

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования  
"САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ"

Кафедра № 13

УТВЕРЖДАЮ  
Ответственный за образовательную  
программу

доц., к.т.н., доц.  
(должность, уч. степень, звание)

В.К. Пономарев  
(инициалы, фамилия)  
(подпись)

«18» февраля 2025 г

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«МЭМС - технологии в приборостроении»  
(Наименование дисциплины)

Код направления подготовки/ специальности	24.04.02
Наименование направления подготовки/ специальности	Системы управления движением и навигация
Наименование направленности	Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации
Форма обучения	очная
Год приема	2025

Лист согласования рабочей программы дисциплины

Программу составил (а)

Доцент, к.т.н., доцент  
(должность, уч. степень, звание)

(подпись, дата)

Н.А. Овчинникова  
(инициалы, фамилия)

Программа одобрена на заседании кафедры № 13

«18» февраля 2025 г, протокол № 7

Заведующий кафедрой № 13

к.т.н.  
(уч. степень, звание)

(подпись, дата)

Н.А. Овчинникова  
(инициалы, фамилия)

Заместитель директора института №1 по методической работе

доц., к.т.н.  
(должность, уч. степень, звание)

(подпись, дата)

В.Е. Таратун  
(инициалы, фамилия)

## Аннотация

Дисциплина «МЭМС - технологии в приборостроении» входит в образовательную программу высшего образования – программу магистратуры по направлению подготовки/специальности 24.04.02 «Системы управления движением и навигация» направленности «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации». Дисциплина реализуется кафедрой «№13».

Дисциплина не является обязательной при освоении обучающимся образовательной программы и направлена на углубленное формирование следующих компетенций:

ПК-1 «Способен формировать новые направления научных исследований и опытно- конструкторских разработок»

Содержание дисциплины охватывает круг вопросов, связанных с использованием МЭМС акселерометров и гироскопов в системах ориентации и навигации, анализом их ошибок, моделированием, методами повышения точности, расчетом конструктивных параметров, обеспечивающих заданные метрологические характеристики.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, самостоятельная работа обучающегося.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля: текущий контроль успеваемости, промежуточная аттестация в форме зачета.

Общая трудоемкость освоения дисциплины составляет 1 зачетную единицу, 36 часов.

Язык обучения по дисциплине «русский»

## 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине

### 1.1. Цели преподавания дисциплины

Целью дисциплины «МЭМС технологии в приборостроении» является получение обучающимися необходимых знаний в области моделирования электромеханических систем управления движением подвижных объектов различных классов, анализа и синтеза этих систем, автоматизации проектирования приборов и систем ориентации, стабилизации и навигации. Основной упор делается на исследование аэрокосмических систем. В процессе изучения дисциплины обучающимся предоставляется возможность развить навыки построения математических моделей электромеханических систем, ориентированных на использование современных программных систем. Основными программными системами, используемыми в курсе «МЭМС технологии в приборостроении» являются MATLAB и Simulink. Полученные студентами необходимые навыки использования программных систем ориентированы на использование их в последующих специальных курсах, научных исследованиях и практической работе.

1.2. Дисциплина является факультативной дисциплиной по направлению образовательной программы высшего образования (далее – ОП ВО).

1.3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения ОП ВО.

В результате изучения дисциплины обучающийся должен обладать следующими компетенциями или их частями. Компетенции и индикаторы их достижения приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень компетенций и индикаторов их достижения

Категория (группа) компетенции	Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
Профессиональные компетенции	ПК-1 Способен формировать новые направления научных исследований и опытно-конструкторских разработок	ПК-1.3.1 знать современные тенденции развития приборов и систем ориентации, стабилизации и навигации летательных аппаратов и техники в целом

## 2. Место дисциплины в структуре ОП

Дисциплина может базироваться на знаниях, ранее приобретенных обучающимися при изучении следующих дисциплин:

- «Математика»,
- «Технология приборостроения»,
- «Физика»
- «Теоретическая механика»
- «Электроника»
- «Методы теории фильтрации в задачах навигации и управления»
- «Современная теория управления»

Знания, полученные при изучении материала данной дисциплины, имеют как самостоятельное значение, так и используются при изучении других дисциплин:

- «Интегрированные системы ориентации и навигации»,
- «Системы ориентации и управления космическими аппаратами»

## 3. Объем и трудоемкость дисциплины

Данные об общем объеме дисциплины, трудоемкости отдельных видов учебной работы по дисциплине (и распределение этой трудоемкости по семестрам) представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Объем и трудоемкость дисциплины

Вид учебной работы	Всего	Трудоемкость по семестрам
		№2
1	2	3
<b>Общая трудоемкость дисциплины, ЗЕ/(час)</b>	1/ 36	1/ 36
<b>Из них часов практической подготовки</b>		
<b>Аудиторные занятия, всего час.</b>	17	17
в том числе:		
лекции (Л), (час)	17	17
практические/семинарские занятия (ПЗ), (час)		
лабораторные работы (ЛР), (час)		
курсовой проект (работа) (КП, КР), (час)		
экзамен, (час)		
<b>Самостоятельная работа, всего (час)</b>	19	19
<b>Вид промежуточной аттестации:</b> зачет, дифф. зачет, экзамен (Зачет, Дифф. зач, Экз.**)	Зачет	Зачет

