

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОУПРУГОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Артём Владимирович БЫКОВ родился в 1979 г. в городе Истра Московской области. Ведущий инженер ОАО «ГосМКБ «Вымпел» им. И.И.Торопова». Аспирант ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского. Основные научные интересы — в области расчетной и экспериментальной аэроупругости летательных аппаратов. Автор шести научных работ. E-mail: A.Bikov@mail.ru.

Artem V. BYKOV, was born in 1979, in the Moscow Region. He is Principal Engineer at the State machine-building design office «Vypmel» named by I.I. Toropova. He is Postgraduate Student at the Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI). His research interests are calculated and experimental investigations of flutter and aeroservoelasticity problems. He has published 6 technical papers. E-mail: A.Bikov@mail.ru.

Сергей Гаврилович ПАРАФЕСЬ родился в 1958 г. в городе Днепрозержинске Днепропетровской области. Доцент МАИ. Кандидат технических наук, доцент. Основные научные интересы — в области проектирования летательных аппаратов. Автор более 60 научных работ. E-mail: S.Parafes@mail.ru.

Sergey G. PARAFES, Ph.D., was born in 1958, in the Dnepropetrovsk Region, the Ukrainian SSR. He is an Associate Professor at the MAI. His research interests are in aircraft design. He has published more than 60 technical papers. E-mail: S.Parafes@mail.ru.

Всеволод Игоревич СМЫСЛОВ родился в 1931 г. в городе Ленинграде. Главный научный сотрудник ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского. Доктор технических наук, старший научный сотрудник. Основные научные интересы — в области колебаний и динамической аэроупругости летательных аппаратов, теории автоматического управления. Автор более 120 научных работ. E-mail: smysl@mail.ru

Vsevolod I. SMYSLOV, D.Sci., was born in 1931, in the Leningrad. He is Main Research Associate at the Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI). His research interests are in oscillations, flutter and aeroservoelasticity problems, as well as in theory of automatic control. He has published more than 120 technical papers. E-mail: smysl@mail.ru

В работе рассматривается программно-аппаратный комплекс, состоящий из программного обеспечения и оборудования для автоматизированного возбуждения колебаний и сбора данных в стендовых условиях. Комплекс обеспечивает экспериментальные, расчетные и комбинированные расчетно-экспериментальные исследования по определению параметров собственных колебаний упругой конструкции, частотных характеристик контура стабилизации, границ флаттера и аэроупругой устойчивости летательного аппарата совместно с системой автоматического управления в полете.

A firmware inclusive software and equipment for excitation oscillation and data acquisition in laboratory conditions is considered. The firmware provides experimental, calculated and experiment-calculated investigations directed to determination of natural oscillations, frequency response of system stabilization, as well as solution of flutter and aeroservoelasticity problems.

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс, летательный аппарат, система автоматического управления, собственные колебания, флаттер, аэроупругая устойчивость.

Key words: firmware, aircraft, automatic control system, natural oscillations, flutter, aeroelastic stability.

Введение

Решение проблем аэроупругости является одним из важнейших условий создания надежного и безопасного летательного аппарата (ЛА). Среди многочисленных явлений аэроупругости наиболее опасными являются флаттер конструкции ЛА и аэроупругое взаимодействие ЛА с системой автоматического управления (САУ), проявляющееся в возможности возникновения автоколебаний в кон-

туре «упругий ЛА — САУ». Трудоемкая задача обеспечения аэроупругой устойчивости ЛА с САУ и безопасности от флаттера [1] решается на стадии наземной отработки, предваряющей летные испытания. Для решения указанных проблем разработан современный программно-аппаратный комплекс.

В состав комплекса входит как аппаратно-программная часть для возбуждения и измерения колебаний, так и программное обеспечение для рас-

четных работ с использованием конструкторской документации и экспериментальных данных.

1. Назначение и область применения комплекса

Назначение комплекса — проведение экспериментальных, расчетных и комбинированных расчетно-экспериментальных работ, направленных на определение характеристик собственных колебаний упругой конструкции ЛА, амплитудных и частотных характеристик рулевых приводов, характеристик контура стабилизации САУ в диапазоне частот собственных колебаний конструкции, границ флаттера ЛА и аэроупругой устойчивости контура «упругий ЛА — САУ», а также выбор средств обеспечения необходимых запасов устойчивости контура «упругий ЛА — САУ».

Область применения комплекса относится в первую очередь к маневренным беспилотным ЛА класса «воздух—воздух», «поверхность—воздух», «воздух—поверхность». Кроме этого, система может использоваться для исследования упругих конструкций изделий машиностроения широкого класса в пределах рабочего диапазона частот системы.

Перечень и последовательность задач, решаемых с помощью программно-аппаратного комплекса, представлены на рис. 1.

