

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Пензенский государственный университет» (ПГУ)

---

Н. К. Юрков

## Технология радиоэлектронных средств

Допущено Министерством образования и науки  
Российской Федерации в качестве учебника  
для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по специальности 210201  
«Проектирование и технология РЭС»

Пенза  
Издательство ПГУ  
2012

УДК 621.396.69.002  
Ю75

**Р е ц е н з е н т ы:**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
«Микрорадиоэлектроника и технология радиоаппаратуры»  
Санкт-Петербургского государственного технического университета (ЛЭТИ),  
заслуженный деятель науки РФ  
*И. Г. Мироненко;*

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
«Проектирование и технология производства электронной аппаратуры»  
Московского государственного технического университета  
им. Н. Э. Баумана, член-корреспондент РАН  
*В. А. Шахнов;*

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
«Информационные средства и технологии»  
Самарского государственного аэрокосмического университета  
им. С. П. Королева, заслуженный работник высшей школы РФ  
*С. А. Прохоров*

**Юрков, Н. К.**

Ю75      Технология радиоэлектронных средств : учеб. / Н. К. Юрков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – 640 с.  
ISBN 978-5-94170-428-6

Учебник посвящен вопросам технологии производства радиоаппаратуры для радиосвязи, радиовещания, телевидения, радиолокации, радионавигации и других направлений науки и техники. Наиболее общим названием изделий радиоэлектроники, рекомендованным в стандартах, является термин «радиоэлектронное средство» (РЭС), понимаемый как техническое изделие определенной сложности или его составная часть, в основу действия которого положены принципы радиотехники и электроники. Разделы учебника изложены весьма подробно и логично, основываются на глубоком знании электроники, радиотехники, системотехники, физико-химических положений технологии РЭС. По своей структуре, содержанию и объему учебник соответствует примерной рабочей программе курса «Технология радиоэлектронных средств».

Издание подготовлено на кафедре «Конструирование и производство радиоаппаратуры» и рекомендуется в качестве учебника для студентов специальности 210201 «Проектирование и производство РЭС» и может быть полезно для студентов родственных специальностей.

**УДК 621.396.69.002**

**ISBN 978-5-94170-428-6**

© Юрков Н. К., 2012

© Пензенский государственный университет, 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |     |
|--|-----|
| СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ .....   | 8   |
| ПРЕДИСЛОВИЕ.....   | 12  |
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 13  |
| ГЛАВА 1. ЕДИНАЯ СИСТЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ<br>ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА.....                      | 18  |
| 1.1. Структура технологических процессов.<br>Цели и задачи ЕСТПП.....                        | 18  |
| 1.2. Технологическая подготовка производства .....   | 24  |
| 1.3. Средства выполнения технологических процессов.....                                      | 26  |
| 1.4. Требования ЕСТПП к технологическим процессам.....                                       | 28  |
| ГЛАВА 2. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ<br>СИСТЕМ.....                                    | 35  |
| 2.1. Основные понятия и определения в теории<br>и практике производственных технологий ..... | 35  |
| 2.2. Иерархический подход в конструировании<br>и технологии радиоэлектронных средств.....    | 41  |
| 2.3. Особенности радиоэлектронных средств .....  | 45  |
| 2.4. Технология радиоэлектронных средств<br>как сложная система .....                        | 47  |
| 2.5. Основные направления развития технологии<br>радиоэлектронных средств.....               | 59  |
| 2.6. Построение ТП в зависимости от типа производства .....                                  | 61  |
| 2.7. Классификация технологических процессов .....   | 63  |
| 2.8. Этапы разработки технологических процессов .....  | 66  |
| 2.8.1. Основные понятия проектирования технологии.....                                       | 66  |
| 2.8.2. Выбор структуры технологической системы<br>по экономическим показателям .....         | 69  |
| 2.8.3. Этапы разработки частного технологического процесса...                                | 80  |
| 2.8.4. Конструкторско-технологическая система обозначения<br>технологических документов..... | 97  |
| 2.9. Анализ и расчет технологичности конструкции изделия .....                               | 102 |
| 2.9.1. Основные показатели технологичности.....  | 102 |
| 2.9.2. Общая классификация технологичности конструкции<br>изделия.....                       | 110 |
| 2.9.3. Взаимосвязь видов технологичности конструкции<br>изделия.....                         | 117 |

