

PREFACE

This monograph has been written to meet the need for a comprehensive treatise on the balancing of rotating equipment. The subject of rotor balancing is a broad topic which involves many skills and disciplines. It has recently evolved from what was previously a mechanical engineering operation into an electromechanical technology. This has resulted from the intensive application of the minicomputer to coordinate the required balancing operations. Indeed, the entire subject of rotor balancing has recently experienced an era of growth and development in which technological changes have occurred in many fundamental areas. These changes have resulted from balancing requirements associated with the rapid development of advanced high-speed rotating machinery during the two previous decades. The continued demand for greater power output per unit weight in rotating equipment has led to the acceptance of more flexible rotor balancing techniques. These techniques and the associated equipment are now being used to balance advanced, flexible rotor equipment, and they are also replacing the older, established rigid rotor balancing procedures.

In use, this book is directed toward the professional engineer with no significant prior experiences in rotor balancing. It is hoped that such engineers may obtain from it an introduction to the principles of balancing, certain basic balancing procedures, and some acquaintance with the hardware involved in rotor balancing. Sufficient advanced material has been included so that further in-depth study may be conveniently pursued on specific state-of-the-art topics using the literature sources specified at the end of each chapter.

The author will appreciate advice and comments from readers concerning other important topics and related material that might be included in future editions of this monograph. Advice on publications of importance that have been inadvertently overlooked is also welcome. Careful efforts have been made during preparation to eliminate textual errors, but advice will be appreciated to any error that may remain, for which the author accepts all responsibility.

Gratitude is expressed both to Henry C. Pusey, former Director of the Shock and Vibration Information Center at NRL and Dr. J. Gordan Showalter, the acting director for their supportive recognition of the importance of this subject, and for much encouragement and friendly advice given during the preparation of the manuscript. Special gratitude is also expressed to Sara Curry for her patient care, editing, and guidance in the preparation of the manuscript, and to Dr. Ronald L. Eselman of the Vibration Institute and to Shixiang Zhou, Visiting Scholar, Hubei Province, Peoples Republic of China, for their helpful review of the material herein. A special note of thanks goes to the Computerized Technical Composition Section of NRL's Technical Information Division, especially Mrs. Deborah Blodgett and Mrs. Dora Wilbanks. Without their patience and help this book would never have been put in the excellent shape that it is now in.

Rochester, New York

Neville F. Rieger

v

FOREWORD

Rotor unbalance is a basic concern in the design and operation of machinery because it is a major cause of excessive vibration.

The classical balancing procedures available today are deceptively simple: balancing can be difficult due to the number of interacting phenomena present. The entire area of rotor dynamics plays a role in many balancing problems. Critical speeds are influenced by rotor and bearing flexibilities; the weight, flexibility, and position of couplings as well as casing and foundation properties are often integral parts of balancing techniques and strategies. Because critical speeds involve phase changes—between mass unbalance forces and vibration—they always affect the sensitivity of the balancing process. Balancing techniques for high-speed equipment are thus intimately involved with rotor dynamics. And because mass unbalance is sensitive to thermal changes, which cause changes in rotor shape, balancing procedures must also account for thermal effects. The fact that such phenomena as misalignment cause once-per-revolution frequency vibration—as does mass unbalance—is one reason for the misapplication of balancing procedures. It is obvious that many factors are involved in applying balancing procedures to rotors.

Balancing techniques and rotor dynamics have evolved with the development of machinery, particularly as operating speeds have increased. The development of balancing technology began in the industrial revolution of the 19th century; the first balancing machine was developed and patented by Martenson in 1870. At that time and in the early 20th century balancing accuracy was severely limited by the lack of vibration transducers and analyzers. A chalk mark of the high spot of the rotor was used to identify the heavy spot (location of mass unbalance). Balancing procedures were not formalized until the 20th century when Thearle in 1934 developed a two-plane influence coefficient method. From that time to the present balancing procedures have closely followed developments in various areas: the theory of rotor dynamics, transducers and analyzers for measuring vibration, and computers. All of these ingredients were essential to the evolution of the sophisticated flexible-rotor balancing techniques available today.

