



Автономная некоммерческая организация высшего образования
«Волгоградский институт бизнеса»

Рабочая программа учебной дисциплины

Инжиниринг 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	6
Общее количество часов	216
Аудиторные часы контактной работы обучающегося с преподавателями:	128
– Лекционные (Л)	64
– Практические (ПЗ)	64
– Лабораторные (ЛЗ)	
– Семинарские (СЗ)	
Самостоятельная работа обучающихся (СРО)	52
К (Р-Г) Р (П) (+;-)	
Тестирование (+;-)	
ДКР (+;-)	
Зачет (+;-)	
Зачет с оценкой (+;- (Кол-во часов))	
Экзамен (+;- (Кол-во часов))	+ (36)

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.....	10
Раздел 6. Оценочные средства промежуточной аттестации (с ключами).....	15
Раздел 7. Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины	18
Раздел 8. Материально-техническая база и информационные технологии	19
Раздел 9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины	20

Раздел 1. Организационно-методический раздел

1.1. Цели освоения дисциплины

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

ОПК-9 Способен внедрять и осваивать новое технологическое оборудование

Дескрипторы компетенции:

ОПК-9.1. Способен осуществлять поиск актуальной информации о направлениях, методах и средствах развития технических систем в сфере профессиональной деятельности, в том числе в реестре патентного поиска.

ОПК-9.2. Способность внедрять и осваивать решения по автоматизации, механизации и роботизации производства.

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)
	ОПК-9.1. Способен осуществлять поиск актуальной информации о направлениях, методах и средствах развития технических систем в сфере профессиональной деятельности, в том числе в реестре патентного поиска. ОПК-9.2. Способность внедрять и осваивать решения по автоматизации, механизации и роботизации производства.	Знает ИД-1 ОПК-9.1 Методы поиска актуальной информации о направлениях, методах и средствах развития технических систем в сфере профессиональной деятельности, в том числе в реестре патентного поиска (без привязки к профессиональному стандарту); ИД-2 ОПК-9.2 Порядок внедрения и освоения решений по автоматизации, механизации и роботизации производства (без привязки к профессиональному стандарту). Умеет ИД-3 ОПК-9.1 Применять методы поиска актуальной информации о направлениях, методах и средствах развития технических систем в сфере профессиональной деятельности, в том числе в реестре патентного поиска (без привязки к профессиональному стандарту); ИД-4 ОПК-9.2 Использовать порядок внедрения и освоения решений по автоматизации, механизации и роботизации производства (без привязки к

		профессиональному стандарту). Имеет навыки ИД-5 ОПК-9.1 Поиска актуальной информации о направлениях, методах и средствах развития технических систем в сфере профессиональной деятельности, в том числе в реестре патентного поиска (без привязки к профессиональному стандарту); ИД-6 ОПК-9.2 Внедрения и освоения решений по автоматизации, механизации и роботизации производства (без привязки к профессиональному стандарту).
--	--	--

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.	Основы инжиниринга	

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. Методология инжиниринга МС. Системный подход к проектированию.	24	8	8	8	ИД-1 ОПК-9.1 ИД-2 ОПК-9.2 ИД-3 ОПК-9.1 ИД-4 ОПК-9.2 ИД-5 ОПК-9.1 ИД-6 ОПК-9.2
2	Тема 2. Концептуальное проектирование и архитектура.	24	8	8	8	ИД-1 ОПК-9.1 ИД-2 ОПК-9.2 ИД-3 ОПК-9.1 ИД-4 ОПК-9.2 ИД-5 ОПК-9.1 ИД-6 ОПК-9.2
3	Тема 3. Инжиниринг механических подсистем.	22	8	8	6	ИД-1 ОПК-9.1 ИД-2 ОПК-9.2 ИД-3 ОПК-9.1 ИД-4 ОПК-9.2 ИД-5 ОПК-9.1 ИД-6 ОПК-9.2
4	Тема 4. Проектирование исполнительных электроприводов.	22	8	8	6	ИД-1 ОПК-9.1 ИД-2 ОПК-9.2 ИД-3 ОПК-9.1 ИД-4 ОПК-9.2 ИД-5 ОПК-9.1 ИД-6 ОПК-9.2
5	Тема 5. Интеграция сенсорики и встраиваемых вычислений.	22	8	8	6	ИД-1 ОПК-9.1 ИД-2 ОПК-9.2 ИД-3 ОПК-9.1 ИД-4 ОПК-9.2 ИД-5 ОПК-9.1 ИД-6 ОПК-9.2
6	Тема 6. Разработка встроенного программного обеспечения (<i>Embedded Software</i>).	22	8	8	6	ИД-1 ОПК-9.1 ИД-2 ОПК-9.2 ИД-3 ОПК-9.1 ИД-4 ОПК-9.2 ИД-5 ОПК-9.1 ИД-6 ОПК-9.2
7	Тема 7. Модельно-ориентированное проектирование (<i>Model-Based Design</i>).	22	8	8	6	ИД-1 ОПК-9.1 ИД-2 ОПК-9.2 ИД-3 ОПК-9.1 ИД-4 ОПК-9.2 ИД-5 ОПК-9.1 ИД-6 ОПК-9.2
8	Тема 8. Испытания, отладка и ввод в эксплуатацию.	22	8	8	6	ИД-1 ОПК-9.1 ИД-2 ОПК-9.2 ИД-3 ОПК-9.1 ИД-4 ОПК-9.2 ИД-5 ОПК-9.1 ИД-6 ОПК-9.2
Вид промежуточной аттестации(Экзамен)		36				
Итого		216	64	64	52	

