



Издательский Дом
ИНТЕЛЛЕКТ

Р. ЛИЧ

**ИНЖЕНЕРНЫЕ
ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ
НАНОМЕТРОВОЙ ТОЧНОСТИ**

Р. ЛИЧ

ИНЖЕНЕРНЫЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ НАНОМЕТРОВОЙ ТОЧНОСТИ

*Перевод с английского
А.В. Заблоцкого*



ДОЛГОПРУДНЫЙ
2012

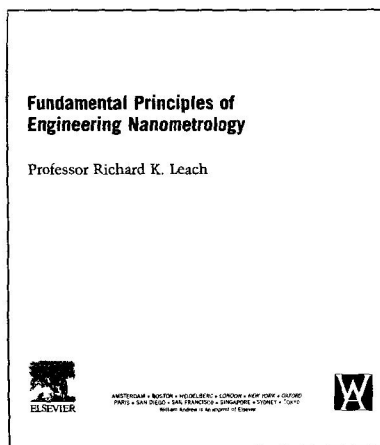
Р. Лич

Инженерные основы измерений нанометровой точности: Учебное издание / Р. Лич – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2012. – 400 с.

ISBN 978-5-91559-119-5

Книга известного специалиста Национальной Физической Лаборатории (NPL, Великобритания) последовательно рассматривает инженерные аспекты достижения нанометровой точности измерений перемещений и параметров рельефа поверхности, контроля параметров макрообъектов с помощью координатно-измерительных машин, различных зондовых, оптических и электронных средств измерений (включая вопросы обеспечения прослеживаемости измерений длины с помощью лазерной интерферометрии и калибровочных образцов). Также рассмотрены вопросы прецизионных измерений масс.

Для студентов и преподавателей технических университетов, специалистов промышленных предприятий, инженеров-разработчиков и исследователей.



ISBN 978-5-91559-119-5

ISBN 978-0-08-096454-6 (англ.)

© 2010, Richard K. Leach. Published by Elsevier Inc. All rights reserved. This edition of FUNDAMENTAL PRINCIPLES OF ENGINEERING NANOMETROLOGY by Richard Leach is published by arrangement with ELSEVIER INC., a Delaware corporation having its principal place of business at 360 Park Avenue South, New York, NY 10010, USA

2012, ООО Издательский Дом «Интеллект», оригинал-макет, оформление

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| Благодарности | 15 |
| Глава 1 | |
| ВВЕДЕНИЕ В МЕТРОЛОГИЮ ДЛЯ МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЙ | 17 |
| 1.1. Что представляет собой инженерная нанометрология? | 19 |
| 1.2. Содержание этой книги | 20 |
| 1.3. Список использованных источников | 21 |
| Глава 2 | |
| ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ | 23 |
| 2.1. Введение | 23 |
| 2.2. Единицы измерений и система СИ | 25 |
| 2.3. Длина | 26 |
| 2.4. Масса | 30 |
| 2.5. Сила | 32 |
| 2.6. Угол | 33 |
| 2.7. Прослеживаемость измерения | 34 |
| 2.8. Точность, прецизионность, разрешение, погрешность и неопределенность измерения | 37 |
| 2.8.1. Точность и прецизионность измерения | 37 |
| 2.8.2. Разрешение и погрешность измерения | 38 |
| 2.8.3. Неопределенность измерения | 39 |
| 2.8.3.1. Перенос распределений вероятности | 40 |
| 2.8.3.2. Руководство по выражению неопределенности в измерениях (GUM) | 42 |
| 2.8.3.3. Метод Монте-Карло | 44 |



| | |
|--|----|
| 2.9. Лазеры | 46 |
| 2.9.1. Принцип действия гелий-неонового лазера | 46 |
| 2.9.2. Способы стабилизации длины волны одномодового лазера | 49 |
| 2.9.3. Стабилизация частоты лазера с использованием метода насыщенного поглощения | 50 |
| 2.9.3.1. Стабилизация лазера с двухмодовым режимом работы | 52 |
| 2.9.4. Лазеры, стабилизированные посредством использования эффекта Зеемана, излучающие на длине волны 633 нм | 53 |
| 2.9.5. Калибровка частоты (стабилизированного) лазера, излучающего на длине волны 633 нм | 56 |
| 2.9.6. Существующие и перспективные лазерные стандарты частоты | 57 |
| 2.10. Список использованных источников | 58 |