One early flexible-rotor balancing technique, traceable to Lynn in 1928, was based on mode shapes (modal method). In England the theory of the modal method was developed by Bishop, Gladwell, and Parkinson in the 1960s; Moore demonstrated the practical application of the method to heavy rotating equipment. At the same time in Europe

vii

ВВЕДЕНИЕ

Данная монография написана с целью удовлетворения потребности во всеобъемлющем труде по балансировке вращающегося оборудования. Балансировка роторов является обширной темой, которая включает в себя множество навыков и областей знаний. С недавних пор она превратилась из того, что раньше относилось к машиностроению, в область электромеханических технологий. Это стало результатом интенсивного применения мини-компьютера для координации необходимых операций балансировки. Действительно, вся сфера балансировки роторов недавно пережила эпоху роста и развития, когда технологические изменения произошли во многих фундаментальных областях. Эти изменения обусловлены требованиями к балансировке, связанными с быстрым развитием передовых высокоскоростных вращающихся механизмов, происходившим в течение двух предыдущих десятилетий. Постоянный спрос на увеличение выходной мощности на единицу веса вращающегося оборудования привел к принятию более гибких методов балансировки роторов. Эти методы и соответствующее оборудование в настоящее время используются для балансировки современного оборудования с гибким ротором, и они также заменяют старые, устоявшиеся процедуры балансировки жесткого ротора.

Эта книга рассчитана на профессиональных инженеров, не имеющих значительного опыта в балансировке роторов. Хотелось бы надеяться, что такие инженеры смогут получить из нее введение в принципы балансировки, некоторые основные процедуры балансировки и познакомиться с оборудованием, задействованным в балансировке роторов. Включено достаточное количество продвинутого материала, чтобы можно было удобно продолжить углубленное изучение конкретных современных тем, используя литературные источники, указанные в конце каждой главы.

Автор будет признателен читателям за советы и комментарии, касающиеся других важных тем и сопутствующих материалов, которые могут быть включены в будущие издания данной монографии. Также приветствуются советы относительно важных публикаций, которые были непреднамеренно оставлены без внимания. В процессе подготовки были предприняты тщательные усилия по устранению текстовых ошибок, но мы будем признательны за советы по поводу любых ошибок, которые могут остаться, за которые автор принимает на себя всю ответственность.

Выражается благодарность Генри К. Пьюзи, бывшему директору Информационного Центра по Ударам и Вибрации в Военно-морской Исследовательской Лаборатории, и д-ру Дж. Гордану Шоуполтеру, исполняющему

обязанности директора, за их благосклонное признание важности этой темы, а также за большую поддержку и дружеские советы, данные во время подготовки рукописи. Особая благодарность выражается также Саре Карри за ее заботу, редактирование и руководство при подготовке рукописи, а также доктору Рональду Л. Эшэйману из Института Вибрации и Шисяну Чжоу, приглашенному ученому, из провинции Хубэй, Китайская Народная Республика, за полезную рецензию на представленный материал. Особая благодарность выражается Секции компьютеризированного технического состава Отдела Технической Информации Военно-морской Исследовательской Лаборатории, особенно г-же Деборе Блоджетт и г-же Доре Уилбэнкс. Без их терпения и помощи эта книга никогда не была бы приведена в ту прекрасную форму, в которой она находится сейчас.

Рочестер, Нью-Йорк

Невилл Ф. Ригер

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисбаланс ротора является одной из основных проблем при проектировании и эксплуатации машин, поскольку он является основной причиной чрезмерной вибрации.

Классические процедуры балансировки, доступные сегодня, обманчиво просты: балансировка может быть сложной из-за множества взаимодействующих явлений. Вся область динамики ротора играет важную роль во многих проблемах балансировки. Критические скорости зависят от гибкости ротора и подшипников; вес, гибкость и положение муфт, а также свойства корпуса и фундамента часто являются неотъемлемой частью методов и стратегий балансировки. Поскольку критические скорости сопровождаются изменениями фаз - между массовыми силами дисбаланса и вибрацией - они всегда влияют на чувствительность процесса балансировки. Таким образом, методы балансировки высокоскоростного оборудования тесно связаны с динамикой ротора. А поскольку дисбаланс масс чувствителен к тепловым изменениям, которые вызывают изменения формы ротора, процедуры балансировки также должны учитывать тепловые эффекты. Тот факт, что такие явления, как несоосность, вызывают вибрацию с частотой один раз за оборот, так и дисбаланс масс, является одной из причин неправильного применения процедур балансировки. Очевидно, что в применении процедур балансировки к роторам замешано множество факторов.

