

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
 УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
 «ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
 (ФГБОУ ВО «ВГТУ», ВГТУ)

**УТВЕРЖДАЮ»**  
 Председатель ученого совета ФРТЭ

\_\_\_\_\_ В.А. Небольсин

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**  
**«МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ»**

**Закреплена за кафедрой:** полупроводниковой электроники и наноэлектроники (ППЭНЭ)

**Направление подготовки (специальности):** 28.03.02 «Наноинженерия»

**Профиль:** «Инженерные нанотехнологии в приборостроении»

**Часов по УП:** 180 / **Часов по РПД:** 180

**Часов по УП (без учета на экзамены):** 144/ **Часов по РПД:** 144

**Часов на самостоятельную работу по УП:** 72 (50 %)

**Часов на самостоятельную работу по РПД:** 72 (50 %)

**Общая трудоемкость в ЗЕТ:** 5

**Виды контроля в семестрах (на курсах):** Экзамен 7; Зачеты —; Курсовой проект 7; Курсовая работа —.

**Форма обучения:** очная. **Срок обучения:** нормативный

**Распределение часов дисциплины по семестрам**

Вид занятий	№ семестров, число учебных недель в семестрах																	
	1/18		2/18		3/18		4/18		5/18		6/18		7/18		8/12		Итого	
	УП	РПД	УП	РПД	УП	РПД	УП	РПД	УП	РПД	УП	РПД	УП	РПД	УП	РПД	УП	РПД
Лекции													18	18			18	18
Лабораторные													36	36			36	36
Практические													18	18			18	18
Ауд. занятия													72	72			72	72
Сам. работа													72	72			72	72
<b>Итого</b>													<b>180</b>	<b>180</b>			<b>180</b>	<b>180</b>

Программа составлена на основании Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО) — государственные требования к минимуму содержания и уровня подготовки бакалавра по направлению подготовки 28.03.02 «Наноинженерия». Утвержден приказом Министерства образования Российской Федерации от 3 декабря 2015 г. № 1414.

Программу составил канд. техн. наук, доцент

Г.И. Липатов

Рецензент: д-р техн. наук, профессор

С.А. Акулинин

Рабочая программа дисциплины составлена на основании учебного плана подготовки бакалавров по направлению 28.03.02 «Наноинженерия», профиль «Инженерные нанотехнологии в приборостроении».

Рабочая программа дисциплины рассмотрена и одобрена на заседании кафедры ППЭНЭ.

Протокол № 5 от «14» января 2016 г.

Заведующий кафедрой ППЭНЭ

С.И. Рембеза

Рассмотрено и одобрено на заседании методической комиссии ФРТЭ.

Протокол № \_\_\_ от «22» января 2016 г.

Председатель методической комиссии ФРТЭ

А.Г. Москаленко

## 1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1	Целью изучения дисциплины «Микроэлектромеханические системы» является формирование у обучающихся знаний об устройстве, принципах работы, технологии изготовления и областях применения микроэлектромеханических систем (МЭМС)
1.2	Для достижения цели ставятся задачи приобретения студентами знаний:
1.2.1	принципов работы, конструкции, технологии изготовления и области применения чувствительных и исполнительных устройств МЭМС
1.2.2	об особенностях построения математических моделей чувствительных элементов МЭМС-устройств
1.2.3	способах реализации МЭМС-устройств

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП ВО

Цикл (раздел) ОПОП: вариативная часть		Код дисциплины в УП: Б1.В.ОД.10
2.1	<b>Требования к предварительной подготовке обучающегося:</b>	
	Б1.Б.4 «Математика» Б1.Б.5 «Физика» Б1.Б.13 «Прикладная механика» Б1.Б.16 «Физико-химические основы нанотехнологии» Б1.В.ОД.12 «Основы проектирования приборных устройств и систем» Б1.В.ДВ.4.1 «САПР в наноинженерии»	
2.2	<b>Дисциплины и практики, для которых освоение данной дисциплины необходимо как предшествующее:</b>	
	Б1.В.ДВ.6.1 «Микро- и наносистемы на базе 3D технологий» Б1.В.ДВ.6.2 «Микрооптоэлектромеханические устройства» Выпускная квалификационная работа	

