

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

М. Е. Антипин
А.В.Асадчий

Управление в робототехнических системах

Методические указания по проведению практических занятий

Томск
2026

УДК 004.02
ББК 3стд2-02
А 72

Рецензент:

Ефимов А.А., руководитель по внешним коммуникациям и развитию ООО «НПП «ТЭК»,
канд. техн. наук

Антипин, Михаил Евгеньевич

А 72 Управление в робототехнических системах: Методические указания по проведению практических занятий/ М.Е. Антипин, А.В. Асадчий. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2026. – 30 с.

Методические указания содержат рекомендации и материалы, необходимые для проведения практических занятий по дисциплине «Управление в робототехнических системах». Для студентов высших учебных заведений.

Авторами данных методических указаний являются доцент кафедры управления инновациями М.Е. Антипин, а также сотрудник профильного предприятия, начальник конструкторского отдела АО НПЦ «Полюс», г.Томск, к.т.н. А.В.Асадчий.

Одобрено на заседании кафедры УИ, протокол № 7 от 23.04.2026.

УДК 004.02
ББК 3стд2-02

© Антипин М.Е., Асадчий А.В. 2026
© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2026

Оглавление

1 Общие положения	4
2 Общие требования к проведению практических занятий	5
3 Техническое обеспечение практических занятий	6
4 Прием результатов выполнения практических заданий	6
5 План практических занятий	7
Раздел 1. Робототехнические системы как объект управления	7
Раздел 2. Кинематика роботов	10
Раздел 3. Динамика роботов	14
Раздел 4. Управление приводами. Элементы питания робототехнических устройств	16
Раздел 5. Обеспечение безопасности	20
Раздел 6. Навигация робототехнических систем	23
Раздел 7. Технологическое применение робототехнических систем	25
6 Вопросы для устного опроса на занятиях	28
Список рекомендуемой литературы	30

1 Общие положения

Данные методические указания разработаны для студентов, обучающихся в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (далее - Университет) по программам магистратуры.

Структура дисциплины «Управление в робототехнических системах» предполагает проведение практических занятий. Практические занятия предназначены для закрепления материала, полученного в лекционном курсе, самостоятельного изучения и обсуждения материалов дисциплины, предусмотренных рабочей программой. Полученные навыки и знания могут быть полезны при анализе и моделировании бизнес-процессов, оценки эффективности и ключевых показателей деятельности организаций, реинжиниринге и автоматизации бизнес-процессов. Рекомендации по выполнению самостоятельной работе студентов приведены в соответствующих методических указаниях.

В ходе проведения практических занятий студентам прививаются навыки поиска информации, работы с учебно-методической документацией, умения увязывать теоретические знания с практикой, четко излагать свои мысли, отвечать на вопросы, оформлять и представлять результаты работы.

Рекомендации подготовлены с целью помочь студентам в успешном освоении дисциплины и подготовке и прохождении промежуточных этапов аттестации.

2 Общие требования к проведению практических занятий

Практические занятия по дисциплине «Управление в робототехнических системах» проводятся согласно учебному расписанию отдельно для каждой группы студентов очной формы обучения. В ходе практических занятий студент участвует в обсуждении темы, обозначенной на предыдущем занятии и выполняет практические задания, полученные от преподавателя. Практические задания выполняются студентами очной формы обучения индивидуально под контролем со стороны преподавателя. Все консультации осуществляются преподавателем.

Во время проведения практических занятий студентам в аудитории запрещается:

- Разговаривать между собой на любые темы без разрешения преподавателя.
- Консультировать друг друга.
- Передавать друг другу материалы, являющиеся результатом выполнения заданий.
- Производить шум, мешающий остальным сосредоточиться на выполнении задания.
- Пользоваться наушниками, берушами и другими приспособлениями, не позволяющими отчетливо слышать указания преподавателя.
- Читать литературу, конспекты и другие записи, не относящиеся к изучаемому предмету.
- Находиться в помещении аудитории в верхней одежде, если температура выше 18°C.
- Приносить верхнюю одежду с собой и размещать ее на стуле/столе, если в учебном корпусе работает гардероб.

В случае однократного нарушения преподаватель должен предупредить студента. При повторном нарушении в течении одного занятия студент из аудитории удаляется.

Студент имеет право:

- Уточнять полученные задания у преподавателя.
- Пользоваться любыми доступными методическими материалами по данной дисциплине.
- Просить консультации у преподавателя, если он в текущий момент не распределяет задания, не принимает выполненные работы и не консультирует другого студента.
- Пользоваться для выполнения практических заданий собственным ноутбуком или планшетным компьютером.

Преподаватель, давая консультацию студенту, указывает раздел технической документации или методической литературы, в которой имеется ответ на вопрос студента. Если необходимые сведения в документации и литературе отсутствуют, то преподаватель должен дать устные пояснения или продемонстрировать практические действия, приводящие к требуемому результату для повторения студентом.

3 Техническое обеспечение практических занятий

Практические занятия должны проводиться в аудитории, оборудованной:

- Доской и маркерами.
- Проектором и экраном.
- Персональными компьютерами, не менее одного на двух студентов группы, удовлетворяющих требованиям:
 - доступ в сеть Internet;
 - современный графический редактор для разработки моделей и схем.
 - Офисный пакет программ.
- Робототехническими манипуляторами Promobot M Edu.
- Робототехническими манипуляторами Promobot Rooky.
- Лаборными источниками питания.
- Генераторами сигналов.
- Осциллографами.
- Мультиметрами.
- Отладочными платами с современными микроконтроллерами.
- Макетными платами для сборки схем.
- Электронными и электротехническими элементами для сборки схем.
- Видеокамерами.

4 Прием результатов выполнения практических заданий

За выполнение каждого задания преподаватель выставляет студенту оценку. Оценка выполнения задания складывается из трех равнозначных компонентов:

- Время выполнения задания. Фиксируется с момента получения задания до момента сдачи отчета. Измеряется в астрономических часах. Сравнивается с нормативным временем выполнения.
- Полнота и правильность выполнения задания. Экспертная оценка преподавателя.
- Аккуратность при выполнении текстовых и графических материалов.

Во время приема выполненной работы преподаватель вправе требовать у студента обоснования представленных материалов.

Преподаватель должен объявить студенту поставленную ему оценку за выполнение задания, а в случае возникновения непонимания, объяснить причины ее выставления. В случае, если оценка неудовлетворительно, студент имеет право повторно предъявить результат выполнения, но не более двух раз в течение одного занятия. При этом для вычисления оценки время, затраченное на исправление, прибавляется к общему времени выполнения задания.

Выставленная оценка влияет на оценку студента по контрольной точке и среднюю оценку за практические занятия.

До конца семестра студент должен получить оценку по всем заданиям, предусмотренным настоящими указаниями. За работы, результаты выполнения которых не были предъявлены преподавателю для оценивания, выставляется оценка неудовлетворительно. Студенты, имеющие среднюю оценку за практические занятия ниже удовлетворительной, к итоговой аттестации по предмету не допускаются.

