

ПРИМЕНЕНИЕ ИВК МІС-300М+ ДЛЯ МОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Брянцев Б.Д.¹, Григорьев Б.В.¹, Каринский В.И.², Скилов И.О.²

¹ ФГУП «ЦАГИ»

² НПП «МЕРА»

Ключевые слова: измерительно-вычислительный комплекс, динамические испытания, модальный анализ

Аннотация

В работе приводятся краткое описание и результаты тестирования измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) МІС-300М+, предназначенного для наземных частотных испытаний летательных аппаратов (ЛА) и их моделей в потоке в аэродинамических трубах (АДТ). Штатные программные средства ИВК обеспечивают измерение динамических характеристик объектов при моногармоническом, полигармоническом, импульсном контролируемом, импульсном неконтролируемом и внешнем неконтролируемом случайном (типа «белый шум») видах возбуждений. Дополнительно установленное на ИВК программное обеспечение ЦАГИ позволяет проводить модальный анализ по результатам всех перечисленных выше видов измерений. На результатах испытаний специальной тестовой модели самолета иллюстрируются возможности ИВК МІС-300М+ и средств модального анализа, установленных на нем.

1. Введение

В ЦАГИ с 1970 года ведутся работы по разработке и внедрению технологий исследований явлений аэроупругости на основе идентификации математических моделей динамики конструкций ЛА по результатам динамических испытаний (ДИ). Эти технологии строятся на основе модального анализа, проводимого по результатам измерений колебаний конструкций испытываемого объекта при следующих типах внешних воздействий/возбуждений:

моногармоническое, полигармоническое, импульсное контролируемое, импульсное неконтролируемое, случайное неконтролируемое (под действием внешних случайных сил, в том числе турбулентности при испытаниях в потоке).

В работе [1] «Базовые алгоритмы идентификации и коррекции математических моделей динамики конструкций летательных аппаратов по результатам динамических испытаний» изложены основные принципы и комплекс основных алгоритмов идентификации и коррекции расчетных динамических моделей конструкций ЛА в виде уравнений возмущенного движения неконсервативной линейной динамической системы (ДС). Комплекс включает: алгоритмы аппроксимации векторных частотных характеристик дробно-рациональными функциями и получения по ним параметров собственных колебаний системы; алгоритмы формирования системы нормальных коор-

динат; алгоритмы формирования динамических матриц жесткости и демпфирования и алгоритмы определения величин обобщенных масс тонов нормальных колебаний неконсервативных ДС на основе анализа векторных частотных характеристик, а также на основе метода догрузки с учетом изменения форм нормальных колебаний.

В работе [2] «Идентификация модальных параметров и прогнозирование флаттера по отклику на турбулентное возбуждение» дано теоретическое обоснование методики идентификации модальных параметров по автокорреляционным и взаимокорреляционным функциям, полученным по реакции конструкции на неконтролируемое случайное возбуждение типа «белый шум».

Для конструкции без потока и в потоке модальные параметры идентифицируются с помощью анализа частотных и/или импульсных характеристик, а также анализа вибраций, вызванных неконтролируемым случайным возбуждением (естественной турбулентностью потока).

Представленный в [1,2] подход обладает основными преимуществами, типичными для методов, базирующихся на идентификации (и последующей экстраполяции) коэффициентов уравнений колебаний. В частности, этот подход позволяет реально предсказывать критический скоростной напор флаттера по экспериментальным данным, полученным в потоке далеко (до 50%) от критической скорости флаттера ($V_{кр}$).

Применимость методики к реальным системам иллюстрируется [2,3] на результатах флаттерных испытаний модели в аэродинамической трубе.

До настоящего времени в качестве измерительно вычислительных комплексов (ИВК) использовались или 16-ти канальная ИВК и программное обеспечение (ПО) на основе отечественных систем, обеспечивающих все перечисленные виды измерений и модальный анализ по результатам испытаний, или ИВК и ПО LMS Test. Lab [4,5], обеспечивающие измерения при: 1. моногармоническом, 2. импульсном контролируемом, 3. случайном контролируемом возбуждении и модальный анализ по результатам измерений.

При этом имеющиеся в наличии средства LMS практически не обеспечивают применение наиболее эффективной технологии измерений и модального анализа на основе полигармонического возбуждения, а так же технологий на основе внешнего импульсного неконтролируемого и случайного неконтролируемого возбуждения типа «белый шум».

Малоканальность использовавшегося ранее отечественного ИВК и технологические ограничения использовавшихся в ЦАГИ ИВК фирмы LMS привели к необходимости создания отечественных ИВК нового поколения, обеспечивающих все перечисленные выше технологии измерений и модального анализа по результатам испытаний.

В данной работе приводится краткое описание разработанного и изготовленного в НПП «МЕРА» по исходным требованиям ЦАГИ нового ИВК МИС-300М+, предназначенного для наземных частотных испытаний (НЧИ) ЛА и их динамически подобных моделей (ДПМ) в АДТ ЦАГИ.

Кроме того, в данной работе дается краткое описание дополнительно установленного на ИВК МИС-300М+ разработанного в ЦАГИ программного комплекса, обеспечивающего возможность проведения модального анализа по результатам всех перечисленных выше видов испытаний, возможность идентификации уравнений динамики испытываемого объекта в потоке, а также прогнозирования и параметрического анализа флаттера по результатам испытаний на докритических режимах.

На результатах наземных испытаний тестовой ДПМ самолета иллюстрируются возможности ИВК МИС-300М+ и средств модального анализа.

2. Краткое описание ИВК

В штатной комплектации измерительно-вычислительный комплекс для измерения, анализа и регистрации параметров вибрационных процессов МІС-300М [6] (далее по тексту – прибор) представляет собой прибор со встроенными функциями записи/воспроизведения и экспресс-анализа быстропеременных аналоговых сигналов по независимым измерительным каналам (8/16/24 канала).



Рис. 2.1. ИВК МІС-300М. Внешний вид

Прибор предназначен для измерения и анализа сигналов датчиков вибрации, акустических шумов, статико-динамического давления, а так же для измерения других аналоговых сигналов в полосе частот от постоянного тока до 28000 Гц и амплитудой до $\pm 10\text{В}$.

Обеспечивается вывод измеряемых величин или преобразованных параметров на встроенный цветной жидкокристаллический или внешний экран одновременно по произвольному количеству входных измерительных каналов.

Прибор может быть использован для построения многоканальных измерительных систем, автоматических и автоматизированных систем измерения, контроля, учета и управления производственными и технологическими процессами.

В прибор МІС-300М могут быть установлены функции подробного анализа зарегистрированной экспериментальной информации.

Прибор позволяет работать с различными видами первичных измерительных преобразователей (пьезоэлектрическими, индуктивными, тензометрическими, емкостными, термометрами сопротивления, термоэлектрическими термометрами и т. д.).

Прибор может комплектоваться внешними модулями-нормализаторами как производства НПП «МЕРА» (усилитель заряда пьезоэлектрических датчиков, нормализатор сигнала датчика оборотов и др.), так и сторонних производителей.

Прибор может использоваться как самостоятельно в простых системах типа «объект – регистратор», так и в сложных многоуровневых системах на нижнем уровне измерений.

2.1. Назначение ИВК МІС-300М+

ИВК МІС-300М+ является модификацией ИВК МІС-300М, который в соответствии с исходными требованиями и руководством оператора [7] обеспечивает измерения:

- 1) частотных характеристик (ЧХ) при моногармоническом возбуждении;
- 2) колебаний испытываемого объекта при полигармоническом возбуждении;
- 3) случайных колебаний объекта при турбулентном (случайном внешнем) возбуждении;
- 4) случайных колебаний при контролируемом внешнем импульсном возбуждении;
- 5) случайных колебаний при неконтролируемом внешнем импульсном возбуждении;

В ходе экспериментов результаты измерений сохраняются в базе данных Пакета Обработки Сигналов WinПОС [8] в виде записей сигналов датчиков колебаний испытываемого объекта во временной области.

Затем, с помощью специально разработанных процедур WinПОС, экспериментальные данные преобразуются в форматы системы Идентификации Расчетных Динамических Моделей (ИРДМ), применяемой в ЦАГИ для анализа результатов динамических испытаний и прогнозирования флаттера.

Результаты измерений при моногармоническом возбуждении преобразуются в текстовые файлы в кодировке «ASCII», содержащие амплитудно-фазо-частотные характеристики (АФЧХ), которые могут быть импортированы в MS Excel для оформления результатов измерений в виде графиков амплитудных и фазовых характеристик для визуального анализа и печати отчетных материалов.

Кроме того, результаты измерений ЧХ, полученные при моногармоническом возбуждении, могут быть преобразованы с помощью специально разработанной в ЦАГИ программы trnprxf.exe в текстовый формат файлов типа xf.ddd для модального анализа и прогнозирования флаттера в системе ИРДМ.