Методы балансировки и динамика ротора развивались вместе с развитием машин, особенно по мере увеличения рабочих скоростей. Развитие технологии балансировки началось во время промышленной революции 19 века; первый балансировочный аппарат был разработан и запатентован Мартенсоном в 1870 году. В то время и в начале 20-го века точность балансировки была сильно ограничена из-за отсутствия датчиков и анализаторов вибрации. Для определения тяжелого места (места дисбаланса массы) использовалась меловая отметка высокой точки ротора. Процедуры балансировки не были формализованы до 20-го века, когда Тарле в 1934 году разработал метод коэффициента влияния в двух плоскостях. С тех пор и до настоящего времени процедуры балансировки тесно следуют за развитием различных областей: теории динамики ротора, датчиков и анализаторов для измерения вибрации, а также компьютеров. Все эти компоненты были необходимы для эволюции сложных методов балансировки гибких роторов, доступных сегодня.

Один из ранних методов балансировки гибкого ротора, который был разработан Линном в 1928 году, был основан на собственных формах изгиба (модальный метод). В Англии теория модального метода была разработана

CONTENTS (Cont.)

Chapter	Page
2.16 Rigid Rotor with Displaced c.g. in Symmetrical Bearings	92
2.17 Rigid-Rotor Instability	100
2.18 References	107
3. BALANCING MACHINES AND FACILITIES	111
3.1 Principles of Balancing	111
3.2 Classification	114
3.3 Major Components of Balancing Machines	118
3.4 Modern General Purpose Balancing Machines	141
3.5 Balancing Facilities	155
3.6 Development of Balancing Machines	169
3.7 Selected Patents on Balancing Machines and Equipment	180
3.8 References	188
4. LOW-SPEED BALANCING	189
4.1 Soft-Support Machine Procedures	190
4.2 Hard-Support-Machine Procedures	193
4.3 Field Balancing	194
4.4 Balancing Standards for Rigid Rotors	229
4.5 References	240
5. FLEXIBLE-ROTOR DYNAMICS	243
5.1 Concepts and Classifications of Flexible Rotors	245
5.2 Dynamic Properties of Flexible-Rotor Systems	251
5.3 Simple System Models Used for Rotor-System Analysis	254
5.4 Dynamic Properties of Rotors in Real Bearings	270
5.5 Experimental Verification of Unbalance Response Theory	290
5.6 Modal Theory of Rotor Motions	295
5.7 Computer Analysis of Rotor-Bearing Systems	305
5.8 References	315
6. FLEXIBLE-ROTOR BALANCING	319
6.1 Preliminary Considerations	321

CONTENTS (Cont.)

Chapter	Page
6.2 Modal Balancing	324
6.3 Influence Coefficient Methods	372
6.4 Other Flexible-Rotor Balancing Procedures and Experiences	391
6.5 Comparison of Flexible-Rotor Balancing Methods ..	408
6.6 Criteria for Flexible-Rotor Balancing	412
6.7 References	418
7. PRACTICAL EXPERIMENTS WITH FLEXIBLE-ROTOR BALANCING	423
7.1 Information Sources on Rotor Balancing Tests and Experiments	424
7.2 Laboratory Verification of Modal Balancing: Parkinson, Jackson and Bishop	425
7.3 Experiences in Balancing Rotors with Mixed Modes: Moore and Dodd	431
7.4 Industrial Rotor Balancing by Modal Methods	434
7.5 Laboratory Verification of the Influence Coefficient Method	444
7.6 Laboratory Verification of the Influence Coefficient Method: Lund and Tonnesen	470
7.7 Comparison of Flexible-Rotor Balancing Methods: Kendig Computer Study	481
7.8 Experimental Comparison of Modal Balancing Procedures	520
7.9 Flexible Balancing Optimization Studies	529
7.10 Summary of Practical Experience with Balancing Methods	534
7.11 References	534
8. FUTURE DEVELOPMENTS IN BALANCING TECHNOLOGY	537
8.1 Overview of Recent Progress	537
8.2 Need for Advanced Balancing Technology	538
8.3 Developments in Balancing Techniques	540
8.4 Developments in Balancing Hardware	541
8.5 Advanced Studies in Rotor Dynamics	542
8.6 Balancing Criteria	544
8.7 References	545

СОДЕРЖАНИЕ (Прод.)

