

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по УР

И.Г. Игнатова

2019

**ПРОГРАММА ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ
«ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК СЕНСОРНЫХ МИКРОСИСТЕМ»**

Программа повышения квалификации разработана в Центре НТИ «Сенсорика»

Москва – 2019

1. Цель реализации программы

Цель программы – получение новой компетенции: сквозное проектирование элементов сенсорных микросистем, соответствующей отдельным обобщенным трудовым функциям (ОТФ) профстандарта 29.007 «Специалист по проектированию микро- и наноразмерных электромеханических систем»:

ОТФ С. Разработка физического прототипа микроэлектро-механической системы:

С/01.6 Определение возможных вариантов физической реализации микромеханических компонентов микроэлектромеханической системы);

С/04.6 Моделирование и анализ результатов термоэлектромеханического, оптического, жидкостного, электромагнитного, электрического и технологического моделирования микроэлектромеханической системы.

2. Требования к результатам обучения

Формируемая профессиональная компетенция – сквозное проектирование элементов сенсорных микросистем.

В результате освоения данной программы слушатель должен:

знать:

- маршруты проектирования сенсорных микросистем;
- типы конструкций чувствительных элементов сенсорных микросистем;
- основы расчета элементов конструкции сенсорных микросистем;
- базовые технологии изготовления элементов сенсорных микросистем;
- особенности моделирования технологических процессов.

уметь:

- проводить интеграцию элементов сенсорной микросистемы;
- разрабатывать архитектуру сенсорной микросистемы;
- проводить разработку элементов сенсорной микросистемы;
- проводить моделирование сенсорной микросистемы;
- проводить проектирование топологии чувствительного элемента сенсорных микросистем и «сенсоров-на-кристалле»;
- осуществлять верификацию топологии чувствительного элемента сенсорных микросистем и «сенсоров-на-кристалле».

иметь практический опыт:

- выбора маршрута проектирования МЭМС;
- проведения расчётов выходных параметров сенсорных микросистем;
- верификации схемы съема сигнала с чувствительного элемента микросистемы.

3. Содержание программы

**Учебный план
программы повышения квалификации
«Цифровой двойник сенсорных микросистем»**

Категория слушателей – инженеры, инженеры-конструкторы, инженеры-технологи, а также другие инженерные сотрудники предприятий, профессиональная деятельность которых связана с исследованием и разработкой сенсорных микросистем.

Срок обучения – 72 часа.

Форма обучения очная/очно-заочная/электронное обучение.

№ п/ п	Наименование разде- лов / модулей	Всего, час	В том числе			Образова- тельные технологии, в том числе ЭО и (или) ДОТ
			Аудиторных		Самостоя- тельная работа	
			Лекции	Практиче- ские и ла- боратор- ные заня- тия		
1.	Подходы к проектиро- ванию МЭМС	8	4	2	2	ЭО
2.	Проектирование на системном уровне	16	10	3	3	ЭО
3.	Проектирование на фи- зическом уровне	16	7	6	3	ЭО
4.	Проектирование топо- логии «сенсора-на- кристалле»	8	4	2	2	ЭО
5.	Моделирование техно- логических процессов	14	10	2	2	ЭО
6.	Верификация МЭМС- сенсора	8	4	2	2	ЭО
7.	Итоговая аттестация: Итоговое индивиду- альное задание	2			2	
	Всего	72	39	17	16	