2. Состав и основные функции комплекса

Программно-аппаратный комплекс включает в себя основные элементы, обеспечивающие управляемое гармоническое возбуждение колебаний, их измерение, визуализацию и регистрацию, оперативные расчеты.

Основное оборудование представлено электродинамическими силовозбудителями с усилителями мощности и датчиками с согласующей аппаратурой. Дополнительное оборудование включает систему обеспечения граничных условий для испытываемой конструкции, систему питания силовых приводов ЛА, контрольно-поверочную аппаратуру (КПА) всех систем ЛА, в частности САУ. Значительная часть функций возбуждения, измерения и регистрации колебаний реализуется с помощью персонального компьютера (ПК) с необходимым программным обеспечением. Обобщенная схема программной части комплекса представлена на рис. 2, аппаратной части — на рис. 3.

Измеряемые характеристики собственных колебаний и контура «упругий ЛА — САУ» включают:

- амплитудно-фазовые частотные характеристики конструкции в выбранном диапазоне частот;
- собственные частоты и формы низших тонов, логарифмические декременты колебаний;

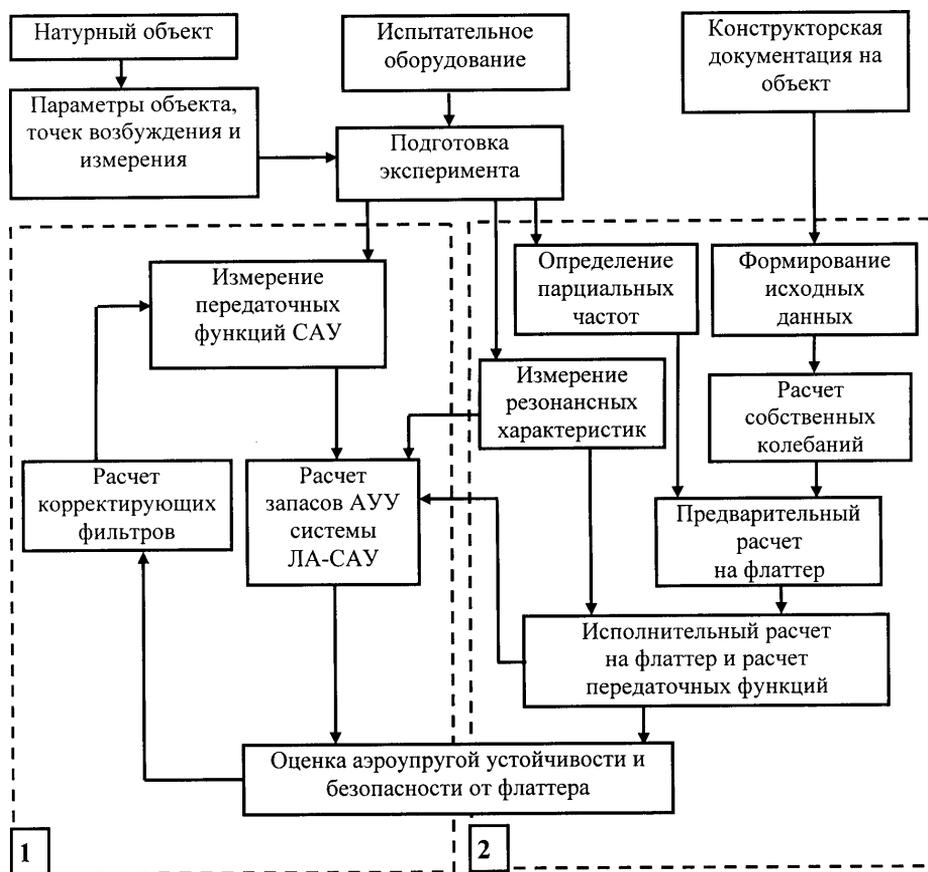


Рис. 1. Перечень и последовательность задач, решаемых с помощью комплекса:

1 — исследование взаимодействия ЛА—САУ; 2 — исследование собственных колебаний и флаттера

