

УДК 629.7.018(075.8)

Э 413

Коллектив авторов

*В. А. Бернс, А. В. Долгополов, Е. П. Жуков, Д. А. Красноруцкий,  
П. А. Лакиза, В. Н. Лушин, Д. А. Маринин*

Рецензенты

д-р техн. наук, профессор, президент НГТУ *Н. В. Пустовой*

канд. техн. наук, заместитель директора

ФАУ «СибНИА им. С. А. Чаплыгина» *Д. Н. Смирнов*

Учебник написан на основе многолетних научных исследований, проводимых сотрудниками Новосибирского государственного технического университета, Сибирского научно-исследовательского института авиации им. С. А. Чаплыгина и акционерного общества «Информационные спутниковые системы» им. М. Ф. Решетнева.

**Э 413 Экспериментальный модальный анализ летательных аппаратов** : учебник / В. А. Бернс, А. В. Долгополов, Е. П. Жуков, Д. А. Красноруцкий, П. А. Лакиза, В. Н. Лушин, Д. А. Маринин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2023. – 328 с. (Учебники НГТУ).

ISBN 978-5-7782-4938-7

Учебник посвящен методам экспериментального модального анализа самолетов, вертолетов, космических аппаратов и беспилотных летательных аппаратов. Представлена история развития этих методов, сделан обзор современных методов и средств модальных испытаний. Изложен метод модального анализа летательных аппаратов, основанный на свойствах вынужденных монофазных колебаний. Приведены результаты исследований погрешностей определения характеристик собственных тонов колебаний динамических систем. Описаны особенности модального анализа космических конструкций. Рассмотрены такие приложения результатов испытаний, как коррекция расчетных моделей и контроль технического состояния летательных аппаратов.

УДК 629.7.018(075.8)

ISBN 978-5-7782-4938-7

© Коллектив авторов, 2017, 2023

© Новосибирский государственный  
технический университет, 2017, 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	9
1. МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА .....	11
1.1. История развития .....	11
1.2. Современные методы модального анализа .....	17
1.3. Средства модальных испытаний .....	20
1.4. Методы коррекции расчетных динамических моделей .....	26
1.5. Методы вибрационной диагностики дефектов .....	28
Библиографический список к разделу 1 .....	39
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ МОНОФАЗНЫХ КОЛЕБАНИЙ.....	57
2.1. Методика экспериментального модального анализа .....	57
2.2. Идентификация диссипативных свойств конструкций по результатам модальных испытаний.....	75
2.3. Влияние случайных ошибок измерений на точность определения обобщенных характеристик собственных тонов колебаний .....	82
2.4. Сглаживание экспериментальных данных .....	96
2.5. Определение обобщенных масс по амплитудам перемещений ....	103
2.6. Взаимное влияние тонов с близкими собственными частотами .....	110
2.7. Влияние системы упругого вывешивания на динамические характеристики объекта испытаний .....	123
2.8. Применение расчета масс для контроля погрешностей в экспериментальных данных. Представление результатов испытаний .....	132
Библиографический список к разделу 2 .....	141



3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ.....	143
3.1. Особенности модальных испытаний космических аппаратов .....	145
3.1.1. Испытания среднеразмерных конструкций .....	146
3.1.2. Испытания крупногабаритных конструкций .....	148
3.1.3. Испытания протяженных конструкций .....	150
3.2. Системы компенсации веса объекта испытаний .....	153
3.2.1. Общие требования .....	153
3.2.2. Пассивные системы компенсации веса .....	154
3.2.3. Активные системы компенсации веса .....	157
3.3. Учет влияния воздушной среды на динамические характери- стики крупногабаритных трансформируемых конструкций .....	169
3.3.1. Экспериментальная установка .....	169
3.3.2. Методика и результаты испытаний .....	173
3.3.3. Исследования влияния воздуха на масштабных моделях ...	174
Библиографический список к разделу 3 .....	187
4. КОРРЕКЦИЯ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ .....	189
4.1. Коррекция упругих характеристик .....	190
4.2. Моделирование диссипативных характеристик .....	203
4.3. Освобождение от наложенных связей .....	207
4.3.1. Описание способа .....	207
4.3.2. Тестирование способа .....	216
4.4. Оценка чувствительности метода коррекции к погрешностям в результатах модальных испытаний .....	221
4.5. Определение модальных характеристик крупногабаритных конструкций .....	226
4.6. Решение практических задач коррекции расчетных моделей .....	233
4.6.1. Коррекция расчетной модели динамически подобной модели самолета Ту-204 .....	233
4.6.2. Коррекция расчетной модели отъемной части крыла изделия С-70 .....	239
Библиографический список к разделу 4 .....	245



5. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛЮФТОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ САМОЛЕТОМ, ЗАЗОРОВ В МЕСТАХ СТЫКОВКИ АГРЕГАТОВ И ПОВЫШЕННЫХ НАГРУЗОК МОНТАЖА ОТКЛОНЯЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	247
5.1. Контроль люфтов в проводках управления по фигурам Лиссажу .....	247
5.2. Искажения портретов колебаний как идентификационный признак люфтов в проводках управления и зазоров в местах стыковки агрегатов.....	256
5.3. Особенности контроля люфтов в безбустерных системах управления .....	274
5.4. Контроль повышенных нагрузок монтажа отклоняемых поверхностей по фазовым портретам .....	279
5.5. Искажения портретов колебаний как идентификационный признак повышенных нагрузок монтажа отклоняемых поверхностей.....	285
Библиографический список к разделу 5 .....	290
6. ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАНЕРА САМОЛЕТА ПО ИСКАЖЕНИЯМ ПОРТРЕТОВ КОЛЕБАНИЙ.....	291
6.1. Контроль дефектов панели планера самолета. Вибрационные испытания панели.....	291
6.2. Модальные характеристики панели с дефектами.....	297
6.3. Портреты колебаний панели с дефектами.....	301
6.4. Нормирование искажений портретов колебаний. Влияние амплитуды колебаний и электрических помех на достовер- ность идентификации дефектов .....	309
6.4.1. Величина абсолютного максимума искажений не нормируется .....	309
6.4.2. Нормирование по амплитуде первой гармоники каждого сигнала.....	311
6.5. Отслеживание изменений состояния панели .....	318
6.6. Примеры диагностики дефектов в элементах планера самолета ....	322
6.6.1. Нервюра крыла самолета .....	322
6.6.2. Нервюра отъемной части крыла самолета .....	324
Библиографический список к разделу 6 .....	325
Заключение .....	327