

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.391.63.029.6

**В. А. АРЖАНОВ  
А. А. БЕЛОУСОВ  
Д. В. САПОЖНИКОВ  
Д. В. ФЁДОРОВ**

Омский государственный  
технический университет

## СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ АНАЛОГОВАЯ ЛИНИЯ СВЯЗИ СВЧ ДИАПАЗОНА

Рассмотрены возможности создания сверхширокополосных аналоговых линий связи диапазона СВЧ с использованием методов и средств радиофотоники. Приведены характеристики аналоговых волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Показана реализация специализированных аналоговых ВОЛС.

**Ключевые слова:** аналоговая линия передачи, аналоговый сигнал, ВОЛС, лазер, СВЧ.

В последние десятилетия волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) получили широкое распространение в самых различных областях науки и техники, и прежде всего, в области телекоммуникаций.

Области практического применения ВОЛС чрезвычайно широки. В зависимости от протяженности они условно делятся на объектовые протяженностью от 1 до 100 м (внутриобъектовые), городские протяженностью до 50–100 км (межгородские протяженностью до 200–300 км, зонавые) и магистральные протяженностью свыше 300 км [1].

Необходимо отметить, что в подавляющем большинстве случаев используются цифровые ВОЛС. Но существует ряд технических задач, для решения которых необходимы аналоговые ВОЛС, например, для передачи аналоговых сверхширокополосных СВЧ сигналов (от 0 до 40 ГГц) на расстояния до нескольких десятков метров и более. Использование в данном случае «классических» коаксиальных кабелей не представляется возможным из-за больших потерь в таких кабелях. Например, у одного из лучших коаксиальных кабелей типа LL160

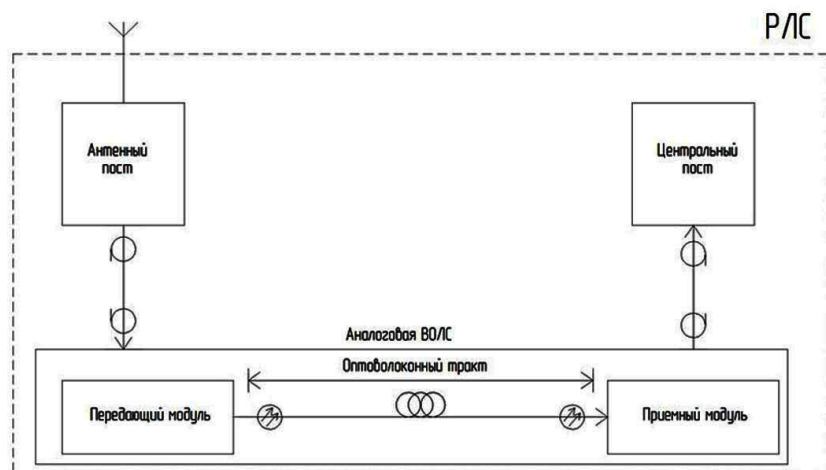


Рис. 1. Структурная схема РЛС с использованием ВОЛС

производства фирмы Harbour Industries [2] погонные потери на частоте 40 ГГц составляют примерно 2,4 дБ/м. Следовательно, потери в линии длиной 100 м, реализованной с использованием такого кабеля, на частоте 40 ГГц составят порядка 240 дБ, что на практике невозможно компенсировать даже самыми маломощными усилителями. Поэтому для решения именно таких технических задач и может быть использована аналоговая ВОЛС.

По сравнению с другими линиями связи ВОЛС имеют ряд преимуществ:

- широкая полоса пропускания: от постоянно тока до 110 ГГц и выше;
- высокая помехозащищенность;
- низкие погонные потери: от 0,2 до 3,8 дБ/км;
- отсутствие проблем с электромагнитной совместимостью;
- дальность передачи сигналов до 70 км, а при использовании оптического волокна со смещенной ненулевой дисперсией длина ВОЛС может достигать 150 км;
- высокое качество передаваемого сигнала;
- длительный срок эксплуатации: более 25 лет;
- малый вес и объем;
- взрыво-пожаробезопасность;
- экономичность (в настоящее время стоимость оптического волокна и медной пары соотносится как 2:5).

Недостатками ВОЛС на сегодняшний день являются:

- подверженность волоконных световодов радиации, за счет которой появляются пятна затемнения, возрастает затухание (но существуют и радиационно-стойкие волокна, которые имеют более высокую стоимость);
- дороговизна приемопередающего оборудования для ВОЛС;
- потребность в специальном оборудовании и инструменте;
- требования специальной защиты волокна.

Однако преимущества, получаемые от замены традиционных «медных» линий на ВОЛС, настолько значительны, что, несмотря на перечисленные выше недостатки, ВОЛС все шире используются для передачи аналоговых сигналов.

В аналоговых, как и в цифровых ВОЛС, в основном используют прямую модуляцию и внешнюю [3].

Принцип прямой модуляции заключается в следующем: на вход лазерного диода с прямой модуляцией поступает СВЧ сигнал, который модулирует выходной оптический сигнал лазерного диода. Промодулированный оптический сигнал по оптоволоконной линии передается на приемный оптоэлектронный модуль, в котором преобразуется в СВЧ сигнал.

Принцип внешней модуляции заключается в том, что на электрооптический модулятор с полупроводникового лазерного модуля поступает оптический сигнал, который модулируется входным СВЧ сигналом. Промодулированный оптический сигнал по оптоволоконной линии передается на приемный оптоэлектронный модуль, в котором преобразуется в СВЧ сигнал.

ВОЛС с прямой модуляцией имеет ряд недостатков по сравнению с ВОЛС с внешней модуляцией. Самыми существенными недостатками являются ограниченная полоса пропускания [4] и значительные нелинейные искажения передаваемого сигнала [5].

Поэтому при реализации специализированных аналоговых систем с диапазоном рабочих частот до 40 ГГц и выше рекомендуется использовать внешнюю модуляцию.

На рис. 1 представлена структурная схема пассивной РЛС, в которой принимаемый антенным постом сигнал передается на центральный пост при помощи аналоговой ВОЛС. Потенциальный диапазон рабочих частот данной аналоговой ВОЛС, в отличие от коаксиальной линии, может достигать нескольких десятков и даже сотен гигагерц при малых потерях (до 0 дБ).

Необходимо отметить, что в аналоговых ВОЛС СВЧ имеет место взаимодействие оптических и СВЧ сигналов. Изучением таких взаимодействий занимается относительно новая область науки и техники — радиофотоника (зарубежный аналог — микроволновая фотоника [3]). Использование методов и средств радиофотоники не ограничивается только аналоговыми ВОЛС.

Так, например, на рис. 2 приведена схема структурная радиофотонного мгновенного волномера (или мгновенного измерителя частоты) с использованием решетки Брэгга. Методы и средства радио(микроволновой) фотоники могут использоваться для создания и других аналоговых процессоров

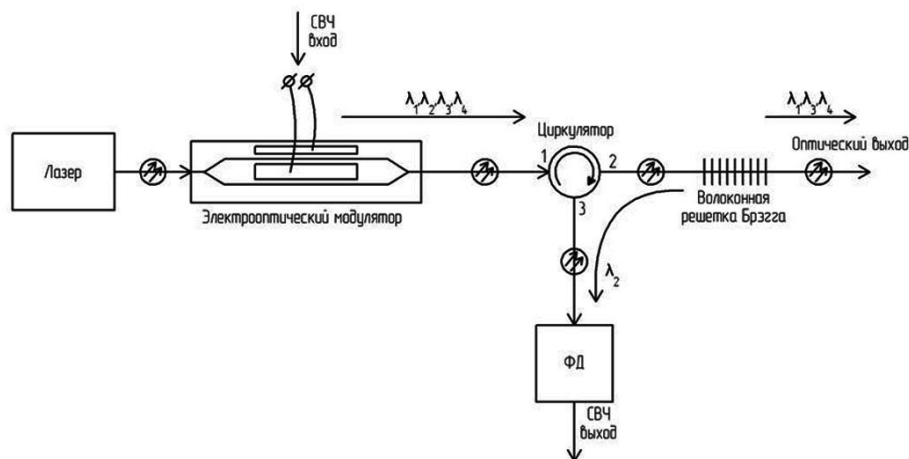


Рис. 2. Структурная схема мгновенного определения частоты с использованием решетки Брэгга

Таблица 1

Параметр	Мин.	Сред.	Макс.	Ед. измер.	
Длина волны излучения	ДМПО155-21	1,52	1,55	1,57	мкм
Ширина огибающей спектра			6	нм	
Ток накачки лазерного диода	25	50	70	мА	
Оптическая мощность на выходе ВОК	1	5		мВт	
Фототок встроенного фотодиода	20			мкА	
Напряжение встроенного фотодиода	4,5	5,0	5,5	В	
Диапазон частот модуляции	0,1		6000	МГц	
Коэффициент передачи *	-35	-25		дБ	
Относит. интенсивность шума RIN *			-140	дБ/Гц	
Сопротивление терморезистора		22,5		кОм	
Макс. ток микроохладителя		1,0		А	
Макс. напряжение микроохладителя		7,0		В	

СВЧ, а также СВЧ автогенераторов с рекордными характеристиками по уровню фазовых шумов, сверхширокополосных АЦП диапазона СВЧ, защитных устройств для входных трактов приемных устройств [3] и других устройств СВЧ с более высокими характеристиками, чем у традиционных, чисто «электронных» устройств.