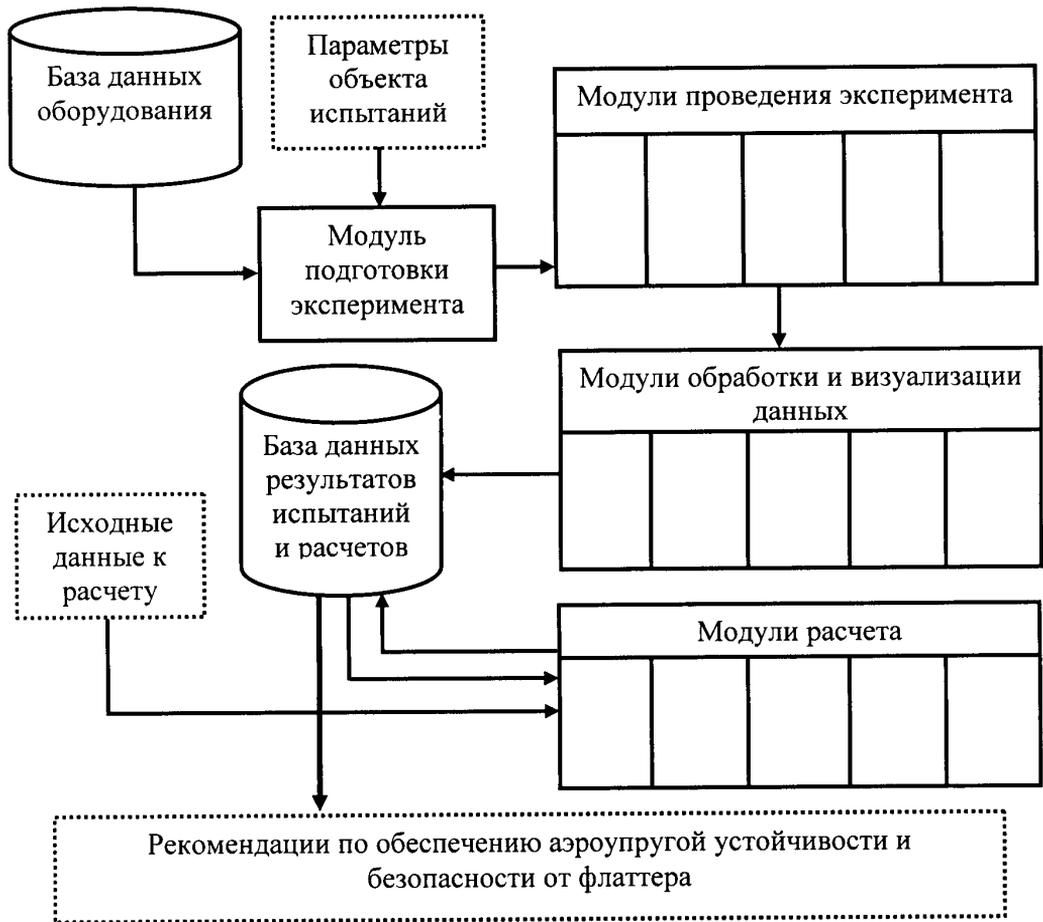


Рис. 2. Общая схема программной части комплекса

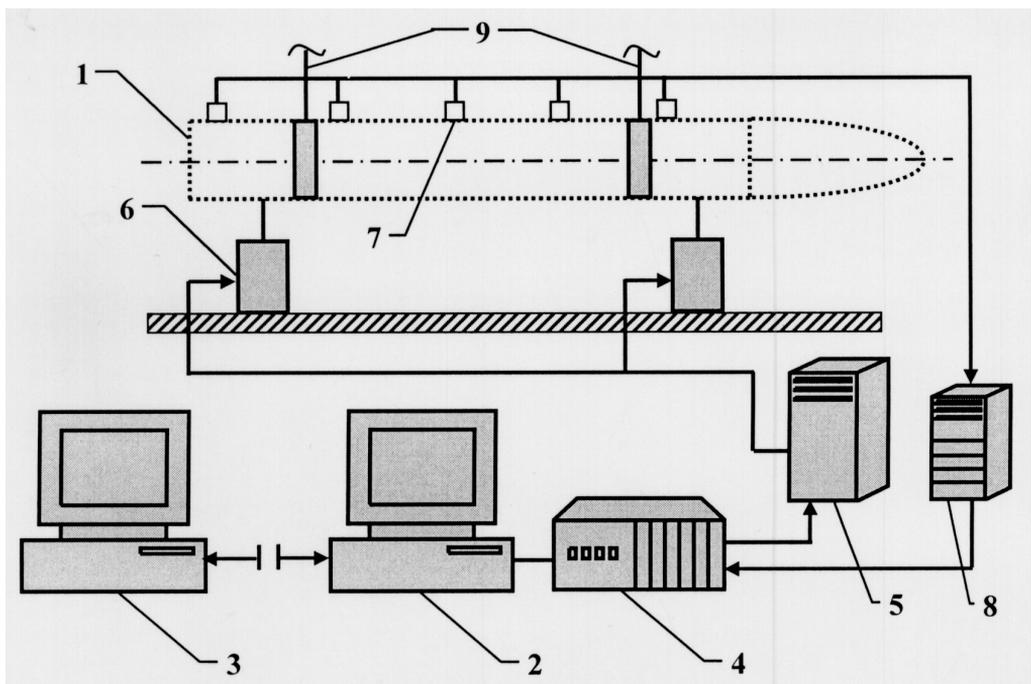


Рис. 3. Схема аппаратной части комплекса:

- 1 — объект испытаний; 2 — ПК эксперимента; 3 — ПК расчета; 4 — измерительный комплекс НВ-16;
 5 — усилители мощности; 6 — силовозбудители; 7 — датчики; 8 — согласующая аппаратура;
 9 — упругий подвес

— приведенные массы;
 — оценки степени нелинейности частотных характеристик конструкции (определяются практически видом зависимости собственных частот от амплитуды колебаний и зависимости амплитуды от общего уровня сил возбуждения);

— амплитудно-фазовые частотные и амплитудные характеристики рулевых приводов;
 — передаточные функции, связывающие колебания ряда точек ЛА и выходных сигналов САУ с силой в точке возбуждения (для исследования проблем аэроупругой устойчивости ЛА с САУ).

