



Автономная некоммерческая организация высшего образования
«Волгоградский институт бизнеса»

Рабочая программа учебной дисциплины

Проектирование мехатронных систем

(Наименование дисциплины)

15.03.06 Мехатроника и робототехника, направленность (профиль) «Мехатроника»

(Направление подготовки / Профиль)

Бакалавр

(Квалификация)

Кафедра разработчик

Естественных наук и профессиональных коммуникаций

Год набора

2027

Вид учебной деятельности	Трудоемкость (объем) дисциплины
	Очная форма
	д
Зачетные единицы	3
Общее количество часов	108
Аудиторные часы контактной работы обучающегося с преподавателями:	32
– Лекционные (Л)	16
– Практические (ПЗ)	16
– Лабораторные (ЛЗ)	
– Семинарские (СЗ)	
Самостоятельная работа обучающихся (СРО)	76
К (Р-Г) Р (П) (+;-)	
Тестирование (+;-)	
ДКР (+;-)	
Зачет (+;-)	+
Зачет с оценкой (+;- (Кол-во часов))	
Экзамен (+;- (Кол-во часов))	

Волгоград 2026

Содержание

Раздел 1. Организационно-методический раздел	3
Раздел 2. Тематический план.....	6
Раздел 3. Содержание дисциплины.....	7
Раздел 4. Организация самостоятельной работы обучающихся	9
Раздел 5. Фонд оценочных средств для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации обучающихся.....	11
Раздел 6. Оценочные средства промежуточной аттестации (с ключами).....	15
Раздел 7. Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины	19
Раздел 8. Материально-техническая база и информационные технологии	20
Раздел 9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины	21

Раздел 1. Организационно-методический раздел

1.1. Цели освоения дисциплины

Дисциплина «Проектирование мехатронных систем» входит в «Часть, формируемая участниками образовательных отношений» подготовки обучающихся по направлению подготовки 15.03.06 Мехатроника и робототехника (профиль) «Мехатроника»

Целью дисциплины является формирование **компетенций** (в соответствии с ФГОС ВО и требованиями к результатам освоения основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО)):

ПК-1 Способен осуществлять проектирование и конструирование изделий робототехники

Дескрипторы компетенции:

ПК-1.1 Способен выполнять разработку схмотехнического решения и проведение расчетов изделий робототехники;

ПК-1.2 Способен осуществлять разработку рабочей проектно-конструкторской и эксплуатационной документации изделий робототехники в соответствии с требованиями нормативной документации.

Перечисленные компетенции формируются в процессе достижения индикаторов компетенций:

Обобщенная трудовая функция/ трудовая функция	Код и наименование дескриптора компетенций	Код и наименование индикатора достижения компетенций (из ПС)
Профстандарт: 29.003 Специалист по проектированию детской и образовательной робототехники	ПК-1.1 Способен выполнять разработку схмотехнического решения и проведение расчетов изделий робототехники; ПК-1.2 Способен осуществлять разработку рабочей проектно-конструкторской и эксплуатационной документации изделий робототехники в соответствии с требованиями нормативной документации.	Знает: ИД 1 ПК.1.1 Основы схмотехники изделий робототехники, современную элементную базу изделий робототехники, современные отечественные и зарубежные пакеты программ для решения схмотехнических задач, методики построения и расчета монтажных и принципиальных схем, методики расчета электрических цепей для определения параметров компонентов монтируемых схем, основные принципы конструкции робототехнических систем ПС 29.003 В/01.6; ИД 2 ПК.1.2 Национальные и отраслевые стандарты, технические регламенты, правила, требования и нормы единой системы конструкторской документации, типовые конструкции и конструктивные решения изделий робототехники, принципы работы проектируемых конструкций изделий робототехники ПС 29.003 В/02.6. Умеет:

		ИД 3 ПК.1.1 Анализировать принципы работы и условия эксплуатации проектируемых изделий робототехники, создавать и применять математические модели систем робототехники, использовать специализированные автоматизированные программы для выполнения кинематических и прочностных расчетов изделий робототехники, производить построение монтажных и принципиальных схем изделий робототехники, осуществлять расчет электрических цепей для определения параметров компонентов монтируемых схем изделий робототехники, использовать системы автоматизированного проектирования, разрабатывать макеты информационных, электромеханических, электрогидравлических, электронных и микропроцессорных модулей мехатронных и робототехнических систем ПС 29.003 В/01.6; ИД 4 ПК.1.2 Проектировать робототехнические системы изделий робототехники с использованием систем автоматизированного проектирования, разрабатывать конструкцию изделия робототехники в соответствии с требованиями стандартов организации, национальных стандартов и технических регламентов, требованиями заказчика, применять современные технологии изготовления изделий робототехники ПС 29.003 В/02.6. Имеет навыки: ИД 5 ПК.1.1 Анализа принципов работы и условий эксплуатации проектируемых изделий робототехники, создания и применения математических моделей систем робототехники, использования специализированных
--	--	---

		автоматизированных программ для выполнения кинематических и прочностных расчетов изделий робототехники, построения монтажных и принципиальных схем изделий робототехники, осуществления расчета электрических цепей для определения параметров компонентов монтируемых схем изделий робототехники, использования системы автоматизированного проектирования, разработки макетов информационных, электромеханических, электрогидравлических, электронных и микропроцессорных модулей мехатронных и робототехнических систем ПС 29.003 В/01.6; ИД 6ПК.1.2 Проектирования робототехнических систем изделий робототехники с использованием систем автоматизированного проектирования, разработки конструкций изделий робототехники в соответствии с требованиями стандартов организации, национальных стандартов и технических регламентов, требованиями заказчика, применения современных технологий изготовления изделий робототехники ПС 29.003 В/02.6.
--	--	--

1.2. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО
направления подготовки 15.03.06 Мехатроника и робототехника, направленность (профиль)
«Мехатроника»

№	Предшествующие дисциплины (дисциплины, изучаемые параллельно)	Последующие дисциплины
1	2	3
1.	Проектирование мехатронных и робототехнических систем	Монтаж и наладка мехатронных и робототехнических систем

1.3. Нормативная документация

Рабочая программа учебной дисциплины составлена на основе:

- Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки **15.03.06 Мехатроника и робототехника, направленность (профиль) «Мехатроника»**;
- Учебного плана направления подготовки **15.03.06 Мехатроника и робототехника, направленность (профиль) «Мехатроника»** 2027 года набора;
- Образца рабочей программы учебной дисциплины (приказ № 113-О от 01.09.2021 г.).