5 План практических занятий

Практические занятия проводятся по шести разделам дисциплины.

Раздел 1. Робототехнические системы как объект управления

Краткие теоретические сведения. Робототехнические системы (РТС) рассматриваются как сложный, многоуровневый объект, на который воздействует система управления. Основное внимание уделяется структуре РТС, её ключевым свойствам и особенностям, определяющим сложность и подходы к синтезу управляющих алгоритмов.

Робототехническая система представляет собой иерархическую структуру, где каждый уровень решает свою задачу в рамках общего процесса управления. Это позволяет декомпозировать сложную систему на управляемые подсистемы.

Исполнительный (нижний) уровень. Это уровень прямого воздействия на объект. Он включает в себя приводы (электродвигатели, гидро- и пневмоцилиндры), исполнительные механизмы и датчики обратной связи (энкодеры, датчики тока, момента). На этом уровне реализуются базовые законы управления приводами для отработки заданных параметров движения.

Координационный (средний) уровень. Этот уровень агрегирует работу отдельных исполнительных устройств в единую систему. Он отвечает за синхронизацию движений по различным степеням подвижности, координацию работы манипулятора и захватного устройства, а также за взаимодействие с внешним технологическим оборудованием. По сути, этот уровень формирует целостное поведение робота как единого механизма.

Стратегический (верхний) уровень. Отвечает за планирование задач, формирование последовательности действий, взаимодействие с внешней средой и оператором. На этом уровне принимаются решения о том, что нужно сделать.

Рассмотрение РТС как объекта управления требует учёта её фундаментальных свойств, которые отличают её от многих других технических систем:

- **Нелинейность.** Динамические характеристики робота нелинейны и зависят от его текущей конфигурации (положения звеньев), скоростей и ускорений. Это означает, что реакция системы на одно и то же управляющее воздействие может быть разной в разных точках рабочего пространства.
- **Многосвязность (взаимное влияние степеней подвижности).** Движение по одной оси манипулятора неизбежно влияет на динамику всех остальных осей из-за изменения конфигурации, перераспределения масс и моментов инерции. Управлять каждой степенью подвижности изолированно невозможно; система управления должна учитывать эти сложные взаимосвязи.
- **Неопределённость и изменчивость параметров.** Фактические параметры объекта (масса полезной нагрузки, коэффициенты трения в шарнирах) могут отличаться от расчётных или изменяться в процессе работы (например, при захвате/отпуске детали). Это создаёт неопределённость в модели объекта, которую система управления должна компенсировать.
- **Не идеальность.** Реальные механизмы обладают упругими деформациями в звеньях и передачах, а также кинематическими погрешностями и люфтами. Эти факторы могут приводить к возникновению нежелательных колебаний и снижению точности позиционирования, что усложняет задачу синтеза регулятора.
- **Работа в реальном времени.** Система управления должна формировать управляющие сигналы с высокой частотой для обеспечения плавности, точности и быстродействия движений. Задержки в контуре управления могут привести к потере устойчивости или возникновению автоколебаний.

Практические занятия по дисциплине проводятся по семи темам.

Тема 1. Знакомство с 4-осевым манипулятором Promobot M Edu.

Образовательная робототехническая платформа Promobot M Edu представляет собой программно-аппаратный комплекс, состоящий из многофункционального настольного четырехосевого робот-манипулятора с плоскопараллельной кинематикой и обратной связью, набора сменных рабочих инструментов и методических указаний, предназначенный для использования в образовательных целях. M Edu обеспечивает пользователю возможность освоения навыков программирования, основ управления роботизированными системами и принципов работы производственных линий.

Основным компонентом M Edu является настольный 4-х осевой манипулятор, который состоит из основания, башни и полиуретанового корпуса. Основание манипулятора – это неразборный блок, включающий в себя дисплей и разъемы для внешних подключений. Дисплей, расположенный на передней панели, отображает статус работы манипулятора с помощью изображений формата GIF. Разъемы для внешних подключений расположены на задней панели. В качестве основного вычислительного модуля используется одноплатный компьютер Raspberry Pi 5 с операционной системой Linux. Управление дополнительными системами M Edu осуществляется через встроенный микроконтроллер STM32. Для выполнения всех функций M Edu необходимо подключить к манипулятору монитор и элементы управления (компьютерная мышь, клавиатура).

Задания по теме 1:

Задание 1. Включение манипулятора M Edu. Разложить поле с разметкой на ровной горизонтальной поверхности. Установить по разметке манипулятор V Edu подключить кабель питания, кабель HDMI от монитора, через разъемы USB клавиатуру, мышь. Включить питание, дождаться завершения процесса калибровки.

Задание 2. Подключение к управлению манипулятором. Осуществить подключение через терминал основного вычислительного модуля согласно технической документации на манипулятор. Оснастить манипулятор пишущим пером. Положить в зону действия манипулятора лист бумаги (не рисовать на поле с разметкой!). Осуществить калибровку (задание «нуля»). Нарисовать выбранную фигуру в программном режиме. Перейти в режим ручного управления и нарисовать ту же фигуру. Подключить Gamedpad и нарисовать фигуру с его помощью.

Задание 3. Выключение манипулятора. Нажмите кнопку «Выход» в правом верхнем углу. Затем нажмите «Выключить манипулятор». С помощью кнопки FreeDrive опустите стрелу на стол и дождитесь отключения системы. Не допускать выключения при поднятой стреле во избежание повреждения манипулятора!

Тема 2. Оснащение манипулятора механическим захватом

Оснащение робототехнического манипулятора механическим захватом (или рабочим органом, end-effector) — это ключевой этап проектирования, который определяет функциональные возможности робота. Выбор и интеграция захвата зависят от множества факторов: от типа перемещаемых объектов до требуемой скорости и точности операций.

Механические захваты можно разделить на несколько основных типов по принципу действия и конструкции. По количеству пальцев захваты бывают Двухпальцевые и трехпальцевые. Самый распространенный тип - двухпальцевый (параллельный). Два пальца движутся параллельно друг другу для зажима объекта. Такие захваты просты, надежны и универсальны. Трехпальцевые захваты обеспечивают центрирование цилиндрических или конических объектов за счет симметричного расположения пальцев. Часто используются для задач сборки. Многопальцевые и антропоморфные захваты имитируют человеческую кисть. Сложны и дороги, применяются для сложных манипуляций, где требуется адаптивность.

По типу привода (актуатора) захваты бывают:

- **Пневматические:** Работают от сжатого воздуха. Отличаются высокой скоростью, простотой конструкции и низкой стоимостью. Основной недостаток — необходимость подвода пневмолинии и сложность точного контроля усилия.
- **Электрические:** Приводятся в движение электродвигателями (часто через редуктор). Позволяют очень точно контролировать положение, скорость и усилие захвата. Не требуют компрессора, что упрощает компоновку. Дороже пневматических аналогов.
- **Гидравлические:** Используются для тяжелых промышленных применений, где требуются огромные усилия зажима. Характеризуются большой мощностью, но также сложностью системы и риском утечек масла.