Более подробно рассмотрим технические характеристики двух видов модуляции: прямой и внешней.

Для примера ВОЛС с прямой модуляцией разберем разработку фирмы НПФ «Дилаз», состоящей из передающего модуля ДМПО155-21 (технические характеристики приведены в табл. 1) и фотодетектора ДФДМШ40-16 (технические характеристики приведены в табл. 2, предельные значения в табл. 3).

Модуль ДМПО155-21 (рис. 3) предназначен для использования в СВЧ аналоговых и цифровых линиях связи, антенных решетках, радиолокационных устройствах, волоконно-оптических линиях задержки и т.д.

Конструктивно модуль выполнен в прямоугольном корпусе с 8-ю электрическими выводами, ВЧ электрическим соединителем СРГ-50-751ФВ, кабельным одномодовым волоконным выходом, оканчивающимся оптическим разъемом типа FC/APC с малым уровнем обратного отражения излучения.

В состав модуля входят: фотодиод обратной связи, микроохладитель, терморезистор, используемые для стабилизации оптических и электрических параметров лазерного диода, ВЧ плата согласования

Модель	Фоточувствительная площадка, мкм	Спектральная чувствительность, А/Вт		Темновой ток, нА		Неравномерность АЧХ, дБ	Полоса пропускания (-3 дБ, 50 Ом), ГГц		Обратные оптические потери, дБ
		1300 нм	1550 нм	мин	макс		мин	макс	
		тип	тип			тип			макс
ДФДШМ40-16	40	0,3*	0,35*	10	50	±2	0,01	16	-45

Таблица 3

Параметр	Значение
Напряжение обратного смещения	20 В
Обратный фототок	4 мА
Прямой ток	5 мА
Рабочая температура	-40... +60 °С
Температура хранения	-40... +70 °С

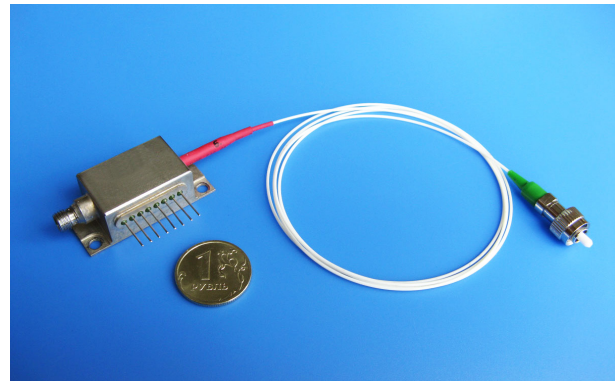


Рис. 3. Модуль ДМПО155-21 с оптическим волокном диаметром 0,9 мм

(50 Ом входной импеданс) для передачи информационного сигнала от электрического ВЧ соединителя к лазерному диоду с узлом развязки по постоянной и переменной составляющим тока накачки лазерного диода. Нарботка на отказ составляет не менее 50 000 часов. Диапазон рабочих температур минус 40... +60 °С.

Микроволновый InGaAs PIN фотодетектор ДФДШМ40-16 (рис. 4) разработан для прямого преобразования оптических импульсов пикосекундного диапазона и оптических сигналов с высокочастотной модуляцией до 16 ГГц в электрический выходной сигнал. Конструкция фотодетектора ДФДШМ40-16 содержит встроенный 50 Ом широкополосный согласующий резистор, эффективно сглаживающий частотную характеристику фотоприемника и обеспечивающий низкую величину КВСН во всём рабочем частотном диапазоне. ДФДШМ40-16 чувствителен на 1300 нм и 1550 нм. Оптический разъём типа FC/APC применяется для устранения обратного отражённого оптического сигнала для улучшения отношения С/Ш особенно в СВЧ-аналоговых линиях передачи данных. Вывод электрического сигнала — через малогабаритный СВЧ-разъём, напряжение смещения подаётся на фотодиод через встроенный фильтр питания.

Достоинства при использовании прямой модуляции в аналоговой ВОЛС:

- дешевизна (нет дополнительных затрат на дополнительный излучающий диод, дополнительные соединения);
- простота изготовления.

Также при использовании прямой модуляции существуют и недостатки:

- узкая полоса пропускания до 20 ГГц;
- большие уровни шумов, примерно от 30 до 50 дБ;
- необходимо постоянно поддерживать температуру;

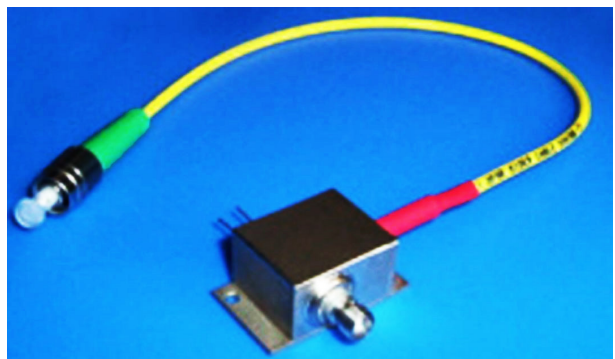


Рис. 4. Фотодетектор ДФДМШ40-16

— большой потребляемый ток элементом охлаждения (элемент Пельтье).

Для примера ВОЛС с внешней модуляцией разберем систему состоящей из:

- лазера Oclaro TL5000DCJ;
- модулятора GigOptix LX8901;
- фотодетектора U<sup>2</sup>t XPDV3120R;
- усилитель СВЧ В&Z ВZ-00104000-500827-252525.

Краткие технические характеристики элементов ВОЛС с внешней модуляцией, представлены в табл. 4.

Результаты измерений спроектированной ВОЛС приведены на рис. 5–7. Для компенсации потерь использовался усилитель СВЧ В&Z ВZ-00104000-500827-252525 [6].

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- использование методов и средств радио-(микроволновой) фотоники позволяет:

Наименование	Рабочая длина волны, нм	Рвых.опт., дБм	Рвх.опт., дБм	Диапазон частот СВЧ (по -3дБ), ГГц
Лазер Oclaro TL5000DCJ	1528 – 1563	+13	–	–
Модулятор GigOptix LX8901	1528 – 1610	–	+13	до 60
Фотодетектор U <sup>2</sup> t XPDV3120R	1480 – 1620	–	+13	до 75
Усилитель СВЧ B&Z BZ-00104000-500827-252525	–	–	–	до 40

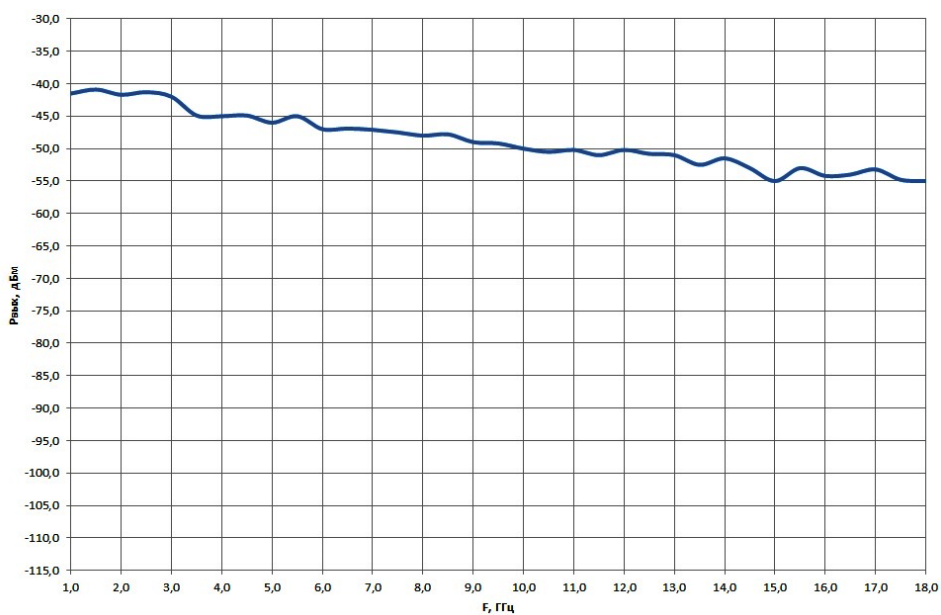


Рис. 5. АЧХ 1-18 ГГц линии ВОЛС с внешней модуляцией (Рвх = -49дБм)