**Учебно-тематический план
программы повышения квалификации
«Цифровой двойник сенсорных микросистем»**

№ п/п	Наименование тем раз- делов / модулей	Всего, час	В том числе			Образова- тельные технологии, в том числе ЭО и (или) ДОТ
			Аудиторных		Само- стоя- тельная работа	
			Лекции	Практиче- ские и ла- боратор- ные заня- тия		
1.	Подходы к проектирова- нию МЭМС	8	4	2	2	ЭО
1.1	Маршруты проектирова- ния сенсорных микросис- тем	4	2	1	1	ЭО
1.2	Интеграция элементов сенсорной системы	4	2	1	1	ЭО
2.	Проектирование на сис- темном уровне	16	10	3	3	ЭО
2.1	Разработка архитектуры сенсорной микросистемы	5	3	1	1	ЭО
2.2	Разработка элементов сен- сорной микросистемы	6	4	1	1	ЭО
2.3	Моделирование сенсорной микросистемы	5	3	1	1	ЭО
3.	Проектирование на физи- ческом уровне (тепловой анализ, прочностной ана- лиз конструкции ЧЭ)	16	7	6	3	ЭО
3.1	Конструкции чувстви- тельных элементов сенсорных микросистем	5	2	2	1	ЭО
3.2	Расчет элементов конст- рукции сенсорных микро- систем	5	2	2	1	ЭО

3.3	Моделирование конструкции сенсорных микросистем	6	3	2	1	ЭО
4.	Проектирование топологии «сенсор-на-кристалле»	8	4	2	2	ЭО
4.1	Проектирование топологии чувствительного элемента сенсорных микросистем	4	2	1	1	ЭО
4.2	Проектирование топологии «сенсор-на-кристалле»	4	2	1	1	ЭО
5.	Моделирование технологических процессов	14	10	2	2	ЭО
5.1	Базовые технологии изготовления элементов сенсорных микросистем	7	5	1	1	ЭО
5.2	Особенности моделирования технологических процессов	7	5	1	1	ЭО
6.	Верификация МЭМС-сенсора	8	4	2	2	ЭО
6.1	Верификация топологии чувствительного элемента сенсорных микросистем	4	2	1	1	ЭО
6.2	Верификация топологии «сенсор-на-кристалле»	4	2	1	1	ЭО
7.	Итоговая аттестация: Итоговое индивидуальное задание	2			2	
	Всего	72	39	17	16	

Календарный учебный график

Календарный учебный график составляется в форме расписания занятий при наборе группы и прилагается к программе повышения квалификации.

**Учебная программа
повышения квалификации
«Цифровой двойник сенсорных микросистем»**

Раздел 1. Подходы к проектированию МЭМС (8 часов).

Тема 1.1 Маршруты проектирования сенсорных микросистем

- подходы к проектированию «сверху-вниз» и «снизу-вверх»
- структура САПР МЭМС (библиотеки, подсистемы создания электрических схем, моделирования на системном уровне, создания топологии и чертежей масок, моделирования физических и технологических процессов, формирования 3D моделей, технологической подготовки к производству)
- САПР чувствительного элемента МЭМС
- САПР микросистем

Тема 1.2 Интеграция элементов сенсорной системы

- типы разрабатываемых МЭМС в САПР
- элементы базы данных в САПР МЭМС
- интеграция модулей и подсистемы в САПР МЭМС

Раздел 2. Проектирование на системном уровне (16 часов).

Тема 2.1 Разработка архитектуры сенсорной микросистемы

- состав структуры сенсорной микросистемы
- взаимосвязи между элементами сенсорной микросистемы

Тема 2.2 Разработка элементов сенсорной микросистемы

- разработка чувствительного элемента сенсорной микросистемы

Тема 2.3 Моделирование сенсорной микросистемы

- моделирование сенсорной микросистемы на электронном уровне

Раздел 3. Проектирование на физическом уровне (тепловой анализ, прочностной анализ конструкции ЧЭ) (16 часов).

Тема 3.1 Конструкции чувствительных элементов сенсорных микросистем

- типы конструкций чувствительных элементов сенсорных микросистем
- анализ принципа работы элементов сенсорных микросистем

Тема 3.2 Расчет элементов конструкции сенсорных микросистем

- расчет геометрических параметров чувствительных элементов сенсорных микросистем

- расчет параметров системы съема сигнала

Тема 3.3 Моделирование конструкции сенсорных микросистем

- моделирование динамики работы конструкции чувствительного элемента сенсорной микросистемы

Раздел 4. Проектирование топологии «сенсора-на-кристалле» (8 часов).

