

**Н. М. САФЬЯННИКОВ, О. И. БУРЕНЕВА,  
А. Н. АЛИПОВ**

# **ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*Учебное пособие  
Издание второе, стереотипное*



**ЛАНЬ**

• САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • МОСКВА • КРАСНОДАР •  
• 2024 •

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                      | 3  |
| 1. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ БАЗИС ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ<br>ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ .....      | 5  |
| 1.1. Общие вопросы, термины и определения .....                                     | 5  |
| 1.2. Модульный принцип построения измерительных средств .....                       | 5  |
| 1.3. Характеристики измерений .....                                                 | 7  |
| 1.4. Системы единиц физических величин .....                                        | 8  |
| 1.5. Внесистемные единицы физических величин .....                                  | 12 |
| 1.6. Относительные и логарифмические величины .....                                 | 14 |
| 1.7. Общие правила наименования и обозначения единиц .....                          | 15 |
| 1.8. Погрешности измерений физических величин .....                                 | 16 |
| 1.9. Характеристики качества средств измерений .....                                | 19 |
| 1.10. Оценка результатов измерений .....                                            | 19 |
| 2. КЛАССИФИКАЦИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ .....                                            | 23 |
| 2.1. Классификация по модульному принципу .....                                     | 23 |
| 2.2. Классификация по структурному принципу .....                                   | 24 |
| 2.3. Классификация по физической природе первичных информационных<br>сигналов ..... | 28 |
| 2.4. Классификация по способу и форме представления результата .....                | 30 |
| 2.5. Классификация по методу измерений .....                                        | 31 |
| 3. ФИЗИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ .....                                                         | 32 |
| 3.1. Типы чувствительных элементов .....                                            | 32 |
| 3.2. Резистивные сенсоры .....                                                      | 34 |
| 3.2.1 Терморезисторы .....                                                          | 34 |
| 3.2.2 Тензорезисторы .....                                                          | 35 |
| 3.2.3 Пьезорезисторы .....                                                          | 37 |
| 3.2.4 Магниторезисторы .....                                                        | 38 |
| 3.2.5 Фоторезисторы .....                                                           | 41 |
| 3.2.6 Гигристоры .....                                                              | 42 |
| 3.3. Емкостные сенсоры .....                                                        | 43 |
| 3.3.1. Сенсоры на основе эффекта изменения взаимного расположения<br>пластин .....  | 44 |
| 3.3.2. Сенсоры на основе эффекта изменения диэлектрической<br>проницаемости .....   | 45 |
| 3.4. Индуктивные сенсоры .....                                                      | 46 |
| 3.5. Вольтаические сенсоры .....                                                    | 49 |
| 3.5.1. Сенсоры на основе термо-ЭДС .....                                            | 49 |
| 3.5.2. Сенсоры на основе фотовольтаического эффекта .....                           | 50 |
| 3.5.3. Сенсоры на основе эффекта Холла .....                                        | 53 |
| 3.6. Пьезоэлектрические сенсоры .....                                               | 54 |
| 3.7. Оптические сенсоры .....                                                       | 55 |
| 3.8. Сенсоры на основе $p-n$ -перехода .....                                        | 57 |
| 4. ХИМИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ .....                                                         | 59 |
| 4.1. Электрохимические сенсоры .....                                                | 59 |
| 4.1.1. Потенциометрические сенсоры .....                                            | 62 |

|                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.2. Вольтамперометрические сенсоры .....                           | 63  |
| 4.1.3. Кондуктометрические сенсоры .....                              | 64  |
| 4.1.4. Кулонометрические сенсоры .....                                | 66  |
| 4.2. Электрические сенсоры .....                                      | 67  |
| 4.3. Оптические сенсоры .....                                         | 69  |
| 4.4. Термометрические сенсоры .....                                   | 72  |
| 4.4.1. Температурные сенсоры .....                                    | 73  |
| 4.4.2. Каталитические сенсоры .....                                   | 73  |
| 4.4.3. Сенсоры теплопроводности .....                                 | 74  |
| 5. ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ .....                                | 75  |
| 5.1. Типовые измерительные схемы .....                                | 75  |
| 5.2. Аналоговая элементная база промежуточных преобразователей .....  | 79  |
| 5.2.1. Операционные усилители .....                                   | 80  |
| 5.2.1.1. Понятие идеального ОУ .....                                  | 81  |
| 5.2.1.2. Характеристики операционных усилителей .....                 | 81  |
| 5.2.1.3. Варианты включения операционных усилителей .....             | 83  |
| 5.2.1.4. Суммирующие и вычитающие устройства .....                    | 85  |
| 5.2.1.5. Дифференцирующие и интегрирующие усилители .....             | 87  |
| 5.2.1.6. Программируемый усилитель .....                              | 89  |
| 5.2.2. Компаратор .....                                               | 90  |
| 5.2.3. Устройство выборки-хранения .....                              | 91  |
| 5.3. Цифро-аналоговые преобразователи .....                           | 93  |
| 5.3.1. ЦАП на переключаемых конденсаторах .....                       | 94  |
| 5.3.2. ЦАП с сеткой R – 2R .....                                      | 95  |
| 5.4. Аналого-цифровые преобразователи .....                           | 96  |
| 5.4.1. Характеристики АЦП .....                                       | 96  |
| 5.4.2. АЦП прямого уравнивания .....                                  | 99  |
| 5.4.3. АЦП последовательного приближения .....                        | 100 |
| 5.4.4. Дельта-сигма АЦП ( $\Delta$ - $\Sigma$ АЦП) .....              | 102 |
| 5.4.5. Выходные интерфейсы АЦП .....                                  | 103 |
| 6. ФИЗИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ .....                                           | 106 |
| 6.1. Датчики температуры .....                                        | 107 |
| 6.1.1. Датчик температуры без обработки сигнала .....                 | 107 |
| 6.1.2. Датчики температуры с аналоговым выходом .....                 | 108 |
| 6.1.3. Датчики температуры с квази-цифровым и цифровым выходами ..... | 110 |
| 6.2. Датчики параметров положения и механического перемещения .....   | 111 |
| 6.2.1. Датчики уровня .....                                           | 111 |
| 6.2.1.1. Датчики уровня без обработки сигнала .....                   | 112 |
| 6.2.1.2. Датчики уровня с аналоговым выходом .....                    | 114 |
| 6.2.1.3. Датчики уровня с цифровым выходом .....                      | 116 |
| 6.2.2. Датчики положения .....                                        | 117 |
| 6.2.2.1. Датчик положения без обработки сигнала .....                 | 117 |
| 6.2.2.2. Датчик положения с аналоговым выходом .....                  | 118 |
| 6.2.2.3. Датчик положения с цифровым выходом .....                    | 119 |
| 6.2.3. Датчики угла .....                                             | 120 |
| 6.2.3.1. Датчик угла без обработки сигнала .....                      | 120 |
| 6.2.3.2. Датчик угла с аналоговым выходом .....                       | 120 |
| 6.2.3.3. Датчики угла с квазидигитальным выходом .....                | 121 |
| 6.2.3.4. Датчики угла с цифровым выходом .....                        | 122 |