Раздел 3. Содержание дисциплины

3.1. Содержание дисциплины

Тема 1. Методология инжиниринга МС. Системный подход к проектированию. Структура жизненного цикла изделия (ЖЦИ). Требования стандартов ГОСТ Р МЭК 61508/62061 к функциональной безопасности роботов на этапе разработки.

Тема 2. Концептуальное проектирование и архитектура. Выбор кинематической схемы манипулятора или шасси мобильного робота. Синтез архитектуры аппаратного обеспечения: разделение на вычислительный, силовой и сенсорный уровни.

Тема 3. Инжиниринг механических подсистем. Проектирование несущих конструкций с учетом требований по жесткости и демпфированию. Расчет размерных цепей и компенсация погрешностей сборки в прецизионных модулях.

Тема 4. Проектирование исполнительных электроприводов. Методика подбора серводвигателей и редукторов по нагрузочной диаграмме. Тепловой расчет приводов. Особенности интеграции прямого привода (*Direct Drive*) и безредукторных систем.

Тема 5. Интеграция сенсорики и встраиваемых вычислений. Обратные связи в контуре низкого уровня (ток, скорость, положение). Выбор микроконтроллеров и ПЛИС для задач реального времени. Синхронизация узлов по протоколам EtherCAT / TSN.

Тема 6. Разработка встроенного программного обеспечения (*Embedded Software*). Архитектура ПО контроллера движения (RTOS, приоритетность задач). Программная реализация алгоритмов интерполяции траекторий и профилей скорости (*S-curve*).

Тема 7. Модельно-ориентированное проектирование (*Model-Based Design*). Создание цифрового двойника системы в среде MATLAB/Simulink. Отладка законов управления на модели PIL (*Processor-in-the-Loop*) перед загрузкой в железо.

Тема 8. Испытания, отладка и ввод в эксплуатацию. Разработка планов верификации и валидации (V&V). Использование осциллографирования переменных состояния для поиска автоколебаний. Калибровка абсолютных датчиков положения.

3.2. Содержание практического блока дисциплины

Очная форма обучения (полный срок)

№	Тема практического (семинарского, лабораторного) занятия
1	2
ПЗ 1	Тема 1. Методология инжиниринга МС. Системный подход к проектированию.
ПЗ 2	Тема 2. Концептуальное проектирование и архитектура.
ПЗ 3, 4	Тема 3. Инжиниринг механических подсистем.
ПЗ 5	Тема 4. Проектирование исполнительных электроприводов.
ПЗ 6, 7	Тема 5. Интеграция сенсорики и встраиваемых вычислений.
ПЗ 8	Тема 6. Разработка встроенного программного обеспечения (<i>Embedded Software</i>).

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. Методология инжиниринга МС. Системный подход к проектированию.	ПЗ	Метод кейсов	75
2	Тема 2. Концептуальное проектирование и архитектура.	Л	Лекция-ситуация	25
3	Тема 3. Инжиниринг механических подсистем.	ПЗ	Метод кейсов	75
4	Тема 4. Проектирование исполнительных электроприводов.	ПЗ	Мозговой штурм	25

5	Тема 5. Интеграция сенсорики и встраиваемых вычислений.	Л	Мозговой штурм	50
6	Тема 6. Разработка встроенного программного обеспечения (<i>Embedded Software</i>).	ПЗ	Метод кейсов	75
7	Тема 7. Модельно-ориентированное проектирование (<i>Model-Based Design</i>).	ПЗ	Метод кейсов	75
8	Тема 8. Испытания, отладка и ввод в эксплуатацию.	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. Методология инжиниринга МС. Системный подход к проектированию.	1, 2	1, 3, 5
2	Тема 2. Концептуальное проектирование и архитектура.	3, 4, 5, 6	1, 3, 5
3	Тема 3. Инжиниринг механических подсистем.	7, 8, 9	3, 4, 5
4	Тема 4. Проектирование исполнительных электроприводов.	10, 11, 12, 13	2, 3, 4, 5
5	Тема 5. Интеграция сенсорики и встраиваемых вычислений.	14, 15, 16	3, 4, 5
6	Тема 6. Разработка встроенного программного обеспечения (<i>Embedded Software</i>).	17, 18	2, 3, 5
7	Тема 7. Модельно-ориентированное проектирование (<i>Model-Based Design</i>).	19-25	1, 3, 5
8	Тема 8. Испытания, отладка и ввод в эксплуатацию.	26, 27, 28	2, 3, 5, 6

Перечень вопросов, выносимых на самостоятельную работу обучающихся

1. **Сравнительный анализ архитектур встраиваемого программного обеспечения:** монолитное ядро, RTOS (Real-Time Operating System) и роботизированная операционная система (ROS 2) для контроллеров манипуляторов.