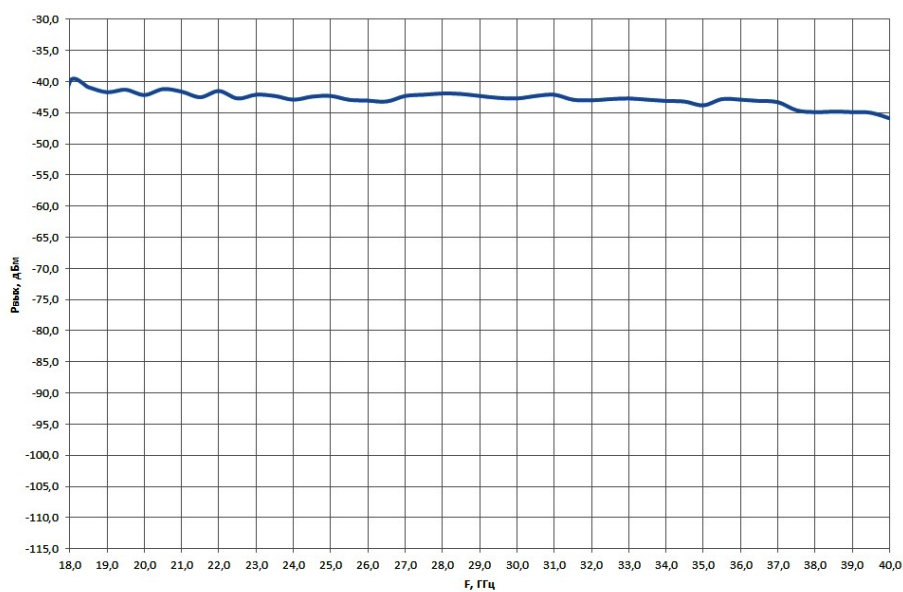


Рис. 6. АЧХ 18-40 ГГц линии ВОЛС с внешней модуляцией (Рвх = -49дБм)

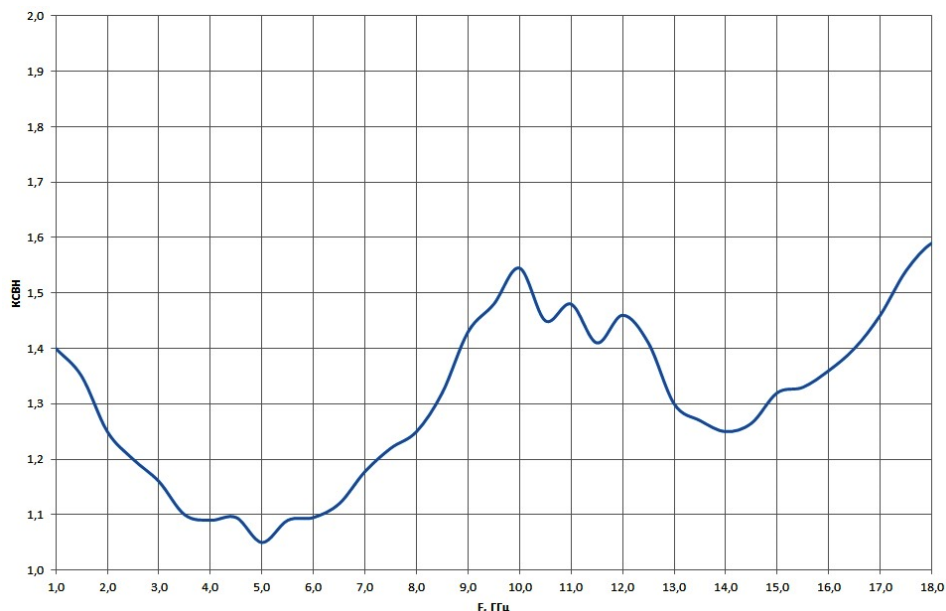


Рис. 7. КСВН до 20 ГГц

а) создавать сверхширокополосные линии передачи аналоговых СВЧ сигналов в виде ВОЛС с более высокими характеристиками, чем у традиционных «медных» линий передачи. Данные ВОЛС наиболее целесообразно использовать в качестве бортовых линий связи летательных аппаратов самолетов и вертолетов;

б) создавать новые изделия с качественно более высокими электрическими параметрами и новыми функциональными возможностями.

Поэтому необходимость проведения поисковых работ по исследованию потенциальных возможностей радиопотонных устройств СВЧ очевидна.

#### Библиографический список

1. Винсент, У. Дж.-мл. Основы микроволновой фотоники / У. Винсент Дж.-мл., Д. МакКинни Джейсон, Дж. Вильямс Кейт. — М.: Техносфера, 2016. — 376 с. — ISBN 978-5-94836-445-2.
2. Harbour Industries. — Режим доступа : <http://www.harbourind.com>. — Загл. с экрана (дата обращения: 30.05.2016).
3. Кривальцевич, С. В. Современные проблемы радиопроизики и радиотехники : сб. докл. науч.-техн. семинара / С. В. Кривальцевич ; отв. ред. С. В. Кривальцевич. — Вып. 1. — Омск : Изд-во ОНИИП. — 2012. — 96 с.
4. 22-GHz Modulation Bandwidth of Long Cavity DBR Laser by Using a Weakly Laterally Coupled Grating Fabricated by

Focused Ion Beam Lithography. — Режим доступа : <http://porto.polito.it/1400870/1/1400870.pdf>. — Загл. с экрана (дата обращения: 01.06.2016).

5. Модуляция излучения источников электромагнитных волн оптического диапазона. — Режим доступа : <http://s1921687209.narod.ru/7sem/course101/lec4.htm>. — Загл. с экрана (дата обращения: 14.06.2016).

6. B&Z Technologies, BZ-00104000-500827-252525. — Режим доступа : <http://www.bnzttech.com/datasheets/BZ-00104000-500827-252525.pdf>. — Загл. с экрана (дата обращения: 15.06.2016).

**АРЖАНОВ Валерий Андреевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехнических устройств и систем диагностики (РТУ и СД).

**БЕЛОУСОВ Алексей Александрович**, аспирант кафедры РТУ и СД.

Адрес для переписки: mirex23@mail.ru

**САПОЖНИКОВ Дмитрий Владимирович**, аспирант кафедры РТУ и СД.

**ФЁДОРОВ Дмитрий Владимирович**, аспирант кафедры электрической техники.

Статья поступила в редакцию 16.06.2016 г.

© В. А. Аржанов, А. А. Белоусов, Д. В. Сапожников, Д. В. Фёдоров

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

**Рассмотрен метод электронного конструирования, обеспечивающий экранирование сигнального проводника внутренним сплошным металлизированным потенциальным слоем в многослойной печатной плате. Произведен расчет эффективности экранирования для магнитного, электрического и электромагнитного полей в многослойной печатной плате.**

**Ключевые слова:** экранирование, эффективность экранирования, многослойная печатная плата, потенциальный слой, магнитное поле, электрическое поле, электромагнитное поле.

На начальном этапе развития электроники при относительно низком быстродействии элементной базы и относительно невысокой сложности электронных устройств проблемы электронного конструирования не стояли так остро и само конструирование изделия сводилось в основном к обеспечению технологичности и механической прочности. Однако, с повышением быстродействия и плотности компоновки элементов, проблемы обеспечения помехоустойчивости и электромагнитной совместимости (ЭМС) устройств становятся важнейшей задачей конструирования радиоэлектронной аппаратуры в целом [1].

В настоящее время ЭМС является одним из важнейших качественных показателей электронной аппаратуры.

Решение вопросов ЭМС становится неотъемлемым элементом деятельности предприятий-разработчиков и изготовителей технических средств, в том числе и монтажных узлов с многослойными печатными платами.

Экранирование является конструкторским средством ослабления электромагнитного поля (ЭМП) помех в пределах определенного пространства и предназначено для повышения помехозащищенности и обеспечения ЭМС аппаратуры [2].

Коэффициент экранирования представляет собой отношение напряженности электрического или магнитного поля в какой-либо точке защищаемого пространства при наличии экрана к напряженности электрического или магнитного воздействующего поля в той же точке при отсутствии экрана [3].

На практике действия экрана принято оценивать эффективностью экранирования. Эффективность экранирования экрана как линейной системы остается неизменной независимо от расположения помехонесущего ЭМП внутри или вне экрана [4].

Для повышения устойчивости работы аппаратуры, следует повысить эффективность экранирования печатных плат входящих в аппаратуру. В этой связи необходимо проработать и смоделировать совокупность экранов в печатных платах в КВ и УКВ диапазонах, позволяющих до изготовления и про-

ведения испытаний аппаратуры сделать предварительные оценки экранирования.

В современных многослойных печатных платах системы питания и заземления выполняются на отдельных потенциальных слоях. Структура слоев в многослойных платах имеет большое значение для обеспечения возможно большей неискаженности сигнала и ЭМС. Обычно систему заземления выполняют сплошным металлизированным полигоном без каких-либо прорезей для соблюдения однородности путей возвратного тока. При этом сплошной металлизированный полигон системы заземления может использоваться для экранирования от слоя питания цепей высокочастотных сигналов.

**Цель данной работы** — моделирование эффективности экранирования сплошного внутреннего металлизированного слоя в печатной плате.

Согласно структуре многослойной печатной платы, источником помех будем считать слой, в котором располагается система питания и/или цепи высокочастотных сигналов. Частота источника помех варьируется от 3 МГц до 3 ГГц, в диапазонах частот: 10, 30, 100, 300, 500 МГц; 1, 2, 3 ГГц. Экраном служит система заземления, расположенная на следующем слое с толщиной меди 0,035 мм. Экран характеризуется не только толщиной, но и удельной электрической проводимостью с определенной магнитной проницаемостью. Расстоянием от источника помех до экрана является толщина диэлектрика печатной платы. Толщина диэлектрика может быть различной в зависимости от количества слоев в плате. Для оценки системы экранирования рассмотрены печатные платы из 4-х, 8-и и 12-и слоев, где за основу взяты материалы, представленные в [5].

На рис. 1 показаны типичные структуры многослойных печатных плат. При этом расстояние от источника помех до экрана может быть:

- в 4-слойной плате — 0,61 мм, 0,42 мм;
- в 8-слойной плате — 0,14 мм, 0,2 мм, 0,21 мм;
- в 12-слойной плате — 0,07 мм, 0,13 мм, 0,14 мм.