Тема 4.1 Проектирование топологии чувствительного элемента сенсорных микросистем

- основные принципы проектирования топологии чувствительного элемента сенсорной микросистемы

- возможность создания топологических параметризованных ячеек чувствительного элемента

Тема 4.2 Проектирование топологии «сенсор-на-кристалле»

- методы и подходы к проектированию топологии «сенсор-на-кристалле»;

- топологические приемы борьбы с шумами и помехами системы «сенсор-на-кристалле»

Раздел 5. Моделирование технологических процессов (14 часов).

Тема 5.1 Базовые технологии изготовления элементов сенсорных микросистем

- технологии изготовления чувствительных элементов МЭМС (поверхностная обработка, объёмная обработка, микростереолитография)

- технологии сборки и монтажа ЧЭ МЭМС

- технологии изготовления микросистем (микросборок)

Тема 5.2 Особенности моделирования технологических процессов

- база данных материалов

- база данных технологических операций

- разработка технологических процессов в САПР МЭМС

Раздел 6. Верификация МЭМС-сенсора (8 часов).

Тема 6.1 Верификация топологии чувствительного элемента сенсорных микросистем

-подготовка топологии чувствительного элемента к производству с использованием современных технологий

-особенности процедуры верификации топологии чувствительного элемента

Тема 6.2 Верификация топологии «сенсор-на-кристалле»

-проверка топологии на соответствие технологическим нормам и требованиям

-проверка топологии на соответствие электрической схеме

Перечень практических занятий

Номер темы	Наименование практического занятия	Кол-во часов
1.1, 1.2	Подходы к проектированию МЭМС	2
2.1,2.2,2.3	Проектирование на системном уровне	3
3.1,3.2,3.3	Проектирование на физическом уровне	6
4.1,4.2	Проектирование топологии «сенсора-на-кристалле»	2
5.1,5.2	Моделирование технологических процессов	2
6.1,6.2	Верификация МЭМС-сенсора	2

Перечень лабораторных работ

Лабораторных работ не предусмотрено.

4. Материально-технические условия реализации программы

Для очной и очно-заочной форм обучения

Наименование специализированных аудиторий кабинетов, лабораторий	Вид занятия	Наименование оборудования, программного обеспечения
Компьютерный класс	Лекции	1. Аппаратное обеспечение: - компьютеры, мультимедийный проектор, экран, доска. 2. Программное обеспечение: - ОС Windows 7, 64; - Adobe Reader; - Microsoft Office или аналогичным

		офисным пакетом
Компьютерный класс	Практическое задание	1. Аппаратное обеспечение: - компьютеры. 2. Программное обеспечение: - ОС Windows 7, 64; - Adobe Reader; - Microsoft Office или аналогичным офисным пакетом

5. Учебно-методическое обеспечение программы

Основная литература:

1. Левицкий А.А. Проектирование микросистем. Программные средства обеспечения САПР: учеб. пособие / А. А. Левицкий, П. С. Маринушкин. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2010. – 156 с.
2. Интеллектуальные сенсорные системы / пер. с англ. под ред. д. т. н., проф. В.А.Шубарева, Москва: Техносфера, 2011. – 464 с. ISBN: 978-5-94836-299-1
3. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Приборы и системы ориентации и навигации на МЭМС-датчиках. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – 225с.
4. Тимофеев В.Н., Погалов А.И., Угольников С.В., Андрианов А.М., Панкратов О.В. Техническая механика микросистем: учебное пособие/В.Н. Тимофеев и др. – М.:БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 176 с.

Дополнительная литература:

1. Вертянов Д.В. Комплексное проектирование микросистем на печатных платах в САПР Mentor Graphics [Текст]: Учеб. пособие. Ч. 1: Центральная библиотека Library Manager / Д.В. Вертянов, В.Г. Сикоев, Е.П. Горюнова, С.П. Тимошенко; Министерство образования и науки РФ, Национальный исследовательский университет "МИЭТ"; Под ред. С.П. Тимошенко. - М.: МИЭТ, 2019. - 172 с.
2. John H. Lau. Advanced MEMS Packaging / Chengkuo Lee, C. S. Premachandran, Yu Aibin. 2018. – 577 P.
3. Daniel Lu. Materials for Advanced Packaging. Second Edition. 2017. – 974 P.
- И.Е. Лысенко. Учебно-методическое пособие «Сборник практических работ по курсу «Микроэлектромеханика» / Е.В. Полищук, В.А. Хайрулина– Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, 2007.– 27 с.
4. И.Е. Лысенко. Учебно-методическое пособие "Моделирование элементов микросистемной техники в программе ANSYS / И.Е. Лысенко, М.А. Денисенко, Е.В.