2. **Методика подбора серводвигателя по нагрузочной диаграмме.** Расчет эквивалентного момента ($M_{eqM_eq}M_{eq}$) и проверка условия теплового баланса при циклическом режиме работы S3-S8.

3. **Проектирование отказоустойчивых систем управления (SIL/PL).** Реализация архитектуры «1oo2» (один из двух) для цепей безопасности промышленного робота: аппаратная логика против программных решений в ПЛК.

4. **Инжиниринг интерфейсов человек-машина (HMI) для пультов обучения (*teach pendant*).** Эргономика органов управления, визуализация многокоординатных данных и снижение когнитивной нагрузки оператора.

5. **Разработка кинематических решателей (*Kinematic Solvers*) для ROS 2.** Программная реализация аналитического и численного методов решения обратной задачи кинематики на языке Python/C++.

6. **Синхронизация распределенных приводов в реальном времени.** Сравнение протоколов EtherCAT и PROFINET IRT: структура кадра, механизмы синхронизации тактирования и задержки передачи сигнала.

7. **Тепловое проектирование замкнутых шкафов автоматики мехатронных модулей.** Расчет принудительной вентиляции и теплоотвода от силовых каскадов частотных преобразователей при плотной компоновке.

8. **Модельно-ориентированное проектирование (MBD): генерация кода (*Embedded Coder*).** Перенос алгоритма векторного управления с модели MATLAB/Simulink на целевой микроконтроллер STM32 без ручного написания кода.

9. **Компенсация упругих деформаций и мертвого хода в механических передачах.** Разработка программного алгоритма коррекции положения вала на основе динамической модели редуктора с люфтом.

10. **Выбор промышленных сетей полевого уровня (*Fieldbus*) для датчиков обратной связи.** Применение стандартов IO-Link и BiSS C для высокоскоростной передачи данных от абсолютных энкодеров к контроллеру.

11. Размерный синтез и инжиниринг допусков в прецизионной сборке. Анализ влияния погрешностей изготовления корпусных деталей на итоговую точность позиционирования SCARA-робота.

12. Разработка драйверов периферийных устройств для микроконтроллеров реального времени. Написание низкоуровневого кода (HAL/LL) для драйвера затвора инвертора с использованием прямого доступа к памяти (DMA).

13. Цифровые двойники (*Digital Twin*) для предиктивного обслуживания. Создание сопряженной мультифизической модели подшипникового узла для прогнозирования остаточного ресурса на основе вибродиагностики.

14. Инжиниринг систем бесперебойного питания и рекуперации энергии. Проектирование звена постоянного тока с блоком суперконденсаторов для поглощения энергии торможения группы сервоприводов.

15. Верификация и валидация (V&V) встроенного ПО согласно стандарту ISO 26262. Методы статического анализа кода, модульного тестирования (*Unit Testing*) и покрытия условий (*MC/DC coverage*) для автомобильных мехатронных блоков.

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. Методология инжиниринга МС. Системный подход к проектированию.	УО		ПРВ	ИД-1 ОПК-9.1 ИД-2 ОПК-9.2 ИД-3 ОПК-9.1 ИД-4 ОПК-9.2 ИД-5 ОПК-9.1 ИД-6 ОПК-9.2
2	Тема 2. Концептуальное проектирование и архитектура.	УО	КМ	ПРВ	ИД-1 ОПК-9.1 ИД-2 ОПК-9.2 ИД-3 ОПК-9.1 ИД-4 ОПК-9.2 ИД-5 ОПК-9.1 ИД-6 ОПК-9.2
3	Тема 3. Инжиниринг механических подсистем.	ЛС	МШ	ПРВ	ИД-1 ОПК-9.1 ИД-2 ОПК-9.2 ИД-3 ОПК-9.1 ИД-4 ОПК-9.2 ИД-5 ОПК-9.1 ИД-6 ОПК-9.2
4	Тема 4. Проектирование исполнительных электроприводов.	УО	КМ	ПРВ	ИД-1 ОПК-9.1 ИД-2 ОПК-9.2 ИД-3 ОПК-9.1 ИД-4 ОПК-9.2 ИД-5 ОПК-9.1 ИД-6 ОПК-9.2
5	Тема 5. Интеграция сенсорики и встраиваемых вычислений.	УО	МШ	ПРВ	ИД-1 ОПК-9.1 ИД-2 ОПК-9.2 ИД-3 ОПК-9.1 ИД-4 ОПК-9.2 ИД-5 ОПК-9.1 ИД-6 ОПК-9.2
6	Тема 6. Разработка встроенного программного обеспечения (<i>Embedded Software</i>).	УО		ПРВ	ИД-1 ОПК-9.1 ИД-2 ОПК-9.2 ИД-3 ОПК-9.1 ИД-4 ОПК-9.2 ИД-5 ОПК-9.1 ИД-6 ОПК-9.2
7	Тема 7. Модельно-ориентированное проектирование (<i>Model-Based Design</i>).	УО	КМ	ПРВ	ИД-1 ОПК-9.1 ИД-2 ОПК-9.2 ИД-3 ОПК-9.1 ИД-4 ОПК-9.2 ИД-5 ОПК-9.1 ИД-6 ОПК-9.2