Примечание: \*\* кандидатский экзамен

#### 4. Содержание дисциплины

##### 4.1. Распределение трудоемкости дисциплины по разделам и видам занятий.

Разделы, темы дисциплины и их трудоемкость приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Разделы, темы дисциплины, их трудоемкость

Разделы, темы дисциплины	Лекции (час)	ПЗ (СЗ) (час)	ЛР (час)	КП (час)	СРС (час)
Семестр 2					
Раздел 1. Основы технологии МЭМС.	3				4
Раздел 2. Методы проектирования микромеханических гироскопов с заданными характеристиками.	4				4
Раздел 3. Элементы микромеханических гироскопов и их проектирование.	3				4
Раздел 4. Тестирование, калибровка и компенсация микромеханических гироскопов и акселерометров.	4				4
Раздел 5. Проектирование встроенных контроллеров для стабилизации метрологических характеристик.	3				3
Итого в семестре:	17				19
Итого	17	0	0	0	19

Практическая подготовка заключается в непосредственном выполнении обучающимися определенных трудовых функций, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

4.2. Содержание разделов и тем лекционных занятий.

Содержание разделов и тем лекционных занятий приведено в таблице 4.

**Таблица 4 – Содержание разделов и тем лекционного цикла**

Номер раздела	Название и содержание разделов и тем лекционных занятий
<b>1</b>	<p><b>Основы технологии МЭМС</b></p> <p>Материалы и технологии производства МЭМС. Структуры и технологии производства микромеханических гироскопов и акселерометров. Типы и физические основы работы микромеханических гироскопов. Гироскопы типа L-L, R-R, L-R и R-L. Схемы с наружным карданным подвесом. Схемы с внутренним карданным подвесом. Схемы со стержневыми подвесами. Схемы с поступательными колебаниями. Схемы с угловыми колебаниями с одной и двумя осями чувствительности измерители. Твердотельные волновые гироскопы. Схемы камертонных подвесов. Типы и физические основы работы микромеханических акселерометров. Основные характеристики микромеханических акселерометров и гироскопов.</p>
<b>2</b>	<p><b>Методы проектирования микромеханических гироскопов с заданными характеристиками.</b></p> <p>Математические модели микромеханических гироскопов разных типов и их анализ. Зависимость чувствительности и полосы пропускания от конструктивных параметров гироскопов. Проектирование микромеханических гироскопов с заданными метрологическими характеристиками.</p>
<b>3</b>	<p><b>Элементы микромеханических гироскопов и их проектирование.</b></p> <p>Электростатические датчики сил и моментов. Электростатические датчики сил и моментов гребенчатой структуры. Датчики сил и моментов плоской структуры. Емкостные датчики микроперемещений. Система автогенераторного возбуждения первичных колебаний ММГ. Основные структуры микромеханических гироскопов. Микромеханические гироскопы прямого преобразования. Микромеханические гироскопы компенсационного типа.</p>
<b>4</b>	<p><b>Тестирование, калибровка и компенсация микромеханических гироскопов и акселерометров.</b></p> <p>Методы и оборудование для тестирования микромеханических гироскопов и акселерометров. Однократное упрощенное тестирование. Статическое и динамическое тестирование. Тестирование на стабильность параметров. Особенности тестирования гироскопов на стендах вращения. Обработка результатов тестирования. Тестирование при изменении температуры. Тестирование при осциллирующей скорости вращения основания. Тестирование на вибрационные и ударные нагрузки. Тестирование па влияние магнитного поля. Калибровка и компенсация ошибок гироскопов и акселерометров.</p>

<b>5</b>	<p style="text-align: center;"><b>Проектирование встроенных контроллеров для стабилизации метрологических характеристик.</b></p> <p>Алгоритмы оценивания параметров микромеханических гироскопов в реальном времени. Методы реализации этих алгоритмов во встроенных контроллерах. Стабилизация метрологических характеристик микромеханических гироскопов на основе результатов оценивания их параметров.</p>
----------	--

#### 4.3. Практические (семинарские) занятия

Темы практических занятий и их трудоемкость приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Практические занятия и их трудоемкость

№ п/п	Темы практических занятий	Формы практических занятий	Трудоемкость, (час)	Из них практической подготовки, (час)	№ раздела дисциплины
Учебным планом не предусмотрено					
Всего					

#### 4.4. Лабораторные занятия

Темы лабораторных занятий и их трудоемкость приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Лабораторные занятия и их трудоемкость

№ п/п	Наименование лабораторных работ	Трудоемкость, (час)	Из них практической подготовки, (час)	№ раздела дисциплины
Учебным планом не предусмотрено				
Всего				