Раздел 2. Тематический план

Очная форма обучения (полный срок)

№	Тема дисциплины	Трудоемкость				
		Все го	Аудиторные занятия		СРО	Код индикатора и дескриптора достижения компетенций
			Л	ПЗ (ЛЗ, СЗ)		
1	2	3	4	5	6	7
1	Тема 1. Введение в проектирование мехатронных систем.	14	2	2	10	ИД 1 ПК.1.1 ИД 2 ПК.1.2 ИД 3 ПК.1.1 ИД 4 ПК.1.2 ИД 5 ПК.1.1 ИД 6ПК.1.2
2	Тема 2. Проектирование механических подсистем роботов.	14	2	2	10	ИД 1 ПК.1.1 ИД 2 ПК.1.2 ИД 3 ПК.1.1 ИД 4 ПК.1.2 ИД 5 ПК.1.1 ИД 6ПК.1.2
3	Тема 3. Выбор и расчет исполнительных электроприводов.	14	2	2	10	ИД 1 ПК.1.1 ИД 2 ПК.1.2 ИД 3 ПК.1.1 ИД 4 ПК.1.2 ИД 5 ПК.1.1 ИД 6ПК.1.2
4	Тема 4. Интеграция сенсорных подсистем (обратные связи).	14	2	2	10	ИД 1 ПК.1.1 ИД 2 ПК.1.2 ИД 3 ПК.1.1 ИД 4 ПК.1.2 ИД 5 ПК.1.1 ИД 6ПК.1.2
5	Тема 5. Математическое моделирование динамики мехатронных модулей.	14	2	2	10	ИД 1 ПК.1.1 ИД 2 ПК.1.2 ИД 3 ПК.1.1 ИД 4 ПК.1.2 ИД 5 ПК.1.1 ИД 6ПК.1.2
6	Тема 6. Синтез законов управления движением.	14	2	2	10	ИД 1 ПК.1.1 ИД 2 ПК.1.2 ИД 3 ПК.1.1 ИД 4 ПК.1.2 ИД 5 ПК.1.1 ИД 6ПК.1.2
7	Тема 7. Планирование траекторий и программная реализация.	12	2	2	8	ИД 1 ПК.1.1 ИД 2 ПК.1.2 ИД 3 ПК.1.1 ИД 4 ПК.1.2 ИД 5 ПК.1.1 ИД 6ПК.1.2
8	Тема 8. Инженерия программного обеспечения и человеко-машинный интерфейс (HMI).	12	2	2	8	ИД 1 ПК.1.1 ИД 2 ПК.1.2 ИД 3 ПК.1.1 ИД 4 ПК.1.2 ИД 5 ПК.1.1 ИД 6ПК.1.2
Вид промежуточной аттестации(Зачет)		+				
Итого		108	16	16	76	

Раздел 3. Содержание дисциплины

3.1. Содержание дисциплины

Тема 1. Введение в проектирование мехатронных систем. Основные понятия: мехатронный модуль, объект управления (ОУ), исполнительный уровень. Структурная схема типовой МС. Жизненный цикл изделия. Роль инженера-робототехника на этапах НИОКР.

Тема 2. Проектирование механических подсистем роботов. Основы конструирования несущих конструкций манипуляторов. Расчеты на жесткость, прочность и виброустойчивость кинематических звеньев. Материалы для облегченных конструкций (композиты, алюминиевые сплавы). Синтез передаточных механизмов (зубчатые, волновые).

Тема 3. Выбор и расчет исполнительных электроприводов. Силовая электроника: драйверы затворов, инверторы напряжения. Методика выбора электродвигателя по нагрузочной диаграмме механизма. Тепловой расчет привода. Особенности применения сервоприводов переменного тока и прямого привода (Direct Drive).

Тема 4. Интеграция сенсорных подсистем (обратные связи). Выбор датчиков положения (энкодеры — абсолютные/инкрементальные), скорости (тахогенераторы, резольверы) и момента. Силомоментное очувствление рабочего органа. Калибровка сенсоров и компенсация систематических погрешностей монтажа.

Тема 5. Математическое моделирование динамики мехатронных модулей. Вывод уравнений Лагранжа-Эйлера и Ньютона-Эйлера для многозвенных роботов. Учет упругости передач и люфтов. Моделирование приводов как объектов с распределенными параметрами. Построение имитационных моделей в средах MATLAB/Simulink или Modelica.

Тема 6. Синтез законов управления движением. Методы классической теории автоматического управления (модальный синтез, технический оптимум). Настройка контуров подчиненного регулирования (ток — скорость — положение). Основы цифрового управления: дискретизация непрерывных регуляторов, теорема Котельникова.

Тема 7. Планирование траекторий и программная реализация. Прямая и обратная задачи кинематики промышленных роботов. Методы планирования пути в обобщенных координатах (точечное, линейное, круговое движение). Сплайновая интерполяция траекторий. Ограничения по току, моменту и рывку (jerk limiting).

Тема 8. Инженерия программного обеспечения и человеко-машинный интерфейс (HMI). Архитектура встраиваемого ПО микроконтроллеров реального времени (RTOS). Протоколы промышленной полевой шины (EtherCAT, CANopen). Разработка верхнего уровня АСУ ТП (SCADA/HMI) для пультов оператора роботизированного комплекса. Безопасность функциональная (SIL/PL).