Глава 3

ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

| | |
|--|----|
| 3.1. Геометрия | 62 |
| 3.2. Кинематика | 62 |
| 3.2.1. Сочленение Кельвина | 64 |
| 3.2.2. Реализация единственной степени свободы | 65 |
| 3.3. Динамика | 66 |
| 3.4. Принцип Аббе | 67 |
| 3.5. Упругое сжатие | 69 |
| 3.6. Структурные схемы | 71 |
| 3.6.1. Каркасный контур | 71 |
| 3.6.2. Тепловой контур | 71 |
| 3.6.3. Метрологический контур | 72 |
| 3.7. Материалы | 72 |
| 3.7.1. Минимизация теплового воздействия | 73 |
| 3.7.2. Минимизация механического воздействия | 74 |
| 3.8. Симметрия | 75 |
| 3.9. Виброизоляция | 76 |
| 3.9.1. Источники вибрации | 77 |
| 3.9.2. Пассивная виброизоляция | 78 |



| | |
|--|----|
| 3.9.3. Подавление колебаний | 80 |
| 3.9.4. Внутренний резонанс | 81 |
| 3.9.5. Активная виброизоляция | 81 |
| 3.9.6. Акустический шум | 81 |
| 3.10. Список использованных источников | 82 |

Глава 4

ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТЬ ДЛИНЫ ПРИ ПОМОЩИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

| | |
|--|-----|
| 4.1. Обеспечение прослеживаемости длины | 85 |
| 4.2. Концевые меры как средство обеспечения прослеживаемости | 86 |
| 4.3. Введение в интерферометрию | 89 |
| 4.3.1. Свет как волна | 89 |
| 4.3.2. Измерение биения в случае, когда $\omega_1 \neq \omega_2$ | 92 |
| 4.3.3. Видность и контраст | 92 |
| 4.3.4. Интерференция белого света и длина когерентности | 93 |
| 4.4. Схемы интерферометров | 96 |
| 4.4.1. Интерферометры Майкельсона и Тваймана—Грина | 96 |
| 4.4.1.1. Модификация Тваймана—Грина | 97 |
| 4.4.2. Интерферометр Физо | 98 |
| 4.4.3. Интерферометры Жамена и Маха—Цендера | 101 |
| 4.4.4. Интерферометр Фабри—Перо | 103 |
| 4.5. Интерферометрия концевых мер | 105 |
| 4.5.1. Измерение длины при помощи интерферометрии | 105 |
| 4.5.2. Работа интерферометра для измерения длины концевых мер | 108 |
| 4.5.2.1. Измерение сдвига интерференционной картины — сдвиг фаз | 108 |
| 4.5.2.2. Анализ мультиволновой интерференции | 109 |
| 4.5.2.3. Длина волны в вакууме | 111 |
| 4.5.2.4. Тепловые эффекты | 111 |
| 4.5.2.5. Измерение показателя преломления | 112 |
| 4.5.2.6. Апертурная коррекция | 113 |
| 4.5.2.7. Эффекты поверхности и изменения фазы | 114 |
| 4.5.3. Источники погрешности | 115 |



| | |
|--|-----|
| 4.5.3.1. Неопределенность относительного сдвига интерференционных полос | 115 |
| 4.5.3.2. Неопределенность мультиволновой интерферометрии | 116 |
| 4.5.3.3. Неопределенность длины волны в вакууме | 116 |
| 4.5.3.4. Неопределенность вследствие тепловых эффектов | 116 |
| 4.5.3.5. Неопределенность показателя преломления | 117 |
| 4.5.3.6. Неопределенность апертурной коррекции | 117 |
| 4.5.3.7. Неопределенность изменения фазы | 117 |
| 4.5.3.8. Косинусная погрешность | 118 |
| 4.6. Список использованных источников | 118 |