В манипуляторе Promobot M Edu предусмотрен двухпальцевый механический захват с электрическим приводом

Задания по теме 2:

Задание 1. Монтаж захвата. Все монтажные работы производить только на обесточенном оборудовании! Установить модуль механического захвата в муфту поворотного модуля. Установить поворотный модуль в гнездо инструмента стрелы манипулятора. Подключить кабель поворотного модуля к разъему 3.GP3, а кабель механического захвата к разъему 4.GP3. Включить манипулятор по инструкции.

Задание 2. Перемещение объекта. При помощи механического захвата переместить тестовый объект (шар, кубик) в режиме ручного управления манипулятором в заданную точку поля с разметкой. Сохранить позиции и создать программу для повторения движения.

Задание 3. Демонтаж захвата. Отключить питание манипулятора по инструкции, не допуская свободного падения стрелы. Отключить кабели поворотного модуля и модуля механического захвата от разъемов на стреле манипулятора. Демонтировать поворотный модуль из гнезда инструмента стрелы манипулятора. Демонтировать модуль механического захвата из муфты поворотного модуля.

Тема 3. Применение вакуумного захвата

Вакуумный захват (вакуумный схват, или gripper) — это один из наиболее распространенных и эффективных типов исполнительных устройств для промышленных и сервисных робототехнических манипуляторов. Его работа основана на создании разрежения (вакуума) между присоской и поверхностью объекта, в результате чего атмосферное давление прижимает объект к захвату.

Основным рабочим элементом вакуумного захвата является эластичная присоска (чашка), герметично прилегающая к поверхности груза. К присоске подведен вакуумный шланг, соединенный с генератором вакуума (вакуумным насосом, эжектором или вакуумным вентилятором).

Этапы работы вакуумного захвата:

1. **Захват:** Робот позиционирует захват над объектом. Вакуумный генератор включается, откачивая воздух из-под присоски. Создается разрежение, и под действием атмосферного давления объект плотно прижимается к присоске.

2. **Удержание:** Пока поддерживается вакуум, сила удержания достаточна для перемещения объекта. Сила удержания (F) рассчитывается по формуле:

$$F = \Delta P \cdot S$$

где ΔP — разница между атмосферным давлением и давлением под присоской, а S — эффективная площадь контакта.

3. **Отпускание:** Для сброса объекта подача вакуума прекращается. Атмосферный воздух поступает в полость под присоской (часто через специальный клапан), давление выравнивается, и объект освобождается.

Вакуумные захваты незаменимы в задачах, где требуется бережное обращение с грузом, высокая скорость работы или работа с объектами сложной формы.

Преимущества вакуумных захватов

1. Бережное обращение: Отсутствие механических зажимов исключает повреждение поверхности груза. Сила удержания распределена по всей площади присоски.

2. Высокая скорость: Цикл захвата-отпускания происходит очень быстро, что повышает общую производительность роботизированной ячейки.

3. Гибкость к форме: Вакуумный захват может надежно удерживать объекты не только с плоской, но и с искривленной поверхностью (хотя его эффективность при этом снижается).

4. Простота конструкции: Относительно малое количество движущихся частей по сравнению с механическими пальцами делает систему надежной и простой в обслуживании.

5. Низкая стоимость: Часто вакуумные захваты дешевле в производстве, чем сложные многозвенные механические схваты.

Недостатки и ограничения вакуумных захватов:

1. Требования к поверхности: Захват работает только с поверхностями, которые могут обеспечить герметичное прилегание. Пористые (картон, некоторые ткани), сильно перфорированные или очень грязные поверхности могут стать причиной утечек воздуха и падения груза.

2. Ограниченная сила удержания: Сила захвата напрямую зависит от площади присоски и атмосферного давления. Для перемещения очень тяжелых или компактных грузов могут потребоваться очень большие присоски или несколько захватов.

3. Зависимость от источника вакуума: Для работы системы требуется внешний источник вакуума (насос), что усложняет мобильную робототехнику (например, логистических роботов) из-за необходимости его размещения и энергопотребления.

4. Чувствительность к утечкам: Любое повреждение шланга или нарушение герметичности соединения приводит к немедленной потере удерживающей силы.

Применение вакуумного захвата для робототехнического манипулятора является оптимальным решением для автоматизации задач по перемещению плоских, гладких и непористых грузов в условиях производства, склада или цеха. Ключевым фактором при выборе такого типа захвата является анализ свойств поверхности объекта и его веса. В состав манипулятора Promobot M Edu входит модуль вакуумного захвата и вакуумный насос, обеспечивающий создание частичного вакуума.

Задания по теме 3.

Задание 1. Монтаж вакуумного захвата. Все монтажные работы производить только на обесточенном оборудовании! Установить присоску вакуумного захвата в поворотный модуль инструмента. Установить поворотный модуль в гнездо инструмента стрелы манипулятора. Подключить кабель поворотного модуля к разъему 3.GP3. Присоединить полиуретановую трубку к штуцерам модуля вакуумного захвата и вакуумного насоса при помощи фитинговых держателей. Присоединить кабель питания вакуумного насоса к разъему на блоке манипулятора. Включить манипулятор по инструкции.

Задание 2. Исследование грузоподъемности. Подключить режим управления вакуумным захватом. Исследовать возможности удержания тестовых объектов в зависимости от веса и типа поверхности.

Задание 3. Демонтаж захвата. Отключить питание манипулятора по инструкции, не допуская свободного падения стрелы. Отключить кабели поворотного модуля и вакуумного насоса от разъемов. Отсоединить полиуретановую трубку. Демонтировать поворотный модуль из гнезда инструмента стрелы манипулятора. Демонтировать модуль вакуумного захвата из муфты поворотного модуля.

Раздел 2. Кинематика роботов

Кинематика роботов — это раздел робототехники, изучающий движение роботов без учёта сил, которые это движение вызывают. Основной акцент делается на геометрию

кинематических цепей, где звенья робота рассматриваются как твёрдые тела, а шарниры обеспечивают вращательное или поступательное движение. Кинематика описывает взаимосвязь между положением, скоростью и ускорением каждого звена и позволяет планировать и управлять движением робота, а также рассчитывать необходимые параметры приводов.

В кинематике выделяют две основных задачи:

Прямая кинематика — определение положения и ориентации рабочего органа (конечного эффектора) по известным значениям углов (или перемещений) в суставах робота. Для типового манипулятора с двумя звеньями длины l_1 и l_2 координаты конечной точки выражаются так:

$$x=l_1\cos\theta_1+l_2\cos(\theta_1+\theta_2),$$

$$y=l_1\sin\theta_1+l_2\sin(\theta_1+\theta_2),$$

где θ_1 и θ_2 — углы поворота суставов[2].

Обратная кинематика — определение необходимых углов суставов для вывода рабочего органа в заданную позицию. Эта задача часто не имеет единственного решения и требует решения системы нелинейных уравнений.

Основные параметры кинематики робота: положение, скорость и ускорение звеньев, длины звеньев, углы поворота в суставах. Для описания движения используются различные координатные системы (декартова, полярная), а для вычислений — матрицы преобразования. Для решения задач применяются аналитические (точные уравнения) и численные (приближённые) методы.