Для первичной обработки, модального анализа и прогнозирования флаттера в системе ИРДМ, результаты измерений при полигармоническом, турбулентном, при внешнем импульсном контролируемом и неконтролируемом возбуждениях из формата WinПОС преобразуются в формат binary (файлы типа xt.bin) системы ИРДМ в виде записей сигналов датчиков во временной области с помощью команд (плагинов), специально разработанных в среде WinПОС.

2.2. Проверка временных параметров и синхронности измерений ИВК МИС-300М+

Опыт использования серийных МИС-300М в ЦАГИ показал необходимость специальной отработки штатного программного обеспечения приборов для повышения надежности и точности синхронизации измерений между измерительными каналами как в рамках одного прибора, так и между приборами, работающими в едином измерительном комплексе. По этой причине были проведены специальные исследования по проверке временных параметров ИВК и проверке синхронности измерений в пределах одного и нескольких приборов, работающих в едином комплексе. Ниже приводятся краткое описание технологии и основные результаты этих проверок.

2.2.1. Проверка временных параметров ИВК

Проверка временных параметров ИВК проводилась путем генерирования сигналов различной частоты с помощью МИС-300М+ и измерения частоты сигнала с помощью образцового частотомера. Результаты сопоставления частот, задаваемых в МИС-300М+ и измеренных частотомером, приведены в таблице №1.

Таблица 1.

№пп	Частота, заданная в МИС-300М, Гц	Измеренная частота, Гц
1	1.000	0.999 ± 0.001
2	10.000	10.00 ± 0.002
3	100.00	99.9998 ± 0.00005
4	500.00	499.99 ± 0.003

2.2.2. Проверка взаимного влияния и синхронизации каналов

При проверке взаимного влияния и синхронизации каналов, измерения проводились по схеме, изображенной на рис. 2.2.1. Сопротивление величиной 1 кОм в цепи канала №2 включено с целью оценить влияние внутреннего сопротивления источника сигнала на результаты измерений.

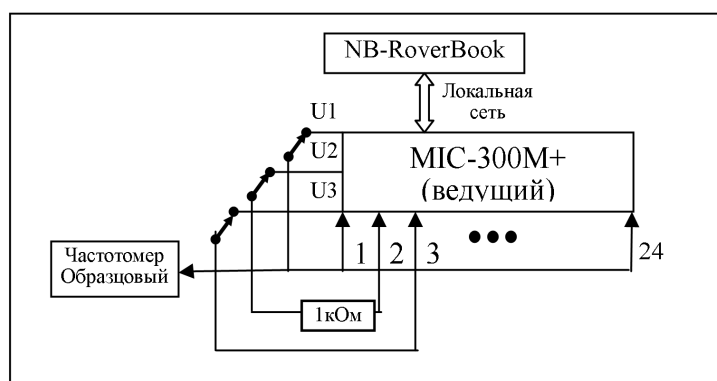


Рис.. 2.2.1. Схема оборудования для испытаний с моногармоническим возбуждением

При этом величины сигналов U_1 , U_2 , U_3 на выходе цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) ИВК составляли $U_1=5.0$ В, $U_2=0.0$ В, $U_3=5.0$ В.

Проверки показали, что разброс в оценке фазовых сдвигов составляет порядка 0.05 градуса в частотном диапазоне 0.1 ... 500 Гц, а межканальное влияние менее -100 дБ, что соответствует исходным требованиям ЦАГИ

2.2.3. Проверки синхронности измерений между ИВК

При разработке ИВК МИС-300М+ была предусмотрена возможность увеличения числа измерительных каналов путем подключения дополнительных (ведомых) МИС-300М через стандартный блок синхронизации ME-020.

В соответствии с программой испытаний была собрана схема с подачей сигналов внешнего генератора на все каналы обоих МИС-300М (см. рис. 2.2.2).

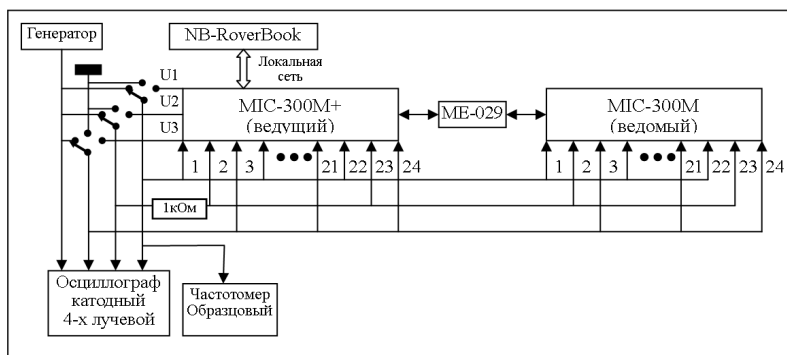


Рис.. 2.2.2. Схема оборудования для проверки синхронности измерений между ИВК МИС-300М

Измерения проводились при частоте сканирования сигналов 4 кГц. При заданной частоте внешнего генератора проводились измерения продолжительностью $t_r=10, 50, 200$ с.

Средствами WinПОС результаты были проверены на предмет сбоев в процессе сбора.

Результаты измерений сохранялись (дописывались) в формате ИРДМ с шагом по времени $dt=0.002, 0.005, 0.001$ с.

Затем средствами ЦАГИ был проведен анализ результатов (просмотр, идентификация частоты процесса, оценка фазовых сдвигов между каналами), в том числе выполнена оценка рассогласований по времени между ИВК МИС-300М.

Оценки производились по фрагментам трех записей продолжительностью примерно 7 секунд каждая. Во всех записях рассогласование по времени составляет меньше 10^{-6} с.

При обработке 3-й записи попутно была проведена проверка влияния канала на канал путем включения в обработку канала с «нулевым» сигналом. Эксперимент показал, что для данных условий эксперимента влияние канала на канал составляет не более 0.04%.

2.2.4. Проверки работы в режиме измерений с полигармоническим возбуждением

Была собрана схема с подачей сигналов от ЦАП ведущего МИС-300М+ на все каналы обоих ИВК (см. рис 2.2.3). Измерения проводились при частоте сканирования сигналов 4 кГц.

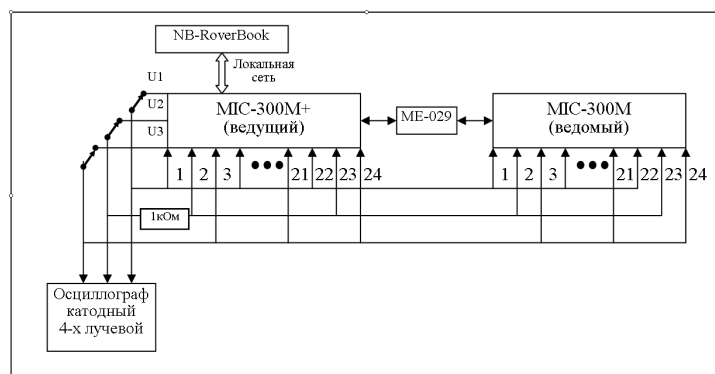


Рис.. 2.2.3 Принципиальная схема оборудования для приемо-сдаточных испытаний в режиме с полигармоническим возбуждением

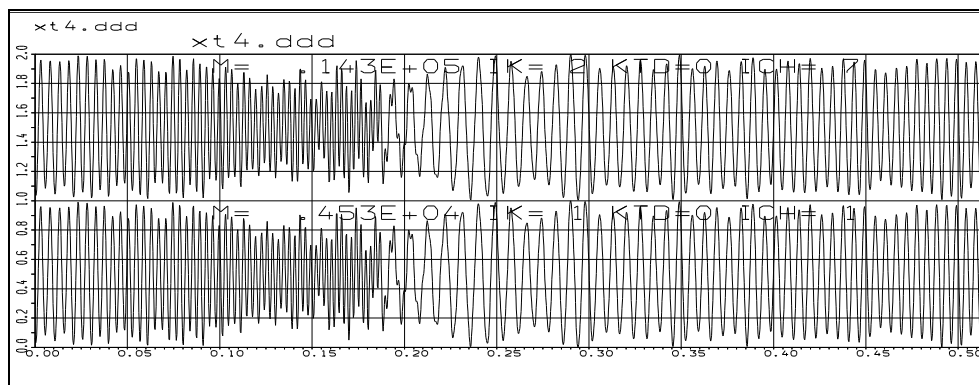


Рисунок 2.2.4 Осциллограммы сигналов первых каналов двух МИС-300М при полигармоническом возбуждении в частотном диапазоне 100 ... 400 Гц после преобразования в формат ИРДМ с частотой сканирования 1000 Гц (исходная частота сканирования 4000 Гц)

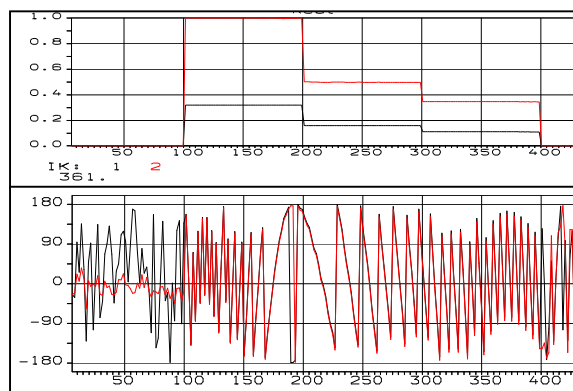


Рисунок 2.2.5 Амплитудный и фазовый спектры, изображенных на рисунке 2.2.4 сигналов первых каналов двух ИВК

Представленные на рисунке 2.2.5 графики спектров показывают практическое отсутствие фазовых сдвигов в системе регистрации ведущего ИВК МІС-300М+ и ведомого МІС-300М в частотном диапазоне 100 ... 400 Гц.