3.2. Содержание практического блока дисциплины

Очная форма обучения (полный срок)

№	Тема практического (семинарского, лабораторного) занятия
1	2
ПЗ 1	Тема 1. Введение в проектирование мехатронных систем.
ПЗ 2	Тема 2. Проектирование механических подсистем роботов.
ПЗ 3, 4	Тема 3. Выбор и расчет исполнительных электроприводов.
ПЗ 5	Тема 4. Интеграция сенсорных подсистем (обратные связи).
ПЗ 6, 7	Тема 5. Математическое моделирование динамики мехатронных модулей.
ПЗ 8	Тема 6. Синтез законов управления движением.

3.3. Образовательные технологии

Очная форма обучения (полный срок)

№	Тема занятия	Вид учебного занятия	Форма / Методы интерактивного обучения	% учебного времени
1	2	3	4	5
1	Тема 1. Введение в проектирование мехатронных систем.	ПЗ	Метод кейсов	75
2	Тема 2. Проектирование механических подсистем роботов.	Л	Лекция-ситуация	25
3	Тема 3. Выбор и расчет исполнительных электроприводов.	ПЗ	Метод кейсов	75
4	Тема 4. Интеграция сенсорных подсистем (обратные связи).	ПЗ	Мозговой штурм	25
5	Тема 5. Математическое моделирование динамики мехатронных модулей.	Л	Мозговой штурм	50
6	Тема 6. Синтез законов управления движением.	ПЗ	Метод кейсов	75
7	Тема 7. Планирование траекторий и программная реализация.	ПЗ	Метод кейсов	75
8	Тема 8. Инженерия программного обеспечения и человеко-машинный интерфейс (HMI).	ПЗ	Деловая игра	75
Итого				29,68%

Раздел 4. Организация самостоятельной работы обучающихся

4.1. Организация самостоятельной работы обучающихся

№	Тема дисциплины	№ вопросов	№ рекомендуемой литературы
1	2	3	4
1	Тема 1. Введение в проектирование мехатронных систем.	1, 2	1, 3, 5
2	Тема 2. Проектирование механических подсистем роботов.	3, 4, 5, 6	1, 3, 5
3	Тема 3. Выбор и расчет исполнительных электроприводов.	7, 8, 9	3, 4, 5
4	Тема 4. Интеграция сенсорных подсистем (обратные связи).	10, 11, 12, 13	2, 3, 4, 5
5	Тема 5. Математическое моделирование динамики мехатронных модулей.	14, 15, 16	3, 4, 5
6	Тема 6. Синтез законов управления движением.	17, 18	2, 3, 5
7	Тема 7. Планирование траекторий и программная реализация.	19-25	1, 3, 5
8	Тема 8. Инженерия программного обеспечения и человеко-машинный интерфейс (HMI).	26, 27, 28	2, 3, 5, 6

Перечень вопросов, выносимых на самостоятельную работу обучающихся

1. **Сравнительный анализ методов аддитивного производства (FDM, SLS, SLA)** для изготовления корпусных деталей роботизированных захватов: прочностные характеристики и шероховатость поверхности.
2. **Проектирование облегченных кинематических звеньев манипуляторов** с использованием бионического дизайна (топологической оптимизации) в САПР (например, SolidWorks Simulation или Fusion 360).
3. **Разработка математической модели гибкого манипулятора** с распределенными параметрами. Анализ влияния упругих колебаний на точность позиционирования рабочего органа.
4. **Методы активной виброгашения** в мехатронных модулях. Проектирование динамических гасителей колебаний для снижения резонансных амплитуд при высокоскоростном движении.
5. **Прямой привод (Direct Drive) против редукторных систем:** сравнительный расчет КПД, мертвого хода (люфта), полосы пропускания и точности поддержания момента в прецизионных осях станков.
6. **Синтез системы силомоментного очувствления** запястья робота-манипулятора. Алгоритмы управления при контакте с неопределенной средой (force control vs impedance control).
7. **Применение бесконтактных датчиков угла поворота** (резольверы, синусно-косинусные трансформаторы) в условиях сильных электромагнитных помех промышленного цеха.
8. **Моделирование нелинейностей электропривода:** влияние насыщения магнитной цепи двигателя и квантования ШИМ-модулятора на автоколебания в маломощных контурах регулирования.
9. **Планирование гладких траекторий промышленных роботов** с ограничением рывка (*jerk limiting*) для минимизации износа механических передач и динамических нагрузок.
10. **Синхронизация многокоординатных приводов по протоколу EtherCAT.** Анализ задержек передачи данных реального времени и их компенсация в алгоритмах интерполяции.
11. **Разработка архитектуры отказоустойчивой системы управления (SIL/PL).** Принципы построения двухканальных схем безопасности и аппаратный контроль целостности цепей тормоза серводвигателя.

12. **Эргономическое проектирование пульта оператора (НМІ) мобильного робота:** выбор органов управления, визуализация телеметрии и снижение когнитивной нагрузки на человека.

13. **Тепловое моделирование замкнутых шкафов автоматики.** Расчет принудительной вентиляции и теплоотвода от силовых модулей преобразователей частоты при плотной компоновке.

14. **Энергопотребление автономного мобильного робота.** Методика расчета емкости аккумуляторной батареи с учетом циклических пиковых нагрузок привода шасси и навесного оборудования.

15. **Цифровой двойник (Digital Twin) мехатронного модуля.** Создание сопряженной мультифизической модели (механика + теплота + электромагнетизм) для предиктивного обслуживания подшипниковых узлов.

4.2. Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся обеспечивается следующими учебно-методическими материалами:

1. Указаниями в рабочей программе по дисциплине (п.4.1.)
2. Лекционные материалы в составе УМК по дисциплине
3. Заданиями и методическими рекомендациями по организации самостоятельной работы обучающихся в составе УМК по дисциплине.
4. Глоссарием по дисциплине в составе УМК по дисциплине.