В отдельных случаях регистрируются также переходные процессы при функционирующей САУ с одновременным воспроизведением аэродинамических сил на органах управления (ОУ) — электромеханическим моделированием [1].

В процессе эксперимента мгновенные значения каждого измеренного сигнала $u \cos(pt + \varphi)$ преобразуются с помощью опорных сигналов возбуждения $1 \cdot \cos pt$ и $1 \cdot \sin pt$, чтобы получить амплитуды синфазного с возбуждением, Ru и квадратурного, сдвинутого на четверть периода, Iu компонентов:

$$u \cos(pt + \varphi) = (Ru) \cos(pt) + (Iu) \sin(pt);$$

$$Ru = \frac{2}{nT} \int_0^{nT} u \cos(pt + \varphi) \cos(pt) dt;$$

$$Iu = \frac{2}{nT} \int_0^{nT} u \cos(pt + \varphi) \sin(pt) dt; \quad T = 2\pi / p,$$

n — целое число.

Далее по этим величинам электрических сигналов вычисляются соответствующие компоненты перемещений Ry и Iy (или скоростей) в точках измерения ЛА с учетом всех тарировочных коэффициентов и частоты.

Расчетные исследования флаттера и аэроупругой устойчивости ЛА направлены на решение основных задач, которые обеспечиваются соответствующими программными пакетами комплекса. К ним относится предварительный расчет на флаттер по конструкторской документации. В этой задаче определяются характеристики собственных колебаний конструкции ЛА (корпуса, крыла, руля) по чертежам конструкции и массовым сводкам, а также проводится расчет консольных (рулевых и крыльевых) и корпусных форм флаттера.

В число основных задач входит исполнительный многостепенный расчет на флаттер на основе объединения экспериментальных и конструкторских данных.

Эти задачи дополняет исследование аэроупругой устойчивости ЛА с САУ и выбор средств обеспечения необходимых запасов устойчивости.

3. Основные данные комплекса

Программная часть комплекса состоит из подсистем:

- управления базами данных оборудования и результатов измерений;
- проведения измерений и обработки данных;
- проведения расчетов.

Основные данные комплекса относятся к числу каналов возбуждения и измерения колебаний, частотному и амплитудному диапазону, видам измеряемых характеристик, аппаратной базе.

Управляющая часть аппаратной базы системы — измерительный специализированный комплекс НВ-16 (измерительная станция Н-2000) [2], представляющий собой основанный на ПК крейт (процессор Pentium III от 1000 МГц, ОЗУ 256 Мб) с возможностью установки до 16 специализированных модулей. Основные параметры управляющей части:

— число каналов возбуждения — до 8, измерения — 16—32;

— частота дискретизации цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) 40 кГц (каждого канала), номинальная разрядность — 16 бит;

— диапазон частот возбуждения 2—500 Гц при дискретности задания частоты 0,0001 Гц и стабильности 0,01 %;

— амплитуда сигналов возбуждения 0—10В при дискретности задания 1 мВ с погрешностью амплитуды 0,1 %;

— диапазон частот измеряемых сигналов определяется частотой аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и величиной приемлемой погрешности измерения. Частота дискретизации АЦП 20 кГц (каждого канала), номинальная разрядность АЦП — 16 бит.

Система возбуждения содержит:

— программные генераторы гармонических сигналов, управляющие модулями с ЦАП. Фазовые сдвиги выходных сигналов генераторов могут составлять 0, π а также $\pm \pi/2$ относительно выбранного канала (или произвольное значение). Уровень этих сигналов устанавливается индивидуально для каждого канала по заданному амплитудному значению силы возбуждения. Возможно также одновременное изменение уровня всех каналов («общего уровня»);

— усилители мощности — генераторы тока, преобразующие выходные напряжения ЦАП в пропорциональный им ток силовых возбудителей, не зави-

сящий от колебаний точек возбуждения и от изменения величины полного сопротивления нагрузки;

— электродинамические силовозбудители, у которых сила, приложенная к подвижной системе, пропорциональна току и не зависит от частоты и колебаний точки возбуждения в пределах рабочего перемещения. При использовании силовозбудителей с электромагнитом как источником магнитного поля используются соответствующие блоки подмагничивания. Для возбуждения колебаний используются отечественные (АВДИ) или импортные (Prodera) силовозбудители [3, 4], при этом разной мощности: для корпуса — на 200, 500 и 1000 Н, для органов управления — на 50 и 200 Н.

