

БЕРНС В.А.

**ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
САМОЛЕТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
РЕЗОНАНСНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

Монография

НОВОСИБИРСК
2012

УДК 629.735.33.018.4
Б 514

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *В.Е. Левин*
д-р техн. наук, зам. директора
по научной работе СибНИИА *В.К. Белов*

Бернс В.А.

Б 514 Диагностика и контроль технического состояния самолетов по результатам резонансных испытаний : монография / В.А. Бернс. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2012. – 272 с. (Серия «Монографии НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-1981-6

В монографии изложены методы анализа результатов резонансных испытаний, проведенных с целью выявления конструктивных и технологических дефектов технического состояния самолетов.

Представлено решение проблемы резонансных испытаний и модальной идентификации конструкций без использования априорного математического описания их диссипативных свойств. Приведены результаты исследований погрешностей определения характеристик собственных тонов колебаний. Описаны нелинейные математические модели конструкций с дефектами и методы анализа результатов испытаний, позволяющие установить наличие и виды дефектов, определить их местоположение и оценить величину. Рассмотрены такие виды дефектов, как люфты и повышенное трение в механических проводках управления, недостаточная эффективность гидравлических демпферов в составе упругого планера, несоосная установка опор отклоняемых поверхностей, низкая жесткость крепления агрегатов.

По результатам резонансных испытаний 80 самолетов десяти типов составлен перечень типовых конструктивных и технологических дефектов планера и систем, обнаруженных в этих испытаниях.

Монография предназначена для специалистов, занимающихся разработкой и испытаниями авиационной техники.

УДК 629.735.33.018.4

ISBN 978-5-7782-1981-6

© Бернс В.А., 2012
© Новосибирский государственный
технический университет, 2012

V.A. BERNS

APPLICATION OF RESONANCE
TESTING RESULTS IN AIRCRAFT
TECHNICAL STATE CONTROL

Monograph

NOVOSIBIRSK
2012

UDC 629.735.33.018.4
B 514

Reviewers:

Prof. *V.E. Levin*, D.Sc. (Eng.)

V.K. Belov, D.Sc. (Eng.), Deputy Director for Research, SIBNIA

Berns V.A.

B 514 Application of Resonance Testing Results in Aircraft Technical State Control : monograph / V.A. Berns. – Novosibirsk : NSTU Publisher, 2012. – 272 pp. (“NSTU Monographs” series).

IBSN 978-5-7782-1981-6

The monograph describes methods of analysis of resonance testing results aimed at revealing design and technological defects that characterize parameters of the aircraft technical state.

The solution to the problem of resonance testing and modal identification of structures without using mathematical description of vibration damping is presented. The results of investigating errors in determining characteristics of eigen tones of vibrations are given. Nonlinear mathematical models of defective structures are described along with methods of analyzing testing results that make it possible to find and specify types of defects locate them and evaluate their size. Such types of defects as plays and increased friction in mechanical control system guide, insufficient efficiency of hydraulic dampers in elastic airframes, out-of-alignment mounting of control vane supports, and low stiffness of aircraft unit attachment are considered in the monograph.

Based on the results of resonance testing of 80 aircraft of 10 types a list of typical design and technological defects of aircraft airframe and systems revealed in these tests has been made.

The monograph is designed for specialists involved in developing and testing aircraft systems and units.

UDC 629.735.33.018.4

ISBN 978-5-7782-1981-6

© Berns V.A., 2012

© Novosibirsk State Technical University, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	7
1. МЕТОДЫ РЕЗОНАНСНЫХ ИСПЫТАНИЙ, ИДЕНТИФИКАЦИИ И КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ	9
1.1. Резонансные испытания и идентификация динамических систем.....	10
1.2. Диагностирование технического состояния конструкций.....	31
2. МОДАЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МОНОФАЗНЫХ КОЛЕБАНИЙ	39
2.1. Математическая модель механической колебательной системы.....	40
2.2. Основные свойства вынужденных монофазных колебаний.....	43
2.3. Разделение задач определения упругомассовых характеристик и характеристик демпфирования. Реализация монофазных колебаний.....	46
2.4. Определение параметров математической модели.....	50
2.5. Возбуждение колебаний ограниченным числом сил.....	56
2.6. Корректировка параметров расчетной модели при изменении характеристик системы	63
3. ПОГРЕШНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ	69
3.1. Влияние числа степеней свободы модели и уровня демпфирования в системе на точность определения обобщенных характеристик.....	70
3.2. Случай близких собственных частот	83
3.3. Об использовании гипотезы Базиля.....	99
3.4. Оценка точности определения характеристик собственных тонов при наличии случайных ошибок в экспериментальных данных.....	105
3.5. Сглаживание результатов испытаний.....	121
3.6. Определение обобщенных масс по амплитудам перемещений.....	128