## 3. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Код и наименование компетенции	
ОПК-1	способность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и экспериментального исследования

### В результате освоения дисциплины обучающийся должен

3.1	<b>Знать:</b> конструкции, принципы работы, технологии изготовления и области применения МЭМС (ОПК-1).
3.2	<b>Уметь:</b> разрабатывать элементную базу МЭМС, удовлетворяющую функциональным требованиям и областям применения (ОПК-1).
3.3	<b>Владеть:</b> методами выполнения проекторочных расчетов элементов МЭМС (ОПК-1).

## 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость в часах				
			Лекции	Практ. занятия	Лаб. работы	СРС	Всего часов
1	МЭМС устройства и их применение	1—7	8	8	16	24	56
2	Компоненты МЭМС	9—13	6	6	12	24	48
3	Технологии изготовления МЭМС	15, 17	4	4	8	24	40
<b>Итого часов:</b>			<b>18</b>	<b>18</b>	<b>36</b>	<b>72</b>	<b>144</b>

#### 4.1 Лекции

Неделя семестра	Тема и содержание лекции	Объем часов
<b>1 МЭМС устройства и их применение</b>		
1	Что такое МЭМС?	2
3	Конструкции и принципы работы МЭМС-устройств. Акселерометры	2
5	Конструкции и принципы работы МЭМС-устройств. Гироскопы	2
7	Радиочастотные МЭМС	2
<b>2 Компоненты МЭМС</b>		
9	Работа вибрационного микрогироскопа	2
11	Возбуждение и детектирование	2
13	Реальные конструкции микрогироскопов. Текущие проблемы и будущие тенденции в производстве МЭМС/НЭМС	2
<b>3 Технологии изготовления МЭМС</b>		
15	Основные технологические процессы изготовления механических компонентов	2
17	КМОП и микрообработка	2
<b>Итого часов:</b>		<b>18</b>

#### 4.2 Практические занятия

Неделя семестра	Тема и содержание практического занятия	Объем часов	Виды контроля
<b>1 МЭМС устройства и их применение</b>			Текущий контроль выполнения учебных заданий
1	Передаточная функция системы	2	
3	Свободные колебания системы	2	
5	Резонансные сенсоры	2	
7	Способы управления резонансным сенсором	2	
<b>2 Компоненты МЭМС</b>			
9	Коэффициенты жесткости балок	2	
11	Коэффициенты демпфирования	2	
13	Электростатический привод	2	
<b>3 Технологии изготовления МЭМС</b>			
15	Топологическое проектирование МЭМС	2	
17	Методы реализации МЭМС	2	
<b>Итого часов:</b>		<b>18</b>	

#### 4.3 Лабораторные работы

Неделя семестра	Наименование лабораторной работы	Объем часов	Виды контроля
<b>1 МЭМС устройства и их применение</b>			Проверка отчета по лабораторной работе
2, 4	Изучение методов обобщенного описания и комплексного анализа элементов микросистем различной физической природы	8	
6, 8	Изучение элементной базы микромеханических приборов	8	
<b>2 Компоненты МЭМС</b>			
10, 12	Изучение принципа работы и характеристик микромеханического гироскопа	8	
14, 16	Моделирование конструкционных и динамических характеристик элементов МЭМС-гироскопа	4	
<b>3 Технологии изготовления МЭМС</b>			
18	Исследование одномассового двухосевого сенсора угловых скоростей и линейных ускорений	8	

<b>Итого часов:</b>	<b>36</b>
---------------------	-----------

#### 4.4 Самостоятельная работа студента (СРС)

Неделя семестра	Содержание СРС	Виды контроля	Объем часов
3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17	Проработка материала лекций с использованием рекомендуемой литературы	Опрос	8
2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18	Подготовка к лабораторным работам	Ответы на контрольные вопросы	6
6, 12	Подготовка к контрольным работам	Результаты выполнения задания	4
<b>Итого часов:</b>			<b>18</b>

#### Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

На сегодняшний день технология МЭМС (микроэлектромеханических систем) является одной из перспективных технологий XXI в. и способна провести революцию как в промышленном, так и в потребительском секторах путем объединения кремниевой микроэлектроники и технологии микрообработки. Устройства, разрабатываемые на основе данной технологии, обладают не просто эволюционно лучшими качествами, но также и рядом других, ранее не доступных. Учитывая общую тенденцию развития технологий МЭМС, изучение дисциплины «Микроэлектромеханические системы» должно осуществляться как изучение системной, многогранной проблемы, исследуемым объектам которой (микросенсорам) свойственны: а) многообразие разновидностей, различия конструктивной реализации и функционального состава; б) специфическая методология моделирования и проектирования; в) особый научный аппарат. Прикладные вопросы ориентируют обучающихся на решение типовых задач моделирования и проектирования сенсоров на базе МЭМС, выбор адекватных физическим процессам моделей, методов, алгоритмов, прикладных пакетов, обладающих максимальной эффективностью. Поэтому во всех разделах предусмотрены темы, содержание которых связано с формированием и развитием у будущих специалистов практических навыков решения задач проектирования МЭМС.

#### 5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

<b>В рамках изучения дисциплины предусмотрены следующие образовательные технологии:</b>	
5.1	Лекции
5.2	Лабораторные работы
5.3	Практические занятия
5.4	Самостоятельная работа
5.5	Консультации по всем вопросам учебной программы

#### 6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

<b>6.1</b>	<b>Контрольные вопросы и задания</b>
6.1.1	Для текущего контроля успеваемости используются контрольные вопросы, помещенные в конце каждой лабораторной работы
6.1.2	В качестве заданий предусмотрены выдаваемые для самостоятельного решения задачи
<b>6.2</b>	<b>Темы письменных работ</b> не предусмотрены
<b>6.3</b>	<b>Другие виды контроля</b> не предусмотрены

Полная спецификация оценочных средств, процедур и контролируемых результатов в привязке к формируемым компетенциям, показателей и критериев оценивания приводится в Фонде оценочных средств по дисциплине, являющемся приложением к рабочей программе.

## 7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

7.1 Рекомендуемая литература				
№ п/п	Авторы/ составители	Заглавие	Вид и годы издания	Обеспеченность
<b>7.1.1 Основная литература</b>				
Л1.1	Распопов В.Я.	Микромеханические приборы. М.: Машиностроение. 2007. 400 с.	Учеб. пособие, 2007	1
Л1.2	Вардан В., Виной К., Джозе К.	ВЧ МЭМС и их применение. М.: Техносфера, 2004. 528 с.	Учеб. пособие, 2004	
Л1.3	Тимофеев В.Н.	Техническая механика микросистем. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 176 с.	Учеб. пособие, 2013	
<b>7.1.2 Дополнительная литература</b>				
Л2.1	Бхушан Б.	Справочник Шпрингера по нанотехнологиям (в 3-х томах) / Под ред. Б. Бхушана. М.: Техносфера, 2010.	Справочник, 2010	1
Л2.2	Фрайден Дж.	Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2006. 592 с.	Справочник, 2006	1
Л2.3	Джексон Р.	Новейшие датчики. М.: Техносфера, 2007. 384 с.	Справочник, 2007	1
Л2.4	Войтович И.Д., Корсунский В.М.	Интеллектуальные сенсоры. М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 624 с.	Учеб. пособие, 2011	
<b>7.1.3 Методические разработки</b>				
<b>7.1.4 Программное обеспечение и Интернет-ресурсы</b>				
1	Системы компьютерной математики MathCAD, MATLAB			
2	Программный комплекс ANSYS			
3	Нано- и микросистемная техника. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <a href="http://www.microsystems.ru">http://www.microsystems.ru</a> . An information portal for the MEMS and Nanotechnology community [Электронный ресурс]. Режим доступа: <a href="http://www.memsnet.org">http://www.memsnet.org</a> . Новости МЭМС и нанотехники [Электронный ресурс]. Режим доступа: <a href="http://www.smalltimes.com">www.smalltimes.com</a> .			