#### 4.5. Курсовое проектирование/ выполнение курсовой работы

Учебным планом не предусмотрено

#### 4.6. Самостоятельная работа обучающихся

Виды самостоятельной работы и ее трудоемкость приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Виды самостоятельной работы и ее трудоемкость

Вид самостоятельной работы	Всего, час	Семестр 2, час
1	2	3
Изучение теоретического материала дисциплины (ТО)	16	16
Курсовое проектирование (КП, КР)		
Расчетно-графические задания (РГЗ)		
Выполнение реферата (Р)		

Подготовка к текущему контролю успеваемости (ТКУ)	3	3
Домашнее задание (ДЗ)		
Контрольные работы заочников (КРЗ)		
Подготовка к промежуточной аттестации (ПА)		
Всего:	19	19

#### 5. Перечень учебно-методического обеспечения

для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)

Учебно-методические материалы для самостоятельной работы обучающихся указаны в п.п. 7-11.

#### 6. Перечень печатных и электронных учебных изданий

Перечень печатных и электронных учебных изданий приведен в таблице 8.

Таблица 8– Перечень печатных и электронных учебных изданий

Шифр/ URL адрес	Библиографическая ссылка	Количество экземпляров в библиотеке (кроме электронных экземпляров)
531 Л 84	Распопов, В. Я. Приборы первичной информации : Микромеханические приборы. : учебное пособие / В. Я. Распопов ; Тул. гос. ун-т. - Тула : [2002. - 390 с. : - ISBN 5-8125-0239-0. Издание имеет гриф Министерства образования РФ	15
681.2 Р 24	Распопов, В. Я. Микромеханические приборы. учебное пособие / В. Я. Распопов. - М. : Машиностроение, 2007. - 400 с. : рис., табл. - Библиогр.: - ISBN 5-217-03360-6. Имеет гриф Минобрнауки России	7
629.7 М 59	Матвеев В.А., Липатников В.И., Алехин А.В. Проектирование волнового твердотельного гироскопа: Учеб. пособие для втузов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. 168с	100
629.7 С28	Северов Л.А. Механика гироскопических систем.-М.: Изд. МАИ, 1996. -212с	52
	Матвеев, В. В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. учебное пособие / В. В. Матвеев, В. Я. Распопов ; ред. В. Я. Распопов ; ГНЦ РФ - ЦНИИ "Электроприбор". СПб. : Изд-во ГНЦ РФ - ЦНИИ 2009. - 278 с. : ISBN 978-5-900780-73-3. Издание имеет гриф УМО по образованию	

629.7 T-64	Titterton D.H., Weston J.L. Strapdown Inertial Navigation Technology. Second edition. Ed. Paul Zarchan, MIT Lincoln Laboratory, 2009, 558 p.	2
	Северов Л.А., Пономарев В.К., Панферов А.И., Сорокин А.В., Кучерков С.Г., Лучинин В.В. Корляков А.В. Микромеханические гироскопы: конструкции, характеристики, технологии, пути развития. - Известия ВУЗов, Приборостроение, т.41, №1-2, 1998. с.57-73.	
	Меркурьев И.В., Подалков В.В. Динамика микромеханического и волнового твердотельного гироскопов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 228 с. – ISBN 987-5-9221-1125-6	
	Матвеев В.А., Басараб М.А., Ивойлов М.А. Генетические алгоритмы балансировки миниатюрного волнового твердотельного гироскопа // Труды Девятого Международного Симпозиума «Интеллектуальные системы» INTELS'2010, Россия, Владимир, 28 июня – 2 июля 2010г., С. 516-519.	

#### 7. Перечень электронных образовательных ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

Перечень электронных образовательных ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины приведен в таблице 9.

Таблица 9 – Перечень электронных образовательных ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

URL адрес	Наименование
<a href="http://matlab.exponenta.ru/">http://matlab.exponenta.ru/</a>	Е.В.Никульчев Control System Toolbox

#### 8. Перечень информационных технологий

8.1. Перечень программного обеспечения, используемого при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

Перечень используемого программного обеспечения представлен в таблице 10.

Таблица 10– Перечень программного обеспечения

№ п/п	Наименование
	Не предусмотрено



8.2. Перечень информационно-справочных систем,используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

Перечень используемых информационно-справочных систем представлен в таблице 11.

Таблица 11– Перечень информационно-справочных систем

№ п/п	Наименование
	Не предусмотрено

## 9. Материально-техническая база

Состав материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине, представлен в таблице12.

Таблица 12 – Состав материально-технической базы

№ п/п	Наименование составной части материально-технической базы	Номер аудитории (при необходимости)
1	Лекционная аудитория	13-03а
2	Мультимедийная лекционная аудитория	13-04

## 10. Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

10.1. Состав оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине приведен в таблице 13.