8	Тема 8. Испытания, отладка и ввод в эксплуатацию.	УО	ДИ	ПРВ	ИД-1 ОПК-9.1 ИД-2 ОПК-9.2 ИД-3 ОПК-9.1 ИД-4 ОПК-9.2 ИД-5 ОПК-9.1 ИД-6 ОПК-9.2
---	--	----	----	-----	--

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. **Тепловой расчет сервопривода по нагрузочной диаграмме.** Дано: циклограмма работы (разгон, движение с постоянной скоростью, торможение, пауза) и параметры двигателя из каталога. Задача: рассчитать эквивалентный действующий момент ($M_{rmsM_{\{rms\}}M_{rms}}$) методом среднеквадратичного значения и проверить двигатель на перегрев по условию $M_{nom} > M_{rmsM_{\{nom\}}} > M_{\{rms\}}M_{nom} > M_{rms}$ с учетом коэффициента тепловой перегрузки.

2. **Разработка драйвера затвора (Gate Driver) для полумостового инвертора в САПР.** Задача: в среде Altium Designer или KiCad развести печатную плату драйвера. Обеспечить гальваническую развязку сигналов управления (через цифровой изолятор), рассчитать номинал резисторов заряда/разряда затвора (R_{gR_gRg}) для IGBT-транзистора и разместить снабберную цепочку.

3. **Программная реализация S-образного профиля скорости (S-curve).** Задача: написать код на языке C для микроконтроллера STM32, генерирующий профиль движения оси с ограничением рывка (*jerk*). Программа должна рассчитывать мгновенное значение ускорения и скорости для каждого такта ШИМ при заданных перемещении, $V_{max}V_{\{max\}}V_{max}$, $A_{max}A_{\{max\}}A_{max}$ и $J_{max}J_{\{max\}}J_{max}$.

4. **Настройка ПИД-регулятора тока методом технического оптимума (ТО).** Дано: параметры силовой цепи преобразователя частоты ($L\sigma, R_sL_{\{\sigma\}}, R_sL\sigma, R_s$). Задача: рассчитать теоретические коэффициенты ПИ-регулятора тока ($K_p, T_{iK_p}, T_{iKp}, T_i$), обеспечивающие стандартное демпфирование $\zeta = 0,707 \zeta = 0,707 \zeta = 0,707$, и построить переходную характеристику контура в MATLAB Simulink.

5. **Проектирование схемы безопасности категории 3 (PL d) по ГОСТ Р МЭК 62061.** Задача: начертить принципиальную электрическую схему безопасного останова (*STO — Safe Torque Off*) привода. Использовать дублированные контакты реле контроля дверей и проанализировать вероятность отказа системы за час (PFH).

6. **Решение обратной задачи кинематики аналитическим методом.** Дано: геометрические параметры промышленного робота (например, SCARA или антропоморфной руки). Задача: вывести систему тригонометрических уравнений для нахождения углов суставов ($\theta_1, \theta_2, \dots$) ($\theta_1, \theta_2, \dots$) по координатам (x, y, z) (x, y, z) (x, y, z) рабочего органа. Реализовать проверку решения на наличие сингулярностей.

7. **Инжиниринг интерфейса EtherCAT Slave-модуля.** Задача: используя среду TwinCAT 3 или CodeSys, сконфигурировать сеть из мастер-контроллера и одной ведомой платы ввода-вывода. Настроить PDO (Process Data Objects) для циклического обмена данными о положении энкодера с временем цикла 500 мкс.

8. **Компенсация мертвого хода (*Backlash Compensation*) программным способом.** Задача: разработать алгоритм для контроллера движения, который меняет знак управляющего воздействия не в нуле ошибки рассогласования, а с упреждением на величину люфта передачи ($\Delta\phi$ / $\Delta\phi$), хранящуюся в энергонезависимой памяти.

9. **Расчет размерной цепи прецизионного модуля линейного перемещения.** Дано: чертеж узла «винт-гайка-шарикоподшипник-корпус». Задача: провести допусковый анализ (методом максимума-минимума или вероятностным), чтобы обеспечить параллельность направляющих в пределах 10 мкм на всей длине хода 500 мм.

10. **Моделирование тепловых процессов в шкафу автоматики.** Задача: в САЕ-системе (или через упрощенную тепловую модель в Excel) рассчитать требуемую производительность вентиляторов охлаждения. Учитывать тепловыделение от частотных преобразователей при КПД 95% и максимальную температуру окружающей среды +45°C.

11. **Разработка архитектуры встраиваемого ПО на базе RTOS.** Задача: спроектировать структуру задач FreeRTOS для контроллера мобильного робота. Определить приоритеты для задач: опроса датчиков лидара (высокий), алгоритма навигации (средний) и обновления экрана HMI (низкий), обосновав выбор схемой вытеснения.