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.3. Датчики давления .....                                                                         | 123 |
| 6.3.1. Датчик давления без обработки сигнала .....                                                  | 123 |
| 6.3.2. Датчик давления с аналоговым выходом .....                                                   | 124 |
| 6.3.3. Датчик давления с цифровым выходом .....                                                     | 125 |
| 6.4. Датчики цвета .....                                                                            | 126 |
| 6.4.1. Датчики цвета с аналоговым выходом .....                                                     | 126 |
| 6.4.2. Датчики цвета с цифровым выходом .....                                                       | 127 |
| 7. ХИМИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ .....                                                                         | 128 |
| 7.1. Электрохимические датчики .....                                                                | 129 |
| 7.2. Электрические датчики .....                                                                    | 133 |
| 7.3. Оптические датчики .....                                                                       | 134 |
| 7.4. Термометрические датчики .....                                                                 | 135 |
| 8. МИКРОСИСТЕМНЫЕ ДАТЧИКИ .....                                                                     | 137 |
| 8.1. Микросистемные датчики физических величин .....                                                | 137 |
| 8.2. МЭМС-датчики .....                                                                             | 140 |
| 8.2.1. МЭМС-акселерометры .....                                                                     | 140 |
| 8.2.2. МЭМС-гироскопы .....                                                                         | 143 |
| 8.2.3. Мультисенсорные модули .....                                                                 | 145 |
| 8.3. Микрооптические электронные датчики .....                                                      | 147 |
| 8.4. Микросистемные химические датчики .....                                                        | 148 |
| 8.5. Биосенсоры .....                                                                               | 150 |
| 9. ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....                                        | 152 |
| 9.1. Базовые элементы цифровых модулей .....                                                        | 152 |
| 9.2. Комбинационные схемы .....                                                                     | 153 |
| 9.2.1. Схемы с памятью .....                                                                        | 154 |
| 9.2.2. Пример проектирования цифрового модуля для датчика с характеристикой квадратного корня ..... | 158 |
| 10. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....                              | 164 |
| 10.1. Микроконтроллеры .....                                                                        | 164 |
| 10.2. Структура измерительной системы на базе микроконтроллера .....                                | 169 |
| 10.3. Разработка программного обеспечения для микроконтроллера .....                                | 171 |
| 10.4. Пример разработки измерительной системы на базе микроконтроллера .....                        | 174 |
| 11. МИКРОСИСТЕМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ .....                                 | 183 |
| 11.1. Обзор элементной базы .....                                                                   | 183 |
| 11.1.1. Программируемые логические интегральные схемы .....                                         | 183 |
| 11.1.2. Программируемые системы на кристалле .....                                                  | 187 |
| 11.1.2.1. Процессорные ядра фирмы Xilinx .....                                                      | 190 |
| 11.1.2.2. Процессорные ядра фирмы Intel FPGA .....                                                  | 192 |
| 11.1.2.3. Программируемые схемы с аналоговыми элементами .....                                      | 193 |
| 11.2. Проектирование цифровых преобразователей интеллектуальных датчиков на ПЛИС .....              | 195 |

|                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 11.2.1. Системы автоматизированного проектирования.....                                                  | 195 |
| 11.2.2. Языки проектирования аппаратуры.....                                                             | 196 |
| 11.2.3. Средства конфигурирования.....                                                                   | 200 |
| 11.2.4. Основные этапы проектирования.....                                                               | 201 |
| 11.3. Проектирование цифровых блоков на ПЛИС в САПР Quartus II .....                                     | 203 |
| 11.3.1. Разработка специализированного измерительного прибора на ПЛИС ....                               | 204 |
| 11.3.2. Разработка процессорной измерительной системы на ПЛИС.....                                       | 216 |
| 11.3.3. Разработка измерительно-вычислительного комплекса на ПЛИС .....                                  | 219 |
| 11.3.4. Разработка измерительно-вычислительного комплекса на базе<br>СнК с аналоговыми компонентами..... | 221 |
| Список литературы .....                                                                                  | 224 |