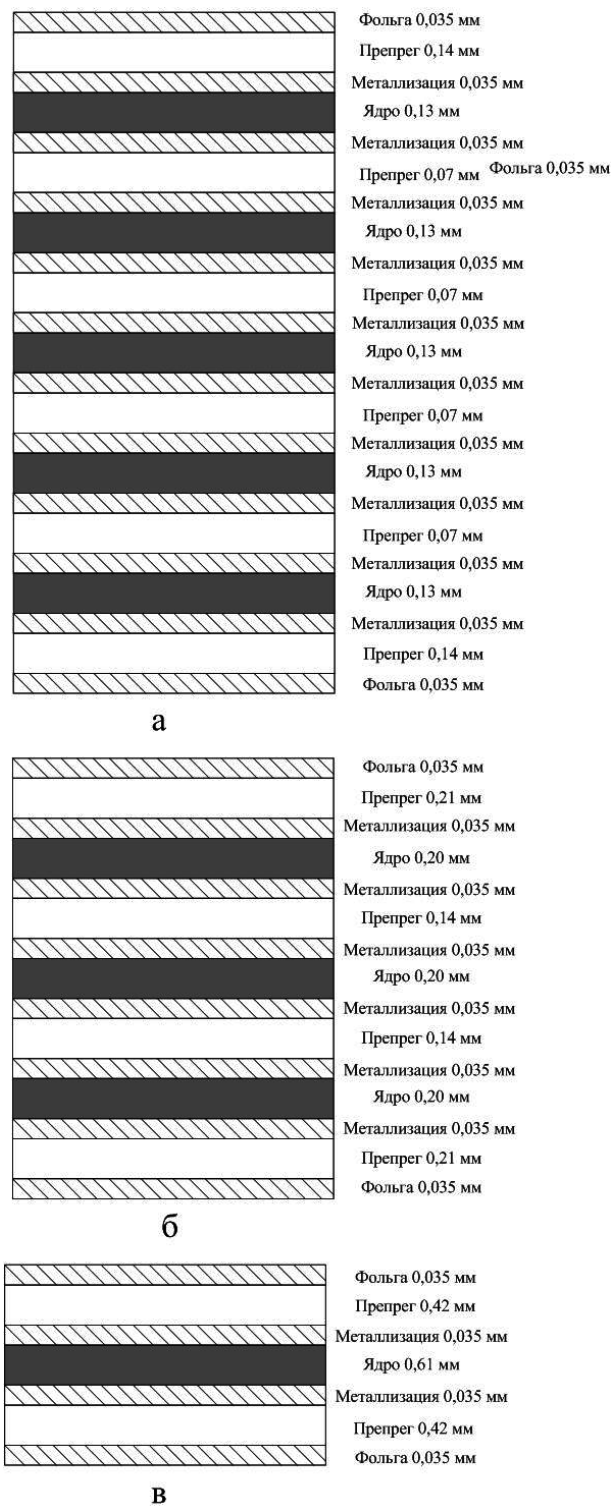


Рис. 1. Структура слоев многослойной печатной платы:  
а) 12 слоев; б) 8 слоев; в) 4 слоя

Идеальный слой опорного напряжения должен быть сплошным, без каких-либо прорезей и других пробельных элементов [6]. По технологическим соображениям в ряде случаев сплошные металлизированные слои заменяются в многослойной печатной плате сетчатыми. При этом регулярная неоднородность в слое возвратных токов изменяет значение волнового сопротивления линий передачи [7]. Но для соблюдения однородности путей возвратных токов целесообразно закладывать сплошные металлизированные слои.

Количественной характеристикой экранирования является эффективность экранирования, которая определяется как отношение значений напряженности поля в точке наблюдения при отсутствии и с экраном.

На рис. 2 показано: при падении волны на границу диэлектрик – металлизированный слой часть ее отражается, а другая часть проходит в слой и ослабляется из-за прохождения в меди. Пройдя до границы металлизированный слой – диэлектрик, часть волны вновь отражается, а другая часть выходит из металлизированного слоя. Отраженные волны распространяются в обратном направлении, испытывая многочисленные переотражения от металлизированных слоев. Исходя из этого, расчет эффективности экранирования складывается из трех слагаемых [8]:

$$SE=R+A+B,$$

где  $A$  — затухание за счет поглощения;

$R$  — затухание за счет отражения основной волны от границы раздела диэлектрик – металлизированный слой и металлизированный слой – диэлектрик;

$B$  — затухание за счет многократного внутреннего переотражения.

Используя известную формулу [8], получим выражения эффективности экранирования для магнитного, электрического и электромагнитного полей.

Для магнитного поля:

$$SE_M = 20 \lg \left| \frac{\omega \mu r - \sqrt{\omega \mu / \sigma}}{4 \omega \mu r \sqrt{\omega \mu / \sigma}} \right|^2 + 12,28 t \sqrt{\omega \mu \sigma} + 20 \lg \left| 1 - \frac{\omega \mu r - \sqrt{\omega \mu / \sigma}}{\omega \mu r + \sqrt{\omega \mu / \sigma}} \exp(-2t \sqrt{\omega \mu \sigma}) \right|.$$

Для электрического поля:

$$SE_E = 20 \lg \left| \frac{1/\omega \mu r + \sqrt{\omega \mu / \sigma}}{4 \sqrt{\omega \mu / \sigma} / \omega \mu r} \right|^2 + 12,28 t \sqrt{\omega \mu \sigma} + 20 \lg \left| 1 - \frac{1/\omega \mu r - \sqrt{\omega \mu / \sigma}}{1/\omega \mu r + \sqrt{\omega \mu / \sigma}} \exp(-2t \sqrt{\omega \mu \sigma}) \right|.$$

Для электромагнитного поля:

$$SE_{EM} = 20 \lg \left| \frac{\left( \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} + \sqrt{\omega \mu / \sigma} \right)^2}{4 \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \sqrt{\omega \mu / \sigma}} \right|^2 + 12,28 t \sqrt{\omega \mu \sigma} + 20 \lg \left| 1 - \frac{\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} - \sqrt{\omega \mu / \sigma}}{\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} + \sqrt{\omega \mu / \sigma}} \exp(-2t \sqrt{\omega \mu \sigma}) \right|,$$

где  $\mu$  — магнитная проницаемость;

$\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость;



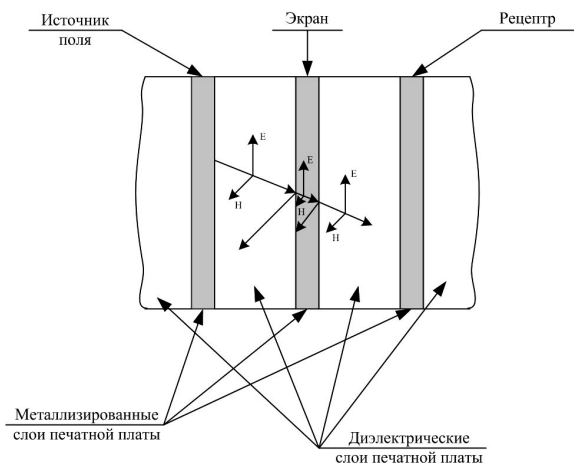
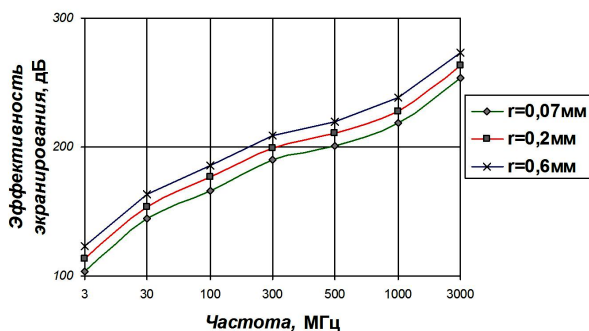
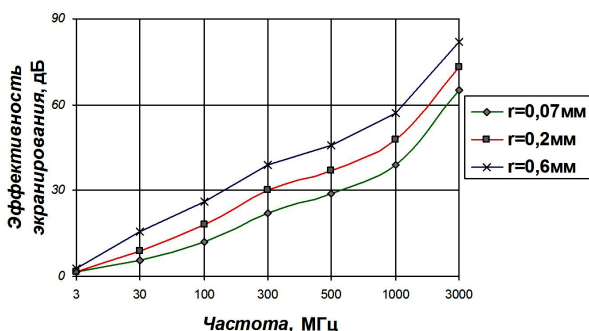


Рис. 2. Распространение электромагнитного поля в слоях многослойной печатной платы



а



б

Рис. 3. Частотная зависимость эффективности экранирования сплошного металлизированного слоя в печатной плате с толщиной фольги 0,012 мм: а) в электрическом поле; б) в магнитном поле ( $\gamma$  — толщина препрега)

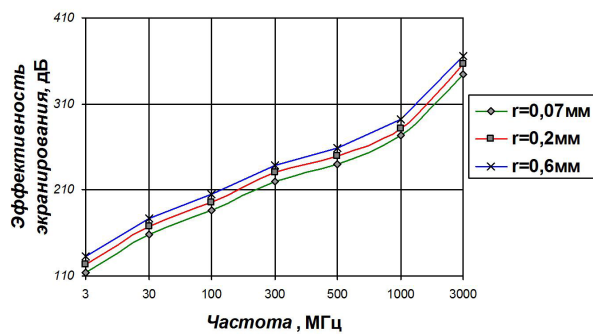
$\gamma$  — толщина фольги;

$\sigma$  — удельная проводимость меди;

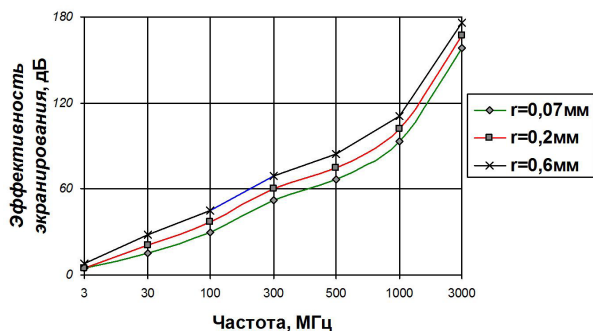
$\omega = 2\pi \cdot f$ .