12. **Синтез наблюдателя состояния (*Luenberger observer*) для оценки скорости.** Дано: математическая модель ДПТ НВ и измерения только токов якоря и возбуждения. Задача: составить матрицы наблюдателя в пространстве состояний, выбрать полюса наблюдателя в 3–5 раз левее полюсов объекта и смоделировать его работу в Simulink при зашумленном сигнале.

13. **Калибровка абсолютного многооборотного энкодера.** Задача: описать процедуру поиска нулевой метки (*homing*) для робота без механических конечных выключателей. Рассчитать поправочный коэффициент (*offset*) между электрическим нулем датчика и механическим нулевым положением сустава манипулятора.

14. **Проектирование звена постоянного тока с рекуперацией энергии.** Дано: группа из четырех осей станка, выполняющих частые циклы разгона/торможения. Задача: рассчитать необходимую емкость суперконденсаторного блока для поглощения излишков энергии торможения, чтобы избежать аварии «*Overvoltage*» на выпрямителе.

15. **Анализ электромагнитной совместимости (ЭМС) силового жгута.** Задача: определить минимально допустимое расстояние прокладки между кабелем мощного сервомотора и витой парой сигнала энкодера внутри гибкого кабель-канала робота. Предложить меры защиты (экранирование, ферритовые кольца) для исключения помех на высоких частотах коммутации ШИМ.

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. **Архитектура систем функциональной безопасности (SIL/PL) в промышленной робототехнике.** Сравнительный анализ аппаратных и программно-аппаратных решений для реализации функций Safe Torque Off (STO), Safe Stop 1 (SS1) и Safely Limited Speed (SLS).

2. **Методология модельно-ориентированного проектирования (*Model-Based Design*).** Процесс верификации алгоритмов управления: от создания цифрового двойника в MATLAB/Simulink до автоматической генерации кода (*Embedded Coder*) для целевого микроконтроллера.

3. **Инжиниринг человеко-машинного интерфейса (HMI) пультов обучения (*teach pendant*).** Эргономика органов управления, визуализация многокоординатных данных реального времени и оптимизация рабочих процессов оператора-наладчика.

4. **Синхронизация распределенных приводов в реальном времени.** Применение промышленных сетей EtherCAT и PROFINET IRT для координированного управления группами роботов: механизмы Distributed Clocks и компенсация джиттера.

5. **Разработка драйверов периферийных устройств для ОС РВ (*FreeRTOS, RTLinux*).** Написание HAL-уровня для высокоскоростного обмена данными с энкодерами по протоколам BiSS-C или EnDat 2.2 с использованием прямого доступа к памяти (*DMA*).

6. **Компенсация упругих деформаций и мертвого хода в механических передачах мехатронных модулей.** Математическое моделирование люфта редуктора и синтез программного алгоритма упреждающего управления (*feedforward backlash compensation*).
7. **Тепловое проектирование силовых преобразователей частоты.** Расчет тепловых сопротивлений «кристалл–корпус–радиатор», выбор методов принудительного охлаждения и жидкостных систем отвода тепла для компактных шкафов автоматики.
8. **Системы бесперебойного питания и рекуперации энергии в сервоприводах.** Инжиниринг звена постоянного тока с блоками суперконденсаторов для поглощения регенеративной энергии при торможении многоосевых манипуляторов.
9. **Цифровые двойники (*Digital Twin*) для предиктивного технического обслуживания.** Создание сопряженной мультифизической модели подшипникового узла для прогнозирования остаточного ресурса на основе онлайн-анализа вибросигналов.
10. **Инжиниринг допусков и размерный анализ в прецизионной сборке мехатронных узлов.** Влияние погрешностей изготовления корпусных деталей на итоговую кинематическую точность параллельных роботов (например, дельта-механизмов).
11. **Эволюция архитектуры встраиваемого ПО:** переход от циклических программ (*Super Loop*) к событийно-ориентированным системам на базе паттернов Publish/Subscribe в среде ROS 2 для автономных мобильных платформ.
12. **Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) в кабельных сетях роботов.** Методы защиты низкосигнальных линий обратной связи (энкодеры) от помех мощных инверторов: экранирование, скрутка пар, применение синфазных фильтров и ферритовых колец.
13. **Наблюдатели состояния (*State Observers*) как альтернатива прямым датчикам.** Проектирование расширенного фильтра Калмана (*EKF*) для оценки скорости и положения ротора в бездатчиковых векторных электроприводах.
14. **Стандартизация жизненного цикла изделия в инжиниринге МС.** Применение требований стандартов ISO 13849 (безопасность машин) и ГОСТ Р МЭК 61508 при разработке документации, проведении FMEA-анализа и сертификации оборудования.
15. **Интеграция систем технического зрения (*Machine Vision*) в контур управления движением.** Организация конвейерной обработки изображений для динамического изменения траектории робота-сварщика в режиме жесткого реального времени.