Таблица 13 – Состав оценочных средств для проведения промежуточной аттестации

Вид промежуточной аттестации	Перечень оценочных средств
Зачет	Список вопросов, тесты

10.2. В качестве критериев оценки уровня сформированности (освоения) компетенций обучающимися применяется 5-балльная шкала оценки сформированности компетенций, которая приведена в таблице 14. В течение семестра может использоваться 100-балльная шкала модульно-рейтинговой системы Университета, правила использования которой, установлены соответствующим локальным нормативным актом ГУАП.

Таблица 14 –Критерии оценки уровня сформированности компетенций

Оценка компетенции	Характеристика сформированных компетенций
5-балльная шкала	
«отлично» «зачтено»	<ul style="list-style-type: none"> <li>– обучающийся глубоко и всесторонне усвоил программный материал;</li> <li>– уверенно, логично, последовательно и грамотно его излагает;</li> <li>– опираясь на знания основной и дополнительной литературы, тесно привязывает усвоенные научные положения с практической деятельностью направления;</li> <li>– умело обосновывает и аргументирует выдвигаемые им идеи;</li> <li>– делает выводы и обобщения;</li> <li>– свободно владеет системой специализированных понятий.</li> </ul>
«хорошо» «зачтено»	<ul style="list-style-type: none"> <li>– обучающийся твердо усвоил программный материал, грамотно и по существу излагает его, опираясь на знания основной литературы;</li> <li>– не допускает существенных неточностей;</li> <li>– увязывает усвоенные знания с практической деятельностью направления;</li> <li>– аргументирует научные положения;</li> </ul>

Оценка компетенции	Характеристика сформированных компетенций
5-балльная шкала	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>– делает выводы и обобщения;</li> <li>– владеет системой специализированных понятий.</li> </ul>
«удовлетворительно» «зачтено»	<ul style="list-style-type: none"> <li>– обучающийся усвоил только основной программный материал, по существу излагает его, опираясь на знания только основной литературы;</li> <li>– допускает несущественные ошибки и неточности;</li> <li>– испытывает затруднения в практическом применении знаний направления;</li> <li>– слабо аргументирует научные положения;</li> <li>– затрудняется в формулировании выводов и обобщений;</li> <li>– частично владеет системой специализированных понятий.</li> </ul>
«неудовлетворительно» «не зачтено»	<ul style="list-style-type: none"> <li>– обучающийся не усвоил значительной части программного материала;</li> <li>– допускает существенные ошибки и неточности при рассмотрении проблем в конкретном направлении;</li> <li>– испытывает трудности в практическом применении знаний;</li> <li>– не может аргументировать научные положения;</li> <li>– не формулирует выводов и обобщений.</li> </ul>

10.3. Типовые контрольные задания или иные материалы.

Вопросы (задачи) для экзамена представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Вопросы (задачи) для экзамена

№ п/п	Перечень вопросов (задач) для экзамена	Код индикатора
	Учебным планом не предусмотрено	

Вопросы (задачи) для зачета / дифф. зачета представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Вопросы (задачи) для зачета / дифф. зачета

№ п/п	Перечень вопросов (задач) для зачета / дифф. зачета	Код индикатора
1	Материалы и технологии производства МЭМС. Структуры и технологии производства микромеханических гироскопов и акселерометров.	ПК-1.3.1
2	Типы и физические основы работы микромеханических гироскопов.	ПК-1.3.1
3	Гироскопы типа L-L, R-R, L-R и R-L. Схемы с наружным карданным подвесом. Схемы с внутренним карданным подвесом. Схемы со стержневыми подвесами. Схемы с поступательными колебаниями.	ПК-1.3.1
4	Схемы с угловыми колебаниями с одной и двумя осями чувствительности измерители.	ПК-1.3.1
5	Твердотельные волновые гироскопы.	ПК-1.3.1
6	Схемы камертонных подвесов.	ПК-1.3.1
7	Типы и физические основы работы микромеханических акселерометров.	ПК-1.3.1
8	Основные характеристики микромеханических акселерометров и гироскопов.	ПК-1.3.1