2.3. Примеры экранных форм

При подготовке каждого вида эксперимента необходимо подготовить, так называемые, «экранные формы» («формуляры»/«виртуальные приборы»), которые являются основным интерфейсом системы для оператора, и произвести настройку измерительной системы, в ходе которой задаются: номера каналов, диапазоны напряжений входных и выходных сигналов, параметры возбуждения и т. д.

На рисунке 2.3.1 изображено меню редактирования формуляра.



Рисунок 2.3.1. Меню редактирования формуляра

1 – кнопка активации меню редактирования, 2 – добавление компонента “Исследование вибраций”, 3 - таблица значений, 4- изображение кнопки, 5 - картинка (например, индикатор перегрузок), 6- текстовая метка, 7- цифровой индикатор, 8 - выбор эксперимента.

С помощью указанных кнопок можно выполнить ввод, масштабирование и перемещение компонент окна формуляра.

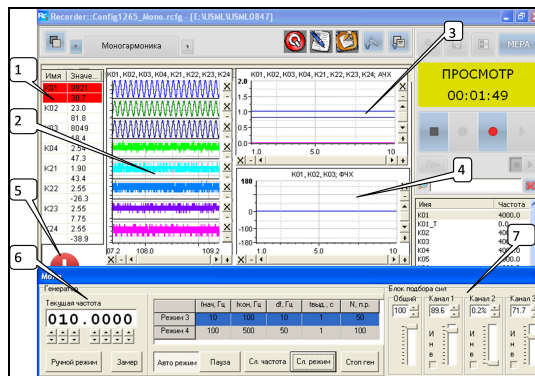


Рисунок 2.3.2. Формуляр испытаний при моногармоническом возбуждении

1 – таблица идентификаторов визуализируемых сигналов в каналах и их текущих параметров (амплитуда, среднее значение), 2 - окно визуализации исходного процесса (осциллограмм), 3 - окно визуализации модуля ЧХ (АЧХ) (в линейном или логарифмическом масштабе), 4 - окно визуализации ФЧХ (фазовой частотной характеристики), 5 - индикатор перегрузок в каналах, 6 – окно управления генерацией сигнала, 7 – блок подбора сил (управления амплитудами и фазами сигналов возбуждения).

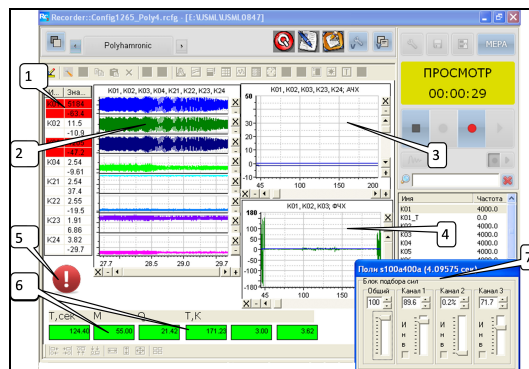


Рисунок 2.3.3. Формуляр для испытаний при полигармоническом возбуждении

1 – таблица идентификаторов визуализируемых сигналов в каналах и их текущих параметров (амплитуда, среднее значение), 2 - окно визуализации исходного процесса, 3 - окно визуализации АЧХ, 4 - окно визуализации ФЧХ, 5 - индикатор перегрузок в каналах, 6 - окна визуализации параметров потока, получаемых в режиме реального времени по сетевому кабелю из файла "parameterpotoka.txt" (имя файла может меняться) от ИВК оператора испытаний или от ИВК АДТ, 7 – блок подбора сил.

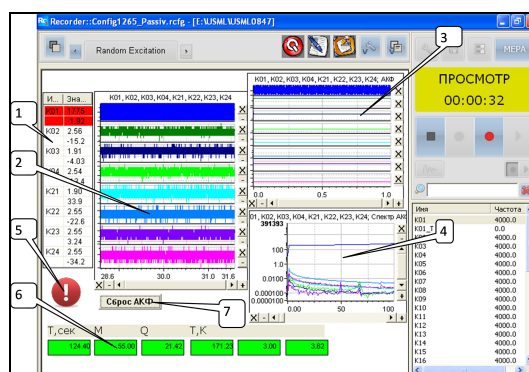


Рисунок 2.3.4. Формуляр испытаний при внешнем не контролируемом (турбулентном) возбуждении. 1 – таблица идентификаторов визуализируемых сигналов в каналах и их текущих параметров (амплитуда, среднее значение), 2 - окно визуализации исходного процесса, 3 - окно визуализации автоковариационных функций (АКФ), 4 - окно визуализации автоспектров (по оси Y логарифмический масштаб), 5 - индикатор перегрузок в каналах, 6 - окна визуализации параметров потока, получаемых в режиме реального времени по сетевому кабелю из файла "parameterpotoka.txt" (имя файла может меняться) от ИВК оператора испытаний или от ИВК АДТ, 7 – кнопка сброса АКФ.

3. Использование МИС-300М+ для динамических испытаний и модального анализа

Как отмечалось в разделе 1, основная цель создания ИВК МИС-300М+ и специализированного программного обеспечения для него состояла в обеспечении измерений:

1. частотных характеристик (ЧХ) при моногармоническом возбуждении;
2. колебаний испытываемого объекта при полигармоническом возбуждении;
3. случайных колебаний объекта при турбулентном (случайном внешнем) возбуждении;
4. случайных колебаний при внешнем импульсном контролируемом и неконтролируемом возбуждении.

Результаты этих измерений являются исходными материалами для модального анализа и исследований явлений аэроупругости на основе идентификации математических моделей динамики конструкций ЛА по результатам динамических испытаний (ДИ).

Ниже дается краткое описание дополнительно установленного на ИВК МИС-300М+ программного обеспечения (ПО) ЦАГИ, обеспечивающего возможность проведения модального анализа по результатам всех перечисленных выше видов испытаний. Это дает возможность идентификации уравнений динамики испытываемого объекта в потоке, а также прогнозирования и параметрического анализа флаттера по результатам испытаний на докритических режимах непосредственно с помощью МИС-300М+.

Цель данного раздела – дать краткое описание основных возможностей комплекса программ идентификации уравнений колебаний упругого ЛА в потоке по результатам динамических испытаний в потоке и без потока.

3.1. Основные определения

В соответствии с [1, 2, 3], испытываемый объект снабжен системой из n датчиков, с помощью которых измеряются мгновенные значения перемещений $X_1(t), \dots, X_n(t)$ в n точках конструкции.

Колебания объекта вызываются системой силовозбудителей или других устройств, воздействующих на ЛА сосредоточенными силами $f_1(t), \dots, f_r(t)$ в r точках конструкции.

В ходе эксперимента (динамических испытаний) информация о параметрах вынужденных колебаний объекта обычно собирается в виде векторов мгновенных значений перемещений $X^T(t) = [X_1(t), \dots, X_n(t)]$ и возбуждающих сил $f^T(t) = [f_1(t), \dots, f_r(t)]$ в моменты времени $t = t_i, i = 1, \dots, m, t_{i+1} - t_i = \Delta t$.

Предполагается, что уравнение возмущенного движения упругого ЛА в потоке воздуха, в некоторой системе обобщенных координат может быть записано в виде:

$$M\ddot{G}(t) + KG(t) + D\dot{G}(t) = \Phi(t),$$

где M, K, D – $k \times k$ -мерные матрицы масс, жесткости и демпфирования, $G(t)$ – вектор обобщенных координат, $\Phi(t)$ – вектор обобщенных сил, k – число степеней свободы ЛА как динамической системы.

Связь между векторами $G(t)$ и $X(t)$, $F(t)$ и $\Phi(t)$ может быть выражена в виде:

$$G(t) = LX(t), \quad \Phi(t) = A^T F(t),$$

где L – $k \times n$ -мерная матрица перехода от вектора перемещений к обобщенным координатам, A – $r \times k$ -мерная матрица форм обобщенных координат в точках возбуждения.

Матрицы L, A, M, K, D составляют расчетную динамическую модель (РДМ) упругого ЛА в потоке воздуха.