Раздел 5. Фонд оценочных средств для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации обучающихся

Фонд оценочных средств по дисциплине представляет собой совокупность контролируемых материалов, предназначенных для измерения уровня достижения обучающимися установленных результатов образовательной программы. ФОС по дисциплине используется при проведении оперативного контроля и промежуточной аттестации обучающихся. Требования к структуре и содержанию ФОС дисциплины регламентируются Положением о фонде оценочных материалов по программам высшего образования – программам бакалавриата, магистратуры.

5.1. Паспорт фонда оценочных средств Очная форма обучения (полный срок)

№	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Оценочные средства			
		Л	ПЗ (ЛЗ, СЗ)	СРО	Код индикатора и дескриптора достижения компетенций
1	2	3	4	5	6
1	Тема 1. Введение в проектирование мехатронных систем.	УО		ПРВ	ИД 1 ПК.1.1 ИД 2 ПК.1.2 ИД 3 ПК.1.1 ИД 4 ПК.1.2 ИД 5 ПК.1.1 ИД 6 ПК.1.2
2	Тема 2. Проектирование механических подсистем роботов.	УО	КМ	ПРВ	ИД 1 ПК.1.1 ИД 2 ПК.1.2 ИД 3 ПК.1.1 ИД 4 ПК.1.2 ИД 5 ПК.1.1 ИД 6 ПК.1.2
3	Тема 3. Выбор и расчет исполнительных электроприводов.	ЛС	МШ	ПРВ	ИД 1 ПК.1.1 ИД 2 ПК.1.2 ИД 3 ПК.1.1 ИД 4 ПК.1.2 ИД 5 ПК.1.1 ИД 6 ПК.1.2
4	Тема 4. Интеграция сенсорных подсистем (обратные связи).	УО	КМ	ПРВ	ИД 1 ПК.1.1 ИД 2 ПК.1.2 ИД 3 ПК.1.1 ИД 4 ПК.1.2 ИД 5 ПК.1.1 ИД 6 ПК.1.2
5	Тема 5. Математическое моделирование динамики мехатронных модулей.	УО	МШ	ПРВ	ИД 1 ПК.1.1 ИД 2 ПК.1.2 ИД 3 ПК.1.1 ИД 4 ПК.1.2 ИД 5 ПК.1.1 ИД 6 ПК.1.2
6	Тема 6. Синтез законов управления движением.	УО		ПРВ	ИД 1 ПК.1.1 ИД 2 ПК.1.2 ИД 3 ПК.1.1 ИД 4 ПК.1.2 ИД 5 ПК.1.1 ИД 6 ПК.1.2
7	Тема 7. Планирование траекторий и программная реализация.	УО	КМ	ПРВ	ИД 1 ПК.1.1 ИД 2 ПК.1.2 ИД 3 ПК.1.1 ИД 4 ПК.1.2 ИД 5 ПК.1.1 ИД 6 ПК.1.2

8	Тема 8. Инженерия программного обеспечения и человеко-машинный интерфейс (НМИ).	УО	ДИ	ПРВ	ИД 1 ПК.1.1 ИД 2 ПК.1.2 ИД 3 ПК.1.1 ИД 4 ПК.1.2 ИД 5 ПК.1.1 ИД 6 ПК.1.2
---	--	----	----	-----	--

Условные обозначения оценочных средств (Столбцы 3, 4, 5):

УО – устный (фронтальный, индивидуальный, комбинированный) опрос;

ПРВ – проверка рефератов, отчетов, рецензий, аннотаций, конспектов, графического материала, эссе, переводов, решений заданий, выполненных заданий в электронном виде и т.д.;

МШ – Метод мозгового штурма;

КМ – Кейс-метод;

ДИ – Деловая игра;

ЛС – Лекция-ситуация.

5.2. Оценочные средства текущего контроля

Перечень практических (семинарских) заданий Задачи

1. **Кинематический расчет 3-звенного плоского манипулятора.** Дано: длины звеньев L_1, L_2, L_3 . Задача: составить уравнения прямой и обратной задачи кинематики (ОЗК). Построить карту рабочих зон с учетом сингулярностей (вытянутая рука, локоть вверх/вниз).

2. **Проектирование передачи «винт-гайка» для оси Z станка.** Дано: масса перемещаемого стола, требуемая скорость подачи, допустимый люфт. Задача: выбрать диаметр и шаг винта из каталога SKF/ТНК, рассчитать критическую скорость вращения винта и КПД передачи.

3. **Тепловой расчет серводвигателя по нагрузочной диаграмме.** Дано: циклограмма работы привода (разгон, работа на постоянной скорости, торможение, пауза). Задача: методом эквивалентных величин рассчитать средний квадратичный момент (M_{eq}) и проверить двигатель на перегрев по условию $M_{nom} > M_{eq}$.

4. **Синтез контура тока подчиненного регулирования.** Дано: параметры якорной цепи двигателя ДПТ НВ (R_a, L_a) или звена постоянного тока частотного привода. Задача: настроить регулятор тока на технический оптимум (ТО), записать передаточную функцию ПИ-регулятора и построить переходную характеристику в MATLAB.

5. **Моделирование динамики гибкого звена.** Задача: в Simscape Multibody создать модель однозвенного робота с упругим элементом. Снять график колебаний концевой точки при ступенчатом входном воздействии. Подобрать коэффициент демпфирования для подавления вибрации за один период.

6. **Выбор планетарного редуктора для поворотного стола.** Дано: инерция нагрузки, требуемое угловое ускорение, точность позиционирования. Задача: рассчитать необходимый момент ускорения, учесть КПД редуктора и влияние приведенного мертвого хода (ϕ_{play}) на ошибку останова.

7. **Разработка схемы подключения инкрементального энкодера.** Задача: начертить принципиальную электрическую схему сопряжения дифференциального выхода энкодера (RS-422) со входом контроллера. Рассчитать максимальную частоту счета импульсов при заданной линейной скорости объекта.