Кинематика необходима для разработки алгоритмов управления движением, планирования маршрутов, повышения точности и скорости работы роботов. Она широко применяется в промышленности (автоматизация производства), медицине (хирургические манипуляторы), научных исследованиях.

Сложности задач кинематики: программирование и управление шарнирными роботами затруднено из-за множества решений обратной задачи и наличия сингулярных конфигураций, требующих специальных алгоритмических мер предосторожности.

Тема 1. Расстановка осей связанных систем отсчёта для манипуляторов с различной рабочей зоной.

Расстановка осей связанных систем отсчёта для манипуляторов с различной рабочей зоной — ключевой этап кинематического проектирования, определяющий форму рабочей зоны, структуру и возможности управления роботом. Выбор системы координат осуществляется на ранних этапах проектирования и зависит от требуемой геометрии рабочей зоны и компоновки манипулятора.

Основные типы систем координат и правила расстановки осей:

Прямоугольная (декартова) система: оси X, Y, Z взаимно перпендикулярны. Положение схвата определяется тремя линейными координатами. Рабочая зона — параллелепипед. Оси обычно совмещают с направлениями основных линейных перемещений звеньев.

Цилиндрическая система: одна из осей (например, Z) совпадает с осью вращения основания, вторая (радиальная) определяет выдвижение руки, третья — вертикальное перемещение. Положение схвата задаётся радиусом, углом поворота и высотой. Рабочая зона — цилиндр или его сегмент.

Сферическая система: оси ориентируются по главным угловым и линейным степеням свободы (например, два угла поворота и радиус-вектор). Рабочая зона — сферический сегмент.

Правила расстановки осей и начало отсчёта:

- Начало координат обычно совмещают с базовой точкой манипулятора (например, с центром основания или первым сочленением).

- Оси связанных систем отсчёта для каждого звена направляют вдоль осей кинематических пар (вращательных или поступательных), соблюдая правило правой руки.

- Точка отсчёта определяется пересечением осей двух соседних звеньев. В случае параллельности осей допускается смещение начала координат вдоль одной из них.

- Структурная схема манипулятора (формула строения) отражает ориентацию осей и типы кинематических пар для каждого звена относительно базовой системы координат.

Рабочая зона манипулятора (пространство, достижимое центром схвата) полностью определяется выбранной системой координат, компоновкой звеньев и конструктивными ограничениями на перемещения в суставах. Универсальные схемы (например, шарнирные) обеспечивают наибольший охват пространства за счёт комбинации вращательных степеней свободы.

Соглашения Денавита — Хартенберга (DH-параметры) — это стандартизированный метод задания систем координат для звеньев кинематической цепи, в первую очередь манипуляторов роботов. Предложен Жаком Денавитом и Ричардом Хартенбергом в 1955 году для унификации описания пространственных механизмов.

Основные положения и правила расстановки осей:

- Для каждого сочленения (между звеньями $n-1$ и n) вводится своя система координат.

- Ось z_n всегда направлена вдоль оси сустава (оси вращения или поступательного перемещения) звена n .

- Ось x_n направляется вдоль общей нормали (кратчайшего перпендикуляра) к осям z_{n-1} и z_n . Если оси параллельны, направление x выбирается произвольно, а один из параметров становится свободным.

- Ось y_n определяется по правилу правой руки, замыкая правую тройку (x, y, z) .

- Начало системы координат n размещается в точке пересечения оси z_n и общей нормали (оси x_n). Если оси z_{n-1} и z_n пересекаются — в точке их пересечения, если скрещиваются — на общей нормали [1][3].

Для каждого звена (сочленения) вводятся четыре параметра Денавита — Хартенберга, полностью описывающих взаимное расположение соседних систем координат:

1. d_n — смещение вдоль предыдущей оси z_{n-1} до пересечения с общей нормалью.

2. θ_n — угол поворота вокруг оси z_{n-1} между предыдущей осью x_{n-1} и текущей осью x_n .

3. a_n (или r_n) — длина общей нормали (расстояние между осями z_{n-1} и z_n вдоль оси x_n).

4. α_n — угол поворота вокруг общей нормали (оси x_n) между осью z_{n-1} и осью z_n .

Эти параметры позволяют построить однородную матрицу преобразования размером 4×4 , которая описывает положение и ориентацию системы координат одного звена относительно предыдущего. Перемножая такие матрицы по всей кинематической цепи, получают итоговое преобразование для определения положения рабочего органа относительно базы.

Преимущества и ограничения:

- Метод минимизирует количество параметров и стандартизирует описание кинематики.

- Ограничения возникают при параллельных или почти параллельных осях суставов (сингулярности).

Задания по теме 1.

Задание 1. Выставить оси связанных систем координат для первых трех сочленений манипулятора с прямоугольной рабочей зоной.

Задание 2. Выставить оси связанных систем координат для первых трех сочленений манипулятора с цилиндрической рабочей зоной.

Задание 3. Выставить оси связанных систем координат для первых трех сочленений манипулятора со сферической рабочей зоной.

Задание 4. Выставить оси связанных систем координат для первых четырех сочленений манипулятора с угловой рабочей зоной.

Тема 2. Решение задачи кинематики для манипулятора Promobot M Edu

Манипулятор Promobot M Edu — это настольный четырехосевой робот с плоскопараллельной кинематикой. В отличие от классических последовательных манипуляторов, его исполнительный орган (схват) перемещается в параллелограммной структуре, что обеспечивает высокую жесткость, точность и повторяемость движений в плоскости.

Схема манипулятора представлена на рисунке 1:

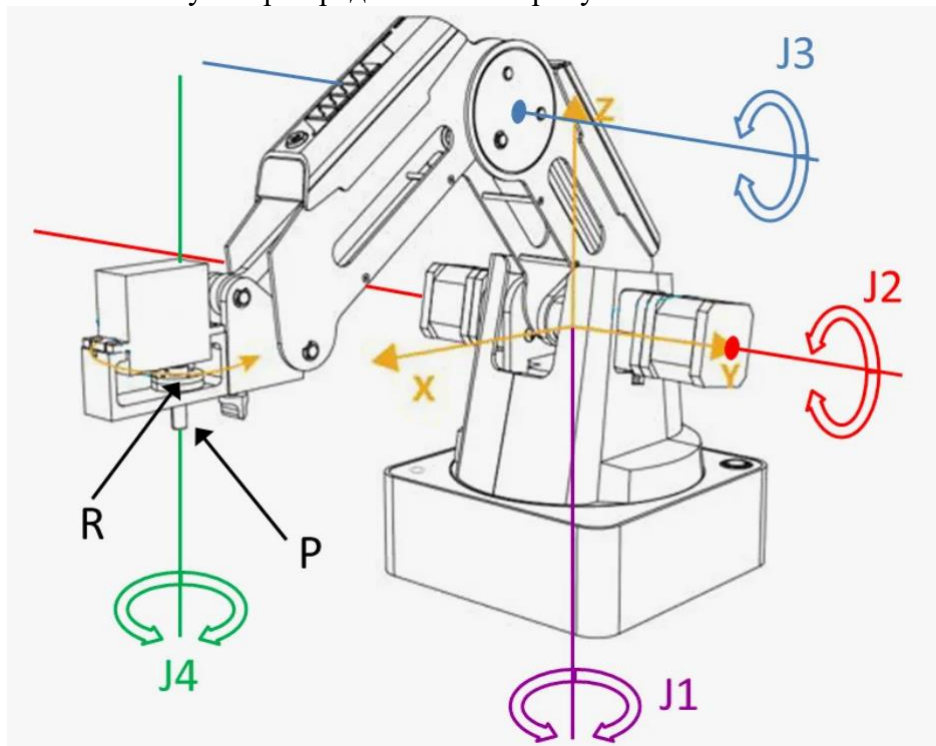


Рисунок 1 – схема 4-осевого манипулятора

Прямая задача кинематики — по заданным углам поворота приводов (внутренним координатам) вычисляется положение и ориентация рабочего органа (схвата) в декартовом пространстве. Эта задача решается аналитически и сводится к геометрическим преобразованиям, так как координаты X и Y напрямую зависят от длин звеньев и углов поворота в шарнирах основания.

Задания по теме 2.

Задание 1. Выставить оси по соглашениям Денавита-Хартенберга. Составить кинематическую схему манипулятора Promobot M Edu и связать с каждым звеном подвижную систему координат

Задание 2. Составить таблицу параметров Денавита-Хартенберга. Выписать в таблицу углы поворота и смещения осей.

Задание 3. Составить матрицы преобразования координат для каждого сочленения.

Задание 4. Вычислить положения схвата при заданных углах поворота сочленений. Для двух последних заданий использовать матричный калькулятор.

Тема 3. Демонстрация и разбор работы портального манипулятора.

Портальные манипуляторы (также известные как декартовы или гантри-роботы) представляют собой класс промышленных роботов, кинематика которых основана на перемещении рабочего органа по трём взаимно перпендикулярным линейным осям X , Y и Z .

Рабочая зона портального робота представляет собой прямоугольный параллелепипед. Перемещение инструмента в любую точку этого пространства описывается простыми тригонометрическими функциями без необходимости решения сложных нелинейных уравнений обратной кинематики, что выгодно отличает их от шарнирных систем. Это делает программирование таких роботов прозрачным и интуитивно понятным.

Если горизонтальная балка (портал) опирается на две вертикальные стойки с обоих концов, такая конфигурация называется порталным или гантри-роботом. Эта схема позволяет перекрывать огромные площади и работать с грузами, недоступными для напольных манипуляторов.

Области применения порталных манипуляторов: логистика, складская автоматизация, паллетирование, механическая обработка (фрезерование, сверление), крупногабаритная сварка, нанесение покрытий и сборка крупных конструкций — основные сферы, где порталный робот не имеет конкурентов по соотношению размера рабочей зоны и грузоподъёмности.

Ключевые характеристики:

Точность: порталные системы обеспечивают высокую точность позиционирования — до 0,1 мм при перемещениях на расстояние более четырёх метров.

Грузоподъёмность: диапазон грузоподъёмности очень широк: от нескольких десятков килограммов у компактных моделей до нескольких тонн у тяжёлых промышленных систем.

Жёсткость конструкции: благодаря массивной станине и направляющим такие роботы обладают высокой жёсткостью, что критично для операций механической обработки, сварки и паллетирования крупногабаритных объектов.

Необходимость обслуживания: Открытые направляющие подвержены загрязнению, поэтому требуют защитных мер и регулярного технического обслуживания.

Задания по теме 3.

Практическое занятие по теме 3 проводится в выездном режиме на территории промышленного партнера, где развернут порталный манипулятор.

Задание 1. Пройти инструктаж по ОТ и ТБ при работе с порталным манипулятором. При необходимости использовать средства индивидуальной защиты (СИЗ).

Задание 2. Познакомиться с устройством порталного манипулятора и особенностями его работы. Записать технические характеристики. Начертить кинематическую схему с геометрическими размерами манипулятора.

Раздел 3. Динамика роботов

Динамика роботов — это раздел механики, изучающий движение робота под действием приложенных к нему сил и моментов. В отличие от кинематики, которая описывает лишь геометрию движения (положения, скорости, ускорения) без учета причин его вызывающих, динамика связывает эти параметры с физическими причинами: инерцией звеньев, гравитацией, силами трения, а также управляющими усилиями со стороны приводов.

Поведение многосвязного манипулятора описывается векторно-матричным уравнением:

$$M(q)q'' + C(q, q')q' + G(q) = \tau$$

где:

q — вектор обобщённых координат (углы поворота шарниров);

q' — вектор скоростей;

q'' — вектор ускорений;

$M(q)M(q)$ — матрица инерции. Зависит от конфигурации робота и определяет сопротивление ускорению. Её элементы зависят от масс и моментов инерции звеньев.
 $C(q, \dot{q})\dot{q}$ — вектор кориолисовых и центробежных сил. Эти члены возникают из-за вращения звеньев и их взаимного влияния друг на друга при движении.

$G(q)$ — вектор гравитационных нагрузок. Определяет моменты в суставах, создаваемые силой тяжести.

τ — вектор управляющих моментов/усилий, развиваемых приводами в суставах.

Это уравнение является фундаментом для синтеза систем управления. Оно показывает, какой крутящий момент (τ) необходимо приложить к каждому суставу, чтобы обеспечить заданное движение ($q, \dot{q}, \ddot{q}$) с учетом всех динамических факторов.

В робототехнике выделяют два основных типа задач динамики:

1. **Прямая задача динамики (Forward Dynamics):**

Дано: Управляющие моменты (τ), текущие положения и скорости ($q, \dot{q}$).

Найти: Результирующие ускорения звеньев ($\ddot{q}$).

Применение: Используется в симуляциях для моделирования поведения робота под действием заданных усилий. Позволяет предсказать, как робот будет двигаться.

1. **Обратная задача динамики (Inverse Dynamics):**

Дано: Желаемая траектория движения (заданы $q(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t)$).

Найти: Требуемые управляющие моменты (τ), которые необходимо приложить к приводам для реализации этой траектории.

Применение: Является основой для вычисления управляющих сигналов в реальном времени. Контроллер робота решает эту задачу тысячи раз в секунду, чтобы точно следовать заданной траектории, компенсируя инерцию, гравитацию и другие силы.

Понимание динамики критически важно для проектирования и эксплуатации робототехнических систем:

Расчет требуемых усилий и мощности двигателей.

Создание алгоритмов, которые обеспечивают плавное, точное и энергоэффективное движение.

Минимизация времени выполнения операций за счет оптимального использования динамических возможностей робота.

Предотвращение вибраций, резких рывков и поломок, которые могут возникнуть при неправильном учете инерционных и гравитационных нагрузок

Тема 1. Исследование влияния нагрузки на динамические характеристики манипулятора.