Набор матриц L, A, M, K, D будем называть локальной моделью (ЛМ) конструкции ЛА в потоке. Эта модель называется локальной, потому что она соответствует объекту с фик-

сированными параметрами конструкции и потока. Однако величины коэффициентов уравнений движения упругого ЛА в потоке (элементов матриц M, D, K) зависят от параметров потока: числа Маха M_∞ , давления P_∞ , температуры T_∞ , или плотности ρ_∞ и скорости V_∞ , а также от параметров конструкции таких, как распределения масс, жесткостей и т. д. Поэтому используются, так называемые, параметрические модели, в которых в аналитическом виде отражена зависимость коэффициентов матриц M, D, K от параметров потока и конструкции. Предположим, что значения элементов каждой из этих матриц в любой точке пространства параметров P , можно записать в

виде: $R(p) = \sum_{i=1}^{nf} R_i f_i(p)$, где R_i – матрицы постоянных коэффициентов, $f_i(p)$ – некоторые заранее задаваемые функции параметров $P_i, i=1, \dots, r$. Заметим, что для каждой из матриц M, D, K может быть свой набор функций $f_i(p)$. В частности, зависимость матриц жесткости и демпфирования конструкции ЛА от параметров потока при $M_\infty \ll 1$ может быть представлена в виде

$$K = K_1 + \rho_\infty V_\infty^2 K_2, \quad D = D_1 + \rho_\infty V_\infty D_2 \quad \text{или в виде} \quad K = K_1 + \frac{M_\infty^2 P_\infty}{\sqrt{(1 - M_\infty^2)}} K_2, \quad D = D_1 + \frac{M_\infty P_\infty}{\sqrt{T_\infty (1 - M_\infty^2)}} D_2,$$

где K_1, D_1 – матрицы жесткости и демпфирования конструкции без потока,

а K_2, D_2 – матрицы коэффициентов аэродинамической жесткости и демпфирования соответственно.

Таким образом, под *параметрической моделью* понимается набор матриц R_i и функций $f_i(p)$, соответствующих матрицам M, D и K .

Как правило, для формирования параметрической модели сначала формируются локальные модели при различных значениях параметров конструкции и потока, т. е. при различных значениях вектора параметров P . Потом на основе этого набора локальных моделей формируются параметрические модели, например, с помощью метода наименьших квадратов.

При необходимости РДМ позволяет оценивать влияние некоторых модификаций конструкции объекта испытаний расчетным путем. В частности, наличие системы дополнительных точечных грузов, закрепленных в точках p_1, \dots, p_t , может быть учтено корректировкой матрицы масс на величину $\Delta M = A^T \Delta m A$, где $A - t*k$ -мерная матрица форм обобщенных координат в точках p_1, \dots, p_t , а ΔM – диагональная матрица, элементами которой являются массы дополнительных грузов $\Delta m_1, \dots, \Delta m_t$.

Наличие дополнительных упругих связей между точками $p_1 \dots p_t$ можно учесть изменением матрицы K на величину $\Delta K = A^T \Delta k A$, где $\Delta k - t*t$ -мерная матрица коэффициентов влияния дополнительных упругих связей между точками p_1, \dots, p_t . Аналогичным образом можно учесть эквивалентные изменения матрицы демпфирования D при введении системы дополнительных демпферов.

Основная идея технологии идентификации локальных моделей состоит в том, чтобы решение задачи находить через модальные параметры объекта $U_i = u_i + jv_i$ – собственные векторы системы, соответствующие собственным числам $\lambda_i = \delta_i + j\Omega_i, (i=1, \dots, k)$, которые определяются из экспериментальных данных.

Задача определения U_i, λ_i сводится к задаче аппроксимации Векторных Частотных Характеристик (ВЧХ) функциями вида $X_{(j\omega)} = \sum_{i=1}^{2k} \frac{U_i}{(j\omega - \lambda_i)}$ на основе итерационной процедуры [1, 2] аппроксимации ВЧХ дробно рациональными функциями вида.

$$X(j\omega) = \left(\sum_{i=1}^L b_i \cdot (j\omega)^i \right) / \left\{ (j\omega)^{2k} + \sum_{i=1}^{2k} a_i \cdot (j\omega)^{i-1} \right\},$$

где b_i - векторные, a_i - скалярные коэффициенты

Входными данными для модального анализа (МА) являются результаты эксперимента в виде измеренных в эксперименте векторных частотных характеристик $X(j\omega)$.

Задача МА по записям свободных колебаний после импульсного возбуждения

$X(t) = \sum_{i=1}^{2k} U_i e^{\lambda_i t}$ сводится к задаче МА частотных характеристик с помощью Дискретного Преобразования Фурье (ДПФ).

Задача модального анализа по результатам измерений $X(t)$ при внешнем неконтролируемом случайном возбуждении типа «белый шум» сводится к задаче модального анализа авто- и кроссковариационных функций $R_{ij}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T x_i(t) x_j(t + \tau) dt \right\}$, математическая модель которых

$R_{ij}^T(\tau) = \sum_{s=1}^{2k} \tilde{U}_{si} e^{\lambda_s \tau}$ идентична структуре математических моделей записей при импульсном возбуждении [2].

В общем случае определение матриц M , K , D по экспериментальным данным – довольно сложная задача и основные варианты ее решения рассмотрены в [1, 2, 3].

Однако если известен набор собственных чисел λ_i и собственных векторов $\hat{U}_i = LU_i$ в системе обобщенных координат, то по ним однозначно могут быть определены [1, 2] динамические матрицы жесткости и демпфирования: $\tilde{K} = M^{-1}K$; $\tilde{D} = M^{-1}D$.

Для этого рассмотрим характеристическое матричное уравнение системы

$$E\hat{U}\lambda^2 + \tilde{K}\hat{U} + \tilde{D}\hat{U}\lambda = 0, \quad (*)$$

где \hat{U} – $k*2k$ -мерная матрица собственных векторов, столбцами которой являются векторы $\hat{U}_i = LU_i$, а λ – $2k*2k$ -мерная диагональная матрица, элементами которой являются собственные значения λ_i .

Система (*) может быть переписана в виде

$$[\tilde{K} : \tilde{D}] \cdot \begin{bmatrix} \hat{U} \\ \hat{U}\lambda \end{bmatrix} = -\hat{U}\lambda^2$$

разрешив которую относительно $[\tilde{K} : \tilde{D}]$, получим

$$[\tilde{K} : \tilde{D}] = -\hat{U}\lambda^2 \begin{bmatrix} \hat{U} \\ \hat{U}\lambda \end{bmatrix}^{-1}.$$

Здесь предполагается, что набор собственных векторов является полным и включает как комплексные, так и вещественные собственные векторы и собственные числа.

Теперь, если известна матрица M , то матрицы K и D могут быть легко вычислены

$$K = M \cdot \tilde{K}, \quad D = M \cdot \tilde{D}.$$

Необходимо отметить, что, для использования приведенных здесь алгоритмов, несущественно каким образом получены собственные векторы и собственные числа системы. Например, часть из них может быть получена из результатов частотных испытаний путем аппроксимации векторных частотных характеристик, часть может быть получена путем анализа записей свободных колебаний после импульсного возбуждения [2], а часть собственных векторов и собственных чисел может быть получена путем анализа случайных колебаний под действием внешних случайных сил.

Задача идентификации матрицы масс M достаточно подробно описана в [1]. В программном комплексе ИРДМ реализованы вариант идентификации обобщенных масс по параметрам собственных векторов, полученных при различных условиях возбуждения, и вариант идентификации обобщенных масс на основе метода догрузки с учетом изменения форм нормальных колебаний.

В [1, 2] достаточно подробно описаны, реализованные в программном комплексе ИРДМ, алгоритмы идентификации параметров собственных колебаний, формирования базисов систем обобщенных координат, идентификации матрицы масс M , построения математических моделей уравнений динамики и прогнозирования флаттера.

3.2. Организация программных средств и состояние их разработки

Учитывая многообразие возможных вариантов технологии анализа и обработки экспериментальных данных, корректировки РДМ, за основу был принят модульный принцип организации программ. Это дало возможность разбить процесс обработки данных, идентификации и корректировки РДМ на ряд достаточно независимых и относительно простых операций, каждая из которых выполняется отдельным одним или несколькими модулями. Обмен данными между модулями осуществляется с помощью файлов стандартных типов.

Общее управление работой всех модулей и файлами данных осуществляется с помощью управляющей программы-«оболочки» (SH.exe), которая взаимодействует с оператором с помощью гибко программируемой системы многоуровневых меню (см. рис.3.1).

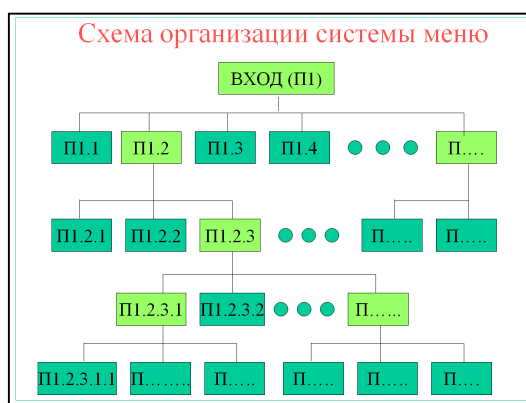


Рисунок 3.1

Каждая позиция (пункт) меню обеспечивает решение определенной задачи. Узловые пункты меню, открывающие следующий уровень задач, обозначены на схеме светлым цветом. Система меню может изменяться редактированием файла настройки «оболочки» меню под именем SH.SFN

с помощью любого текстового редактора в формате «ASCII». Фрагмент файла настройки оболочки приведен в приложении №1.