|  |            |
|--|------------|
| 2.9.4. Этапы отработки конструкции на технологичность .....  | 121        |
| 2.9.5. Показатели технологичности радиоэлектронных средств, характеризующие конструкцию .....                        | 129        |
| 2.9.6. Показатели технологичности радиоэлектронных средств, характеризующие технологию изготовления изделий .....    | 131        |
| 2.9.7. Базовые показатели и уровень технологичности конструкции радиоэлектронных средств .....                       | 132        |
| 2.9.8. Показатели технологичности конструкций узлов и блоков радиоэлектронных средств .....                          | 135        |
| 2.9.9. Пути повышения уровня технологичности .....   | 137        |
| 2.10. Устойчивость технологического процесса .....   | 139        |
| 2.11. Структура жизненного цикла радиоэлектронных средств длительного функционирования .....                         | 142        |
| <b>ГЛАВА 3. ТЕХНОЛОГИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ .....</b>   | <b>145</b> |
| 3.1. Классификация печатных плат, области применения .....   | 145        |
| 3.2. Материалы печатных оснований.....   | 151        |
| 3.2.1. Требования к материалам печатных оснований .....  | 151        |
| 3.2.2. Конструктивно-технологическая характеристика ПП.....  | 153        |
| 3.3. Фоторезисты .....   | 161        |
| 3.4. Диазопирование .....  | 165        |
| 3.5. Методы изготовления одно- и двусторонних печатных плат .....  | 167        |
| 3.6. Особенности производства многослойных печатных плат ....  | 177        |
| 3.6.1. Получение внутренних слоев печатных плат .....  | 177        |
| 3.6.2. Метод ПАФОС .....   | 182        |
| 3.6.3. Получение наружных слоев печатных плат.....   | 184        |
| 3.6.4. Паяльные маски для наружных слоев печатных плат.....  | 190        |
| 3.7. Выбор технологических методов в производстве печатных плат .....  | 192        |
| 3.7.1. Особенности прессования многослойных плат .....   | 194        |
| 3.7.2. Производство многослойных печатных плат с межслойными соединениями, выполненными механическими деталями ..... | 200        |
| 3.7.3. Метод металлизации сквозных отверстий .....   | 200        |
| 3.7.4. Метод попарного прессования .....   | 213        |
| 3.8. Перспективные и новые технологии производства печатных плат .....   | 220        |
| 3.8.1. Прямая металлизация .....   | 220        |
| 3.8.2. Гибкие печатные платы.....  | 221        |

|  |            |
|--|------------|
| 3.8.3. Полиимидные платы .....   | 229        |
| 3.8.4. Платы алюминиевые с анодированием .....                                 | 231        |
| 3.8.5. Керамические платы .....  | 232        |
| 3.8.6. Металлические платы .....   | 233        |
| 3.8.7. Печатные платы на металлических основаниях .....                        | 237        |
| 3.8.8. Материалы и конструкции оснований ППМ .....                             | 239        |
| 3.8.9. Конструкции гибких схем .....   | 246        |
| 3.8.10. Технологии получения микроотверстий .....                              | 253        |
| 3.9. Нанесение влагозащитных покрытий .....                                    | 257        |
| <b>ГЛАВА 4. МЕТОДЫ ВЫПОЛНЕНИЯ МОНТАЖНЫХ<br/>СОЕДИНЕНИЙ.....</b>                | <b>275</b> |
| 4.1. Технология жгутового монтажа .....  | 275        |
| 4.2. Технология накрутки .....   | 283        |
| 4.3. Пайка монтажных соединений.....   | 287        |
| 4.3.1. Пайка: определение, физическая сущность процесса .....                  | 287        |
| 4.3.2. Факторы, определяющие смачиваемость и паяемость<br>печатных плат .....  | 307        |
| 4.3.3. Групповая пайка элементов с радиальными выводами.....                   | 308        |
| 4.3.4. Пайка алюминия и его сплавов .....                                      | 318        |
| 4.3.5. Методы пайки компонентов.....   | 329        |
| 4.3.6. Пайка в инертной атмосфере .....  | 333        |
| 4.3.7. Пайка бессвинцовыми припоями .....                                      | 336        |
| 4.3.8. Пайка конструкционных материалов .....                                  | 345        |
| 4.4. Поверхностный монтаж радиоэлектронных средств .....                       | 348        |
| 4.4.1. Основные понятия и определения .....                                    | 348        |
| 4.4.2. Компоненты и корпуса .....  | 352        |
| 4.4.3. Способы упаковки компонентов.....                                       | 360        |
| 4.4.4. Выбор адгезивов .....   | 368        |
| 4.5. Технология клеевых соединений.....  | 370        |
| 4.5.1. Применение клеев в производстве радиоэлектронных<br>средств .....       | 370        |
| 4.5.2. Применение термостойких клеев.....                                      | 374        |
| 4.5.3. Быстрохватывающиеся клеи для сборки изделий<br>на печатных платах ..... | 376        |
| 4.5.4. Клеи в тензометрии .....  | 379        |
| 4.5.5. Клеи для магнитопроводов.....   | 380        |
| 4.6. Монтаж ткаными устройствами коммутации .....                              | 381        |