Система измерения включает:

— датчики — используются преимущественно пьезоакселерометры и пьезодатчики силы (или комбинированные — импедансные головки). Перспективным является использование «интеллектуальных» датчиков (TEDS, с встроенным микрокомпьютером);

— согласующую аппаратуру — «предусилители», а также средства фильтрации;

— программные модули: синхронного детектирования (вычисляющий в реальном времени значения амплитуд синфазного и квадратурного компонентов измеряемого сигнала для каждого канала), вычисления действующих значений, БПФ и др.

Напряжения предусилителей поступают на входы модулей АЦП. Использование модулей с автономными АЦП в каждом канале принципиально исключает сдвиги по времени отдельных входных напряжений.

Программное обеспечение эксперимента — системно-прикладное, ориентированное на операционные системы Microsoft Windows 2000/XP, а также системное ПО низкоуровневого доступа от производителя станции (L-Card). Прикладное ПО можно разделить, условно, на три части: подготовки измерений, их проведения и оперативной обработки данных.

Программный комплекс представляет собой многооконную диалоговую среду (во многом подобно комплексу в [3, 5]), обеспечивающую:

— ввод условий эксперимента, параметров объекта, координат точек возбуждения, измерения; извлечение из базы данных (БД) параметров силовозбудителей (тип, тарировка, ориентация), аналогичных данных по усилителям мощности, датчикам, предусилителям;

— полуавтоматическое создание каналов возбуждения и измерения (связей вида: ЦАП—усилитель мощности—силовозбудитель и датчик—предусилитель—АЦП);

— проверку работоспособности, комплексную тарировку, расчет погрешности измерения каналов;

— преобразования сигналов требуемого вида, в зависимости от измерения, расчет параметров собственных колебаний [4, 6];

— выбор измеряемой характеристики (частотные характеристики, собственная форма, «осциллограмма» — переходный процесс и др.) и ввод соответствующих исходных данных. При измерении частотных характеристик указывается набор частотных интервалов с вариантами их реализации (шаг по частоте, число периодов установления колебаний и т.д.), задаются общий уровень и отдельные уровни возбуждения;

— индикацию в процессе измерений эксперимента измеряемых величин. При определении частотных характеристик производится отображение в реальном времени данных на графиках зависимости компонентов перемещений (или модуля и фазы) от частоты (рис. 4), в виде фигур Лиссажу или «пучка векторов» — в координатах синфазного и квадратурного компонентов;

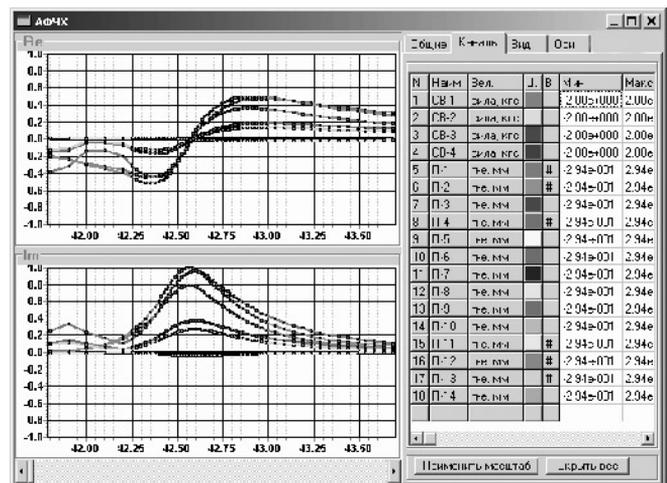


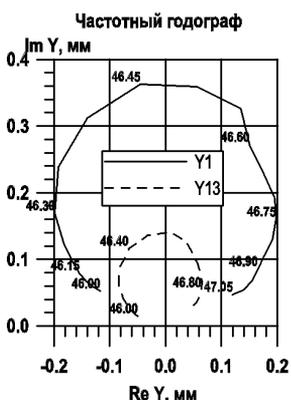
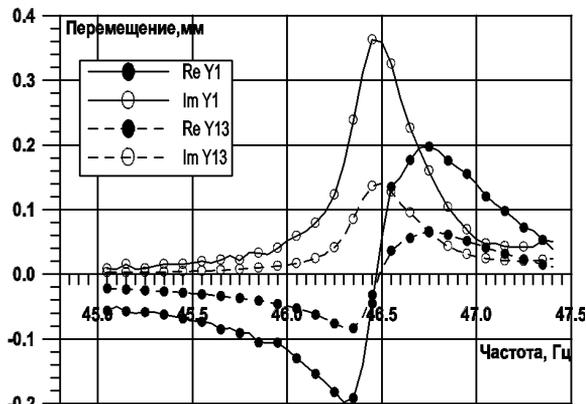
Рис. 4. Отображение частотных характеристик в процессе измерений

— оперативное, сразу по завершении измерений, отображение результатов в виде таблиц и графиков с необходимыми комментариями, редактирование и непосредственный вывод на печатающее устройство. Получаемая документация имеет форму, пригодную для экспресс-отчета (рис. 5).

