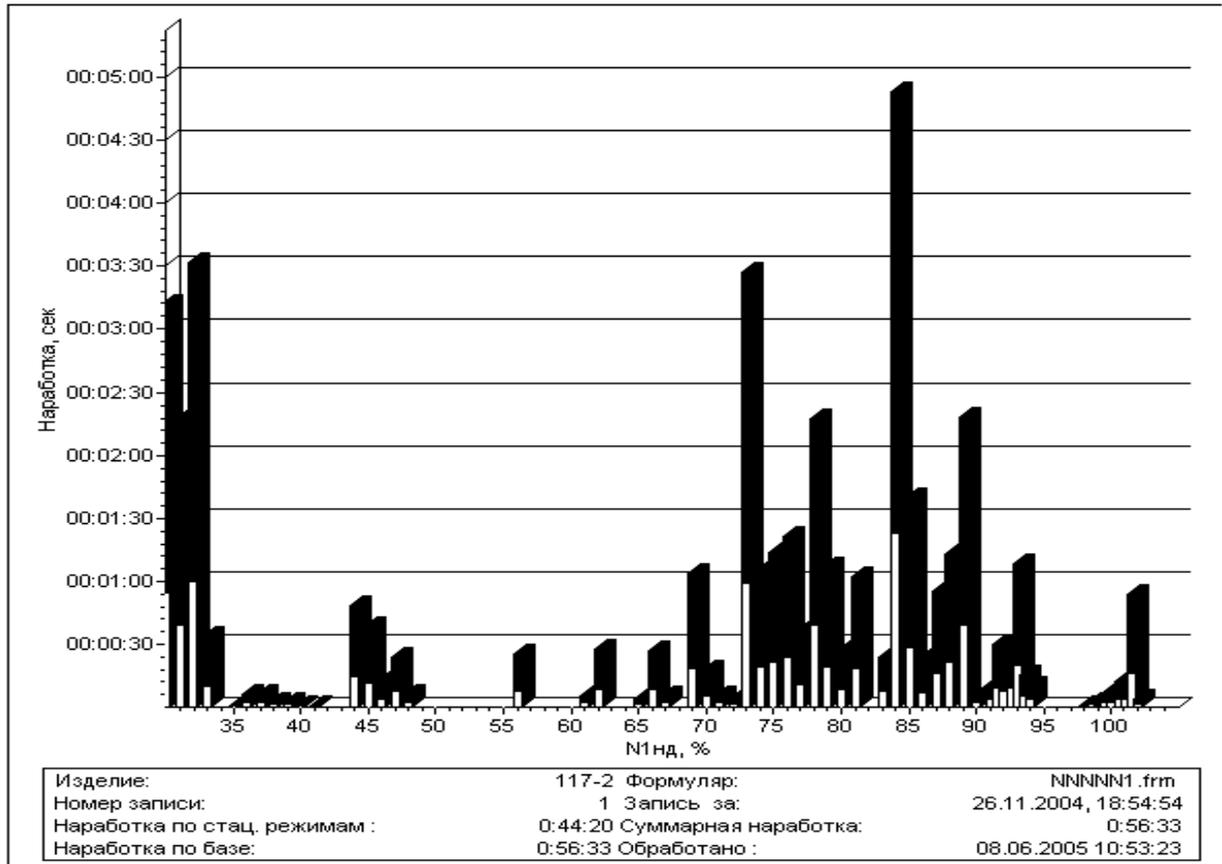
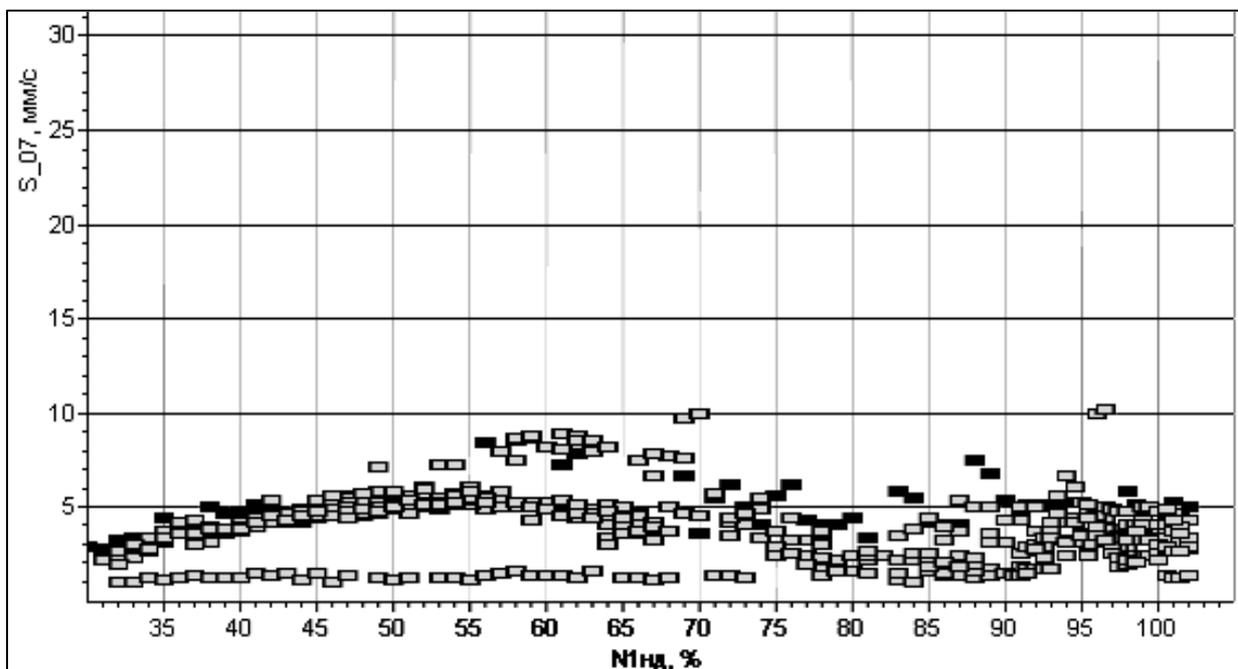