Вид окна экрана компьютера на этапе первичной обработки экспериментальных данных приведен на рисунке 3.2.

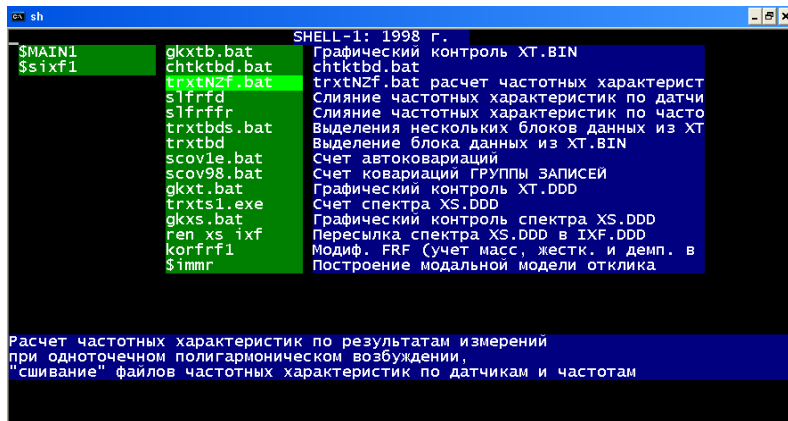


Рисунок 3.2

В левой колонке зеленого поля окна отображаются узловые пункты, а в правой колонке зеленого поля каждая строка соответствует решению определенной локальной задачи анализа и обработки данных. Имена узловых пунктов меню начинаются с символа «\$». Ярким цветом выделен активный в данный момент пункт меню.

Изменение активного пункта меню осуществляется нажатием клавиш ←, ↑, → или ↓ на клавиатуре компьютера.

На синем поле справа приводится краткий комментарий, поясняющий функцию каждого пункта меню. На синем фоне в нижней части экрана отображается расширенный комментарий, поясняющий назначение активного пункта меню.

Текст в колонке пунктов меню обычно соответствует имени командного файла, которому передается управление при нажатии на клавишу «Enter».

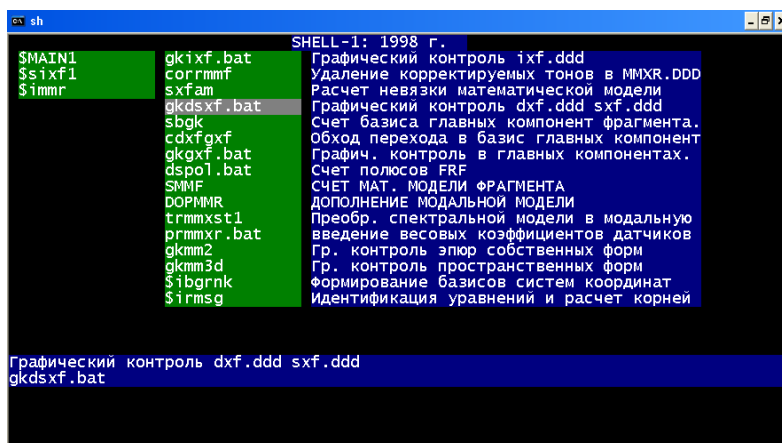


Рисунок 3.3

На рисунке 3.3 приведен вид экрана для задачи идентификации модальной модели частотной характеристики при активном пункте графического контроля невязки фрагмента ЧХ с его модальной моделью.

Последние два пункта меню соответствуют задачам формирования базисов систем рабочих координат, идентификации уравнений колебаний и расчетам параметров собственных колебаний в пространстве параметров объекта и среды.

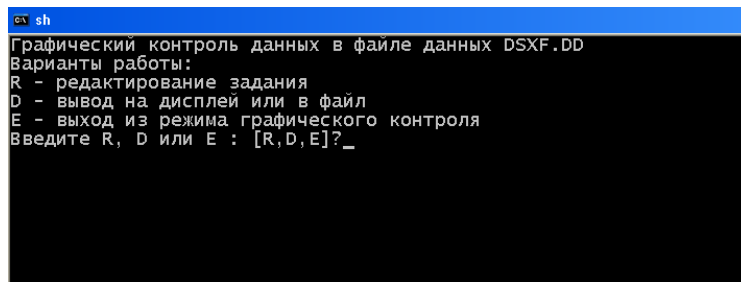
Вариант типичного командного файла, соответствующего активному пункту меню на рисунке 3.3, приведен на рисунке 3.4.

```
echo off
call inpf.bat gkdsxf.nf
copy gkdsxf.nf gkxf.nf

:LO
cls
echo Графический контроль данных в файле данных DSXF.DD
echo Варианты работы:
echo R - редактирование задания
echo D - вывод на дисплей или в файл
echo E - выход из режима графического контроля
rem be ask "Введите R, D или E : ", RDE
CHOICE /C:RDE "Введите R, D или E : "
if errorlevel 3 goto e
if errorlevel 2 goto D
me gkdsxf.nf
copy gkdsxf.nf gkxf.nf
goto LO
:D
ECHO Идет запись графика в файл!
gkxf.exe > nul
pause
goto LO
:e
EXIT
```

Рисунок 3.4

На рисунке 3.5 приведен вид фрагмента экрана при активации пункта меню, соответствующего рисунку 3.3.



```
ex sh
Графический контроль данных в файле данных DSXF.DD
Варианты работы:
R - редактирование задания
D - вывод на дисплей или в файл
E - выход из режима графического контроля
Введите R, D или E : [R,D,E]?_
```

Рисунок 3.5

Обычно при этом открывается возможность оператору в диалоговом режиме выбрать вариант решения. В данном примере обеспечивается возможность или редактирования файла настройки задания программного модуля, соответствующего данному пункту меню, и/или передачи управления соответствующему исполняемому файлу (программе), или выхода в основное меню.

3.3 Перечень основных программных модулей комплекса ИРДМ

1. SH.exe – управляющая программа («программная оболочка»).
2. DSPOL.exe – идентификация полюсов фрагмента векторной частотной характеристики (ВЧХ).
3. GKFRF.exe – программа рисования годографов ВЧХ и графиков АЧХ и ФЧХ.
4. GKMM2.exe – программа рисования форм тонов собственных колебаний по результатам модального анализа в виде линейных графиков.
5. GKMM3D.exe – программа рисования 3-мерных форм тонов собственных колебаний по результатам модального анализа.
6. IBD.exe – идентификация динамических матриц жесткости и демпфирования.
7. IGMD.exe – идентификация обобщенных масс на основе метода догрузки с учетом изменчивости форм нормальных колебаний.
8. IGMM.exe – идентификация обобщенных масс по параметрам собственных колебаний, полученным при различных условиях возбуждения.
9. IRMBDRK.exe – формирование обобщенной (регрессионной) математической модели уравнений (PMM) в базисе рабочих координат.
10. NBNK.exe – нормировка базиса нормальных координат.
11. SBGK.exe – расчет базиса главных компонент фрагмента ВЧХ.
12. SBGKM1.exe – вычисление главных компонент модальной модели ВЧХ.
13. SBNK.exe – программа формирования базиса нормальных координат.
14. SBRK.exe – формирование матриц перехода в рабочие координаты и обратно.
15. SCOV.exe – вычисление матрицы ковариационных функций по записям случайных колебаний.
16. SFRS.exe – расчет фундаментального решения динамической системы по ее уравнениям.
17. SGRM.exe – расчет годографов собственных значений системы в пространстве варьируемых параметров по PMM.
18. SMBD.exe – формирование локальной модели уравнений по экспериментальным матрицам динамической жесткости и демпфирования, базису нормальных координат и обобщенным массам.
19. SMBDR.exe – формирование «локальной» модели уравнений по PMM.
20. SMMF.exe – расчет собственных векторов MM фрагмента ВЧХ по известным собственным значениям системы..
21. SMMX.exe – расчет модальной модели отклика по фундаментальному решению динамической системы.
22. SXFAM.exe – программа расчета невязки между экспериментальными данными и MM.
23. SXFMRD.exe – расчет параметров вынужденных колебаний.
24. TRBDNK.exe – преобразование базиса рабочих координат, матриц динамической жесткости и демпфирования в нормальные координаты.
25. TRMMXST1.exe – преобразование модальной модели спектра отклика в модальную модель отклика.
26. TRXF.exe – перевод ВЧХ в базис главных компонент.
27. TRXTS1.exe – преобразование Лапласа временной реализации.

4. Примеры использования МИС-300М+ для модального анализа динамически подобной модели (ДПМ)

Результаты испытаний и модального анализа специальной тестовой ДПМ, наглядно иллюстрируют некоторые возможности ИВК МИС-300М+.