5.4. Перечень вопросов промежуточной аттестации по дисциплине

Список вопросов для зачета

1. Системный подход в инжиниринге мехатронных систем. Структура жизненного цикла изделия (ЖЦИ) и роль стандартов функциональной безопасности (ГОСТ Р МЭК 61508/62061).
2. Концептуальное проектирование МС: выбор кинематической схемы манипулятора, определение степеней подвижности и анализ рабочей зоны.
3. Инжиниринг механических подсистем: расчет размерных цепей, допусковый анализ точности позиционирования и компенсация упругих деформаций звеньев.
4. Проектирование несущих конструкций с учетом требований по жесткости, демпфированию собственных частот и виброустойчивости.
5. Методика подбора серводвигателей и редукторов по нагрузочной диаграмме механизма. Расчет эквивалентного момента ($M_{rmsM_rms} M_{rms}$) и тепловой проверки привода.
6. Особенности интеграции прямого привода (*Direct Drive*) и безредукторных систем: динамика, мертвая зона и проблемы теплоотвода.
7. Архитектура силовых преобразователей частоты. Топологии инверторов напряжения, широтно-импульсная модуляция (ШИМ) и спектральный состав выходного напряжения.
8. Тепловое проектирование шкафов автоматики. Расчет систем принудительного воздушного и жидкостного охлаждения для компактных мехатронных модулей.
9. Интеграция сенсорных подсистем: выбор абсолютных и инкрементальных энкодеров, резольверов. Протоколы высокоскоростной передачи данных BiSS-C и EnDat.
10. Обратные связи низкого уровня (ток, скорость, положение). Принципы построения контуров подчиненного регулирования координат.

11. Наблюдатели состояния (*State Observers*): назначение, структура наблюдателя Люенбергера и расширенного фильтра Калмана (*EKF*) для оценки неизмеряемых переменных.
12. Синхронизация распределенных приводов в реальном времени. Промышленные сети EtherCAT и PROFINET IRT: механизмы Distributed Clocks и тайминг обмена данными.
13. Разработка архитектуры встроенного программного обеспечения на базе ОС реального времени (RTOS). Управление приоритетами задач и синхронизация потоков (семафоры, мьютексы).
14. Программная реализация алгоритмов интерполяции траекторий движения. Точечная, линейная и круговая интерполяция в пространстве обобщенных координат.
15. Генерация профилей скорости S-кривой (*S-curve profiling*): математическое описание фаз разгона, ограничение рывка (*jerk*) и влияние на динамические нагрузки конструкции.
16. Модельно-ориентированное проектирование (*Model-Based Design*). Верификация законов управления методами PIL (*Processor-in-the-Loop*) и HIL (*Hardware-in-the-Loop*).
17. Разработка драйверов периферийных устройств микроконтроллеров. Написание HAL-уровня для работы с АЦП, ШИМ и интерфейсами SPI/CAN с использованием DMA.
18. Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) кабельных сетей роботов. Методы защиты сигнальных линий от помех мощных инверторов (экранирование, ферритовые кольца).
19. Инжиниринг человеко-машинного интерфейса (HMI) пультов обучения (*teach pendant*). Эргономика органов управления и визуализация многокоординатных процессов.
20. Системы безопасного останова (*Safe Torque Off — STO*) категории 3/PL d. Аппаратная логика реализации цепей безопасности согласно ГОСТ Р МЭК 62061.
21. Рекуперация энергии в многоосевых системах. Проектирование звена постоянного тока с блоками суперконденсаторов для поглощения излишков энергии торможения.
22. Цифровые двойники (*Digital Twin*) для предиктивного технического обслуживания. Использование мультифизических моделей подшипниковых узлов и винтовых передач.
23. Стандартизация процесса разработки ПО встраиваемых систем в робототехнике. Покрываемость кода тестами (*Code Coverage*), статический анализ и сертификация по ISO 26262 / DO-178C.
24. Калибровка измерительных каналов мехатронных систем. Поиск нулевой метки (*homing*), температурная компенсация дрейфа датчиков и масштабирование сигналов обратной связи.
25. Анализ видов и последствий отказов (*FMEA*) при проектировании мехатронных модулей. Оценивание критичности дефектов механической части, электроники и программного обеспечения.

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 промышленный протокол передачи данных реального времени использует механизм «Distributed Clocks» для аппаратной синхронизации тактовых сигналов всех ведомых устройств сети? а) Modbus RTU; б) EtherCAT; в) Profibus DP; г) CANopen. **Правильный ответ: б)**

Вопрос 2. В структуре системы подчиненного регулирования координат электропривода какой контур настраивается первым при движении от внутреннего к внешнему («изнутри — наружу»)? а) Контур положения; б) Контур скорости; в) Контур тока (момента); г) Контур ЭДС двигателя. **Правильный ответ: в)**

Вопрос 3. Какое устройство обеспечивает гальваническую развязку низковольтных логических сигналов микроконтроллера и управление затворами силовых IGBT/MOSFET транзисторов инвертора? а) Оптопара линейная; б) Драйвер затвора (*Gate Driver*) с изолированным питанием; в) Резонансный фильтр dv/dt ; г) Датчик Холла компенсационный. **Правильный ответ: б)**

Вопрос 4. При калибровке абсолютного многооборотного энкодера какая процедура необходима для привязки электрического нуля датчика к механическому нулевому положению

сустава робота? а) Фазировка синусно-косинусных каналов; б) Процедура поиска опорной метки (*Homing*); в) Температурная коррекция смещения; г) Масштабирование разрешения.

