

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 ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА.....	18
1.1. Структура технологических процессов. 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 СИСТЕМ.....	35
2.1. Основные понятия и определения в теории и практике производственных технологий .....	35
2.2. Иерархический подход в конструировании и технологии радиоэлектронных средств.....	41
2.3. Особенности радиоэлектронных средств .....	45
2.4. Технология радиоэлектронных средств как сложная система .....	47
2.5. Основные направления развития технологии 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 по экономическим показателям .....	69
2.8.3. Этапы разработки частного технологического процесса...	80
2.8.4. Конструкторско-технологическая система обозначения 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 изделия.....	110
2.9.3. Взаимосвязь видов технологичности конструкции 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 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 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 средств .....	370
4.5.2. Применение термостойких клеев.....	374
4.5.3. Быстротвердеющие клеи для сборки изделий 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 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 изображениями .....	526
6.5. Непаяные соединения, выполняемые запрессовкой – новый класс соединений на российском рынке электронной техники .....	532
<b>ГЛАВА 7. КОНТРОЛЬ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>547</b>
7.1. Системы технического контроля при производстве радиоэлектронных средств .....	547
7.1.1. Понятия технического контроля и основная 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 радиоэлектронных средств .....	560
7.2. Методы тестирования печатных плат. Выбор стратегии контроля .....	568
7.2.1. Взаимосвязь показателей контролепригодности с характеристиками радиоэлектронных средств .....	585
7.3. Оптические методы контроля в производстве 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 задач диагностирования .....	618
7.7. Основы моделирования конструкций и технологических процессов производства радиоэлектронных средств .....	621
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>634</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>636</b>