Влияние полезной и инерционной нагрузки — один из ключевых факторов, определяющих динамику роботизированного манипулятора. При изменении массы или положения груза существенно меняются переходные процессы, время позиционирования, амплитуда колебаний и уровень пиковых нагрузок в звеньях и приводах.

Основные эффекты от изменения нагрузки

- Увеличение времени переходных процессов: инерционные нагрузки при разгоне/торможении приводят к затухающим механическим колебаниям рабочего органа. Это увеличивает общее время позиционирования до достижения требуемой точности.

- Рост динамических усилий: с увеличением массы груза возрастают изгибающие моменты и усилия в шарнирах, что требует повышения прочности конструкции или применения демпфирующих устройств для снижения уровня вибраций.

- Изменение собственных частот: приведенная масса объекта труда влияет на собственные частоты колебаний манипулятора. Резонансные явления могут приводить к неконтролируемому росту амплитуд и снижению быстродействия.

- **Необходимость компенсации:** Современные алгоритмы управления строятся с учетом прогноза динамической составляющей момента нагрузки, чтобы компенсировать её влияние на движение исполнительных механизмов.

Для изучения влияния нагрузки на динамические характеристики манипулятора применяется 4-осевой манипулятор со сменной оснасткой Promobot M Edu

Задания по теме 1.

Задание 1. Калибровка базовой траектории. Цель – определить эталонные временные и кинематические параметры движения манипулятора без полезной нагрузки. Установить механический захват. Запрограммировать базовую траекторию путем перемещения от точки к точке. Зафиксировать общее время выполнения цикла. Повторить не менее 5 раз.

Задание 2. Влияние статической массы груза на точность позиционирования. Захватить калиброванный груз (массы 0,2 кг, 0,5 кг и 0,7 кг) и выполнить ту же программу перемещения, что и в задании 1. С помощью разметки поля оцените отклонение в конечной точке. Повторить не менее 5 раз для каждого груза. Построить зависимость абсолютной погрешности позиционирования от массы груза.

Задание 3. Влияние статической массы груза на время выполнения траектории. Захватить калиброванный груз (массы 0,2 кг, 0,5 кг и 0,7 кг) и выполнить ту же программу перемещения, что и в задании 1. Измерить время выполнения программы. Повторить не менее 5 раз для каждого груза. Построить зависимость времени обхода траектории от массы груза.

Раздел 4. Управление приводами. Элементы питания робототехнических устройств

Привод промышленного робота — это комплексная система, предназначенная для преобразования подводимой энергии в механическое движение исполнительных звеньев манипулятора. Управление приводом осуществляется по командным сигналам от системы управления и включает в себя следующие ключевые функции:

- **Регулирование скорости:** изменение скорости движения в зависимости от заданной программы, пути, времени или текущей нагрузки.
- **Управление ускорением и замедлением:** обеспечение плавности хода и точности позиционирования.
- **Точная остановка и реверс:** выполнение команд на остановку или изменение направления движения с высокой точностью.
- **Перераспределение нагрузки:** координация работы нескольких приводов для выполнения сложных пространственных перемещений.

В состав привода входят: энергоустановка, двигатели (электрические, гидравлические, пневматические), редукторы, преобразователи движения, тормозные и предохранительные муфты, а также датчики обратной связи (положения, скорости, ускорения). Система управления, получая данные от этих датчиков, формирует управляющие воздействия на силовые преобразователи и исполнительные двигатели для создания необходимых сил и моментов в механических звеньях робота.

Элемент питания (источник энергии) является первичным звеном в цепи привода, обеспечивая энергией все системы робота. Управляемый источник питания (УИП) в робототехнике — это не просто преобразователь энергии, а интеллектуальный узел, который формирует и стабилизирует параметры электропитания (напряжение, ток, мощность) в соответствии с командами от системы управления роботом. Он является связующим звеном между системой управления (контроллером) и исполнительными механизмами (двигателями).

Ключевые функции и характеристики управляемых источников питания:

1. Программируемость и обратная связь. УИП позволяет динамически изменять выходные параметры. Например, для управления скоростью электродвигателя постоянного тока изменяется выходное напряжение, а для управления моментом — выходной ток. Источник работает в режиме стабилизации напряжения (CV — Constant Voltage) или стабилизации тока (CC — Constant Current) в зависимости от требований режима работы двигателя. Современные УИПы имеют встроенные цепи обратной связи, которые с высокой точностью поддерживают заданный параметр.

2. Импульсный режим и модуляция. Для задач, требующих высокой точности и качества, источники поддерживают сложные режимы работы:

3. Системы комплексной защиты. Управляемые источники питания включают аппаратные и программные защиты для обеспечения надежности и безопасности:

- Защита от перегрузки по напряжению (OVP).
- Защита от перегрузки по току (OCP).
- Защита от короткого замыкания.
- Защита от перегрева (OTP).

В контексте лабораторных исследований и разработки робототехнических систем часто используются программируемые лабораторные источники питания. Они обладают еще более широкими возможностями: могут имитировать работу аккумулятора, зарядного устройства, генерировать произвольные формы выходного сигнала по заданной программе (например, на языке SCPI) и обеспечивать экстремально высокую стабильность выходного напряжения и тока (до единиц ppm), что необходимо для прецизионного тестирования электроники робота

Тема 1. Измерение характеристик двигателя постоянного тока.

Основные характеристики и параметры ДПТ

Механическая характеристика — это зависимость частоты вращения вала двигателя (n) от момента нагрузки на валу (M). В установившемся режиме уравнение механической характеристики имеет вид:

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{M(R_{\text{я}} + R_{\text{доб}})}{C_E C_M \Phi^2} \quad \text{где:}$$

U — напряжение на якоре.

M — момент на валу.

$R_{\text{я}}$ — сопротивление обмотки якоря.

$R_{\text{доб}}$ — сопротивление добавочного резистора в цепи якоря.

Φ — магнитный поток.

C_E , C_M — конструктивные постоянные двигателя (коэффициенты противо-ЭДС и момента).

Рабочие характеристики — это зависимости частоты вращения (n), потребляемого тока ($I_{\text{я}}$), момента (M) и КПД (η) от полезной мощности на валу при номинальном напряжении.

Для исследования ДПТ с независимым возбуждением, как правило, используется следующая схема:

Создание нагрузки на валу испытуемого двигателя осуществляется с помощью вспомогательной машины (например, асинхронного двигателя, работающего в режиме динамического торможения) или с помощью фрикционного (тормозного) модуля. Нагрузка плавно изменяется, что позволяет снимать характеристики в нескольких точках.

Измеряемые величины:

- Напряжение на якоре ($U_{\text{я}}$): Измеряется вольтметром.

- Ток якоря ($I_{\text{я}}$): Измеряется амперметром.
- Частота вращения (n): Измеряется с помощью тахогенератора или энкодера.
- Момент на валу (M): Рассчитывается косвенным методом по результатам измерений. Для ДПТ момент пропорционален току якоря: $M = C_m \Phi I_{\text{я}}$. Коэффициент $C_m \Phi$ определяется при калибровке.