8. **Программная реализация S-образной кривой разгона.** Задача: написать код на языке C/C++ для микроконтроллера, генерирующий профиль движения с ограничением рывка ($jerk$). Задание должно включать фазу нарастания ускорения, движение с постоянным ускорением и фазу его снижения.

9. **Анализ устойчивости системы с запаздыванием.** Дано: непрерывный объект управления и чистый транспортный лаг $\tau_{\text{таут}}$ (например, задержка видеосистемы технического

зрения). Задача: определить предельный коэффициент усиления регулятора по критерию Найквиста, используя аппроксимацию Паде 1-го порядка.

10. **Проектирование силомоментного сенсора (FT-sensor).** Задача: разработать топологию тензометрического датчика усилия на базе параллелограммной механики. Рассчитать номиналы резисторов моста Уитстона и требуемый коэффициент усиления инструментального усилителя INA125.

11. **Оптимизация траектории сварочного робота.** Дано: координаты точек сварки замкнутого контура. Задача: расставить дополнительные промежуточные точки (опорные кадры — *waypoints*) так, чтобы минимизировать суммарное время цикла без превышения ограничений по моменту суставов.

12. **Расчет энергопотребления автономного мобильного робота.** Дано: цикл движения (ускорение, крейсерская скорость, подъем в горку). Задача: вычислить среднюю потребляемую мощность приводов колес и подобрать емкость Li-Po аккумулятора для обеспечения времени работы не менее 2 часов.

13. **Настройка протокола EtherCAT Master-Slave.** Задача: в среде TwinCAT 3 сконфигурировать сеть из одного мастер-устройства и трех сервоприводов. Настроить PDO (Process Data Objects) для циклического обмена данными о положении и скорости с временем цикла 1 мс.

14. **Оценка точности позиционирования SCARA-робота.** Задача: провести анализ накопления погрешностей. Рассчитать итоговую ошибку рабочего органа от биения валов двигателей, температурного расширения алюминиевого плеча и зазоров в шарнирах при рабочей температуре +40°C.

15. **Разработка интерфейса HMI-панели оператора.** Задача: в среде CODESYS V3 Visualization спроектировать экран управления мехатронным модулем. Реализовать элементы ввода уставки положения, кнопки включения/сбоя аварии и графический тренд реального времени отображения текущей скорости.

5.3. Тематика письменных работ обучающихся

Рефераты по выбранным темам выполняются в письменной форме обучающимися всех форм обучения. Учебно-методические материалы, необходимые для выполнения работ, а также примерная тематика рефератов содержатся в УМК по дисциплине.

1. **Эволюция кинематических схем промышленных манипуляторов.** Сравнительный анализ преимуществ и недостатков антропоморфных (шарнирных), SCARA, дельта-роботов и картезианских систем в современном производстве.

2. **Бионический дизайн в проектировании мехатронных модулей.** Применение алгоритмов топологической оптимизации для снижения массы подвижных звеньев роботов без потери жесткости конструкции.

3. **Прямой привод (Direct Drive) в высокоточных системах позиционирования.** Физические принципы работы моментных двигателей, методы компенсации силового взаимодействия магнитов и проблема отвода тепла.

4. **Силомоментное очувствление робототехнических комплексов.** Обзор тактильных сенсоров и методов управления: импедансное управление (*impedance control*) и адаптивное управление при взаимодействии с неизвестной средой.

5. **Методы активного подавления упругих колебаний в многозвенных манипуляторах.** Алгоритмы *input shaping* и их влияние на быстродействие системы по сравнению с пассивным демпфированием.

6. **Синхронизация распределенных приводов в реальном времени.** Сравнительный анализ промышленных сетей EtherCAT, PROFINET IRT и POWERLINK для задач координированного движения мобильных платформ.

7. **Цифровые двойники (Digital Twin) жизненного цикла мехатронных систем.** Интеграция мультифизической модели изделия с данными промышленного интернета вещей (IIoT) для предиктивного технического обслуживания.

8. **Проблемы обеспечения функциональной безопасности (SIL/PL) в коллаборативной робототехнике.** Принципы построения цепей безопасного останова (*Safe Torque Off*) и контроля скорости сближения.

9. **Применение нейросетевых технологий для идентификации параметров нагрузки.** Использование рекуррентных нейронных сетей (LSTM) для онлайн-обучения регуляторов момента при захвате объектов переменной массы.
10. **Микромехатроника: особенности проектирования исполнительных механизмов микроразмеров.** Технологии MEMS, пьезоэлектрические актюаторы и тепловые приводы для микроробототехнических систем.
11. **Энергетическая эффективность автономных мобильных роботов.** Стратегии рекуперации энергии при торможении, оптимизация массогабаритных показателей батарейного блока и выбор архитектуры привода шасси.
12. **Перспективные типы передач для робототехники.** Волновая передача (Harmonic Drive), циклоидальные и квазидифференциальные редукторы: анализ мертвого хода, крутильной жесткости и удельной мощности.
13. **Человеко-машинный интерфейс (HMI) дополненной реальности** в управлении мехатронными комплексами. Проекционные дисплеи и жестовое управление как замена традиционным пультам обучения (*teach pendant*).
14. **Проектирование отказоустойчивых структур систем управления.** Резервирование датчиков обратной связи и контроллеров (тройная мажоритарная логика TMR) для критически важных применений (авиация, медицина).
15. **Экологические аспекты утилизации и «зеленое» проектирование мехатронных систем.** Выбор перерабатываемых материалов, снижение использования редкоземельных металлов в постоянных магнитах электродвигателей и стандарты директивы RoHS.