## 8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

8.1	Учебный компьютерный класс, оснащенный компьютерными программами для выполнения расчетов, и рабочими местами для самостоятельной подготовки обучающихся с выходом в Интернет
8.2	Контрольно-измерительное оборудование
8.3	Презентации и учебные видеофильмы

## 9. СТРУКТУРА И СОСТАВ ФОНДОВ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Фонды оценочных средств по дисциплине представляют собой: перечень вопросов для рейтинговых и контрольных мероприятий, варианты экзаменационных билетов.

### 9.1. Перечень вопросов для рейтинговых и контрольных мероприятий

1. Каковы основные факторы развития микросистемной техники?
2. Классифицируйте микросистемную технику с учетом сложности и массогабаритных характеристик.

3. Как влияют компоненты микросистемной техники на характеристики измерительных и исполнительных средств нового поколения?
4. Опишите основные характеристики сенсоров.
5. Какими факторами определяется погрешность измерений сенсоров?
6. Какого рода погрешность можно устранить с помощью калибровки сенсора?
7. Опишите основные конструктивные варианты элементов микромеханических сенсоров. Дайте характеристику их свойств.
8. Какие физические механизмы определяют проявление пьезоэффекта?
9. Каков принцип действия и область применения емкостных сенсоров?
10. Опишите область применения, конструктивные особенности тензорезисторов.
11. Опишите принцип действия датчика давлений. Для чего применяется мостовая измерительная схема?
12. Опишите принцип работы микромеханических гироскопов.
13. Опишите назначение, общую классификацию актюаторов.
14. Опишите основные конструктивные варианты пьезоэлектрических актюаторов. Дайте характеристику их свойств.
15. Какие физические механизмы определяют проявление обратного пьезоэффекта?
16. Опишите принцип работы биморфных пьезоэлектрических актюаторов.
17. Опишите основные конструктивные варианты емкостных актюаторов. Дайте характеристику их свойств.
18. Опишите основные конструктивные варианты термомеханических актюаторов. Дайте характеристику их свойств.
19. Опишите основные конструктивные варианты электромагнитных актюаторов. Дайте характеристику их свойств.
20. Опишите принцип работы электромагнитных актюаторов.
21. Какие физические механизмы определяют проявление эффекта «памяти формы»?
22. Какие механизмы активации используют для создания устройств микросмещения и микропозиционирования? Каковы конструктивные особенности этих устройств?
23. Опишите область применения, конструктивные особенности генераторов-вибраторов.
24. Перечислите варианты конструкций планарных и объемных микроиндукторов.
25. Как зависит добротность катушки индуктивности от занимаемой ею площади?
26. Назовите основные типы регулируемых конденсаторов.
27. Опишите конструкцию и принцип действия микроантенны.
28. Опишите конструкции и принцип действия микрореле и коммутаторов.
29. Приведите примеры применения микросистемных компонентов в высокочастотных устройствах.
30. Назовите сходные черты и различие технологических процессов микроэлектроники и микромеханики.
31. Каково основное конструктивно-топологическое отличие элементов микроэлектроники и микросистемной техники?
32. Опишите основные технологические процессы, используемые в микросистемной технике.
33. Опишите основные операции и область применения технологии с использованием «жертвенного» слоя.
34. Опишите основные операции и область применения технологий анизотропного жидкостного и глубокого реактивно-ионного травления.

## **9.2. Примерные варианты экзаменационных билетов**

### **Билет № 1**

1. Математическое описание чувствительного элемента как динамической системы.
2. Определение добротности интегральных чувствительных элементов.

Билет № 2

1. Особенности микросистемных чувствительных элементов датчиков линейных ускорений.
2. Упругие подвесы и мембраны.

Билет № 3

1. Особенности микросистемных чувствительных элементов датчиков угловых ускорений.
2. Емкостные преобразователи перемещений.

Билет № 4

1. Микроэлектронные преобразователи и узлы, встраиваемые в интегральные датчики ускорений.
2. Измерительные свойства микромеханических устройств.

Билет № 5

1. Уравнение движения и передаточная функция микродатчика ускорения.
2. Электростатические приводы.