Расчет проводился для магнитного, электрического и электромагнитных полей. Результаты расчета представлены на рис. 3–5.

Как видно из рисунков, при конструировании многослойных печатных плат сплошной металлизированный полигон во внутренних слоях платы может быть не только сигнальным, но и несет функцию экранирования одного слоя от другого. Такой метод экранирования можно применять как в аналогово-цифровых, так и в цифровых многослойных печатных платах. Также сплошные металлизированные полигоны можно использовать не только как



а



б

Рис. 4. Частотная зависимость эффективности экранирования сплошного металлизированного слоя в печатной плате с толщиной фольги 0,035 мм: а) в электрическом поле; б) в магнитном поле ( $\gamma$  — толщина препрега)

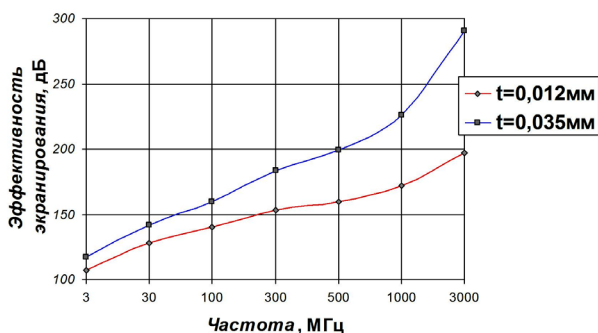


Рис. 5. Частотная зависимость эффективности экранирования сплошного металлизированного слоя в электромагнитном поле ( $t$  — толщина фольги)

экранирование одного слоя от другого, но и экранирование одного конкретного сигнального слоя с обеих сторон полигонами.

Исходя из технологических возможностей изготовления многослойных печатных плат, сплошной металлизированный слой с большей толщиной фольги может повысить эффективность экранирования.

#### Библиографический список

1. Барнс, Дж. Электронное конструирование. Методы борьбы с помехами / Дж. Барнс. — М. : Мир, 1990. — 238 с.
2. Волин, М. Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре / М. Л. Волин. — М. : Радио и связь, 1981. — 296 с.

3. Каден, Г. Электромагнитные экраны в высокочастотной технике и технике электросвязи / Г. Каден. — М. : Госэнергоиздат, 1957. — 327 с.

4. Князев, А. Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / А. Д. Князев, Л. Н. Кечиев, Б. В. Петров. — М. : Радио и связь, 1989. — 224 с.

5. ООО «ПСБ технологии». — Режим доступа : <http://pcbtech.ru> (дата обращения: 30.05.2016).

6. Кечиев, Л. Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры / Л. Н. Кечиев. — М. : ООО «Группа ИТД», 2007. — 616 с.

7. Кечиев, Л. Н. Анализ влияния конструкций сетчатых экранов на волновое сопротивление линий связи в многослойных печатных платах / Л. Н. Кечиев, О. С. Гардлер, А. А. Шевчук // Технологии ЭМС. — 2002. — № 2. — С. 41–43.

8. Газизов, Т. Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры / Т. Р. Газизов. — Томск : ТМЛ-Пресс, 2007. — 256 с.

**ОСИНКИНА Марина Евгеньевна**, ведущий инженер-конструктор АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения».

**КИСМЕРЕШКИН Владимир Павлович**, доктор технических наук, профессор кафедры средств связи и информационной безопасности Омского государственного технического университета.

Адрес для переписки: [marishao@inbox.ru](mailto:marishao@inbox.ru)

Статья поступила в редакцию 10.07.2016 г.

© М. Е. Осинкина, В. П. Кисмерешкин

УДК 621.3.049.75

**М. Е. ОСИНКИНА  
В. П. КИСМЕРЕШКИН**

Омский научно-исследовательский  
институт приборостроения  
Омский государственный  
технический университет

## ОБ УЧЁТЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

**Рассматривается влияние технологических покрытий на волновое сопротивление печатных плат, содержащих микрополосковые линии передачи. Рассчитана погрешность выполнения волнового сопротивления с учетом технологических покрытий.**

**Ключевые слова:** технологическое покрытие, печатная плата, волновое сопротивление, микрополосковая линия.

Проектирование многослойных печатных плат связано с целым рядом аспектов: схемотехнические, конструкторские и технологические. Их учет позволит создать более точный топологический рисунок, от которого будет зависеть функционирование всего изделия. Чем более выверены и обоснованы будут решения на стадии проектирования, тем короче и дешевле будет этап экспериментальной отработки. Одними из основных факторов являются технологические, включающие защитные покрытия во время изготовления печатной платы, и влагозащитные покрытия после монтажа платы.

Повышение влажности воздуха, а в предельных случаях и конденсация влаги, приводят к ухудшению диэлектрических свойств изоляционных материалов и в первую очередь — оснований печатных плат. Доля отказов аппаратуры под воздействием влаги составляет 6–21 % и 19–24 % соответственно при испытании и эксплуатации [1]. Поэтому при разработке печатных плат необходимо закладывать в технологический процесс защитные покрытия.

Защитные покрытия выполняют следующие функции [2]:

— защита печатной платы от повреждений и коррозии;

— ограничение поверхностей пайки знакоместа, при которой припой в процессе пайки остается на поверхности;

— предотвращение стекания припоя на печатные проводники;

— предотвращение короткого замыкания вследствие разбрызгивания припоя или под воздействием капель припоя;

— повышение сопротивления изоляции между печатными проводниками и поверхностями пайки знакоместа.

Обычная рабочая последовательность в классической технологии производства печатных плат заключается в том, что на общий рисунок проводников наносится защитная паяльная маска.

Паяльная маска предназначена для защиты всей поверхности печатной платы кроме контактных площадок от воздействия расплавленного припоя и флюса при групповых процессах пайки компонентов и проводники от перегрева. Паяльная маска наносится на всю поверхность печатной платы за исключением контактных площадок и металлизированных отверстий, которые при групповых процессах пайки будут контактировать с расплавленным припоем [3].

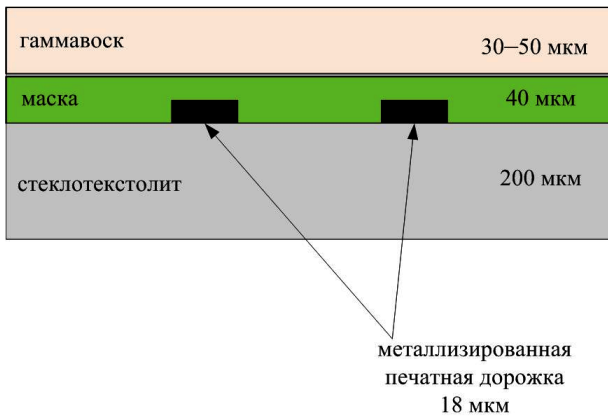


Рис. 1. Последовательность покрытий печатной платы

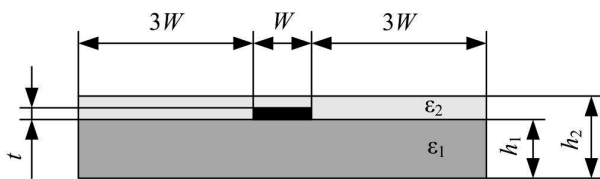


Рис. 2. Модель микрополосковой линии с защитным покрытием

- $t$  — толщина микрополосковой линии;
- $W$  — ширина микрополосковой линии;
- $h_1$  — высота диэлектрика;
- $h_2$  — высота диэлектрика с технологическим покрытием;
- $\epsilon_1$  — диэлектрическая проницаемость диэлектрика;
- $\epsilon_2$  — диэлектрическая проницаемость технологического покрытия

Лаковое покрытие платы часто называют влагозащитным. Действительно, в зависимости от химического состава и физических свойств лаковое покрытие выполняет функции диффузионного барьера для проникновения влаги к поверхности печатных плат. Однако необходимость применения лаковых покрытий состоит прежде всего в защите поверхности печатной платы от загрязнений в процессе эксплуатации печатного узла или блока [4].

Сравнительные результаты испытаний на влагостойкость печатных плат без покрытия и с лаковым покрытием показывают [5], что скорость изменения (уменьшение) сопротивления изоляции в печатной плате с лаковым покрытием значительно меньше [6].

**Целью данной работы** является исследование влияния защитных технологических покрытий в многослойной печатной плате на волновое сопротивление той или иной системы проводников.