Глава 5

| | |
|---|------------|
| ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ | 120 |
| 5.1. Введение | 120 |
| 5.2. Интерферометрия перемещений | 121 |
| 5.2.1. Основы интерферометрии перемещений | 121 |
| 5.2.2. Гомодинная интерферометрия | 122 |
| 5.2.3. Гетеродинная интерферометрия | 123 |
| 5.2.4. Счет и деление интерференционных полос | 125 |
| 5.2.5. Двухпроходная интерферометрия | 126 |
| 5.2.6. Дифференциальная интерферометрия | 127 |
| 5.2.7. Интерферометрия со свипированием частоты | 128 |
| 5.2.8. Источники погрешности | 129 |
| 5.2.8.1. Тепловое расширение | 130 |
| 5.2.8.2. Длина мертвого хода | 130 |
| 5.2.8.3. Косинусная погрешность | 131 |
| 5.2.8.4. Нелинейность | 132 |
| 5.2.8.5. Коррекция Хейдеманна | 133 |
| 5.2.8.6. Источники случайной погрешности | 135 |
| 5.2.8.7. Прочие источники погрешности | 136 |
| 5.2.9. Угловые интерферометры | 136 |
| 5.3. Емкостные датчики | 138 |
| 5.4. Индуктивные датчики | 139 |
| 5.5. Оптические датчики | 142 |
| 5.6. Оптоволоконные датчики | 144 |
| 5.7. Калибровка датчиков перемещения | 146 |



| | |
|--|-----|
| 5.7.1. Калибровка с использованием оптической интерферометрии | 147 |
| 5.7.1.1. Калибровка с использованием интерферометра Фабри—Перо | 147 |
| 5.7.1.2. Калибровка с использованием измерительного лазера | 148 |
| 5.7.2. Калибровка с использованием рентгеновской интерферометрии | 149 |
| 5.8. Список использованных источников | 152 |

Глава 6

| | |
|---|------------|
| СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ | 157 |
| 6.1. Введение | 157 |
| 6.2. Понятие пространственной частоты | 159 |
| 6.3. Исторический обзор | 160 |
| 6.4. Измерение параметров профиля поверхности | 163 |
| 6.5. Измерение параметров трехмерной текстуры поверхности | 164 |
| 6.6. Средства измерений | 166 |
| 6.6.1. Стилусные профилометры | 167 |
| 6.7. Оптические профилометры | 171 |
| 6.7.1. Ограничения оптических средств измерений | 172 |
| 6.7.2. Оптические сканирующие методы | 178 |
| 6.7.2.1. Триангуляционные профилометры | 178 |
| 6.7.2.2. Конфокальные микроскопы | 181 |
| 6.7.2.2.1. Конфокальные хроматические зонды | 185 |
| 6.7.2.3. Профилометрия точечной автофокусировки | 186 |
| 6.7.3. Оптические методы исследования поверхности | 188 |
| 6.7.3.1. Микроскопия с переменным фокусом | 188 |
| 6.7.3.2. Фазосдвигающая интерферометрия | 191 |
| 6.7.3.3. Цифровая голографическая микроскопия | 195 |
| 6.7.3.4. Когерентная сканирующая интерферометрия | 197 |
| 6.7.4. Методы рассеяния | 200 |
| 6.8. Емкостные средства измерений | 204 |
| 6.9. Пневматические средства измерений | 205 |
| 6.10. Калибровка средств измерений параметров рельефа поверхности | 205 |



| | |
|---|-----|
| 6.10.1. Прослеживаемость измерений параметров рельефа поверхности | 206 |
| 6.10.2. Калибровка средств измерений параметров профиля поверхности | 207 |
| 6.10.3. Калибровка средств измерений параметров трехмерной текстуры поверхности | 209 |
| 6.11. Неопределенность измерений параметров рельефа поверхности | 214 |
| 6.12. Сравнение средств измерений параметров рельефа поверхности | 216 |
| 6.13. Стандарты на программное обеспечение | 218 |
| 6.14. Список использованных источников | 219 |

Глава 7

| | |
|---|------------|
| СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ, ЭЛЕКТРОННАЯ И ИОННАЯ МИКРОСКОПИЯ | 229 |
| 7.1. Сканирующая зондовая микроскопия | 230 |
| 7.2. Сканирующая туннельная микроскопия | 232 |
| 7.3. Атомно-силовая микроскопия | 234 |
| 7.3.1. Источники шума в атомно-силовой микроскопии | 235 |
| 7.3.1.1. Определение уровня статического шума | 236 |
| 7.3.1.2. Определение уровня динамического шума | 237 |
| 7.3.1.3. Определение уровня шума ху-сканера | 237 |
| 7.3.2. Некоторые типичные артефакты АСМ-изображений | 238 |
| 7.3.2.1. Размер и форма иглы | 238 |
| 7.3.2.2. Загрязнение зонда | 239 |
| 7.3.2.3. Прочие артефакты | 239 |
| 7.3.3. Определение системы координат атомно-силового микроскопа | 240 |
| 7.3.4. Прослеживаемость в атомно-силовой микроскопии | 241 |
| 7.3.4.1. Калибровка АСМ | 242 |
| 7.3.5. Измерение силы при помощи АСМ | 244 |
| 7.3.6. Определение жесткости кантилевера АСМ | 246 |
| 7.3.7. Измерение меж- и внутримолекулярных сил при помощи АСМ | 248 |
| 7.3.7.1. Придание зонду функциональных свойств | 251 |