На рисунке 4.1 приведена фотография общего вида рабочего места оператора при наземных частотных испытаниях ДПМ с помощью оборудования, блок-схема которого приведена на рисунке 4.2.

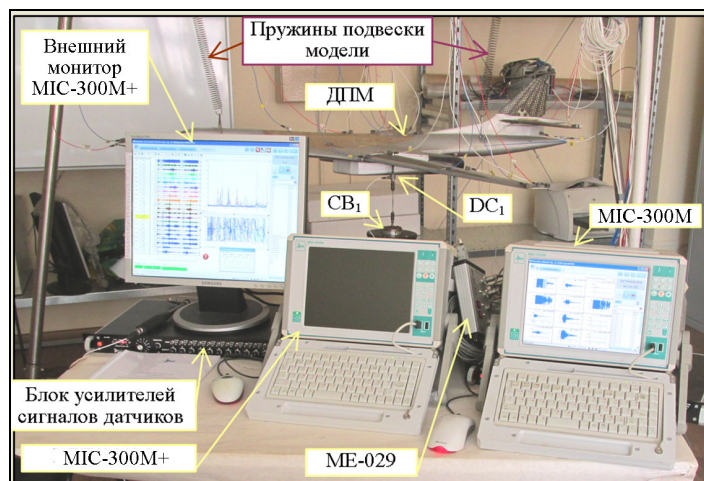


Рисунок 4.1

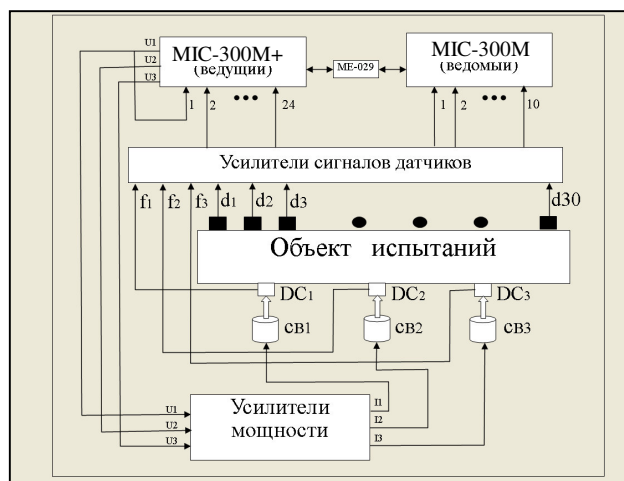


Рисунок 4.2

ДПМ препарирована системой из 30-ти виброакселерометров d_1, \dots, d_{30} , расположенных на фюзеляже, крыльях и хвостовом оперении модели. Ведущий МИС-300М+ с внешним монитором, ведомым МИС-300М и блоком синхронизации МЕ-029 располагались на столе оператора. ДПМ подвешивалась на пружинах так, чтобы частоты колебаний модели как жесткого целого на подвеске были в 5-10 раз ниже частоты первого тона упругих колебаний модели. Колебания модели вызывались с помощью одного электродинамического вибровозбудителя СВ1, хотя в системе МИС-300М+ предусмотрена возможность использования до 3-х силовозбудителей (устройств возбуждения) СВ1, ..., СВ3, возбуждающие силы (f_1, \dots, f_3) от которых контролируются датчиками сил DC_1, \dots, DC_3 .

4.1. Измерение ЧХ в режиме моногармонического возбуждения

Технология измерений частотных характеристик при моногармоническом возбуждении в режиме установившихся колебаний обеспечивает наибольшую точность результатов и в настоящее время является основной технологией при наземных частотных испытаниях как натуральных летательных аппаратов, так и их моделей. На рисунке 4.3 приводится вид экранной формы в процессе предварительных измерений частотных характеристик ДПМ, изображенной на рисунке 4.1.

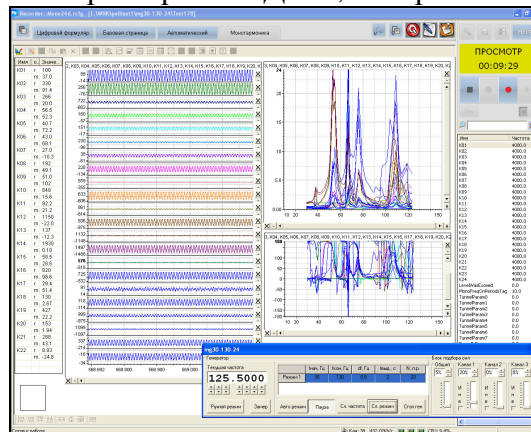


Рисунок 4.3 Вид экрана MIC-300M+ в процессе предварительных измерений частотных характеристик ДПМ при моногармоническом возбуждении

Эта экранная форма настроена на работу с внешним монитором, имеющим значительно больший размер, чем монитор встроенный в MIC-300M. Назначение полей экрана то же, что и на рисунке 2.3.2, однако количество информации (каналов), отображенной на экране значительно больше.

На рисунке 4.4 приводится пример результатов измерений, полученный средствами MS Excel по результатам измерений с помощью MIC-300M+.

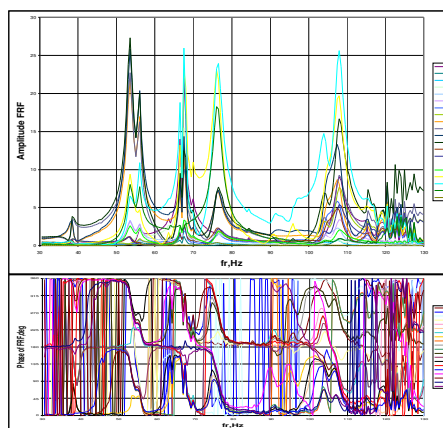


Рисунок 4.4 Пример оформления ЧХ средствами MS Excel по результатам измерений при моногармоническом возбуждении

Еще раз отметим, что эти результаты могут быть преобразованы с помощью программы tnprrxf.exe в формат типа xf.ddd системы ИРДМ для модального анализа и идентификации уравнений динамики испытываемого объекта.

4.2. Измерение ЧХ в режиме полигармонического возбуждения

Возможность измерения ВЧХ за минимальное время весьма важна при динамических испытаниях моделей в скоростных АДТ в связи с высокой стоимостью поточного времени.

При летных испытаниях натуральных объектов кроме цены полетного времени может являться существенным факт непрерывного изменения массовых параметров испытываемого объекта, связанный с расходом топлива, и проблемы выдерживания заданных параметров режима полета в течение длительного промежутка времени. Поэтому возможность формирования и воспроизведения тестовых сигналов, обеспечивающая практическую реализуемость измерений ЧХ при полигармоническом возбуждении за минимальное время, весьма важна как при испытаниях на флаттер ДПМ в скоростных АДТ, так и при летных испытаниях на флаттер летательных аппаратов.

Для этой цели в ЦАГИ была разработана в среде MS Fortran специальная программа Sign2012.exe для расчета массива мгновенных значений тестового сигнала по заданным распределениям амплитуд колебаний в частотной и временной областях. Сигнал воспроизводится в виде напряжений на выходных каналах цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП). При формировании тестового сигнала используются как амплитудная, так и частотная модуляции. Это обеспечило возможность наиболее надежного возбуждения исследуемых тонов объекта при существенных ограничениях по уровню колебаний в различных частотных диапазонах. Пример осциллограмм тестовых сигналов во временной области приведен на рисунке 2.2.3, а их амплитудные и фазовые спектры изображены на рисунке 2.2.4.

Применение технологии измерений при полигармоническом возбуждении позволяет на один-два порядка сократить время, необходимое для измерения частотных характеристик, по сравнению с технологиями при моногармоническом возбуждении в режиме установившихся колебаний. При этом точность измерений остается достаточно высокой.

На рисунке 4.5 приводится вид экранной формы по окончании процесса измерений частотных характеристик ДПМ, изображенной на рисунке 4.1, при полигармоническом возбуждении.

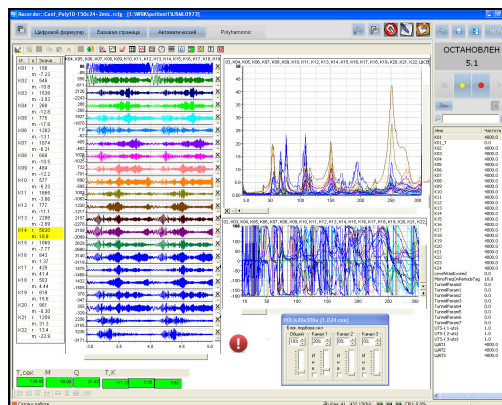


Рисунок 4.5 Вид экрана MIC-300M+ в процессе измерений частотных характеристик ДПМ при полигармоническом возбуждении.

Эта экранная форма настроена на работу с внешним монитором. Назначение полей экрана то же, что и на рисунке 2.3.3, однако, количество информации, отображенной на экране, значительно больше.

В отличие от измерений в режиме с моногармоническим возбуждением при этих измерениях использовался и второй MIC-300M, изображенный на рисунках 4.1 и 4.2.