Как известно в технологический процесс изготовления печатных плат закладывается защитное покрытие стоп-маска, необходимая для удержания паяльной пасты на контактных площадках и предотвращения растекания припоя, кроме того после монтажа элементов данную плату покрывают влагозащитным покрытием. Влагозащитные покрытия чаще всего представляют собой «гаммавоск» (ТУ 2241-001-71439219-2004-01) или кремнийорганическое лаковое покрытие КАК-1 (ТУ 1133-003-7143919-2013). На рис. 1 показана последовательность покрытий печатной платы.

Разработчик при создании топологии печатной платы закладывает определенную ширину дорожки микрополоска, определяющим требуемое волновое

сопротивление (к примеру, 50 Ом), при этом учитывает структуру и материалы печатной платы, и чаще всего без учета последующих технологических покрытий. Расчет микрополоска осуществляется как по известным формулам, так и соответствующим программам. При этом учет покрытий при расчетах опускают. В этой связи учет влияния защитных покрытий представляется актуальным.

Для оценки влияния покрытий необходимо знать диэлектрические проницаемости диэлектриков, защитного покрытия печатной платы и влагозащитного покрытия. К примеру, диэлектрическая проницаемость CARAPACE EMP 110 составляет 6,7, а влагозащитного покрытия «Гаммавоск» 2,4 [7]. Так как «маска» по технологическому процессу идет сразу после протравки топологического рисунка и ее диэлектрическая проницаемость в разы больше защитного покрытия «Гаммавоск», то рассчитаем для начала плату только с защитным покрытием CARAPACE EMP 110.

На рис. 2 показана модель микрополосковой линии с технологическим защитным покрытием сверху.

Величину волнового сопротивления оценим через процентное содержание диэлектриков в представленной модели на рис. 2.

$$Z = kZ_1 + mZ_2, \quad (1)$$

$k$  — процентное содержание диэлектрика в общем объеме модели;

$m$  — процентное содержание защитного покрытия в общем объеме модели;

$Z_1$  — волновое сопротивление, где весь объем заполнен стеклотекстолитом;

$Z_2$  — волновое сопротивление, где весь объем заполнен защитным покрытием.

Исходя из рис. 2, выводим формулу для коэффициентов  $k$  и  $m$ .

$$k = \frac{7h_1W}{0,07h_2W}, \quad (2)$$

$$m = \frac{7W(h_2 - h_1) - Wt}{0,07h_2W}. \quad (3)$$

Подставляем коэффициенты в формулу (1), получим:

$$Z \approx \left( \frac{7h_1W}{0,07h_2W} \right) Z_1 + \left( \frac{7W(h_2 - h_1) - Wt}{0,07h_2W} \right) Z_2. \quad (4)$$

Найдем из формулы 5 необходимую ширину микрополосковой линии ( $W$ ) с учетом толщины фольги ( $t$ ) равной 0,018 мм, толщины стеклотекстолита ( $h_1$ ) 0,2 мм и заданного волнового сопротивления ( $Z$ ), равного 50 Ом. Тогда, исходя из волнового сопротивления микрополосковой линии ( $Z_{ml}$ ) и следуя [8]:

$$Z_{ml} = \frac{60}{\sqrt{0,47\epsilon_r + 0,67}} \ln \left[ \frac{4h_2}{0,67(0,8W + t)} \right]. \quad (5)$$

Ширина микрополоска равна 0,3 мм.

Далее определим волновое сопротивление для стеклотекстолита ( $Z_1$ ) и защитного покрытия ( $Z_2$ ). Так как расчет идет с учетом покрытия, то возьмем формулу 6, расчет волнового сопротивления заглушенной линии ( $Z_2$ ).

$$Z_3 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r \left[ 1 - \exp\left(\frac{-1,55h_2}{h_1}\right) \right]}} \ln \frac{5,98h_2}{0,8W + t} . \quad (6)$$

Волновое сопротивление диэлектрика равно 46,696 Ом, а защитного покрытия ( $Z_3$ ) равно 38,692 Ом. Подставив рассчитанные волновые сопротивления в выведенную формулу (4), получим волновое сопротивление с учетом влияния защитного покрытия. Волновое сопротивление ( $Z$ ) равно 42,538 Ом.

Результат расчетов дает разницу в волновом сопротивлении микрополосковой линии рассчитанной без покрытия, и где учтены технологические параметры в 4,158 Ом. Если перевести в процентное соотношение то разница составит 15 %. Это достаточно весомо и может повлиять на электрические параметры микрополосковой линии. Таким образом, для повышения эффективности проектирования микрополосковых дорожек или других линий передач, при которых необходим учет волнового сопротивления, следует более полно учитывать конструкторско-технологические параметры, а также материалы, заложенные при изготовлении печатной платы.

#### Библиографический список

1. Писарев, В. Система испытаний — основа обеспечения надежности РЭА / В. Писарев // Электроника: НТБ. — 2002. — № 5. — С 32–35.

2. Сускин, В. В. Основы технологии поверхностного монтажа / В. В. Сускин. — Рязань : Изд-во Узорожье, 2001. — 160 с.

3. Пирогова, Е. В. Проектирование и технология печатных плат : учеб. / Е. В. Пирогова. — М. : ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005. — 250 с.

4. Медведев, А. М. Печатные платы. Конструкции и материалы / А. М. Медведев. — М. : Техносфера, 2005. — 304 с.

5. Медведев, А. М. Надежность и контроль качества печатного монтажа / А. М. Медведев. — М. : Радио и связь, 1986. — 216 с.

6. Уразаев, В. Влагозащитный печатный монтаж. Обзор методов / В. Уразаев // Электроника: НТБ. — 2003. — № 1. — С. 64–67.

7. ООО «Гамма-Ресурс». — Режим доступа : <http://gamma-resurs.ru> (дата обращения: 11.05.2016).

8. Кечиев, Л. Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры / Л. Н. Кечиев. — М. : ООО «Группа ИТД», 2007. — 616 с.

**ОСИНКИНА Марина Евгеньевна**, ведущий инженер-конструктор АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения».

**КИСМЕРЕШКИН Владимир Павлович**, доктор технических наук, профессор кафедры средств связи и информационной безопасности Омского государственного технического университета.  
Адрес для переписки: [marishao@inbox.ru](mailto:marishao@inbox.ru)

Статья поступила в редакцию 10.07.2016 г.

© М. Е. Осинкина, В. П. Кисмерешкин

## Книжная полка

**Гуриков, В. Возникновение и развитие оптико-электронного приборостроения / В. Гуриков. — 2-е изд. — М. : Ленанд, 2016. — 192 с. — ISBN 978-5-9710-2863-5.**

Книга является первым историко-научным исследованием развития оптико-электронного приборостроения от его истоков до создания современных оптико-электронных систем на лазерах. Анализируются взаимосвязи различных естественных и технических наук, разрабатывающих проблемы оптико-электронного приборостроения, а также отдельные понятия и явления, лежащие в его основе.

Книга рассчитана на научных и инженерно-технических работников, аспирантов и студентов старших курсов, занимающихся проблемами оптико-электронного приборостроения, а также на всех интересующихся вопросами истории науки и техники.

**Щепетов, А. Основы проектирования приборов и систем. Задачи и упражнения. Mathcad для приборостроения : учеб. пособие / А. Щепетов. — 2-е изд., стер. — М. : Юрайт, 2016. — 272 с. — ISBN 978-5-9916-5748-8.**

В книге даются начальные сведения о работе в интерактивной программной среде компьютерной математики Mathcad и примеры решения в этой среде типовых задач анализа, синтеза и оптимизации характеристик измерительных устройств. Изложение сопровождается большим количеством примеров с использованием оригинальных алгоритмов и программных модулей, разработанных автором. Их можно с успехом использовать в задачах расчета погрешности от нелинейности статической характеристики прибора, параметрического синтеза этой характеристики, расчета параметров градуировочной характеристики средства измерения, расчета статической характеристики корректирующего звена, кусочно-линейной аппроксимации этой характеристики и пр. Подробно рассматривается решение в Mathcad задач анализа динамических характеристик измерительных устройств и синтеза их параметров по критериям динамической точности, в том числе расчет передаточной функции прибора, расчет реакции прибора на детерминированный и случайный измерительные сигналы, синтез оптимальных значений параметров прибора по критериям минимальной длительности переходного процесса, максимальной ширины полосы пропускания частот, интегральным показателям качества переходного процесса и др.

Книга предназначена для студентов, аспирантов, магистров и преподавателей приборостроительных специальностей вузов, а также инженерно-технических и научных работников, специализирующихся в области расчета и проектирования средств измерений.

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

Определение численных критериев оценки технического состояния объектов диагностирования и мониторинга по параметрам характеристических функций является актуальной задачей. Целью работы является разработка методики получения теоретических функций распределения и плотности вероятности по экспериментальным данным. В работе предложена методика построения эмпирических и теоретических функций распределения и плотности вероятностей параметров характеристической функции мгновенных значений виброакустического сигнала, полученных для различных состояний объекта диагностирования. Произведена оценка достоверности аппроксимации путем расчета множественного коэффициента детерминации. Полученные выражения теоретических функций распределения модуля характеристической функции для различных технических состояний объекта диагностирования и различных величин параметра характеристической функции позволяют методами принятия статистических решений произвести расчеты численных критериев оценки состояния объектов по параметрам характеристических функций. Данные результаты получены впервые в практике формирования определяющих критериев неисправностей по параметрам характеристических функций.