9	Математические модели микромеханических гироскопов разных типов и их анализ.	ПК-1.3.1
10	Зависимость чувствительности и полосы пропускания от конструктивных параметров гироскопов.	ПК-1.3.1
11	Проектирование микромеханических гироскопов с заданными метрологическими характеристиками.	ПК-1.3.1
12	Электростатические датчики сил и моментов. Электростатические датчики сил и моментов гребенчатой структуры.	ПК-1.3.1
13	Датчики сил и моментов плоской структуры. Емкостные датчики микроперемещений.	ПК-1.3.1
14	Система автогенераторного возбуждения первичных колебаний ММГ.	ПК-1.3.1
15	Основные структуры микромеханических гироскопов.	ПК-1.3.1
16	Микромеханические гироскопы прямого преобразования.	ПК-1.3.1
17	Микромеханические гироскопы компенсационного типа.	ПК-1.3.1
18	Методы и оборудование для тестирования микромеханических гироскопов и акселерометров. Однократное упрощенное тестирование.	ПК-1.3.1
19	Статическое и динамическое тестирование. Тестирование на стабильность параметров. Особенности тестирования гироскопов на стендах вращения.	ПК-1.3.1
20	Обработка результатов тестирования.	ПК-1.3.1
21	Тестирование при изменении температуры. Тестирование при осциллирующей скорости вращения основания.	ПК-1.3.1
22	Тестирование на вибрационные и ударные нагрузки. Тестирование па влияние магнитного поля.	ПК-1.3.1
23	Калибровка и компенсация ошибок гироскопов и акселерометров	ПК-1.3.1
24	Алгоритмы оценивания параметров микромеханических гироскопов в реальном времени.	ПК-1.3.1
25	Методы реализации этих алгоритмов во встроенных контроллерах. Стабилизация метрологических характеристик микромеханических гироскопов на основе результатов оценивания их параметров	ПК-1.3.1
26	Рассчитайте относительное изменение сопротивления «точечного» тензорезистора для следующих исходных данных: длина тензорезистора равна $0.1 \cdot 10^{-3}$ м, ширина тензорезистора равна $0.01 \cdot 10^{-3}$ м, $T=300$ К, ширина полосы пропускания частот составляет $6.28 \cdot 10^3$ 1/с, допустимая удельная мощность рассеяния равна $5 \cdot 10^6$ Вт/м <sup>2</sup> , относительная суммарная ошибка тензопреобразователя составляет 0,01.	ПК-1.3.1
27	Вычислите параметры линейного микродвигателя. Микроструктура вытравлена из поликремния, имеющего $E=1,4 \cdot 10^{11}$ Па, $\rho=2300$ кг/м <sup>3</sup> . Геометрические размеры: толщина всей микроструктуры 3,5 мкм, ширина пальца ротора, также и у статора 4,0 мкм, взаимное перекрытие пластин конденсаторов 20 мкм, зазор между пальцами гребенчатых структур 2,0 мкм, длина пальца ротора, также	ПК-1.3.1

	и статора 30 мкм, длина ротора 112 мкм, длина упругого элемента 120 мкм, ширина упругого элемента 2,0 мкм, размеры соединительных элементов $d=30\text{мкм}$ , $l=24\text{мкм}$ , $t=12\text{мкм}$ . Модули напряжений: $U_{оп} = U_x = 30\text{ В}$ . Число пальцев ротора $n = 20$ шт.	
28	Рассчитайте добротность, обусловленную внутренним трением в упругих элементах подвеса для МГ по рисунку, при колебаниях ротора по координате $\beta$ . Ротор находится в вакуумированном корпусе.	ПК-1.3.1
29	Вычислите амплитуды колебаний ЦМ маятника и его фазовое запаздывание для значений $L = 0$ и $1\text{ м}$ при частотах угловых колебаний основания $\omega = 1$ (6,28 1/с), 2 (12,56 1/с) и 3 Гц (18,84 1/с) и амплитуде $\gamma_m = 8^\circ = 0,139$ рад. Параметры маятника: $m=0,29 \cdot 10^{-3}\text{ кг}$ , $l+a=5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$ , $g=9,81\text{ м/с}$ ; $k_{22}=4,4 \cdot 10^{-4}\text{ Н}\cdot\text{м}$ ; $J_A = 7,093 \cdot 10^{-9}\text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ; $k_{d\theta} = 49,93 \cdot 10^{-6}\text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ , число упругих балок 3.	ПК-1.3.1
30	Рассчитайте параметры фильтра, обеспечивающие крутизну выходной характеристики $U_{вых}/u = 1\text{ В/г}$ , и значение пульсации выходного сигнала $\Delta U \leq 10^{-5}\text{ В}$ для параметров МА: $m=0,2 \cdot 10^{-3}\text{ кг}$ , $h_0 = 20 \cdot 10^{-6}\text{ м}$ , $K_y = 6,34 \cdot 10^{-4}\text{ м/Н}$ , $T = 3,55 \cdot 10^{-4}\text{ с}$ , $\xi_y = 15,28$ , $U = 5\text{ В}$ .	ПК-1.3.1
31	Рассчитайте максимальную амплитуду горизонтальной вибрации, измеряемой акселерометром с электростатической обратной связью. Исходные данные: $m = 0,075 \cdot 10^{-3}\text{ кг}$ ; $l+a \approx 5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$ ; $h_0 = 20 \cdot 10^{-6}\text{ м}$ ; $n=3$ ; $\gamma_0 = 270^\circ$ ; $k_{11} = 2,036 \cdot 10^3\text{ Н/м}$ , $k_{12}=k_{21}=-0.819\text{ Н}$ , $k_{22}= 4.398 \cdot 10^{-4}\text{ Н/м}$ , $\epsilon=1,00058$ ; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}\text{ Ф/м}$ , $S=6 \cdot 10^{-5}\text{ м}^2$ , $K_\phi=1$ , $U_{оп}=1\text{ В}$ .	ПК-1.3.1
32	Рассчитайте параметры и характеристики МГ с одной ИМ. Схема МГ с соблюдением масштаба относительных размеров ИМ и элементов упругого подвеса приведена на рисунке.	ПК-1.3.1
33	Постройте математическую модель MEMS-акселерометра MMA7331L	ПК-1.3.1