4.3. Измерения со случайным или импульсным внешним возбуждением

При измерениях с внешним импульсным контролируемым возбуждением, когда возбуждение производится с помощью внешнего устройства, обеспечивающего контроль возбуждающего усилия и не влияющего на динамические характеристики объекта испытаний по окончании воздействия, технология анализа результатов может не отличаться от технологии, применяемой при полигармоническом возбуждении.

При этом для измерений можно воспользоваться экранной формой, соответствующей измерениям с полигармоническим возбуждением, с настройкой начала регистрации по каналу, соответствующему датчику входного воздействия. Однако, при этом надо помнить о том, что для случая систем с очень малым демпфированием при идентификации параметров собственных колебаний объекта, могут быть особенности в связи с недостаточной длиной анализируемого процесса.

Для измерений с внешним неконтролируемым импульсным или случайным возбуждением может быть использована экранная форма типа изображенной на рисунке 2.3.4.

Вариант экранной формы, использовавшейся при испытаниях ДПМ, приведен ниже на рисунке 4.6.

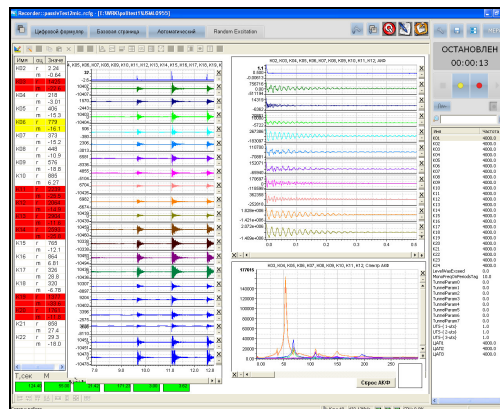


Рисунок 4.6 Вид экрана при измерениях с внешним неконтролируемым (турбулентным/импульсным) возбуждением

В отличие от рисунка 2.3 в окне визуализации автоспектров по оси Y выбран не логарифмический, а линейный масштаб.

В данном случае внешнее случайное возбуждение моделировалось серией ударов по модели, что хорошо видно в поле осциллограмм. В правом верхнем углу отображены автоковариационные функции сигналов, а в нижней, правой части экрана приведены автоспектры сигналов датчиков.

Как и при измерениях с полигармоническим возбуждением при этих измерениях использовался второй МС-300М, изображенный на рисунках 4.1 и 4.2.

4.4. Пример результатов модального анализа

Как упоминалось в разделе 3, цель всех описанных выше экспериментов состояла в получении экспериментальных данных для идентификации параметров собственных колебаний испытываемого объекта.

В данном разделе приводятся наиболее характерные результаты, отражающие этапы модального анализа на примере описанных выше испытаний динамической подобной модели.

На рисунке 4.7 представлены типичные результаты измерений по первым 10-ти из 30-ти акселерометров векторных частотных характеристик (ВЧХ), измеренных в течение эксперимента.

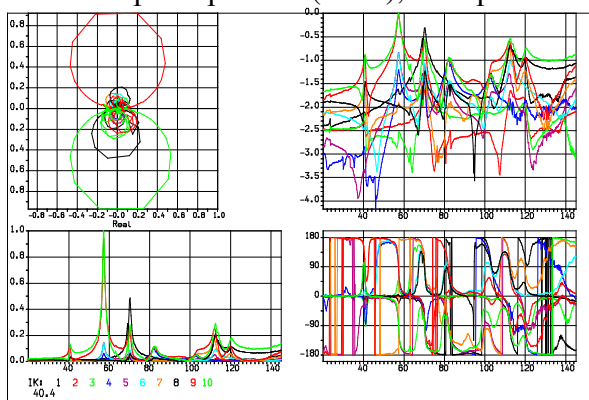


Рисунок 4.7 Пример результатов измерений ВЧХ

В левом верхнем углу рисунка приведен годограф ВЧХ, ниже изображена амплитудно-частотная характеристика, в правом верхнем углу приводится зависимость логарифма модуля ВЧХ, а справа, внизу – фазовая характеристика.

Идентификация модальных моделей в виде параметров собственных колебаний U_i , λ_i производилась путем аппроксимации Векторных Частотных Характеристик (ВЧХ) функциями вида

$$X(j\omega) = \sum_{i=1}^{2k} \frac{U_i}{(j\omega - \lambda_i)}$$

На рисунке 4.8 приведен пример графического контроля результатов идентификации модальной модели фрагмента ВЧХ

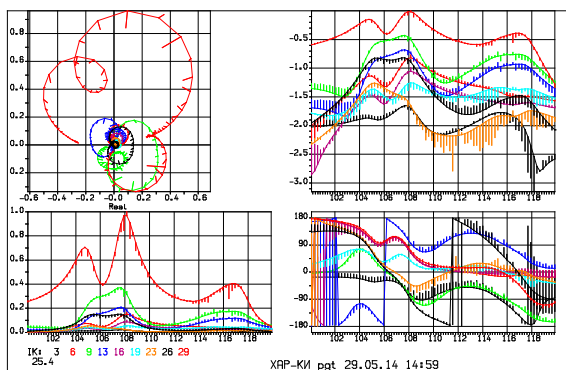


Рисунок 4.8 Пример графического контроля результатов идентификации модальной модели фрагмента ВЧХ.

Расположение полей на рисунке 4.8 такое же, как на рисунке 4.7. Непрерывными линиями соединены точки, соответствующие математической модели, а экспериментально полученные точки соответствуют точкам на концах линий, соединяющих их с точками математической модели.

По результатам идентификации модальных моделей фрагментов ВЧХ формировались модальные модели объекта в заданном частотном диапазоне. Пример распечатки такой модели приведен в приложении 2.

На рисунке 4.9 приводятся результаты модального анализа в виде эпюр форм собственных колебаний модели.

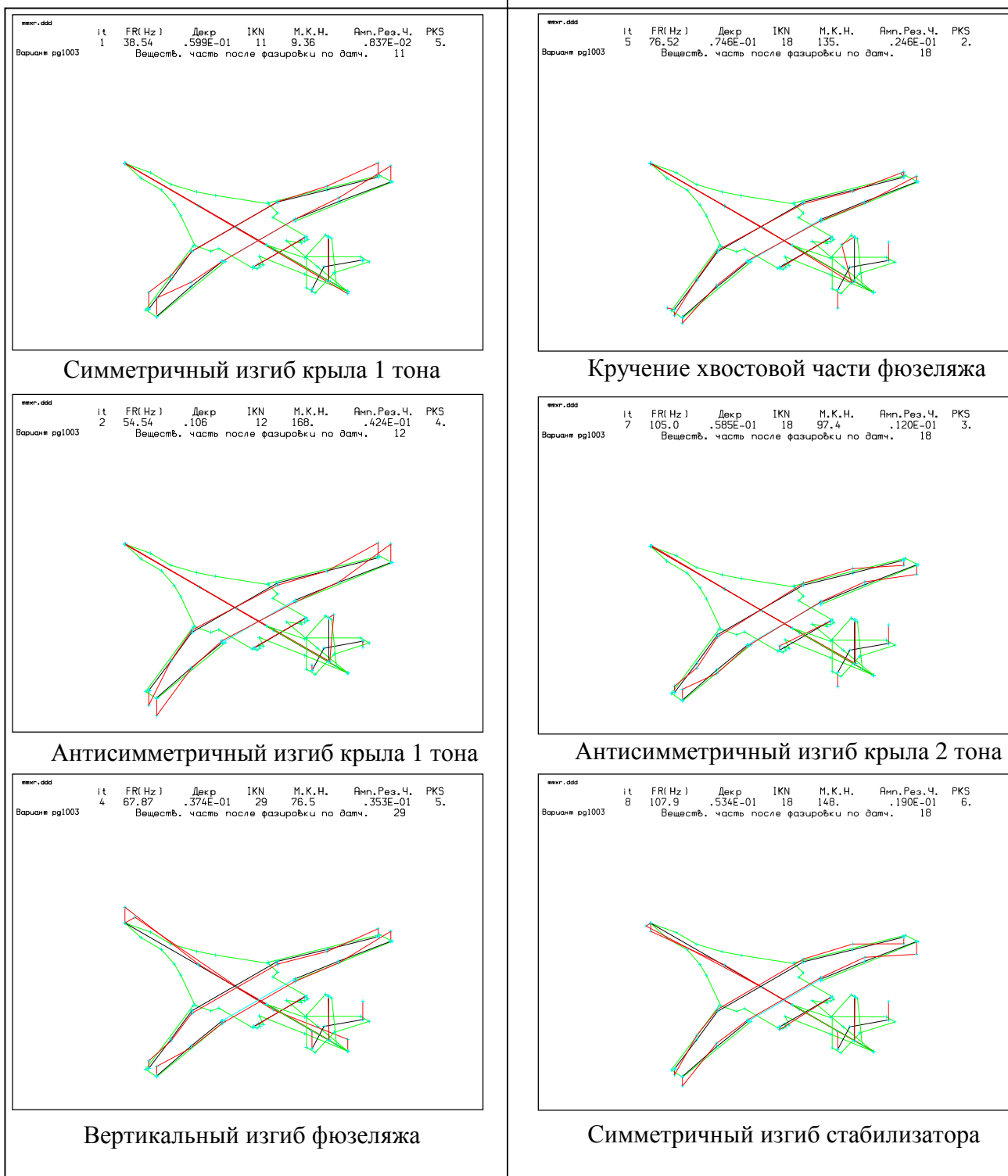


Рисунок 4.9 Формы тонов собственных колебаний, полученные по результатам испытаний

Приведенные выше результаты подтверждают возможность использования ИВК МС-300М+ для проведения динамических испытаний и модального анализа по результатам измерений.