Правильный ответ: б)

Вопрос 5. Что характеризует число обусловленности матрицы Якоби роботизированного манипулятора? а) Максимальную грузоподъемность; б) Степень анизотропности (неравномерности) свойств манипулятора в разных направлениях рабочей зоны; в) Общий объем рабочего пространства; г) Количество степеней свободы. **Правильный ответ:** б)

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

Прочитайте текст и выберите два правильных ответа. **Вопрос 6.** Укажите функции, которые реализуются на уровне встраиваемой операционной системы реального времени (RTOS) контроллера движения: а) Планировщик задач с приоритетами (*Preemptive Scheduler*); б) Механизмы межзадачной синхронизации (семафоры, мьютексы); в) Физический расчет моментов в редукторе; г) Генерация аналогового ШИМ-сигнала на ножках МК. **Правильный ответ:** а), б)

Вопрос 7. Какие меры применяются для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) сигнальных линий энкодеров вблизи мощных кабелей приводов? а) Использование витой пары с дифференциальной передачей (RS-422/485); б) Увеличение длины неэкранированного участка кабеля; в) Установка синфазных ферритовых фильтров (колец) на кабель; г) Прокладка силового и сигнального кабелей в одном пучке без разделения. **Правильный ответ:** а), в)

Вопрос 8. Выберите методы верификации программного обеспечения мехатронных систем согласно стандартам функциональной безопасности: а) Статический анализ исходного кода (*Static Code Analysis*); б) Покрытие условий и решений (*MC/DC Coverage*); в) Ручное тестирование только основного функционала; г) Отказ от документирования процесса разработки. **Правильный ответ:** а), б)

Вопрос 9. Какие компоненты входят в состав архитектуры безопасного останова категории 3 (PL d) привода оси робота? а) Одноканальное программное условие выключения питания; б) Дублированные релейные цепи контроля целостности тормоза; в) Контроллер безопасности, проверяющий взаимную диагностику входов; г) Отсутствие диагностики перекрестных замыканий. **Правильный ответ:** б), в)

Вопрос 10. Какие процессы происходят в звене постоянного тока при активном торможении группы осей сервоприводов? а) Энергия возвращается из механической части в конденсатор шины DC; б) Напряжение на шине падает ниже уровня сетевого выпрямителя; в) Возникает риск аварии перенапряжения (*Overvoltage*); г) КПД системы мгновенно возрастает до 100%. **Правильный ответ:** а), в)

3. На установление последовательности (5 вопросов)

Укажите правильную последовательность действий или процессов. **Вопрос 11.** Расположите этапы модельно-ориентированного проектирования (MBD) встроенной системы управления:

1. Автоматическая генерация С-кода (*Embedded Coder*);
2. Создание математической модели объекта и регулятора в Simulink;
3. Загрузка прошивки в целевой микроконтроллер и натурные испытания;
4. Проведение симуляции (Model-in-the-Loop) и проверка требований. **Правильный**

ответ: 2-4-1-3

Вопрос 12. Установите порядок фаз выполнения процедуры аварийного безопасного останова (*Safe Stop 1 — SS1*):

1. Инициирование команды остановки внешним сигналом безопасности;
2. Замедление привода под управлением активного контура момента/скорости;
3. Контроль достижения нулевой скорости или заданного порога;
4. Снятие напряжения с силовых ключей (переход в STO). **Правильный ответ:** 1-2-3-

4

Вопрос 13. Расположите уровни абстракции драйвера периферийного устройства (от низкого к высокому):

1. Библиотека HAL (Hardware Abstraction Layer);
2. Регистровая карта конкретного микроконтроллера;

3. Прикладной интерфейс вызова функций в задаче ОС;
4. Обработчик прерываний (ISR) DMA-передатчика. **Правильный ответ:** 2-4-1-3

Вопрос 14. Установите иерархию протоколов промышленной сети по уровню OSI (от нижних к верхним) для стека EtherCAT:

1. Протокол прикладного уровня (CoE — CANopen over EtherCAT);
2. Канальный уровень Ethernet (с модифицированным обработчиком кадров);
3. Физический уровень (100BASE-TX);
4. Сервисы безопасности и диагностики (FoE, EoE). **Правильный ответ:** 3-2-1-4

(Примечание: CoE и диагностика работают поверх канального уровня).

Вопрос 15. Расположите шаги алгоритма компенсации мертвого хода (Backlash Compensation) в системе ЧПУ:

1. Определение текущего направления движения оси;
2. Сравнение знака текущей ошибки со знаком предыдущей ошибки;
3. Добавление величины люфта ($\Delta\phi$ / $\Delta\phi$) к уставке контроллера при смене направления;
4. Чтение значения параметра люфта из таблицы настроек станка. **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 скорости и его характеристикой изменения ускорения:

Профиль	Характеристика
А) Трапецеидальный	1) Бесконечный рывок в моменты старта и стопа (ступенчатый разгон)
Б) S-образный	2) Постоянное ускорение внутри фазы разгона
В) Синусоидальный	3) Непрерывное изменение ускорения (ограничение рывка)
Правильный ответ: А – 2, Б – 3, В – 1 (или вариация: А–1 как идеализация, но классический инженерный ответ: А–2, Б–3).	