Перечень тем для курсового проектирования/выполнения курсовой работы представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Перечень тем для курсового проектирования/выполнения курсовой работы

№ п/п	Примерный перечень тем для курсового проектирования/выполнения курсовой работы
	Учебным планом не предусмотрено

Вопросы для проведения промежуточной аттестации в виде тестирования представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Примерный перечень вопросов для тестов

№ п/п	Примерный перечень вопросов для тестов	Код индикатора
1.	Выберите из списка типы акселерометров, различающиеся по виду	ПК-1.3.1

	<p>движений инерционной массы:</p> <p>А. Осевые</p> <p>Б. Однокомпонентные</p> <p>В. Маятниковые</p> <p>Г. Линейные</p> <p>Д. Приборы компенсационного измерения</p> <p>Запишите соответствующие буквы в любом порядке.</p>	
2.	<p>Сопоставьте элементам первого списка</p> <p>1. Акселерометр прямого измерения</p> <p>2. Линейный акселерометр</p> <p>3. Акселерометр компенсационного измерения</p> <p>4. Угловой акселерометр</p> <p>и элементы второго списка</p> <p>А. Ось чувствительности параллельна вектору линейного ускорения, являющегося следствием углового ускорения.</p> <p>Б. ЧЭ непосредственно передает информацию о действующем на него ускорении в виде перемещений ИМ или деформаций упругих элементов подвеса на вторичный преобразователь. Все погрешности измерительной цепи присутствуют в выходном сигнале акселерометра.</p> <p>В. Сила, вызванная измеряемым ускорением и действующая на ИМ, частично или полностью (интегратор в контуре) уравнивается с помощью цепи отрицательной обратной связи, реализующей силовую разгрузку ЧЭ посредством выходного сигнала, поступающего на устройство компенсации (преобразователи силы, момента). Точность измерительной цепи зависит в основном от преобразователя силы (момента).</p> <p>Г. Ось чувствительности параллельна вектору измеряемого ускорения</p>	ПК-1.3.1
3.	<p>Уравнение движения инерционной массы (ИМ) осевого микроакселерометра при условии, что центр масс и геометрический центр подвеса совпадают и направление действующего ускорения совпадает с осью <math>y</math>, которая является осью чувствительности, имеет вид</p> $m y'' + b_y y' + G_y y = m a_y,$ <p>где <math>m</math> – масса ИМ; <math>b_y</math>, <math>G_y</math> – коэффициент демпфирования и суммарная жесткость подвеса в направлении оси <math>y</math> соответственно; <math>a_y</math> – действующее ускорение.</p> <p>Запишите данное уравнение в установившемся режиме.</p>	ПК-1.3.1
4.	<p>Перечислите не менее пяти классификационных признаков микромеханических гироскопов.</p>	ПК-1.3.1
5.	<p>Выберите ошибочное утверждение.</p> <p>А. По виду движения ИМ в режиме движения (РД) и режиме чувствительности (РЧ) различают гироскопы LL-типа (linear-linear), гироскопы RR-типа (rotare-rotare) и гироскопы LR-типа.</p> <p>Б. В LL-гироскопах ИМ в РД и РЧ совершают вращательные перемещения</p> <p>В. В RR-гироскопах ИМ в РД и РЧ совершают вращательные перемещения</p> <p>Г. В LR (RL)-гироскопах ИМ в РД и РЧ совершают различные комбинации поступательных и вращательных перемещений.</p>	ПК-1.3.1
6.	<p>Монокристаллический кремний наиболее часто используется в</p>	ПК-1.3.1