Шерова, Н.К. Приступчик – Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, 2007.– 42 с.

5. И.Е. Лысенко. Учебно-методическое пособие "Моделирование элементов микросистемной техники в программе ANSYS. Часть II / И.Е. Лысенко, М.А. Денисенко, Е.В. Шерова, Н.К. Приступчик – Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, 2009.– 28 с.

6. И.Е. Лысенко. Руководство к лабораторной работе "Моделирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники с использованием языка VHDL-AMS"/ И.Е. Лысенко, Е.А. Рындин. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. 26 с.

7. Б.Г. Коноплев. Руководство к лабораторной работе «Схемотехническое моделирование СБИС и микросистем в САПР Tanner Pro» / Б.Г. Коноплев, Е.А. Рындин, А.В. Ковалев, И.Е. Лысенко – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 30 с.

8. Учебное пособие по дисциплине «Разработка и моделирование МЭМС-устройств». Учебное пособие. М.: МИЭТ, 2019. – 144 с.: ил. Шалимов А.С., Кочурина Е.С., Калугин В.В., Тимошенко С.П. Москва, 2019г. МИЭТ. 144с.

9. Шалимов А.С., Кочурина Е.С., Калугин В.В., Тимошенко С.П. Разработка и моделирование МЭМС-устройств : учеб.пособие / под ред. С.П.Тимошенко. – М. : МИЭТ, 2019. – 144 с. : ил.

10. Шалимов А.С., Кочурина Е.С. Проектирование МЭМС-устройств : учеб.пособие / под ред. С.П.Тимошенко. – М. : МИЭТ, 2018. – 108 с. : ил.

Программное обеспечение:

1. ОС Windows 7, 64;
2. Adobe Reader;
3. Microsoft Office или аналогичным офисным пакетом
4. TeamViewer, Skype (для дистанционной работы)

6. Оценка качества освоения программы

Образовательное учреждение, реализующее программу курса, обеспечивает организацию и проведение текущего и итогового контроля – демонстрирующих обучающимися знаний, умения и полученного опыта практической деятельности.

Текущий контроль проводится преподавателем на основе оценки результатов выполнения практических заданий (Приложение 1).

Итоговый контроль проводится комиссией, состоящей из преподавателей и представителей профессионального сообщества по результатам защиты выполненного итогового индивидуального задания. Примеры тем индивидуальных заданий приведены в Приложении 2.

Оценивание выполнения практических заданий проводится бинарно, в случае успешного выполнения обучающийся получает 10 баллов. Итоговое индивидуальное задание оценивается максимум 40 баллами. Структура и сроки сдачи контрольных мероприятий, а также детальная схема начисления баллов представлена в таблице ниже.

Структура и график контрольных мероприятий

№ модуля	1	2	3	4	5	6	Итоговое индивидуальное задание	ИТОГО
Максимальный балл	10	10	10	10	10	10	40*	100

*Итоговое индивидуальное задание является обязательным для получения положительной итоговой оценки.

Максимальный балл (40) ставится в случае полностью выполненного индивидуального задания без ошибок.

Средний балл (20) ставится в случае выполненного индивидуального задания с ошибками, но не более 3.

Минимальный балл (5) ставится в случае не полностью выполненного индивидуального задания с ошибками.

При выставлении итоговой оценки используется следующая шкала:

Сумма баллов	Оценка
Менее 65	Не зачтено
65 и выше	Зачтено

7. Составители программы

Евстафьев С.С., канд. техн. наук, доцент Института НМСТ,

Вертянов Д.В., старший преподаватель Института НМСТ.