4. Расчетные исследования флаттера и аэроупругой устойчивости ЛА с САУ, выполняемые с использованием комплекса

Предварительный расчет на флаттер выполняется с использованием двухступенных моделей на основе метода заданных форм. В качестве заданных

Резонансные кривые изгиба корпуса (1-го тона)
 Изделие ..., комплектация "...", канал - 1-й.
 Возбуждение: 20JE20 ($X_{F1}/X_{max} = 0.165$), 20JE20 ($X_{F2}/X_{max} = 0.94$)
 F1=... кгс, F2=... кгс



Собственные формы изгиба корпуса (1-го тона)

Изделие ..., комплектация "...", канал - 2-й.
 Возбуждение: 20JE20 ($X_{F1}/X_{max} = 0.165$), 20JE20 ($X_{F2}/X_{max} = 0.94$)
 $Y_{max} = 0.3$ мм $X_1/X_{max} = 0.28$, $X_2/X_{max} = 0.83$

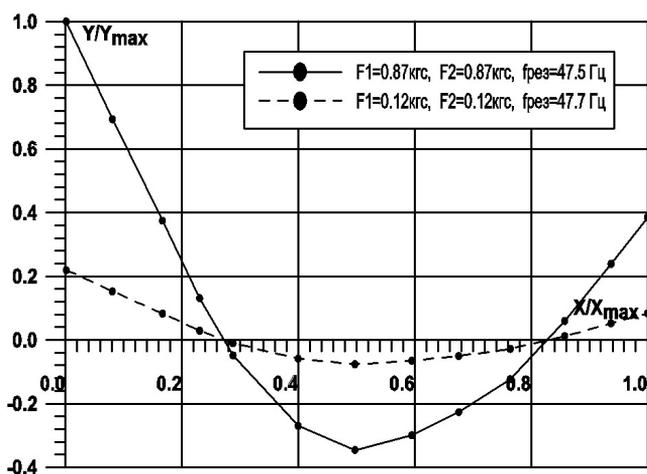


Рис. 5. Пример результатов измерения

форм рассматриваются собственные колебания органа управления и корпуса.

Параметры собственных колебаний корпуса (частоты и формы) находятся с помощью балочной модели на основе метода конечных элементов. При расчете параметров собственных колебаний ОУ

используется двумерная модель (т.е. он схематизируется пластиной) на основе метода конечных разностей. Исходные данные для расчетов формируются на основе чертежей конструкции и массовой сводки ЛА.

Предварительный расчет на флаттер включает исследование:

- 1) консольных форм флаттера (изгибно-крутильного и изгибно-поворотного флаттера ОУ);
- 2) корпусных форм флаттера, соответствующих взаимодействию следующих форм колебаний;
 - изгиб ОУ — изгиб корпуса по первому тону,
 - изгиб ОУ — изгиб корпуса по второму тону,
 - кручение (вращение) ОУ — изгиб корпуса по первому тону,
 - кручение (вращение) ОУ — изгиб корпуса по второму тону.

Алгоритмы и программы предварительного расчета на флаттер позволяют проводить расчет критических параметров (критической скорости и частоты флаттера) для заданных режимов полета ЛА, а также находить запасы устойчивости по критическому скоростному напору (или скорости) флаттера для определяющих параметров конструкции (таких, как отношение частот колебаний, коэффициенты демпфирования, инерционные коэффициенты).

Эти алгоритмы и программы объединены в программный пакет. Его интерфейс позволяет осуществлять ввод и редактирование исходных данных в интерактивном режиме или из файла данных, а также отображать результаты расчета в числовой (табличной) и графической форме (в частности, в виде зависимостей критического скоростного напора от параметров конструкции и др.).

Исполнительный многостепенный расчет на флаттер использует математическую модель на основе метода заданных форм, объединяющую колебания ОУ и корпуса с крыльями.

Система уравнений, используемая для исследования флаттера со многими степенями свободы, имеет вид

$$M\ddot{q} + N\dot{q} + Gq + D\dot{V}q + BV^2q = 0, \quad (1)$$

где M и G — матрицы масс и жесткости конструкции; N — матрица конструкционного демпфирования; D и B — матрицы аэродинамического демпфирования и аэродинамической жесткости; q — вектор обобщенных координат; V — скорость потока.