Определение параметров ключевых параметров двигателя:

- Сопротивление обмотки якоря ($R_{\text{я}}$): Может быть рассчитано по паспортным данным или измерено напрямую (например, методом амперметра-вольтметра).
- Коэффициенты C_E и C_M : Определяются из уравнения механической характеристики по снятым экспериментальным точкам.
- Номинальный КПД (η): Рассчитывается как отношение полезной мощности на валу к потребляемой мощности.

Эти данные необходимы для создания точной математической модели двигателя, которая используется в системах численного моделирования и для разработки алгоритмов цифрового управления приводом

Задания по теме 1.

Задание 1. Собрать измерительную схему. Собирается схема, включающая двигатель, лабораторный источник питания, систему создания нагрузки. В качестве измерительного прибора использовать цифровые измерения с лабораторного источника питания.

Задание 2. Снять естественную механическую характеристику. Без нагрузки измеряются токи и скорости вращения при изменении напряжения питания. Построить график.

Задание 3. Снять механическую характеристику под нагрузкой. Измеряются токи и скорости вращения при изменении напряжения питания. Построить график.

Задание 4. Снять реостатные механические характеристики. Для этого в цепь якоря поочередно включаются добавочные резисторы, и процедура измерений повторяется.

Задание 5. Вычислить характеристики двигателя. Вычисляются сопротивление обмотки якоря, коэффициенты C_E и C_M , КПД.

Тема 2. Разработка системы управления (драйвера) двигателя постоянного тока.

Драйвер двигателя — это электронное устройство, которое выполняет две ключевые функции: усиление управляющего сигнала от микроконтроллера до уровня мощности, необходимого двигателю, и коммутацию питания для обеспечения вращения.

В основе большинства драйверов лежит мостовая схема. Она состоит из четырех ключевых элементов (транзисторов), которые позволяют:

- Подавать напряжение разной полярности на двигатель, изменяя направление его вращения.
- Регулировать среднее значение напряжения на двигателе с помощью широтно-импульсной модуляции (*ШИМ*).
- Обеспечивать режим торможения (закорачивание обмоток).

Управляющая логика драйвера получает два основных сигнала от контроллера:

1. Сигнал направления (Direction): Логический уровень ("0" или "1"), определяющий, в какую сторону должен вращаться двигатель.
2. Сигнал ШИМ (PWM): Сигнал с переменным коэффициентом заполнения (скважностью), который определяет скорость вращения.

Принцип работы и алгоритмы управления:

- ШИМ-регулирование скорости: двигатель питается не постоянным напряжением, а импульсами. Среднее напряжение на двигателе пропорционально коэффициенту заполнения ШИМ-сигнала.

- Управление направлением: В зависимости от логического уровня сигнала направления, драйвер коммутирует транзисторы моста так, чтобы полярность напряжения на клеммах двигателя менялась на противоположную.

- **Защитные функции:** Качественный драйвер реализует аппаратную защиту от сквозных токов (когда одновременно открыты верхний и нижний транзисторы одной ветви моста), перегрузки по току и короткого замыкания.

Задания по теме 2.

Задание 1. Собрать управляемый прерыватель питания на MOSFET-транзисторе. В качестве основного питания использовать лабораторный источник питания. В качестве источника ШИМ-сигнала – генератор сигналов. Осуществить регулировку скорости вращения двигателя.

Задание 2. Сборка исполнительной части драйвера. В качестве основного питания использовать лабораторный источник питания. По мостовой схеме собрать биполярный прерыватель питания. В качестве источника управляющих сигналов использовать микроконтроллер. Осуществить реверс вращения двигателя.

Задание 3. Реализация обратной связи. Установить энкодер угла поворота вала двигателя и подключить к микроконтроллеру. Вывести в монитор последовательного порта угол поворота вала.

Задание 4. Осуществить регулирование угла поворота двигателя (сервопривод). Осуществлять синтез управляющих сигналов для поворота на заданный угол. Значение передавать через последовательный порт микроконтроллера.

Тема 3. Разработка алгоритмов управления шаговым двигателем на микроконтроллере.

Шаговый двигатель (ШД) — это синхронный бесщёточный двигатель, ротор которого поворачивается на определённый угол (шаг) в ответ на импульсный управляющий сигнал. Ключевая особенность — возможность точного позиционирования без использования датчиков обратной связи (в режиме open-loop), что делает его идеальным для задач перемещения в робототехнике.

Режимы управления ШД:

- **Полношаговый режим (Full Step):** это базовый режим, при котором на каждом шаге запитываются либо одна, либо две фазы двигателя. Это обеспечивает максимальный крутящий момент, но сопровождается значительными вибрациями и шумом.
- **Однофазное возбуждение (Wave Drive):** в каждый момент времени запитана только одна фаза. Требуется меньше энергии, но имеет меньший момент удержания.
- **Двухфазное возбуждение (Full Step):** запитаны две соседние фазы. Это наиболее распространённый вариант полношагового режима, обеспечивающий максимальный статический момент.
- **Микрошаговый режим (Microstepping):** для повышения плавности хода, снижения шума и увеличения точности позиционирования используется микрошаговый режим. Ток в обмотках изменяется не скачкообразно, а по определённому закону (чаще всего синусоидальному), что позволяет ротору останавливаться в промежуточных положениях между полными шагами. Чем больше микрошагов на один полный шаг (например, 1/16, 1/32, 1/256), тем плавнее движение.

Простая подача импульсов с постоянной частотой не является эффективной. Для качественной работы привода разрабатываются алгоритмы, управляющие не только скоростью, но и ускорением. Скорость вращения ШД прямо пропорциональна частоте управляющих импульсов. Профиль движения (Motion Profiles) - это алгоритм, который определяют, как должна изменяться скорость во времени для выполнения перемещения. Наиболее распространённый — S-кривая (S-Curve). В отличие от простого линейного разгона, S-кривая управляет не только скоростью, но и её изменением (ускорением), а также изменением ускорения (рывком). Это позволяет избежать резких толчков в начале и конце движения, что критически важно для плавности и точности. Любой манёвр должен начинаться с разгона и заканчиваться торможением. Резкий старт на высокой скорости

может привести к пропуску шагов из-за недостаточного крутящего момента для преодоления инерции нагрузки. Алгоритм плавно увеличивает частоту импульсов до целевой скорости, а затем, перед достижением цели, плавно её снижает.

Задания по теме 3.

Задание 1. Реализовать однофазное управление ШД. В качестве основного питания использовать лабораторный источник питания. Питание драйвера ШД осуществлять только от лабораторного источника (не от отладочной платы). В качестве источника управляющих сигналов использовать микроконтроллер. Реализовать программно однофазный алгоритм управления двигателем, осуществить реверсирование движения.

Задание 2. Реализовать двухфазное управление ШД. В качестве основного питания использовать лабораторный источник питания. Питание драйвера ШД осуществлять только от лабораторного источника (не от отладочной платы). В качестве источника управляющих сигналов использовать микроконтроллер. Реализовать двухфазный алгоритм управления двигателем, осуществить реверсирование движения.