|  |            |
|--|------------|
| 4.7. Стежковый монтаж радиоэлектронных средств .....   | 384        |
| <b>ГЛАВА 5. МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ .....</b>   | <b>388</b> |
| 5.1. Расчет размерных цепей.....   | 388        |
| 5.2. Методика расчета размерных цепей .....  | 399        |
| 5.3. Схемы базирования различных геометрических тел .....  | 402        |
| 5.4. Производственные погрешности, причины возникновения, законы распределения .....                                   | 410        |
| 5.4.1. Прочность обработки. Производственные погрешности ..  | 414        |
| 5.5. Влияние шероховатости поверхностей на точность изделия .  | 417        |
| 5.6. Аналитический метод расчета ожидаемой точности обработки .....  | 420        |
| 5.7. Технологические процессы и качество. Влияние технологии производства на надежность радиоэлектронных средств ..... | 424        |
| 5.8. Защита радиоэлектронных средств от воздействия климатических факторов .....                                       | 446        |
| <b>ГЛАВА 6. СУЩНОСТЬ И ОСОБЕННОСТИ СБОРКИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ .....</b>   | <b>459</b> |
| 6.1. Анализ точности сборочного соединения.....  | 459        |
| 6.1.1. Основные понятия теории точности .....  | 459        |
| 6.1.2. Систематические и случайные погрешности.....  | 460        |
| 6.2. Схемы сборки радиоэлектронных средств .....   | 466        |
| 6.2.1. Правила построения сборочной операции .....   | 473        |
| 6.2.2. Согласование ТП сборки по организационным формам ...  | 477        |
| 6.3. Виды механических соединений .....  | 479        |
| 6.3.1. Разъемные и неразъемные механические соединения.....  | 479        |
| 6.3.2. Требования, предъявляемые к соединениям.....  | 483        |
| 6.3.3. Соединения расклепыванием и развальцовкой .....   | 484        |
| 6.3.4. Соединения с помощью цапф (выступов) .....  | 491        |
| 6.4. Виды неисправностей радиоэлектронных средств и методы их устранения.....  | 494        |
| 6.4.1. Классификация дефектов радиоэлектронных средств .....   | 496        |
| 6.4.2. Испытания радиоэлектронных средств. Испытания как основная форма контроля .....                                 | 499        |
| 6.4.3. Испытания радиоэлектронных средств на механические воздействия .....  | 513        |

|   |            |
|---|------------|
| 6.4.4. Испытания радиоэлектронных средств<br>на климатические воздействия .....   | 519        |
| 6.4.5. Виды дефектов и способы их обнаружения .....   | 523        |
| 6.4.6. Описание стадий пайки и их связь с рентгеновскими<br>изображениями .....   | 526        |
| 6.5. Непаяные соединения, выполняемые запрессовкой –<br>новый класс соединений на российском рынке<br>электронной техники ..... | 532        |
| <b>ГЛАВА 7. КОНТРОЛЬ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ.....</b>   | <b>547</b> |
| 7.1. Системы технического контроля при производстве<br>радиоэлектронных средств .....   | 547        |
| 7.1.1. Понятия технического контроля и основная<br>терминология .....   | 547        |
| 7.1.2. Виды технического контроля.....  | 549        |
| 7.1.3. Основные показатели контроля .....   | 552        |
| 7.1.4. Методика выбора средств контроля и испытаний.....  | 559        |
| 7.1.5. Технологическая регулировка и настройка<br>радиоэлектронных средств .....  | 560        |
| 7.2. Методы тестирования печатных плат.<br>Выбор стратегии контроля.....  | 568        |
| 7.2.1. Взаимосвязь показателей контролепригодности<br>с характеристиками радиоэлектронных средств .....                         | 585        |
| 7.3. Оптические методы контроля в производстве<br>печатных плат .....   | 598        |
| 7.4. Наладка радиоэлектронных средств .....   | 603        |
| 7.5. Основные понятия поиска неисправностей.....  | 613        |
| 7.5.1. Классификация дефектов радиоэлектронных средств .....  | 615        |
| 7.6. Математические модели – основа решения<br>задач диагностирования .....   | 618        |
| 7.7. Основы моделирования конструкций и технологических<br>процессов производства радиоэлектронных средств .....                | 621        |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>  | <b>634</b> |
| <b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>   | <b>636</b> |