**Ключевые слова:** характеристическая функция, диагностика, техническое состояние, диагностический признак, виброакустический сигнал.

Поиск новых диагностических признаков неисправностей объектов диагностирования по параметрам виброакустических (ВА) сигналов является актуальной задачей технической диагностики [1–5]. Однако применение новых диагностических признаков связано с научно обоснованным определением их пороговых величин, разделяющих виды технических состояний, которое основывается на статистических характеристиках величин диагностических признаков.

Для описания статистических свойств диагностических признаков следует получить эмпирические и теоретические функции распределения их вероятностей для различных состояний объекта диагностирования [6, 7]. Эти исследования являются первым шагом по оценке предельных значений диагностических признаков, разделяющих состояния объекта диагностирования на классы состояний.

**Построение эмпирической плотности вероятности.** Для больших выборок эмпирические ряды данных можно представить в виде гистограммы, являющейся графической (эмпирической) оценкой плотности вероятности.

Группировка эмпирических рядов данных по интервалам состоит из следующих процедур [6]:

- определение величины размаха изменений параметра ряда  $x$ ;
- расчет количества интервалов, их величины;
- определение для каждого  $i$ -го интервала  $[x_i - x_{i+1})$  абсолютного значения частоты  $n_i$  или величины относительной частоты (частотности  $v_i$ ) попадания параметра в интервал.

Итогом расчетов является представление эмпирических рядов данных в виде интервального или

статистического ряда. Графически ряд представляют в виде гистограммы. Чаще всего гистограмму изображают в виде фигуры, состоящей из прямоугольников, основаниями которых служат интервалы длиной  $h$ , а высоты равны соответствующей абсолютной частоте  $n_i$  попадания эмпирических рядов данных в заданный интервал величин параметра. Однако такой подход не совсем корректен. Высоту  $i$ -го прямоугольника  $z_i$  следует выбрать равной  $n_i/n$ .

Такую гистограмму можно интерпретировать как графическое представление эмпирической функции плотности распределения  $F_n(x)$  — в ней суммарная площадь всех прямоугольников равна единице [6].

В качестве примера исходными данными будут являться значения модуля ХФ  $\theta(v)$  при параметре  $v=0,2$ .

Чтобы построить общую гистограмму, необходимо определить оптимальное число интервалов группирования экспериментальных данных по Уильямсу [6]:

$$K \leq 4[0,75(368 - 1)^2]^{0,2} \approx 40.$$

В данном случае для удобства вычислений и для наглядности гистограммы используется  $K = 35$ .

Длины интервалов удобно выбирать одинаковыми и равными величине:

$$h = (x_{\max} - x_{\min})/K = (0,89 - 0,255)/35 \approx 0,018, \quad (1)$$

где  $x_{\max}$  — максимальное и  $x_{\min}$  — минимальное значение параметра.

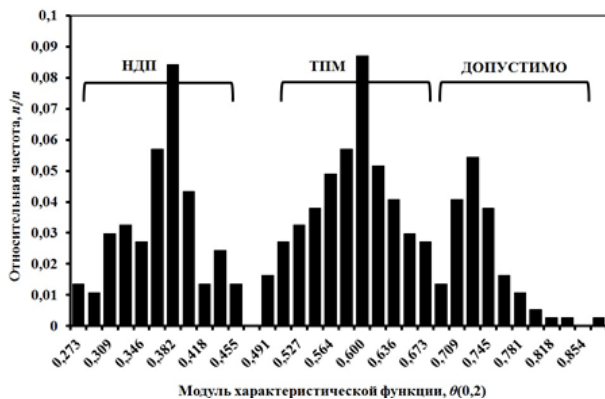


Рис. 1. Гистограмма распределения  $\theta(0,2)$  ВА сигналов с ЦПГ ПК для всего набора данных (эмпирическая плотность вероятности)

Затем рассчитывается количество значений параметра, попавших в каждый интервал (частотность в терминах программы MS Excel). В MS Excel частотность рассчитывается с помощью условия — если в ряде данных  $[x_i; x_n]$  встречается значение от  $a$  до  $b$ , в данную интервал прибавляется единица. По данному алгоритму производится расчет для остальных 35 интервалов. Далее производится расчет накопления ряда по всем 35 интервалам и получают значения накоплений для всех интервалов. Каждое накопленное значение, соответствующее определенному интервалу, делят на общее количество значений коэффициентов  $n$  для получения процентного ряда или ряда относительных частот.

По рассчитанным данным строят общую гистограмму, по оси абсцисс откладывают  $x_i$  (интервалы), по оси ординат — относительную частоту (рис. 1).

На гистограмме присутствуют три явно выраженные моды, которые соответствуют трем состояниям деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) поршневого компрессора (ПК): «Недопустимо» (НДП), «Требуется принятия мер» (ТПМ), «Допустимо» (ДОПУСТИМО).

По минимуму значений между модами определяем приблизительные границы между состояниями и получаем три интервала относительных частот, соответствующие трем состояниям ЦПГ, — НДП, ТПМ, ДОПУСТИМО.

**Построение эмпирической функции распределения.** Эмпирическая функция распределения  $F_n(x)$  определяется в виде относительной частоты (доле) таких значений  $x_i$ , что  $x_i \leq x$ ,  $i = 1, \dots, n$ :

$$F_n(x) = P_n(X < x) = n_x / n, \quad (2)$$

где  $n_x$  — число вариант, меньших  $x$ .

Тогда  $F_n(x)$  — эмпирическая или выборочная функция распределения:

$$F_n(x_i) = \frac{n_1 + n_2 + \dots + n_i}{n}, \quad (3)$$

где  $n_i$  — число совпадающих значений  $x_i$  и скачок в точке  $x_i$  равен  $n_i/n$ .

При  $n \rightarrow \infty$  ЭФР стремится к теоретической,  $F_n(x_i) \rightarrow F(x)$ .

Для состояния НДП ЭФР определяется согласно (3) и для  $x_i$  будет иметь величину:

$$F_n(x) = 2/131 \approx 0,0153.$$

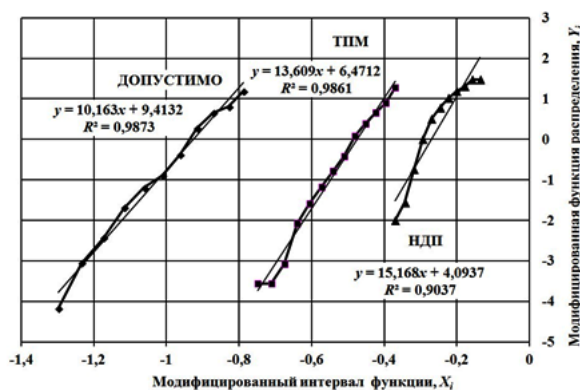


Рис. 2. Модифицированные эмпирические функции распределения  $\theta(0,2)$  для трех состояний объекта и их регрессионные модели,  $R^2$  — величина достоверности аппроксимации

Для состояний ТПМ и ДОПУСТИМО ЭФР рассчитываются аналогично, но с использованием рядов относительных частот для соответствующих состояний.

**Аппроксимация эмпирической функции распределения.** Для аппроксимации ЭФР находят координаты  $X_i$ ,  $Y_i$  по следующим формулам:

$$Y_i = \ln[-\ln(1 - F_n(x_i))], \quad (4)$$

$$X_i = \ln(x_i), \quad (5)$$

где  $Y_i$  — модифицированная функция распределения,  $X_i$  — модифицированный интервал модифицированной функции распределения,  $F_n(x_i)$  — ЭФР.

Для полученных экспериментальных данных для состояния НДП:

$$Y_i = \ln[-\ln(1 - 0,0153)] \approx -4,2; \quad X_i = \ln(0,273) \approx -1,3.$$

Применяя формулы на все 35 интервалов, получают значения координат  $X_i$  и  $Y_i$  для всех интервалов. Координаты  $Y_i$  для состояний ТПМ и ДОПУСТИМО рассчитываются аналогично, но с использованием рядов со значениями ЭФР  $F_n(x_i)$  для соответствующих состояний.

По результатам расчетов для каждого состояния строят график и аппроксимируют его линейной функцией вида  $y = b \cdot x + A$  (рис. 2). Для устранения выбросов точки, координаты которых имеют нулевые значения (возможны в начале и в конце диапазона интервалов), не используются для построения графика.

Из уравнения  $y = b \cdot x + A$  находят коэффициенты  $b$  и  $A$ , необходимые для расчета теоретической функции распределения (ТФР). По графику (рис. 2) данные расчетов сведены в табл. 1.

**Построение теоретической функции распределения.** На основе знания параметров распределения  $b$  и  $c$  формируются формулы ТФР  $F(x)$  и плотности вероятности  $f(x)$  (табл. 2), рассчитываются значения функций распределения для каждого состояния (рис. 3) и плотности вероятности для каждого состояния (рис. 4).