5.4. Перечень вопросов промежуточной аттестации по дисциплине

Список вопросов для зачета

1. Структура и классификация мехатронных систем (МС). Роль интеграции механики, электроники и информационных технологий.
2. Этапы жизненного цикла изделия в проектировании МС. Место CAD/CAM/CAE-систем на различных этапах разработки.
3. Синтез кинематических схем манипуляционных роботов. Степени подвижности, рабочая зона и сингулярности.
4. Прямая и обратная задачи кинематики: аналитические и численные методы решения для промышленных роботов.
5. Динамические модели исполнительных механизмов. Уравнения Лагранжа-Эйлера и Ньютона-Эйлера.
6. Силовой анализ механических передач. Расчет КПД, жесткости и мертвого хода (люфта) редукторов.
7. Выбор электродвигателя по нагрузочной диаграмме механизма. Метод эквивалентного момента и тепловой расчет.
8. Особенности проектирования приводов прямого действия (*Direct Drive*): преимущества, недостатки и области применения.
9. Типы датчиков обратной связи в робототехнике. Абсолютные и инкрементальные энкодеры, резольверы: принципы работы и погрешности.
10. Силомоментное очувствление рабочего органа. Конструкции сенсоров F/T (силы-момента) и их калибровка.
11. Математическое описание электропривода постоянного тока как объекта управления. Влияние индуктивности якоря.
12. Принципы векторного управления асинхронным двигателем. Ориентация по полю ротора (Field Oriented Control).
13. Структура системы подчиненного регулирования координат. Настройка контуров тока, скорости и положения методом технического оптимума.
14. Цифровое управление электроприводами. Дискретизация непрерывных ПИД-регуляторов. Эффект квантования сигнала.
15. Планирование траекторий движения в пространстве обобщенных координат. Точечное, линейное и круговое интерполирование.

16. S-образный профиль скорости (*S-curve profiling*). Ограничение рывка (*jerk*) и его влияние на динамические нагрузки конструкции.
17. Методы активного подавления упругих колебаний («упругой» вибрации) в гибких звеньях манипуляторов.
18. Архитектура встраиваемого программного обеспечения реального времени (RTOS) для контроллеров мехатронных модулей.
19. Промышленные сети передачи данных реального времени (fieldbus). Протокол EtherCAT: структура кадра и синхронизация узлов.
20. Проектирование человеко-машинного интерфейса (HMI). Требования к визуализации технологических процессов и пультам обучения (*teach pendant*).
21. Обеспечение функциональной безопасности мехатронных систем. Категории останова, цепи STO (*Safe Torque Off*) и уровни полноты безопасности SIL/PL.
22. Тепловое проектирование шкафов автоматики. Расчет систем принудительного охлаждения силовых преобразователей частоты.
23. Применение аддитивных технологий в прототипировании корпусных деталей МС. Постобработка и обеспечение точности посадочных мест подшипников.
24. Понятие цифрового двойника (*Digital Twin*). Сопряженное мультифизическое моделирование динамики, тепловых полей и прочности.
25. Отказоустойчивые структуры систем управления. Аппаратное резервирование контроллеров и мажоритарная логика голосования сигналов.

Раздел 6. Оценочные средства промежуточной аттестации (с ключами)

1. Закрытого типа с одним верным вариантом ответа (5 вопросов)

Прочитайте текст и выберите один правильный ответ. **Вопрос 1.** Какой тип привода обеспечивает прямое преобразование электрической энергии в поступательное перемещение без использования механических передач? а) Серводвигатель постоянного тока; б) Шаговый двигатель; в) Пьезоэлектрический актюатор; г) Линейный асинхронный двигатель. **Правильный ответ: г)**

Вопрос 2. В структуре системы подчиненного регулирования какой контур настраивается на самую высокую частоту среза (имеет наименьшую постоянную времени)? а) Контур положения; б) Контур скорости; в) Контур тока (момента); г) Контур ЭДС двигателя. **Правильный ответ: в)**

Вопрос 3. Какое устройство предназначено для сопряжения низковольтных логических сигналов микроконтроллера с силовыми ключами инвертора напряжения? а) Оптопара; б) Драйвер затвора (*Gate Driver*); в) Резонансный фильтр; г) Датчик Холла. **Правильный ответ: б)**

Вопрос 4. При проектировании механической руки робота увеличение какого параметра наиболее эффективно снижает резонансную частоту конструкции? а) Модуля упругости материала; б) Момент инерции сечения звена; в) Длины свободного пролета звена; г) Плотности покрытия поверхности. **Правильный ответ: в)**

Вопрос 5. Что характеризует коэффициент демпфирования $\zeta=0,7$; $\zeta = 0,7$ в стандартной колебательной системе второго порядка? а) Незатухающие гармонические колебания; б) Апериодический процесс без перерегулирования; в) Процесс с умеренным перерегулированием около 4,6% и быстрым затуханием; г) Медленное затухание колебаний с большой постоянной времени. **Правильный ответ: в)**

2. Закрытого типа с двумя верными вариантами ответа (5 вопросов)

Прочитайте текст и выберите два правильных ответа. **Вопрос 6.** Укажите основные преимущества волновой передачи (*Harmonic Drive*) перед планетарной в робототехнике: а) Высокий удельный КПД (более 98%); б) Сверхвысокий передаточный момент при малых габаритах; в) Практически нулевой мертвый ход (*backlash*); г) Низкая крутильная жесткость. **Правильный ответ: б), в)**

Вопрос 7. Какие компоненты обязательно входят в состав цифрового мехатронного модуля управления движением? а) Силовой полупроводниковый преобразователь; б) Микроконтроллер или сигнальный процессор (DSP); в) Механический редуктор; г) Энкодер (датчик обратной связи).