| | |
|---|-----|
| 7.3.8. Измерение расстояния между зондом и образцом | 253 |
| 7.3.9. Артефакты, возникающие при измерении сил посредством АСМ | 254 |
| 7.4. Исследование наночастиц при помощи сканирующей зондовой микроскопии | 256 |
| 7.5. Электронная микроскопия | 256 |
| 7.5.1. Растровая электронная микроскопия | 256 |
| 7.5.1.1. Выбор калибровочного образца для растровой электронной микроскопии | 258 |
| 7.5.2. Просвечивающая электронная микроскопия | 259 |
| 7.5.3. Прослеживаемость и калибровка просвечивающих электронных микроскопов | 260 |
| 7.5.3.1. Выбор калибровочного образца | 261 |
| 7.5.3.2. Линейная калибровка | 262 |
| 7.5.3.3. Локальная калибровка | 262 |
| 7.5.3.4. Эталонная сетка | 262 |
| 7.5.4. Исследование наночастиц при помощи электронной микроскопии | 263 |
| 7.6. Ионная микроскопия | 265 |
| 7.7. Список использованных источников | 266 |

Глава 8

| | |
|---|------------|
| ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ | 270 |
| 8.1. Введение | 270 |
| 8.2. Характеризация профиля поверхности | 271 |
| 8.2.1. Длина оценки | 272 |
| 8.2.2. Общее перемещение | 273 |
| 8.2.3. Фильтрация профиля | 273 |
| 8.2.3.1. Первичный профиль | 275 |
| 8.2.3.2. Профиль шероховатости | 276 |
| 8.2.3.3. Профиль волнистости | 276 |
| 8.2.4. Стандартные значения при характеризации профиля | 276 |
| 8.2.5. Основные параметры характеризации профиля | 277 |
| 8.2.5.1. Обозначения параметров профиля | 278 |
| 8.2.5.2. Неоднозначность параметров профиля | 279 |
| 8.2.6. Параметры амплитуды профиля (от пиков до впадин) | 279 |



| | | |
|------------|---|-----|
| 8.2.6.1. | Максимальная высота пика профиля R_p | 279 |
| 8.2.6.2. | Максимальная глубина долины профиля R_v | 279 |
| 8.2.6.3. | Максимальная высота профиля R_z | 280 |
| 8.2.6.4. | Средняя высота элементов профиля R_e | 281 |
| 8.2.6.5. | Общая высота поверхности R_t | 281 |
| 8.2.7. | Средние значения параметров профиля | 282 |
| 8.2.7.1. | Среднее арифметическое отклонение профиля R_a | 282 |
| 8.2.7.2. | Среднеквадратичное отклонение профиля R_q | 283 |
| 8.2.7.3. | Асимметрия профиля R_{sk} | 284 |
| 8.2.7.4. | Экссесс профиля R_{ku} | 285 |
| 8.2.8. | Параметры ширины элементов профиля | 286 |
| 8.2.8.1. | Средняя ширина элементов профиля R_{Sm} | 286 |
| 8.2.9. | Параметры кривых профиля | 287 |
| 8.2.9.1. | Относительная опорная длина профиля | 287 |
| 8.2.9.2. | Кривая относительной опорной длины профиля | 288 |
| 8.2.9.3. | Разница высот уровней сечения R_{dc} | 288 |
| 8.2.9.4. | Удельная опорная длина профиля R_{mr} | 289 |
| 8.2.9.5. | Кривая амплитуды высот профиля | 289 |
| 8.2.10. | Стандарты характеристики профиля | 291 |
| 8.3. | Характеризация трехмерной текстуры поверхности | 293 |
| 8.3.1. | Фильтрация изображения поверхности | 293 |
| 8.3.2. | Фильтрация трехмерной текстуры поверхности | 294 |
| 8.3.3. | Стандарты характеристики трехмерной текстуры поверхности | 298 |
| 8.3.4. | Единая система координат для характеристики текстуры и формы поверхности | 300 |
| 8.3.5. | Параметры характеристики трехмерной текстуры поверхности | 301 |
| 8.3.6. | Параметры целого изображения | 301 |
| 8.3.6.1. | Параметры высоты трехмерной текстуры поверхности | 301 |
| 8.3.6.1.1. | Среднеквадратичная высота поверхности S_q | 301 |
| 8.3.6.1.2. | Среднее арифметическое значение абсолютной высоты поверхности S_a | 302 |
| 8.3.6.1.3. | Асимметрия распределения высот S_{sk} | 302 |
| 8.3.6.1.4. | Экссесс распределения высот S_{ku} | 302 |
| 8.3.6.1.5. | Максимальная высота пиков поверхности S_p | 302 |