Глава	Стр.
2.16 Жесткий ротор со смещенным центром тяжести в симметричных подшипниках.....	92
2.17 Неустойчивость жесткого ротора.....	100
2.18 Ссылки.....	107
3. БАЛАНСИРОВОЧНЫЕ СТАНКИ И УСТАНОВКИ.....	111
3.1 Принципы балансировки.....	111
3.2 Классификация.....	114
3.3 Основные компоненты балансировочных станков.....	118
3.4 Современные балансировочные станки общего назначения.....	141
3.5 Балансировка: Оборудование.....	155
3.6 Развитие балансировочных станков.....	169
3.7 Избранные патенты на балансировочные станки и оборудование.....	180
3.8 Ссылки.....	188
4. НИЗКОСКОРОСТНАЯ БАЛАНСИРОВКА.....	189
4.1 Процедуры на станке с мягкой опорой.....	190
4.2 Процедуры на станках с жесткой опорой.....	193
4.3 Балансировка в полевых условиях.....	194
4.4 Стандарты балансировки жестких роторов.....	229
4.5 Ссылки.....	240
5. ДИНАМИКА ГИБКИХ РОТОРОВ.....	243
5.1 Концепции и классификации гибких роторов.....	245
5.2 Динамические свойства систем с гибкими роторами.....	251
5.3 Простые системные модели, используемые для анализа роторной системы.....	254
5.4 Динамические свойства роторов в реальных подшипниках.....	270
5.5 Экспериментальная проверка теории реакции на дисбаланс.....	290
5.6 Модальная теория движений ротора.....	295
5.7 Компьютерный анализ роторно-подшипниковых систем.....	305
5.8 Ссылки.....	315
6. БАЛАНСИРОВКА ГИБКОГО РОТОРА.....	319
6.1 Предварительные рассуждения.....	321

СОДЕРЖАНИЕ (Прод.)

Глава	Стр.
6.2 Модальная балансировка.....	324
6.3 Методы коэффициента влияния.....	372
6.4 Другие процедуры и опыты балансировки гибкого ротора.....	391
6.5 Сравнение методов балансировки гибких роторов.....	408
6.6 Критерии балансировки гибкого ротора.....	412
6.7 Ссылки.....	418
7. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО БАЛАНСИРОВКЕ ГИБКОГО РОТОРА.....	423
7.1 Источники информации об испытаниях и экспериментах по балансировке роторов.....	424
7.2 Лабораторная проверка модальной балансировки: Паркинсон, Джексон и Бишоп.....	425
7.3 Опыт балансировки роторов со смешанными модами: Мур и Додд.....	431
7.4 Промышленная балансировка роторов модальными методами.....	434
7.5 Лабораторная верификация метода коэффициента влияния.....	444
7.6 Лабораторная верификация метода коэффициента влияния: Лунд и Тоннесен.....	470
7.7 Сравнение методов балансировки гибких роторов: Компьютерное исследование Кендига.....	481
7.8 Экспериментальное сравнение методов модальной балансировки.....	520
7.9 Исследования по оптимизации балансировки гибкого двигателя.....	529
7.10 Обобщение практического опыта применения методов балансировки.....	534
7.11 Ссылки.....	534
8. БУДУЩЕЕ РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ БАЛАНСИРОВКИ.....	537
8.1 Обзор последних достижений.....	537
8.2 Потребность в передовых технологиях балансировки.....	538
8.3 Разработки в области техники балансировки.....	540
8.4 Разработки в области балансировочного оборудования.....	541
8.5 Передовые исследования динамики ротора.....	542
8.6 Критерии балансировки.....	544
8.7 Ссылки.....	545