Правильный ответ: а), б) — [Примечание: также допустимы варианты в) и г) как части полного узла, но именно управление реализуется через А и Б]

Вопрос 8. Выберите методы планирования траекторий, гарантирующие непрерывность не только пути, но и его первой (скорость) и второй (ускорение) производных: а) Точечная интерполяция; б) Кубические сплайны; в) Полиномы пятой степени (квинтичные); г) Тупиковая остановка (*Hard stop*). **Правильный ответ:** б), в)

Вопрос 9. Какие физические эффекты лежат в основе работы микромеханических акселерометров (*MEMS*)? а) Эффект Зеебека; б) Изменение емкости конденсатора при смещении подвижной массы; в) Пьезорезистивный эффект в кремниевых тензодатчиках; г) Электромагнитная индукция в катушке. **Правильный ответ:** б), в)

Вопрос 10. Для чего применяются протоколы синхронизации точного времени (*PTP/IEEE 1588, Distributed Clocks*) в промышленных сетях EtherCAT? а) Для выравнивания задержек распространения сигнала в кабеле; б) Для синхронного тактирования алгоритмов управления во всех ведомых устройствах сети; в) Для шифрования передаваемых данных; г) Для автоматической настройки IP-адресов узлов. **Правильный ответ:** а), б)

3. На установление последовательности (5 вопросов)

Укажите правильную последовательность действий или процессов. **Вопрос 11.** Расположите в правильной иерархической последовательности уровни управления промышленным роботом от верхнего к нижнему:

1. Уровень сервоприводов (формирование токов фаз);
2. Уровень планирования задач (*Task Planning*);
3. Уровень кинематической интерполяции траектории;
4. Уровень динамического расчета моментов по модели Ньютона-Эйлера.

Правильный ответ: 2-3-4-1

Вопрос 12. Установите порядок этапов проектирования корпуса детали методом топологической оптимизации:

1. Назначение зон запрета (места креплений, подшипников);
2. Задание силовых граничных условий и нагрузок;
3. Проведение итерационного перераспределения материала;
4. Интерпретация полученной бионической формы в классический CAD-дизайн.

Правильный ответ: 2-1-3-4

Вопрос 13. Расположите в порядке возрастания быстродействия (частоты полосы пропускания) элементы измерительного канала датчика положения:

1. Кодировщик диск энкодера;
2. Фильтр нижних частот антиалиасинга в контроллере;
3. Фотодиодная матрица считывающей головки;
4. Буфер FIFO интерфейса SPI. **Правильный ответ:** 1-3-2-4

Вопрос 14. Установите хронологическую последовательность стадий жизненного цикла разработки ПО для встраиваемого контроллера MC:

1. Написание кода прикладной логики;
2. Формирование требований технического задания;
3. Отладка на целевой плате с использованием JTAG-отладчика;
4. Разработка архитектуры потоков задач RTOS. **Правильный ответ:** 2-4-1-3

Вопрос 15. Расположите этапы синтеза регулятора методом модального управления в правильном порядке:

1. Проверка управляемости пары (А, В);
2. Выбор желаемых собственных чисел замкнутой системы;
3. Расчет матрицы коэффициентов обратных связей ККК;
4. Запись исходной матрицы состояния объекта ААА. **Правильный ответ:** 4-1-2-3

4. На установление соответствия (4 вопроса)

Установите соответствие между понятием и его определением/формулой. **Вопрос 16.** Установите соответствие между типом профиля движения оси и его математическим описанием изменения ускорения:

Тип профиля	Характеристика ускорения
А) Трапецеидальный	1) Постоянное значение внутри фазы разгона, ступенчатый переход
Б) S-образный	2) Нулевое на участках установившейся скорости
В) Синусоидальный	3) Непрерывная гладкая функция (синусоида)

Правильный ответ: А – 1, Б – 3, В – 2 (или вариация в зависимости от трактовки «трапеции»), **классический точный ответ:** А – 2 (на полке), Б – 3, В – 1 (если под трапецией понимать график самого ускорения). **Корректный инженерный ответ:** А – 2 (ступенчатое изменение при переходе), Б – 3, В – 1.

Вопрос 17. Установите соответствие между физическим эффектом и типом микроактюатора:

Физический эффект	Тип актюатора
А) Обратимый пьезоэффект	1) Тепловой привод (<i>Chevron</i>)
Б) Электростатическое притяжение	2) Пьезосканер атомно-силового микроскопа
В) Термическое расширение	3) Конденсаторный гребенчатый двигатель (<i>comb-drive</i>)
Правильный ответ: А – 2, Б – 3, В – 1	

Вопрос 18. Установите соответствие между стандартом безопасности и его назначением в коллаборативной робототехнике:

Стандарт	Назначение
А) ISO 10218	1) Требования к функциональной безопасности систем управления (SIL)
Б) ISO/TS 15066	2) Общие требования безопасности для промышленных роботов
В) IEC 62061	3) Безопасность совместной работы человека и робота (мощность/сила удара)
Правильный ответ: А – 2, Б – 3, В – 1	

Вопрос 19. Установите соответствие между компонентом драйвера затвора и его функцией:

Компонент	Функция
А) Bootstrap-диод и конденсатор	1) Гальваническая развязка цифровой и силовой земли
Б) Согласующий резистор (R_{gR_gRg})	2) Питание верхнего плеча плавающего ключа (High-side)
В) Изолированный DC/DC	3) Ограничение скорости нарастания тока заряда затвора (dI/dt)
Правильный ответ: А – 2, Б – 3, В – 1	

5. Открытого типа с одним-двумя словами (2 вопроса)

Запишите пропущенный термин. **Вопрос 20.** Явление потери способности электропривода точно удерживать позицию из-за взаимодействия магнитных полей ротора и статора при обесточенных обмотках называется потерей момента фиксации или _____. **Правильный ответ:** детента (*detent torque / clogging*)

Вопрос 21. Минимальное угловое расстояние между двумя соседними устойчивыми положениями равновесия шагового двигателя без нагрузки называется углом _____. **Правильного ответа:** шага

6. Открытого типа с определением понятия (расширенный ответ) (2 вопроса)

Дайте развернутое определение. **Вопрос 22.** Раскройте физический смысл принципа дуальности механического импеданса (*Impedance Control*) в системах управления манипуляторами. Почему он предпочтителен классического позиционирования при контакте с неизвестной средой? **Правильный ответ:** принцип заключается в управлении динамическим соотношением между силой воздействия среды и скоростью перемещения рабочего органа. Робот рассматривается не как жесткий источник позы, а как программируемая механическая система с заданной массой, вязкостью и жесткостью. Это позволяет безопасно взаимодействовать со

средой: при столкновении контроллер автоматически ограничивает развиваемую силу, предотвращая разрушение инструмента или объекта, что невозможно при чисто позиционном управлении.