Эквивалентная (1) система дифференциальных уравнений первого порядка имеет вид

$$\dot{Y} = AY, \quad (2)$$

$$Y = \begin{pmatrix} \dot{q} \\ q \end{pmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} -M^{-1}(H + DV) & -M^{-1}(G + BV^2) \\ E & 0 \end{bmatrix};$$

E — единичная матрица.

Подстановка частного решения $Y = Ue^{\lambda t}$ в уравнение (2) приводит к однородному алгебраическому уравнению

$$\lambda U = AU. \quad (3)$$

Собственные значения этого уравнения (компоненты вектора λ) — комплексные частоты

$$\lambda_j = \delta_j + i\omega_j, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

где δ_j — коэффициент затухания; ω_j — круговая частота колебаний; j — номер тона колебаний; n — число степеней свободы системы (число рассматриваемых форм собственных колебаний). Каждому значению λ_j соответствует собственный вектор (комплексный вектор перемещений U_j) — «собственная форма» колебаний конструкции в аэродинамической потоке.

Условия возникновения флаттера выявляются путем исследования характера корней уравнения (3) в зависимости от скорости потока. Для устойчивости конструкции ЛА в потоке все коэффициенты затухания должны быть отрицательны: $\delta_j < 0, j = 1, 2, \dots, n$, а критическая скорость и частота флаттера определяются пересечением годографа скорости с мнимой осью плоскости корней — комплексных частот.

Алгоритмы и программы исполнительного расчета на флаттер позволяют:

- находить критические параметры флаттера путем построения годографа скорости в плоскости комплексных частот колебаний упругого ЛА в потоке (критический скоростной напор, число M , частоту флаттера) для ряда заданных режимов полета, различающихся высотой, скоростью и др.;
- проводить параметрические исследования по оценке влияния инерционных, жесткостных и демпфирующих свойств конструкции ЛА, а также параметров аэродинамического нагружения на границы флаттера;
- использовать в расчетах на флаттер расчетно-экспериментальные данные.

Имеется возможность осуществлять ввод и редактирование исходных данных в интерактивном режиме или из файла данных и отображать резуль-

таты расчета в числовой (табличной) и графической форме, например в виде графиков годографа скорости на плоскости комплексных частот колебаний либо зависимости критического скоростного напора ($q_{кр}$) и частоты флаттера ($f_{фл}$) от отношения частоты вращения поворотной поверхности к частоте изгиба корпуса 1-го тона (κ) (рис. 6).

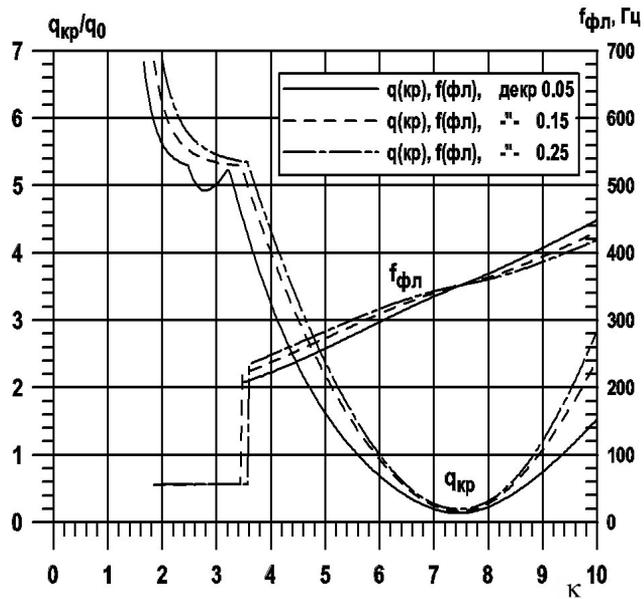


Рис. 6. Зависимость $q_{кр}$ и $f_{фл}$ от κ — отношения частоты вращения поворотной поверхности к частоте изгиба корпуса 1-го тона

Обеспечение необходимых запасов аэроупругой устойчивости контура «упругий ЛА — САУ» сводится, во-первых, к расчету передаточной функции упругого ЛА в полете, во-вторых, к оценке запасов устойчивости контура «упругий ЛА — САУ» (с учетом экспериментальных данных контура стабилизации) и, наконец, к расчету средств фильтрации с целью обеспечения запасов устойчивости контура «упругий ЛА — САУ».

Передаточная функция упругого ЛА определяется как комплексный коэффициент, связывающий угол отклонения руля с одним из параметров колебательного движения (угловая скорость, линейное ускорение) корпуса в точке установки соответствующего датчика контура стабилизации. Для определения передаточной функции упругого ЛА используется модель колебаний ЛА в потоке, подобная многостепенной модели флаттера. Пример результата расчетного определения передаточной функции упругого ЛА от угла отклонения руля до угловой скорости корпуса в месте установки ДУСа представлен на рис. 7.