**Определение достоверности аппроксимации.** Достоверность аппроксимации функции распределения определяет значение  $R^2$  (мера определенности по Линдеру или множественный коэффициент детерминации):

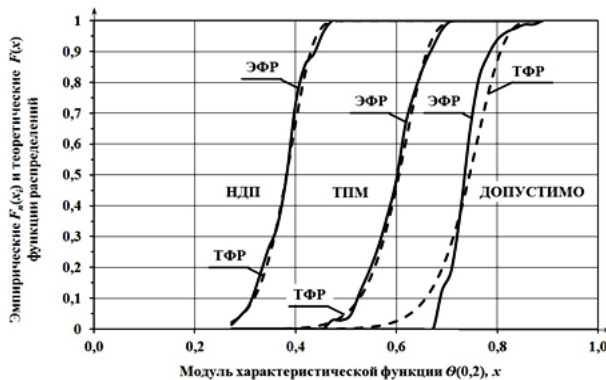
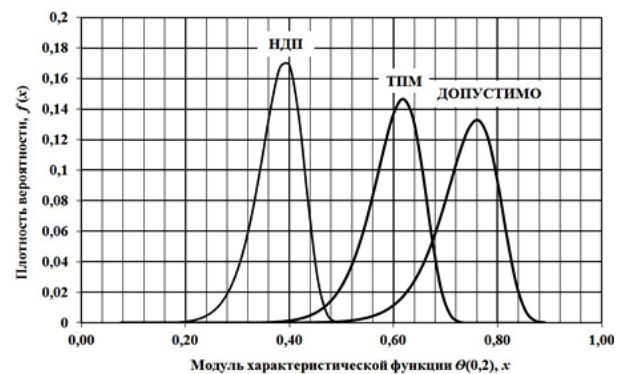
Параметры функций распределения Вейбулла–Гнеденко

Состояние / параметр	$y = b \cdot x + A$	b	A	$c = \exp(A/b)$
НДП:	$y = 10,163x + 9,4132$	10,163	9,4132	0,396
ТПМ:	$y = 13,609x + 6,4712$	13,609	6,4712	0,6216
ДОПУСТИМО:	$y = 15,168x + 4,0937$	15,168	4,0937	0,7635

Таблица 2

Статистические характеристики модуля ХФ  $\theta(0,2)$ 

Состояние / характеристика	ТФР	Плотность вероятности
НДП:	$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{0,396}\right)^{10,163}}$	$f(x) = \frac{10,163}{0,396} \left(\frac{x}{0,396}\right)^{9,163} \exp\left\{-\left(\frac{x}{0,396}\right)^{10,163}\right\}$
ТПМ:	$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{0,622}\right)^{13,609}}$	$f(x) = \frac{13,609}{0,622} \left(\frac{x}{0,622}\right)^{12,609} \exp\left\{-\left(\frac{x}{0,622}\right)^{13,609}\right\}$
ДОПУСТИМО:	$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{0,764}\right)^{15,168}}$	$f(x) = \frac{15,168}{0,764} \left(\frac{x}{0,764}\right)^{14,168} \exp\left\{-\left(\frac{x}{0,764}\right)^{15,168}\right\}$

Рис. 3. ТФР и ЭФР значений модуля ХФ  $\theta(0,2)$ Рис. 4. Плотность вероятности значений модуля ХФ  $\theta(0,2)$ 

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [F(x_i) - F_n(x_i)]^2}{\sum_{i=1}^n F_n^2(x_i) - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n F_n(x_i)\right)^2}, \quad (9)$$

где  $F(x_i)$  — ТФР;  $F_n(x_i)$  — ЭФР.

Для расчета близости ЭФР к теоретической для областей ДОПУСТИМО, ТПМ и НДП используют ряды значений  $(F(x_i) - F_n(x_i))^2$ ,  $F_n^2(x_i)$ ,  $F(x_i)$  соответственно для каждого состояния и рассчитывают аналогично.

Определим меры определенности Линдера  $R^2$  по формуле (9):

$$\text{НДП: } R^2 = 0,9996;$$

$$\text{ТПМ: } R^2 = 0,9993;$$

$$\text{ДОПУСТИМО: } R^2 = 0,9844,$$

которые во всех случаях близки к единице, что говорит о хорошем совпадении распределения диагностического признака  $\theta(0,2)$  с выбранным законом распределения Вейбулла–Гнеденко с соответствующими параметрами распределения.

С использованием данной методики произведена обработка данных и определены ТФР параметров характеристических функций мгновенных значений виброакустических сигналов, полученных с таких узлов поршневого компрессора, как всасывающие и нагнетательные клапаны, осевое и радиальное направление цилиндра, кривошипно-ползунный механизм, коренные подшипники, для различных состояний узлов и деталей.

Полученные характеристики позволяют определить предельные величины модуля ХФ,

определяющие оценки технических состояний объекта диагностирования.

#### Библиографический список

1. Костюков, В. Н. Использование характеристической функции для диагностики поршневых машин / В. Н. Костюков, А. П. Науменко, И. С. Сидоренко // Динамика систем, механизмов и машин : матер. VII Междунар. науч.-техн. конф., 10–12 ноября 2009. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2009. — Кн. 2. — С. 32–35.
2. Сидоренко, И. С. Анализ характеристических функций виброакустических сигналов клапанов поршневых компрессоров / И. С. Сидоренко, А. П. Науменко // Наука, образование, бизнес : матер. регион. науч.-практ. конф., посвящ. Дню радио. — Омск, 2010. — С. 259–264.
3. Кудрявцева, И. С. Оценка возможности использования характеристической функции для диагностики гидроударов / И. С. Кудрявцева, А. П. Науменко // Наука, образование, бизнес : докл. и тез. докл. регион. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию РТФ ОмГТУ. — Омск, 2011. — С. 215–217.
4. Костюков, В. Н. Диагностика подшипников качения по параметрам характеристической функции / В. Н. Костюков, А. П. Науменко, И. С. Кудрявцева // Динамика систем, механизмов и машин. — 2014. — № 4. — С. 142–145.

5. Diagnostics of rolling bearings by the parameters of the characteristic function / V. N. Kostyukov, A. P. Naumenko, S. N. Boichenko, I. S. Kudryavtceva // 12th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies CM 2015/MFPT 2015. Oxford, United Kingdom, 9–11 June 2015. The British Institute of Non-Destructive Testing, 2015. P. 246–249. ISBN 978-1-5108-0712-9.

6. Науменко, А. П. Методика статистического анализа диагностических признаков / А. П. Науменко // Наука, образование, бизнес : докл. и тез. докл. регион. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию РТФ ОмГТУ. — Омск, 2011. — С. 188–195.

7. Костюков, В. Н. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин : учеб. пособие / В. Н. Костюков, А. П. Науменко. — 2-е изд., с уточнениями / М-во образования и науки РФ, Омский гос. тех. ун-т, НПЦ «Динамика». — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2014. — 378 с.

**КУДРЯВЦЕВА (Сидоренко) Ирина Сергеевна**, аспирантка кафедры радиотехнических устройств и систем диагностики.

Адрес для переписки: s\_iren@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24.06.2016 г.

© И. С. Кудрявцева

## Книжная полка

**Мурашкина, Т. Техника физического эксперимента и метрология : учеб. пособие / Т. Мурашкина. — СПб. : Политехника, 2015. — 144 с. — ISBN 978-5-7325-1051-5.**

Рассматриваются основные разделы теоретической метрологии: теории измерительных процедур и физического эксперимента, теории обработки экспериментальных данных при проведении измерительного эксперимента, теории планирования физического измерительного эксперимента, с которой тесно связаны такие вопросы, как разработка методик выполнения измерительного эксперимента и метрологическое обеспечение физического эксперимента. Учебное пособие подготовлено на кафедре «Приборостроение» и предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 200500 «Лазерная техника и лазерные технологии», «Приборостроение», может быть полезно инженерам и научным работникам, занимающимся организацией и проведением измерительного физического эксперимента. Гриф: Рекомендовано Федеральным государственным автономным учреждением «Федеральный институт развития образования» (ФГАУ «ФИРО») в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки «Лазерная техника и лазерные технологии», «Приборостроение».

**Щепетов, А. Основы проектирования приборов и систем. Задачи и упражнения. Mathcad для приборостроения : учеб. пособие / А. Щепетов. — 2-е изд., стер. — М. : Юрайт, 2016. — 272 с. — ISBN 978-5-9916-5748-8.**

В книге даются начальные сведения о работе в интерактивной программной среде компьютерной математики Mathcad и примеры решения в этой среде типовых задач анализа, синтеза и оптимизации характеристик измерительных устройств. Изложение сопровождается большим количеством примеров с использованием оригинальных алгоритмов и программных модулей, разработанных автором. Их можно с успехом использовать в задачах расчета погрешности от нелинейности статической характеристики прибора, параметрического синтеза этой характеристики, расчета параметров градуировочной характеристики средства измерения, расчета статической характеристики корректирующего звена, кусочно-линейной аппроксимации этой характеристики и пр. Подробно рассматривается решение в Mathcad задач анализа динамических характеристик измерительных устройств и синтеза их параметров по критериям динамической точности, в том числе расчет передаточной функции прибора, расчет реакции прибора на детерминированный и случайный измерительные сигналы, синтез оптимальных значений параметров прибора по критериям минимальной длительности переходного процесса, максимальной ширины полосы пропускания частот, интегральным показателям качества переходного процесса и др. Книга предназначена для студентов, аспирантов, магистров и преподавателей приборостроительных специальностей вузов, а также инженерно-технических и научных работников, специализирующихся в области расчета и проектирования средств измерений.