3.7. Применение расчета масс для контроля погрешностей в экспериментальных данных. Представление результатов резонансных испытаний.....	136
4. КОНТРОЛЬ ЛЮФТОВ В МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОВОДКАХ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	143
4.1. Расчетная схема и математическая модель проводки управления.....	143
4.2. Макетная проводка управления и ее математическая модель.....	147
4.3. Исследования динамических характеристик проводки управления.....	151
4.4. Выявление соединений с люфтами.....	158
4.5. Оценка величин люфтов	165
5. ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМИ ДЕМПФЕРАМИ.....	173
5.1. Разработка расчетной схемы органа управления с гидравлическим демпфером.....	174
5.2. Вывод уравнений движения	179
5.3. Влияние характеристик демпфера и проводки управления на жесткость и демпфирование руля	186
5.4. Определение параметров уравнений органа управления с демпфером по результатам испытаний	193
5.5. Использование математической модели руля с демпфером.....	197
6. ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ СТЫКОВКИ АГРЕГАТОВ И ПЛАНЕРА. СОСТАВЛЕНИЕ ПЕРЕЧНЯ ТИПОВЫХ ДЕФЕКТОВ.....	203
6.1. Выявление дефектов по изменению характеристик собственных форм колебаний планера.....	203
6.2. Орган управления с сухим трением в проводке и опорах.....	207
6.2.1. Определение эквивалентного сухого трения по затухающим колебаниям органа управления	207
6.2.2. Контроль сухого трения по выделению тепла при вынужденных колебаниях.....	212
6.3. Орган управления со смещенным узлом навески.....	217
6.3.1. Результаты резонансных испытаний самолетов	218
6.3.2. Определение вида дефекта.....	220
6.3.3. Расчет характеристик вынужденных колебаний органа управления.....	224

6.3.4. Экспериментальные исследования динамических характеристик руля со смещенной опорой.....	231
6.4. Специальные вибрационные испытания	236
6.4.1. Испытания изолированной силовой установки	236
6.4.2. Исследование причин разрушения трубопровода противобледенительной системы самолета Су-24М.....	237
6.5. Конструктивно-технологические дефекты, выявленные по результатам резонансных испытаний самолетов.....	242
Заключение	245
Библиографический список.....	247

CONTENTS

Introduction	7
1. METHODS OF RESONANCE TESTING, IDENTIFICATION AND CONTROL OF TECHNICAL STATE OF STRUCTURES	9
1.1. Resonance testing and dynamic system identification.....	10
1.2. Diagnosis of structures technical state.....	31
2. MODAL IDENTIFICATION OF DYNAMIC SYSTEMS BASED ON MONOPHASE VIBRATIONS.....	39
2.1. A mathematical model of a mechanical vibratory system	40
2.2. Basic properties of monophasе forced vibrations	43
2.3. Separation of tasks of determining elastic-mass characteristics and damping characteristics. Realization of monophasе vibrations.....	46
2.4. Determining mathematical model parameters	50
2.5. Excitation of vibrations by a limited number of forces.....	56
2.6. Correction of the design model parameters with changing characteris- tics of the system	63
3. ERRORS OF DESIGN MODEL CONSTRUCTION BASED ON THE RESULTS OF TESTING	69
3.1. The effect of the number of degrees of freedom and the damping level of a system on the accuracy of determining generalized characteristics.....	70
3.2. The case of close eigenfrequencies.....	83
3.3. The Basil hypothesis application	99
3.4. Estimation of the accuracy of determining characteristics of eigen tones with random errors in experimental data	105
3.5. Smoothing testing results.....	121
3.6. Determining generalized masses by displacement amplitudes	128

3.7. Using mass calculations to control errors in experimental data. Presenting results of resonance tests 136

4. PLAY CONTROL IN AIRCRAFT MECHANICAL CONTROL GUIDES ... 143

4.1. A design diagram and a mathematical model of the control guide..... 143

4.2. A prototype control guide and its mathematical model 147

4.3. Studying dynamic characteristics of the control guide 151

4.4. Revealing connections with plays..... 158

4.5. Evaluation of plays values 165

5. INVESTIGATING DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE CONTROL UNIT WITH HYDRAULIC DAMPERS 173

5.1. Development of the design diagram of the control unit with a hydraulic damper 174

5.2. Derivation of the equation of motion..... 179

5.3. The effect of damper and control guide characteristics on the control vane stiffness and damping..... 186

5.4. Calculation of parameters of the control unit equation with a damper based on testing results 193

5.5. Using the mathematical model of the control vane with a damper 197

6. REVEALING DEFECTS IN ATTACHMENT OF THE AIRCRAFT FRAME AND ITS UNITS. MAKING A LIST OF TYPICAL DEFECTS..... 203

6.1. Revealing defects based on changing characteristics of eigenvibrations of the airframe 203

6.2. The control unit with dry friction in guides and supports 207

6.2.1. Calculation of the equivalent dry friction by damping vibrations of the control unit..... 207

6.2.2. Control of dry friction by heat release caused by forced vibrations..... 212

6.3. The control unit with a displaced attachment fitting..... 217

6.3.1. Results of aircraft resonance tests 218

6.3.2. Determining a defect type 220

6.3.3. Calculation of forced vibration characteristics of the control unit... 224

6.3.4. Experimental study of dynamic characteristics of the control vane with a displaced support 231

6.4. Special vibration tests	236
6.4.1. Tests of an isolated power plant.....	236
6.4.2. Investigations into causes of the deicing system pipeline damage of the SU-24M aircraft	237
6.5. Design and technological defects revealed based on the results of aircraft resonance tests	242
Conclusions	245
Bibliography.....	247