	МЭМС - устройствах. Монокремний имеет структуру решетки типа алмаза. Как известно, для монокристаллов имеет место анизотропия свойств. Определите символ направления, проходящего через начало координат и точку с координатами ( $a/8$ , $3b/8$ , $5c/8$ ).	
7.	Перечислите не менее трех способов контроля размерных параметров ЧЭ МЭМС прибора при травлении.	ПК-1.3.1
8.	Опишите принцип работы емкостного преобразователя перемещений.	ПК-1.3.1
9.	Перечислите и сравните методы устранения электронными средствами основных погрешностей микромеханических гироскопов.	ПК-1.3.1
10.	Дайте краткое пояснение термину «электростатическая жесткость подвеса»	ПК-1.3.1
11.	Способность микроприбора воспроизводить измеряемые величины с допустимыми погрешностями характеризуется его измерительными свойствами. Выберите из списка пункт, не относящийся к измерительным свойствам микроприбора: А. статическая характеристика, Б. Чувствительность В. переходный процесс Г. тип подвеса Д. полоса пропускания частот и частотные искажения измеряемого сигнала	ПК-1.3.1
12.	Укажите, в каком из возможных режимов частотной настройки обеспечивается максимальная чувствительность микромеханического гироскопа к измеряемой угловой скорости.	ПК-1.3.1
13.	Выберите все верные утверждения из списка: А. Частотная характеристика линейной стационарной системы является функцией, позволяющей найти параметры выходного гармонического сигнала по известным параметрам входного сигнала. Б. Чувствительность линейного акселерометра ограничивается в основном жесткостью упругого подвеса, тепловыми шумами, шумами $1/f$ , а также шумами систем считывания информации и управления В. На сегодняшний день известен ряд физических принципов, на которых основано функционирование выпускаемых промышленно МЭМС-акселерометров, различающихся способами считывания сигнала при ускорении подвижной массы устройства: пьезоэлектрические, ёмкостные, пьезорезистивные, оптические и электромагнитные.	ПК-1.3.1
14.	Поясните кратко, с чем связаны А. Погрешности коэффициента преобразования микромеханического гироскопа Б. Смещение нуля	ПК-1.3.1
15.	Приведите формулу расчета вариации Аллана	ПК-1.3.1
16.	Ниже приведен список определяемых при испытаниях характеристик или свойств датчиков угловой скорости (1) Смещение нуля, дрейф, шум (2) Влияние постоянных линейных ускорений (3) Удароустойчивость и ударопрочность (4) Влияние изменений температуры и давления	ПК-1.3.1

	Для каждого из пунктов списка укажите необходимое испытательное оборудование.	
17.	Поясните, для чего применяются фоторезисты в процессе фотолитографии.	ПК-1.3.1
18.	Выберите верные утверждения: А. Получаемые нами показания МЭМС-датчиков не являются точными значениями, они всегда содержат погрешности и ошибки. Б. Получаемые нами показания МЭМС-датчиков являются точными значениями. В. Чтобы ошибки в измерениях не приводили к ошибкам в функционировании системы в целом, данные датчиков необходимо обрабатывать.	ПК-1.3.1
19.	Выберите диапазон размеров МЭМС устройств: А. 100 нм-1000000нм Б. 1000000нм-10 <sup>8</sup> нм В. 0.1 нм-100 нм	ПК-1.3.1
20.	Назовите области применения микромеханических акселерометров	ПК-1.3.1
21.	Перечислите не менее трех методов, применяемых при изготовлении МЭМС устройств.	ПК-1.3.1
22.	Опишите кратко принцип работы волновых микромеханических гироскопов.	ПК-1.3.1
23.	Перечислите известные вам методы испытаний механических свойств микрообразцов.	ПК-1.3.1
24.	Укажите, сколько главных форм колебаний относительно положения равновесия имеет монокристаллический маятник с двумя степенями свободы.	ПК-1.3.1
25.	Выберите из списка ошибочное утверждение. А. Работа преобразователей этого типа основана на изменении характеристик полупроводниковых материалов в зависимости от деформации ЧЭ. Б. В микромеханических приборах (акселерометрах, наклономерх, датчиках давлений и др.) нашли применение тензопреобразователи только диффузионного типа В. Известно, что влияние деформаций на сопротивление проводника связано как с изменением удельной проводимости его материала, так и с изменением длины и площади поперечного сечения образца. Г. Диффузионные тензорезисторы представляют собой примеси n- или p-типа проводимости, которые в виде узких полосок внедряют (имплантируют) в приповерхностный слой кристалла через вскрытые окна в оксиде.	ПК-1.3.1
26.	Перечислите основные достоинства и недостатки емкостного преобразователя перемещений.	ПК-1.3.1
27.	Перечислите методы устранения электронными средствами основных погрешностей МГ.	ПК-1.3.1
28.	Приведите общую схему построения уравнений движения микромеханического гироскопа.	ПК-1.3.1
29.	Объясните причины газового и конструкционного демпфирования чувствительных элементов микромеханических гироскопов.	ПК-1.3.1
30.	Поясните кратко, что понимается под термином «шум» в микромеханических приборах.	ПК-1.3.1

Перечень тем контрольных работ по дисциплине обучающихся заочной формы обучения, представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Перечень контрольных работ

№ п/п	Перечень контрольных работ
	Не предусмотрено

10.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания индикаторов, характеризующих этапы формирования компетенций, содержатся в локальных нормативных актах ГУАП, регламентирующих порядок и процедуру проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся ГУАП.

#### 11. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

11.1. Методические указания для обучающихся по освоению лекционного материала.

Основное назначение лекционного материала – логически стройное, системное, глубокое и ясное изложение учебного материала. Назначение современной лекции в рамках дисциплины не в том, чтобы получить всю информацию по теме, а в освоении фундаментальных проблем дисциплины, методов научного познания, новейших достижений научной мысли. В учебном процессе лекция выполняет методологическую, организационную и информационную функции. Лекция раскрывает понятийный аппарат конкретной области знания, её проблемы, дает цельное представление о дисциплине, показывает взаимосвязь с другими дисциплинами.