5. Основные выводы по результатам работы

1. ИВК МІС-300М+ обеспечивает виды экспериментов при динамических испытаниях ЛА и их моделей, заявленных в требованиях ЦАГИ.
2. Вычислительная часть ИВК МІС-300М+ обеспечивает возможность применения программного обеспечения ЦАГИ для модального анализа и прогнозирования явлений аэроупругости.
3. ИВК МІС-300М+ может быть рекомендован к использованию при динамических испытаниях ЛА и их моделей.
4. Однако:
 - 4.1 процедуры наладки экранных форм, настройки экспериментов достаточно трудоемки;
 - 4.2 переход с одного вида эксперимента на другой достаточно сложен и требует относительно много времени, что приведет к дополнительным затратам поточного времени при испытаниях в аэродинамических трубах (АДТ);
 - 4.3 некоторое запаздывание в отображении оперативной информации в ходе эксперимента создает дополнительные трудности, влияющие на безопасность эксперимента в АДТ.

Список литературы

- 1 Брянецв Б. Д. Базовые алгоритмы идентификации и коррекции математических моделей динамики конструкций летательных аппаратов по результатам динамических испытаний. Препринт N7 ЦАГИ, 23с., Москва, 1990 г.
- 2 Брянецв Б. Д., Зиченков М. Ч., Ключкин Н. Г., Парышев С. Э. Идентификация модальных параметров и прогнозирование флаттера по отклику на турбулентное возбуждение // Сборник трудов 5-го международного научно-технического симпозиума «Авиационные технологии XXI века» том 1, 1999 г. стр. 886-897.
- 3 Брянецв Б. Д. Некоторые результаты применения метода заданных перемещений при исследованиях флаттера на моделях в скоростной аэродинамической трубе // Труды ЦАГИ, 2005 г, вып. 2669, стр. 77-83.
- 4 Bart Peetersa, Herman Van der Auweraera, Patrick Guillaumeb, Jan Leuridana «The PolyMAX frequency-domain method: a new standard for modal parameter estimation» Shock and Vibration 11 (2004) 395–409.
- 5 Lms International, LMS Test. Lab – Structural Testing Rev 4B, Leuven, Belgium, www.lmsintl.com, 2003.
- 6 МІС-300М Прибор для измерения, регистрации и анализа параметров вибрационных процессов. Руководство по эксплуатации, НПП «МЕРА», 2005 г.
- 7 Руководство оператора ИВК МІС-300М+ по работе с комплексом программ проведения наземных частотных испытаний летательных аппаратов и испытаний моделей в аэродинамических трубах ЦАГИ, НПП «МЕРА» 2014 г.
- 8 WinПОС Пакет Обработки Сигналов. Руководство пользователя, издание второе, НПП «МЕРА», г. Королев, 2009 г.

Приложение 1

Пример фрагмента файла sh.sfn – файла настройки пунктов меню.

```

1,-----
$MAIN1
9,72,6,7,25,2,73,3,4,5
ОСНОВНОЕ МЕНЮ
1
ОСНОВНОЙ УЗЕЛ
2,----- номер локальной команды/узлового пункта меню
$sixf Имя узлового пункта меню
10,31,9,32,33,34,40,41,42,45,10, Количество и номера локальных команд
Обработка данных при наз.част.испытаниях краткий комментарий
4 количество строк расширенного комментария
Преобразование данных из формата CBA в формат IRDM } Строки
Графический контроль экспериментальных данных } расширенного
Идентификация модальных моделей с идентификацией } комментария
частот и декрементов тонов свободных колебаний
3,-----
$immr
16,32,33,34,36,37,38,40,41,42,45,46,10,67,68,4,5
Построение модальной модели отклика
1
Построение модальной модели отклика
4,-----

    •      •      •

14,----- номер локальной команды/ пункта меню
gkxtb.bat Имя пункта меню, соответствующего локальной задаче
gkxtb.bat имя командного или исполнительного файла решения локальной задачи
Графический контроль XT.BIN краткий комментарий
2 количество строк расширенного комментария
Графический контроль XT.BIN } Строки расширенного
С отделением статической составляющей } комментария
15,-----

    •      •      •

```

Примечание: выделенный курсивом подчеркнутый текст является пояснениями и в файле sh.sfn отсутствует.

Приложение 2

Пример распечатки фрагмента модальной модели

Вариант pg30130z3

НОМЕРА ТОНОВ	1	2	4	5	7	8
ЧАСТОТЫ, ГЦ	38.54	54.54	67.87	76.52	105.0	107.9
ДЕКРЕМЕНТЫ	0.599E-01	0.106	0.374E-01	0.746E-01	0.585E-01	0.534E-01
ikn, kdn	11 11	12 12	29 29	18 18	18 18	18 18
Мод. комп. норм.	9.36	168.	76.5	135.	97.4	148.
АМП. на РЕЗ. ч.	0.837E-02	0.424E-01	0.353E-01	0.246E-01	0.120E-01	0.190E-01
проц. кв. сост.	5.	4.	5.	2.	3.	6.
IK KDAT. ВЕС.	REAL IMAG	REAL IMAG	REAL IMAG	REAL IMAG	REAL IMAG	REAL IMAG
1 κ1 1.0E+00	6 34	-14 -21	854 -37	0 -2	17 5	-440 46
2 κ2 1.0E+00	-18 3	-3 -5	51 -6	-2 0	-1 0	48 -5
3 κ3 1.0E+00	-47 1	0 -3	-80 0	1 0	-6 0	-16 -1
4 κ4 1.0E+00	-118 37	-10 -26	644 -16	-15 -4	-18 -2	17 0
5 κ5 1.0E+00	-9 -2	124 0	-132 9	82 1	-117 -2	109 -12
6 κ6 1.0E+00	15 -12	-124 -2	-141 -10	-83 -3	104 -1	144 -3
7 κ7 1.0E+00	229 -9	9 0	-91 9	59 1	-258 -12	235 -17
8 κ8 1.0E+00	206 -12	-22 -5	-110 -5	-65 -3	241 4	320 14
9 κ9 1.0E+00	905 -7	-800 -17	414 -39	-308 -8	348 24	-329 21
10 κ10 1.0E+00	787 10	820 0	431 35	288 9	-274 -5	-362 -31
11 κ11 1.0E+00	999 0	-963 -27	505 -42	-324 -13	579 34	-526 33
12 κ12 1.0E+00	865 12	999 0	541 38	309 9	-523 -14	-688 -46
13 κ13 1.0E+00	237 -14	-37 0	-97 12	103 -1	-179 -14	186 -12
14 κ14 1.0E+00	201 -9	26 -5	-106 -5	-85 -3	147 1	212 16
15 κ15 1.0E+00	-4 -3	99 0	-140 9	69 1	-67 -1	77 -6
16 κ16 1.0E+00	8 -9	-99 -2	-143 -7	-65 -2	48 -2	85 -2
17 κ17 1.0E+00	-131 30	299 -24	957 -55	-982 -20	-745 -14	961 -68
18 κ18 1.0E+00	-55 43	-327 -30	995 -6	998 0	999 0	998 0
19 κ19 1.0E+00	-26 -6	319 5	-19 -17	-797 -5	42 -24	34 -14
20 κ20 1.0E+00	-14 1	61 0	24 -2	-178 0	69 -8	-3 -1
21 κ21 1.0E+00	7 22	20 -15	620 -28	-25 -3	71 -5	-293 26
22 κ22 1.0E+00	3 1	26 0	24 2	28 0	0 1	-1 1
23 κ23 1.0E+00	0 -1	49 3	-43 0	-177 -1	87 -10	-16 -1
24 κ24 1.0E+00	24 -19	-53 0	14 24	341 -11	93 -21	-33 -10
25 κ25 1.0E+00	136 5	98 1	60 26	292 8	53 10	82 -9
26 κ26 1.0E+00	2 -2	26 1	-22 -2	-45 -1	231 -2	-149 16
27 κ27 1.0E+00	8 0	9 0	24 2	14 0	-11 6	-3 7
28 κ28 1.0E+00	24 -8	-41 6	-242 10	68 3	128 -4	-136 4
29 κ29 1.0E+00	-65 42	-315 -35	999 0	915 6	943 1	919 4
30 κ30 1.0E+00	0 0	0 0	0 1	0 1	0 1	0 1