Вопрос 17. Установите соответствие между стандартом и областью его применения в инжиниринге МС:

Стандарт	Область
А) ГОСТ Р МЭК 61508	1) Безопасность промышленных машин и роботов
Б) ISO 13849	2) Функциональная безопасность электрических/электронных систем (SIL)
В) ISO 26262	3) Функциональная безопасность автомобильных систем
Правильный ответ: А – 2, Б – 1, В – 3	

Вопрос 18. Установите соответствие между интерфейсом обратной связи и его ключевой особенностью:

Интерфейс	Особенность
А) BiSS-C	1) Последовательный интерфейс, высокая помехозащищенность, лицензия открытая
Б) EnDat 2.2	2) Передача параметров памяти датчика (тип, серийный номер) вместе с позицией
В) SSI	3) Простой синхронный последовательный код, нет диагностики обрыва линии
Правильный ответ: А – 1, Б – 2, В – 3	

Вопрос 19. Установите соответствие между компонентом шкафа автоматики и его функцией защиты:

Компонент	Функция
А) Сетевой дроссель	1) Подавление перенапряжений (импульсных помех) со стороны сети
Б) Варистор / SPD	2) Ограничение скорости нарастания тока (di/dt) и искажений сети
В) Выходной моторный дроссель	3) Защита изоляции двигателя от пиков du/dt ШИМ-инвертора
Правильный ответ: А – 2, Б – 1, В – 3	

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

Запишите пропущенный термин. **Вопрос 20.** Явление возникновения незатухающих колебаний исполнительного органа робота вокруг точки позиционирования из-за избыточного коэффициента усиления ПИД-регулятора называется потерей _____. **Правильный ответ:** устойчивости

Вопрос 21. Минимальное угловое расстояние между двумя соседними устойчивыми положениями равновесия шагового двигателя при отключенном токе обмоток называется углом _____. **Правильный ответ:** фиксации (или *детента/detent*)

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

Дайте развернутое определение. **Вопрос 22.** Раскройте физический смысл принципа действия расширенного фильтра Калмана (*EKF*) при оценке состояния бесколлекторного двигателя. Почему он эффективнее простого вычисления скорости через производную угла? **Правильный ответ:** *EKF* объединяет зашумленные измерения датчиков с динамической моделью двигателя, минимизируя ковариацию ошибки оценки. Он предсказывает состояние (угол, скорость) на основе уравнений динамики и корректирует его с учетом реальных измерений, эффективно фильтруя шум квантования энкодера, который при простом дифференцировании угла приводит к катастрофическому росту ошибок и пульсаций оценки скорости.

Вопрос 23. Что такое коэффициент нелинейных искажений (*THD — Total Harmonic Distortion*) выходного напряжения частотного преобразователя? Как инжиниринг инвертора (частота ШИМ, фильтры) влияет на этот показатель? **Правильный ответ:** *THD* — это отношение среднеквадратичного значения высших гармоник напряжения к значению основной (первой) гармоники. Повышение несущей частоты ШИМ смещает спектр гармоник в область более высоких частот, что облегчает их фильтрацию выходным *LC*-фильтром, тем самым снижая нагрев обмоток двигателя и акустический шум, но увеличивая коммутационные потери в ключах инвертора.

Раздел 7. Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

7.1. Основная литература

1. Иванов, В. К. Управление, моделирование и датчики мехатронных систем : учебное пособие / В. К. Иванов. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. – 212 с. – ISBN 978-5-9729-2590-2. – Текст : непосредственный.

2. Идентификация и диагностика мехатронных систем : учебное пособие / сост. А. А. Мартынов. – Самара : Самарский государственный технический университет, 2024. – 144 с. – Текст : непосредственный.

7.2. Дополнительная литература

3. Волкова, М. А. Приводы мехатронных и робототехнических систем : методические рекомендации [электронное учебное пособие] / М. А. Волкова. – Москва : РТУ МИРЭА, 2024. – 19 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/457019> (дата обращения: 13.08.2026). – Режим доступа: для авториз. пользователей. – Текст : электронный.

4. Вегера, Ж. Г. Основы теории проектирования информационно-измерительных и управляющих систем коптеров : учебное пособие / Ж. Г. Вегера, В. В. Слепцов. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. – 128 с. – ISBN 978-5-9729-2480-6. – Текст : непосредственный.

5. Польшкова, Е. В. Интернет технологии, системы мультимедиа в автоматизации и мехатронике : электронный учебно-методический комплекс по дисциплине / Е. В. Польшкова, А. В. Стаселович. – Минск : БНТУ, 2024. – URL: <https://bntu.by> (дата обращения: 13.08.2026). – 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 **«Инжиниринг мехатронных систем»** можно построить в соответствии со списком вопросов для подготовки к экзамену. Для эффективного изучения курса Безопасности жизнедеятельности 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

Инжиниринг мехатронных систем

*(Наименование дисциплины в соответствии с учебным
планом)*

Николаев Юрий Николаевич

(Фамилия, Имя, Отчество составителя)