Кочурина Е.С., канд. техн. наук, доцент Института НМСТ

Согласовано: Директор ДРОП

Н.Ю. Соколова

1. Вопросы для практических заданий.

Практическое задание 1:

1. Расскажите про подходы к проектированию «сверху-вниз» и «снизу-вверх». Преимущества и недостатки. Приведите примеры.
2. Назовите основные элементы структуры САПР МЭМС.
3. Приведите примеры САПР МЭМС.
4. САПР чувствительного элемента МЭМС.
5. САПР микросистем.
6. Какие типы МЭМС можно разработать с помощью САПР?
7. Назовите основные элементы базы данных в САПР МЭМС?
8. Интеграция модулей и подсистемы в САПР МЭМС.

Практическое задание 2:

1. Основные узлы электронного узла сенсорной микросистемы
2. Прямой и компенсационный принцип измерения ускорения.
3. Принцип работы зарядового усилителя.
4. Принцип работы конструкции чувствительного элемента сенсорной микросистемы маятникового типа.
5. Математическая модель чувствительного элемента сенсорной микросистемы маятникового типа.

Практическое задание 3:

1. Расскажите об особенностях конструкции ЧЭ углового перемещения сенсорных микросистем.
2. Расскажите об особенностях конструкции ЧЭ линейного перемещения сенсорных микросистем.
3. Укажите достоинства и недостатки ЧЭ углового перемещения сенсорных микросистем.
4. Укажите достоинства и недостатки ЧЭ линейного перемещения сенсорных микросистем.
5. Запишите аналитическое выражение зависимости угла перемещения при действии ускорения от геометрических параметров конструкции сенсорных микросистем.
6. Запишите аналитическое выражение зависимости величины перемещения при действии ускорения от геометрических параметров конструкции сенсорных микросистем.

7. Укажите достоинства и недостатки емкостной системы съема сигнала.
8. Укажите достоинства и недостатки пьезоэлектрической системы съема сигнала.
9. Демпфирование конструкции сенсорной микросистемы
10. Гармонический анализ сенсорной микросистемы
11. Полный гармонический анализ сенсорной микросистемы
12. Метод суперпозиции
13. Колебания преднапряженных систем

Практическое задание 4:

1. Основные принципы проектирования топологии при проектировании топологии чувствительного элемента сенсорной микросистемы.
2. Понятие параметризованной ячейки при проектировании топологии системы «сенсор-на-кристалле».
3. Топологические приемы борьбы с шумами и помехами системы «сенсор-на-кристалле».
4. Маршрут проектирования топологии «сенсор-на-кристалле».
5. Методология создание чувствительного элемента сенсорной микросистемы.

Практическое задание 5:

1. Назовите основные технологии изготовления чувствительных элементов МЭМС?
2. Технология поверхностной обработки для создания МЭМС.
3. Технология объёмной обработки для создания МЭМС.
4. Технология микростереолитографии для создания МЭМС.
5. Технологии сборки и монтажа ЧЭ МЭМС.
6. Технологии изготовления микросистем (микросборок).
7. Разработка технологических процессов в САПР МЭМС.
8. База данных материалов в модуле по разработке технологических процессов МЭМС.
9. База данных технологических операций в САПР МЭМС.

Практическое задание 6:

1. Процедура проверки выполнения конструктивно-технологических норм и требований, предъявляемых к топологии при проектировании «сенсор-на-кристалле».
2. Процедура проверки топологии «сенсор-на-кристалле» на соответствие электрической схеме.

3. Особенности подготовки данных для изготовления фотошаблонов системы «сенсор-на-кристалле».
4. Методика верификации «сенсор-на-кристалле».
5. Основные требования к соотношению слоев при проектировании «сенсор-на-кристалле».

2. Примерные темы для итогового индивидуального задания, оцениваемого на итоговом контроле.

1. Расчет выходных параметров сенсорных микросистем в зависимости от геометрических параметров и указанной системы съема сигнала.
2. Верификация схемы съема сигнала с чувствительного элемента микросистемы