Вопрос 23. Дайте определение понятию «мертвое время» (*Dead Time*) в контуре регулирования электромеханической системы. Опишите его негативное влияние на запасы устойчивости по фазе. **Правильный ответ:** мертвое время — это чистый транспортный запаздывание реакции системы на управляющее воздействие, обусловленное временем вычисления алгоритма, задержками аналого-цифрового преобразования и физическими лагами датчиков. Оно вносит дополнительный фазовый сдвиг $-\omega T_d$, который линейно растет с частотой, тем самым резко сокращая запас по фазе и провоцируя автоколебания даже при низких коэффициентах усиления регулятора.

Раздел 7. Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

7.1. Основная литература

1. Лукинов, А. П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств : учебное пособие для вузов / А. П. Лукинов. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2024. — 608 с. — ISBN 978-5-507-47173-7. — Текст : непосредственный.
2. Бошляков, А. А. Проектирование мехатронных систем : учебное пособие / А. А. Бошляков. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. — 120 с. — ISBN 978-5-7038-4125-9. — URL: <https://www.litres.ru/book/andrey-boshlyakov/proektirovanie-mehatronnyh-sistem-70406962/> (дата обращения: 13.08.2026). — Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. — Текст : электронный.

7.2. Дополнительная литература

3. Иванов, В. К. Управление, моделирование и датчики мехатронных систем : учебник / В. К. Иванов. — Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. — 212 с. — ISBN 978-5-9729-2590-2. — Текст : непосредственный.
4. Феофанов, А. Н. Техническое обслуживание, ремонт и испытание мехатронных систем : учебник для СПО / А. Н. Феофанов, Т. Г. Гришина. — Москва : Академия, 2024. — 304 с. — ISBN 978-5-00212-391-9. — Текст : непосредственный.
5. Савенков, А. П. Приводы роботов и мехатронных устройств : учебное пособие / А. П. Савенков [и др.]. — Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2024. — 210 с. — URL: <https://bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=BOOK1-621.86/%D0%9B%20841-188701> (дата обращения: 13.08.2026). — Режим доступа: из локальной сети СФУ. — Текст : электронный.

7.3. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

1. Электронно-библиотечная система -Цифровой образовательный ресурс IPR SMART – электронная библиотека по всем отраслям знаний [Электронный ресурс]. – URL:
2. <http://www.iprbookshop.ru>
3. Справочник математических формул <http://www.pm298.ru/>
4. Каталог ГОСТов - <https://snip.ruscable.ru/>
5. <http://www.consultant.ru/>— Консультант Плюс
6. <http://www.garant.ru/>— Гарант
7. Программное обеспечение для организации конференции.

Раздел 8. Материально-техническая база и информационные технологии

8.1. Учебные аудитории для проведения лекционных и практических занятий (для проведения занятий лекционного и семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации обучающихся всех направлений подготовки).

Учебная аудитория оборудована:

- Стол для преподавателя
- Стул для преподавателя
- Столы для обучающихся
- Стулья для обучающихся
- Моноблок для преподавателя с выходом в интернет
- ЖК панель
- Компьютеры для обучающихся
- комплект учебно-наглядных пособий по дисциплине

Программные средства для проведения практических занятий:

- nanoCAD2025 на 20 посадочных мест.

8.2. Помещение для самостоятельной работы обучающихся (помещение общего пользования с подключением к системам телекоммуникации и с обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду (доступ в сеть Интернет, Wi-Fi, глобальные поисковые системы, электронная почта и т.д.)

Специализированная мебель и технические средства обучения:

- Стол для преподавателя
- Стул для преподавателя
- Столы для обучающихся
- Стулья для обучающихся
- Компьютеры для преподавателя с выходом в интернет
- Компьютеры для обучающихся выходом в интернет
- ПО: MS Office, Яндекс браузер
- Цифровой образовательный ресурс IPR SMART
- доступ в ЭИОС.

Раздел 9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Освоение дисциплины «**Проектирование мехатронных систем**» можно построить в соответствии со списком вопросов для подготовки к экзамену. Для эффективного изучения курса рекомендуется следующий порядок:

Сначала изучаются теоретические вопросы по соответствующей теме с проработкой как конспектов лекций, так и учебников. **Лекции** дают систематизированные основы научных знаний по соответствующей теме, концентрируют внимание на наиболее сложных узловых вопросах. Особое внимание следует обратить на **понимание смысла** основных понятий, определений. Затем нужно самостоятельно **подробно разобрать типовые примеры**, выясняя в деталях **практическое значение выученного теоретического материала**.

Добросовестное изучение всего материала, заключённого в лекциях, практических занятиях и домашних заданиях, гарантирует каждому обучающемуся успешные результаты на экзаменах. Для подготовки к экзамену необходимо, прежде всего, по лекциям и учебникам повторить и систематизировать весь теоретический материал, изученный в семестре.

При ответе на теоретические вопросы на экзамене следует привести необходимые определения, формулировку и примеры. Решение задач (если они есть в билете) следует излагать подробно и аккуратно, объясняя и мотивируя все действия по ходу решения.

Во время экзамена требуется иметь калькулятор для выполнения расчетных заданий.

Не забудьте обратить внимание на применение рассматриваемых вопросов и задач в будущей профессиональной деятельности. Понимание необходимости и возможности такого применения оценивается на экзамене очень высоко.

Учебно-методическое издание

Рабочая программа учебной дисциплины

Проектирование мехатронных систем

*(Наименование дисциплины в соответствии с учебным
планом)*

Николаев Юрий Николаевич

(Фамилия, Имя, Отчество составителя)