##### Планируемые результаты при освоении обучающимися лекционного материала:

- получение современных, целостных, взаимосвязанных знаний, уровень которых определяется целевой установкой к каждой конкретной теме;
- получение опыта творческой работы совместно с преподавателем;
- развитие профессионально-деловых качеств, любви к предмету и самостоятельного творческого мышления.
- появление необходимого интереса, необходимого для самостоятельной работы;
- получение знаний о современном уровне развития науки и техники и о прогнозе их развития на ближайшие годы;
- научиться методически обрабатывать материал (выделять главные мысли и положения, приходить к конкретным выводам, повторять их в различных формулировках);
- получение точного понимания всех необходимых терминов и понятий.

Лекционный материал может сопровождаться демонстрацией слайдов и использованием раздаточного материала при проведении коротких дискуссий об особенностях применения отдельных тематик по дисциплине.

##### Структура предоставления лекционного материала:

- Изложение теоретических вопросов, связанных с рассматриваемой темой;
- Описание методов и алгоритмов, применяемых для решения технических задач моделирования электромеханических систем навигации и управления подвижными объектами;
- Демонстрация примеров решения задач;
- Обобщение изложенного материала;
- Ответы на возникающие вопросы по теме лекции.

Методические указания по освоению лекционного материала имеются в изданном виде, в виде следующих электронных ресурсов библиотеки ГУАП:



М.И. Евстифеев, А.И. Панферов, В.К. Пономарев, Л.А. Северов, С.Ф. Скорина  
Микромеханические инерциальные чувствительные элементы. Микромеханические гироскопы. Учебное пособие. ГУАП. Санкт-Петербург, 2007

#### 11.2. Методические указания для обучающихся по прохождению самостоятельной работы

В ходе выполнения самостоятельной работы, обучающийся выполняет работу по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия.

Для обучающихся по заочной форме обучения, самостоятельная работа может включать в себя контрольную работу.

В процессе выполнения самостоятельной работы, у обучающегося формируется целесообразное планирование рабочего времени, которое позволяет им развивать умения и навыки в усвоении и систематизации приобретаемых знаний, обеспечивает высокий уровень успеваемости в период обучения, помогает получить навыки повышения профессионального уровня.

Методическими материалами, направляющими самостоятельную работу обучающихся являются:

- учебно-методический материал по дисциплине;
- методические указания по выполнению контрольных работ (для обучающихся по заочной форме обучения).

#### 11.3. Методические указания для обучающихся по прохождению текущего контроля успеваемости.

Текущий контроль успеваемости предусматривает контроль качества знаний обучающихся, осуществляемого в течение семестра с целью оценивания хода освоения дисциплины.

Порядок прохождения текущего контроля успеваемости определяется Положениями ГУАП «О текущем контроле успеваемости и промежуточной аттестации студентов ГУАП, обучающихся по программы высшего образования» и «О модульно-рейтинговой системе оценки качества учебной работы студентов в ГУАП».

В начале лекции проводится устный опрос обучающихся по теме предыдущей лекции. В случае успешного прохождения 80% опросов обучающийся в качестве поощрения систематической и успешной работы освобождается от одного из двух вопросов при проведении промежуточной аттестации по выбору обучающегося. В случае отсутствия обучающегося на занятии, он получает дополнительный вопрос по теме соответствующей лекции при проведении промежуточной аттестации.

#### 11.4. Методические указания для обучающихся по прохождению промежуточной аттестации.

Промежуточная аттестация обучающихся предусматривает оценивание промежуточных и окончательных результатов обучения по дисциплине в форме зачета с аттестационной оценкой «зачтено» или «не зачтено».

Билет содержит два теоретических вопроса и задачу. В процессе подготовки обучающиеся могут пользоваться конспектом. В ответ на теоретические вопросы обучающийся должен привести развернутый конспект с планом ответа, необходимыми определениями, иллюстрациями, формулами и зависимостями. Обучающийся должен представить подробное письменное решение задачи, содержащее все необходимые формулы, преобразования и правильный ответ. В ходе ответа преподавателем могут быть заданы уточняющие вопросы. После ответа преподавателем могут быть заданы студенту 1-2 дополнительных вопроса по вопросам из всего курса, не требующие длительной подготовки. На подготовку конспекта ответа по билету отводится не более 1 часа 20

минут, на обдумывание ответа на дополнительные вопросы не более 10 минут на каждый. В общей сложности ответ студента не должен превышать 40 минут без учета времени на обдумывание дополнительных вопросов.

Система оценок и требования к методам проведения промежуточной аттестации осуществляется в соответствии с требованиями Положений «О текущем контроле успеваемости и промежуточной аттестации студентов ГУАП, обучающихся по программы высшего образования» и «О модульно-рейтинговой системе оценки качества учебной работы студентов в ГУАП».

Лист внесения изменений в рабочую программу дисциплины

Дата внесения изменений и дополнений. Подпись внесшего изменения	Содержание изменений и дополнений	Дата и № протокола заседания кафедры	Подпись зав. кафедрой