| | |
|---|-----|
| 8.3.6.1.6. Максимальная глубина долин поверхности S_v | 303 |
| 8.3.6.1.7. Максимальная высота поверхности S_z | 303 |
| 8.3.6.2. Пространственные параметры характеристики трехмерной текстуры поверхности | 303 |
| 8.3.6.2.1. Длина автокорреляции S_{al} | 303 |
| 8.3.6.2.2. Аспектное отношение текстуры поверхности S_{tr} | 304 |
| 8.3.6.3. Смешанные параметры трехмерной текстуры поверхности | 304 |
| 8.3.6.3.1. Среднеквадратичный градиент отфильтрованной поверхности S_{dq} | 305 |
| 8.3.6.3.2. Показатель развитости межфазных границ S_{dr} | 305 |
| 8.3.6.4. Функциональные параметры | 306 |
| 8.3.6.4.1. Относительная опорная площадь отфильтрованной поверхности $S_{mc}(c)$ | 306 |
| 8.3.6.4.2. Кривая относительной опорной площади отфильтрованной поверхности | 306 |
| 8.3.6.4.3. Обратная относительная опорная площадь отфильтрованной поверхности $S_{dc}(mr)$ | 307 |
| 8.3.6.4.4. Параметры характеристики стратифицированной функциональной отфильтрованной поверхности | 307 |
| 8.3.6.4.5. Объем пустот $V_v(mr)$ | 307 |
| 8.3.6.4.6. Объем материала $V_m(mr)$ | 308 |
| 8.3.6.4.7. Высота пиков S_{xp} | 308 |
| 8.3.6.4.8. Функция плотности градиента | 309 |
| 8.3.6.5. Вспомогательный параметр | 309 |
| 8.3.6.5.1. Направление текстуры отфильтрованной поверхности S_{td} | 309 |
| 8.3.7. Характеризация элементов поверхности | 310 |
| 8.3.7.1. Шаг 1. Выбор элементов поверхности | 310 |
| 8.3.7.2. Шаг 2. Сегментация | 310 |
| 8.3.7.2.1. Дерево изменений | 313 |
| 8.3.7.3. Шаг 3. Определение значимых элементов | 315 |
| 8.3.7.4. Шаг 4. Выбор признаков элементов | 316 |
| 8.3.7.5. Шаг 5. Определение количественных характеристик признаков элементов | 316 |
| 8.3.7.6. Параметры элементов | 317 |
| 8.3.7.6.1. Плотность пиков S_{pd} | 317 |
| 8.3.7.6.2. Средняя арифметическая кривизна пиков S_{pc} | 318 |

| | |
|--|-----|
| 8.3.7.6.3. Высота поверхности по десяти точкам $S10z$ | 318 |
| 8.3.7.6.4. Высота пиков по пяти точкам $S5p$ | 318 |
| 8.3.7.6.5. Глубина впадин по пяти точкам $S5v$ | 318 |
| 8.3.7.6.6. Площадь замкнутых долов $Sda(c)$ | 318 |
| 8.3.7.6.7. Площадь замкнутых холмов $Sha(c)$ | 318 |
| 8.3.7.6.8. Объем замкнутых долов $Sdc(c)$ | 319 |
| 8.3.7.6.9. Объем замкнутых холмов $Shv(c)$ | 319 |
| 8.4. Фрактальные методы | 319 |
| 8.4.1. Линейные фрактальные методы | 321 |
| 8.4.2. Фрактальный анализ трехмерной текстуры поверхности | 323 |
| 8.4.2.1. Анализ зависимости объем—масштаб | 324 |
| 8.4.2.2. Анализ зависимости площадь—масштаб | 324 |
| 8.5. Сравнение характеристик профиля и трехмерной текстуры поверхности | 327 |
| 8.6. Список использованных источников | 328 |