Выбор параметров корректирующих фильтров определяется в процессе расчетно-эксперименталь-

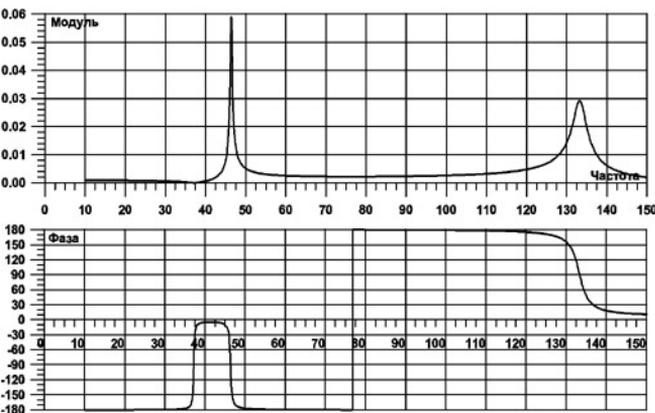


Рис. 7. Расчетная передаточная функция корпуса

ных работ по оценке запасов АУУ. Обеспечение устойчивости контура стабилизации в диапазоне частот упругих колебаний осуществляется, главным образом, за счет установки аналоговых фильтров в каждом из трех каналов контура стабилизации. Предложен ряд схем для реализации передаточных функций вида

$$W(p) = k \frac{T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1}{T_2^2 p^2 + 2\xi_2 T_2 p + 1}$$

на одном усилителе и одной паре емкостей [7]. Постоянные времени T_1 и T_2 изменяются с изменением емкостей, но их отношение остается постоянным, что в значительно меньшей степени сказывается на запасах аэроупругой устойчивости по сравнению с независимым изменением этих параметров. Разработана методика расчёта и программное обеспечение для вычисления номинальных значений их элементов. На рис. 8 представлен пример амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик корректирующего фильтра.

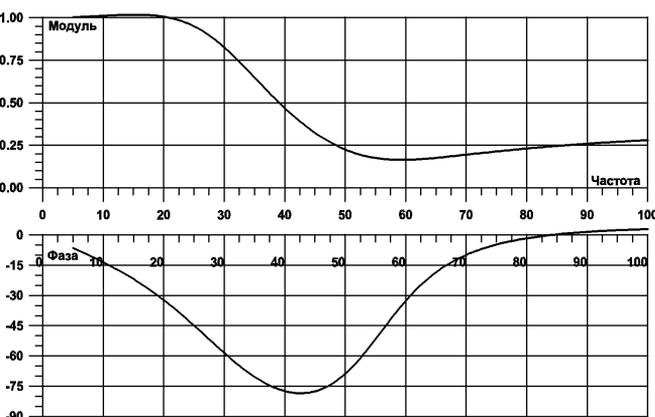


Рис. 8. АФЧХ корректирующего фильтра

Выводы

Для решения задач обеспечения аэроупругой устойчивости ЛА с САУ и безопасности от флаттера на стадии наземной отработки разработан современный программно-аппаратный комплекс, включающий программное обеспечение и оборудование для автоматизированного возбуждения колебаний и сбора данных в стендовых условиях. Комплекс обеспечивает экспериментальные, расчетные и комбинированные расчетно-экспериментальные исследования по определению параметров собственных колебаний упругой конструкции ЛА, частотных характеристик контура стабилизации, границ флаттера и аэроупругой устойчивости ЛА с САУ, а также выбор средств создания необходимых запасов устойчивости контура «упругий ЛА — САУ».

Библиографический список

1. Аэроупругость // Машиностроение. Энциклопедия. Самолеты и вертолеты. Т.IV-21, Аэродинамика, динамика полета и прочность. М., 2002.
2. Станция H2000. Основные сведения. ЗАО L-Card. <http://www.lcard.ru>.
3. Prodera modal analysis systems and software. <http://www.prodera.com/uk/prodera.htm>
4. Вибрации в технике: Справочник в 6 т. / Ред. В.Н. Челомей (пред.). — Т.5. Измерения и испытания / Под ред. М.Д. Генкина. — М.: Машиностроение, 1981.
5. *Hutin C.* Modal Analysis Using Appropriated Excitation Techniques. Sound and Vibration, Structural Analysis. October 2000.
6. *Смыслов В.И.* Наземные резонансные испытания маневренных беспилотных летательных аппаратов //Техника воздушного флота. 2003. № 5,6. С. 52-63.
7. *Педора А.П., Смыслов В.И.* Исследование аэроупругой устойчивости маневренных беспилотных летательных аппаратов // Сб. статей «Прочность, колебания и ресурс авиационных конструкций (к 100-летию со дня рождения проф. С.П.Стрелкова)». Труды ЦАГИ. 2005. Вып. 2669. С. 63-70.

Московский авиационный институт
Статья поступила в редакцию 18.11.2009