Рис. 5. Графическое представление каскадов спектров, полученных при выполнении вибрографирования двигателя



а



б

Рис .6. Графическое представление расчета режимной (вибрационной) наработки (а) и построение вибромодели двигателя (б)

– оценку степени взаимосвязи двух параметров и построение линий регрессии между ними в графическом виде;

– построение тензограмм и расчет величины вибронапряжений роторных деталей с инициализацией частоты вращения ротора;

– расчет вибронаработки двигателя и его элементов с документированием в виде диаграммы;

– представление в графическом виде изменение амплитуды (СКЗ) любой из спектральных составляющих вибраций по частоте вращения ротора за весь цикл проведения испытаний в виде обобщающего графика.

Примеры графического представления результатов испытаний, полученные на реальном материале при проведении ряда работ по вибрографированию и тензометрированию ГТД представлены на рис. 4–6.

### Заключение

Разработанный в ЛИИ программно-аппаратный комплекс для информационного сопровождения летно-прочностных испытаний газотурбинного двигателя нового поколения обеспечивает: непрерывную запись виброакустических процессов и сопровождающей информации в течение всего полета, безопасность проведения испытаний за счет непрерывного бортового контроля динамического нагружения элементов двигателя в реальном времени и оперативную обработку ВЧ информации во временной и частотной областях, позволяя в течение 1–2 часов после посадки борта принимать решение о продолжении испытаний по вибрографированию и динамическому тензометрированию двигателя.

### Литература

1. Коровин Б.Б. Оценка нагружения элементов конструкции ГТД в условиях полета. / В кн. Летные испытания газотурбинных двигателей (под редакцией Г.П. Долголенко) – М.: Машиностроение, 1983. – С. 83 – 91.

2. Бендат Д., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. – М.: Мир, 1971.

3. Коровин Б.Б., Червонюк В.В. Некоторые методические аспекты анализа неравномерности параметров потока при исследовании вибрационного нагружения элементов турбокомпрессора // Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова. – Научно-технический сборник № 134. – 1980. – С. 3 – 14.

4. Коровин Б.Б., Червонюк В.В., Климова С.Н. Анализ вибрационных процессов ГТД с помощью специализированных систем обработки // ЦИАМ. – Труды № 970. – 1982.

5. Дорошко С.М. Контроль и диагностирование технического состояния газотурбинных двигателей по вибрационным параметрам. – М.: Транспорт, 1984. – 128 с.

6. Балицкий Ф.Я., Иванова М.А., Соколова А.Г., Хомяков Е.И. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов. – М.: Наука, 1984. – 120 с.

7. Архангельский А.Я. Приемы программирования в Delphi. – М.: ЗАО “Издательство Бином”, 2003. – 432 с.

*Поступила в редакцию 27.05.2005*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.