Глава 9

| | |
|---|-----|
| КООРДИНАТНАЯ МЕТРОЛОГИЯ | 333 |
| 9.1. Координатно-измерительные машины (КИМ) | 333 |
| 9.1.1. Зондовые системы КИМ | 336 |
| 9.1.2. Программное обеспечение КИМ | 337 |
| 9.1.3. Позиционирование | 337 |
| 9.1.4. КИМ и САПР | 338 |
| 9.1.5. Объекты геометрической и свободной формы | 338 |
| 9.1.6. Прочие типы КИМ | 339 |
| 9.2. Источники погрешности КИМ | 339 |
| 9.3. Прослеживаемость, калибровка и поверка КИМ | 340 |
| 9.3.1. Прослеживаемость КИМ | 341 |
| 9.4. КИМ малого диапазона | 343 |
| 9.4.1. Автономные КИМ малого диапазона | 344 |
| 9.4.1.1. КИМ малого диапазона со штриховой измерительной шкалой | 345 |
| 9.4.1.2. КИМ малого диапазона с лазерным интерферометром | 346 |
| 9.5. Зонды КИМ малого диапазона | 348 |
| 9.6. Калибровка КИМ малого диапазона | 355 |

| | |
|---|-----|
| 9.6.1. Калибровка КИМ малого диапазона с лазерным интерферометром | 357 |
| 9.6.2. Калибровка КИМ малого диапазона со штриховой измерительной шкалой | 358 |
| 9.7. Список использованных источников | 360 |

Глава 10

| | |
|---|------------|
| ИЗМЕРЕНИЯ СИЛ И МАСС | 365 |
| 10.1. Прослеживаемость традиционных измерений масс | 365 |
| 10.1.1. Изготовление Международного прототипа килограмма и его первичных копий | 366 |
| 10.1.2. Текстура поверхности эталонов массы | 367 |
| 10.1.3. Распространение эталона килограмма | 368 |
| 10.1.4. Стабильность эталонов килограмма после очистки | 368 |
| 10.1.5. Ограничения текущего определения килограмма | 369 |
| 10.1.6. Исследования в области альтернативных способов определения килограмма | 370 |
| 10.1.6.1. Использование ватт-весов | 372 |
| 10.1.6.2. Использование метода Авогадро | 372 |
| 10.1.6.3. Использование аккумуляции ионов | 373 |
| 10.1.6.4. Использование левитирующего сверхпроводника | 373 |
| 10.1.7. Компараторы массы | 373 |
| 10.1.7.1. Современные механические весы с двумя чашами | 374 |
| 10.1.7.2. Электронные весы | 374 |
| 10.2. Измерения малых масс | 375 |
| 10.2.1. Определение массы путем деления | 376 |
| 10.3. Измерения малых сил | 376 |
| 10.3.1. Сравнительные величины малых сил | 376 |
| 10.3.2. Прослеживаемость измерений малых сил | 378 |
| 10.3.3. Весы для измерения малых сил | 379 |
| 10.3.4. Эталоны сравнения для измерения малых сил | 380 |
| 10.3.4.1. Использование силоизмерительных машин | 381 |
| 10.3.4.2. Использование упругих элементов | 381 |
| 10.3.4.3. Использование малых электростатических весов | 385 |



| | |
|---|------------|
| 10.3.4.4. Использование резонансных методов | 386 |
| 10.3.4.5. Заключение | 387 |
| 10.4. Список использованных источников | 390 |
| | |
| Приложение А | |
| БАЗОВЫЕ ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ СИСТЕМЫ СИ | |
| И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ В NPL | 394 |
| | |
| Приложение Б | |
| ПРОИЗВОДНЫЕ ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ | |
| СИСТЕМЫ СИ | 397 |
| Примеры производных единиц системы СИ, | |
| выраженных через базовые единицы | 397 |
| Производные единицы системы СИ с собственными | |
| названиями и обозначениями | 398 |