Билет № 6

1. Разработка структурной схемы и полной передаточной функция микросистемного акселерометра.
2. Тензорезистивные преобразователи деформаций.

Билет № 7

1. Особенности газодинамического демпфирования микромеханических маятников акселерометров.
2. Формирование информации об измеряемом ускорении.

Билет № 8

1. Эффект влияния вторичных колебаний инерционного тела на первичные при воздействии постоянной и переменной угловых скоростей основания.
2. Базовые технологии формообразования.

Билет № 9

1. Теория многомерных упругих подвесов, требования к их структуре построения и параметрам.
2. Уравнение движения и передаточная функция микродатчика давления.

Билет № 10

1. Сравнительный анализ различных конструктивных схем инерциальных измерителей.
2. Преобразователи деформаций на поверхностно-акустических волнах.

**9.3. Тематика курсовых проектов**

1. Проектирование чувствительного элемента микроакселерометра с складчатым подвесом.
2. Проектирование чувствительного элемента микроакселерометра с загнутым подвесом.
3. Проектирование чувствительного элемента микроакселерометра с подвесом «ноги краба».
4. Проектирование чувствительного элемента микроакселерометра с подвесом из фиксированных с обоих концов балок.
5. Проектирование тензорезистивного датчика давления.

6. Синтез топологии МЭМС-датчика давления.
7. Синтез топологии одномассового МЭМС-гироскопа.
8. Синтез топологии двухмассового МЭМС-гироскопа.
9. Проектирование емкостного интерфейса МЭМС-акселерометра.
10. Проектирование емкостного интерфейса МЭМС-гироскопа.

Паспорт компетенций для текущего контроля

Раздел дисциплины	Объект контроля	Форма контроля	Метод контроля	Срок выполнения
МЭМС устройства и их применение		Контрольная работа	Письменный	
Компоненты МЭМС		Устный опрос	Устный	
Технологии изготовления МЭМС		Защита ИДЗ	Защита ИДЗ	

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Председатель ученого совета ФРТЭ

\_\_\_\_\_ В.А. Небольсин

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 г.

**Лист регистрации изменений (дополнений) УМКД**

**«Микроэлектромеханические системы»**

В УМКД вносятся следующие изменения (дополнения):

---

---

---

---

Изменения (дополнения) в УМКД обсуждены на заседании кафедры полупроводниковой электроники и наноэлектроники.

Протокол № \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 г.

Зав. кафедрой ППЭНЭ

С.А. Рембеза

Изменения (дополнения) рассмотрены и одобрены методической комиссией ФРТЭ

Председатель методической комиссии ФРТЭ

А.Г. Москаленко

«Согласовано»

С.А. Рембеза

## Карта обеспеченности рекомендуемой литературой

№ п/п	Авторы/ составители	Заглавие	Вид и годы издания	Обеспеченность
<b>1. Основная литература</b>				
Л1.1	Распопов В.Я.	Микромеханические приборы. М.: Машиностроение. 2007. 400 с.	Учеб. пособие, 2007	1
<b>2. Дополнительная литература</b>				
Л2.1	Бхушан Б.	Справочник Шпрингера по нанотехнологиям (в 3-х томах) / Под ред. Б. Бхушана. М.: Техносфера, 2010.	Справочник, 2010	1
Л2.2	Вардан В., Виной К., Джозе К.	ВЧ МЭМС и их применение. М.: Техносфера, 2004. 528 с.	Учеб. пособие, 2004	0,2
Л2.3	Фрайден Дж.	Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2006. 592 с.	Справочник, 2006	1
Л2.4	Джексон Р.	Новейшие датчики. М.: Техносфера, 2007. 384 с.	Справочник, 2007	1
<b>3. Методические разработки</b>				

Зав. кафедрой ППЭНЭ

С.А. Рембеза

Директор НТБ

Т.И. Буковшина

### Лист регистрации изменений

Порядковый номер изменения	Раздел, пункт	Вид изменения (заменить, аннулировать, добавить)	Номер и дата приказа об изменении	Фамилия и инициалы, подпись лица, внесшего изменение	Дата внесения изменения