Раздел 5. Обеспечение безопасности

К основным видам опасностей относятся: механические (удары захватом или инструментом), столкновения с мобильными платформами, ошибки навигации, сбои электропитания и потеря устойчивости. Опасность возрастает при работе на высоких скоростях и с тяжёлыми грузами. Риски зависят от того, действует ли робот изолированно или делит пространство с человеком[1].

Проектирование должно вестись с учётом национальных и международных стандартов (ГОСТ Р 60, ИСО 10218). Роботы должны оснащаться функциями аварийной и защитной остановки, ограничителями скорости (не более 250 мм/с в ручном режиме) и средствами блокировки пуска. При интеграции необходимо предусматривать ограждение опасных зон, ограничение движения по осям, а также предотвращение неожиданного пуска после восстановления питания. Ответственность распределяется между производителем, интегратором и эксплуатантом.

Тема 1. Разработка сенсорной системы для обнаружения опасных ситуаций: присутствия человека в зоне действия робота.

Для обеспечения безопасности при эксплуатации робототехнических систем критически важно своевременно обнаруживать присутствие человека в рабочей зоне и корректировать действия робота. Современные сенсорные системы строятся по многоуровневому принципу и используют различные физические принципы.

Типы сенсоров и их назначение:

- Лазерные сканеры (лидары) и 2D/3D камеры. Формируют плоское или объёмное поле наблюдения, непрерывно измеряя расстояния до объектов. Позволяют строить карту окружения, определять местоположение робота и обнаруживать появление человека в опасной зоне. При обнаружении препятствия или человека система автоматически замедляет движение или инициирует остановку.

- RGB-D камеры (камеры глубины). Позволяют не только обнаруживать объекты, но и оценивать их размеры и положение в пространстве, что повышает точность идентификации человека и снижает количество ложных срабатываний.

- Системы компьютерного зрения. Используют алгоритмы для распознавания образов, отличая людей от других движущихся объектов (животных, техники, теней). При обнаружении человека система может выделять его рамкой и передавать сигнал на контроллер робота для принятия решения об остановке.

- Радиолокационные системы. Позволяют обнаруживать жесты и движения человека без использования оптических средств (камер), что актуально для работы в

условиях плохой видимости или отсутствия света. Система сканирует пространство радиолучом и распознаёт движения с высокой точностью.

- Световые завесы. Создают инфракрасную сетку лучей. Прерывание любого из лучей человеком вызывает немедленную остановку робота. Отличаются высокой надёжностью и малым временем реакции.

Принципы работы:

Сенсорная система непрерывно передаёт данные о расстоянии до объектов и их характеристиках. На основе этих данных строится модель среды. При появлении человека в предопределённой опасной зоне (дистанция рассчитывается по формуле $S=K \times T + C$, где K — скорость сближения, T — время остановки, C — поправка на неточности) система инициирует защитное действие: снижение скорости, изменение траектории или полную остановку.

Задания по теме 1.

Осуществляются на манипуляторе Promobot Rooky.

Задание 1. Моделирование зоны безопасности и расчёт параметров. Изучить техническую документацию на учебный манипулятор: определить максимальную скорость движения рабочего органа и полное время остановки системы. Принять значение поправки в соответствии с рекомендациями стандартов 120 мм. На чертеже обозначить рабочую зону манипулятора и построить границу зоны безопасности на рассчитанном расстоянии.

Задание 2. Выбор и обоснование сенсорной системы. Для сценария совместной работы манипулятора и человека на сборочной линии выбрать и обосновать тип сенсоров системы безопасности.

Задание 3. Разработка алгоритма реакции на обнаружение. Сформулировать требования к алгоритму: приоритет команды остановки, предотвращение неожиданного пуска, необходимость ручного сброса. Нарисовать блок-схему алгоритма.

Тема 2. Подключение и отладка системы аварийной остановки оборудования.

Система аварийной остановки (Emergency Stop, E-Stop) является ключевым элементом обеспечения безопасности робототехнических комплексов. Её подключение и отладка должны выполняться в строгом соответствии с требованиями стандартов (ГОСТ Р МЭК 60204-1, ИСО 13850, ИСО 10218).

Система аварийной остановки обычно состоит из следующих элементов:

- Устройства инициирования: кнопки «Аварийный останов» (E-Stop), грибовидные кнопки, тросовые выключатели. Они должны быть легкодоступны, чётко маркированы и расположены в местах, где оператор может их активировать, не подвергая себя опасности.

- Логические устройства: реле безопасности (Safety Relay) или программируемые контроллеры безопасности (Safety PLC). Использование реле безопасности является предпочтительным, так как они выполняют самодиагностику и предотвращают выход из строя при одиночной неисправности.

- Исполнительные устройства: контакторы, отключающие питание приводов робота.

Ключевые правила подключения:

- Цепь безопасности: Кнопки аварийной остановки включаются последовательно в цепь безопасности, которая управляет катушкой реле безопасности. Выходные контакты реле безопасности (как правило, принудительно управляемые) разрывают цепь питания силовых контакторов, обесточивая приводы робота.

- Приоритет команды: Функция аварийной остановки должна иметь безусловный приоритет над всеми остальными функциями управления. При активации E-Stop никакие другие команды не должны приводить к движению робота.

- Сброс системы: Система не должна автоматически возвращаться в рабочее состояние после устранения причины остановки. Сброс (Reset) возможен только после

преднамеренного действия оператора (нажатие отдельной кнопки сброса) и только при условии, что все устройства E-Stop вернулись в исходное положение.

- **Блокировка пуска:** После аварийной остановки и сброса блокировка автоматического пуска должна сохраняться до тех пор, пока оператор не выполнит отдельное действие для запуска оборудования в автоматическом режиме. Это предотвращает неожиданный пуск.

- **Диагностика:** Реле безопасности должно контролировать целостность своей цепи. При обнаружении обрыва или короткого замыкания в цепи E-Stop система должна переходить в безопасное состояние (аварийная остановка).

Отладка системы аварийной остановки включает следующие этапы:

1. **Визуальный осмотр:** Проверка правильности монтажа, маркировки и доступности всех компонентов.

2. **Функциональная проверка:** Проверка срабатывания системы при нажатии каждой кнопки E-Stop. Контроль того, что робот немедленно и полностью прекращает движение.

3. **Проверка сброса:** Убедиться, что после активации E-Stop и последующего сброса система не запускается автоматически.

4. **Проверка блокировки пуска:** Подтвердить, что для запуска оборудования в автоматическом режиме требуется отдельное действие оператора.

5. **Проверка самодиагностики:** Имитация неисправности в цепи (например, обрыв провода) для проверки корректной реакции реле безопасности.

Задания по теме 2.

Осуществляются на манипуляторе Promobot Rooky.

Задание 1. Сборка и проверка электрической схемы аварийной остановки. Собрать цепь аварийной остановки, включив кнопки E-Stop последовательно. Подключить выходы реле безопасности к цепи управления контакторами. Выполнить функциональную проверку: запустить манипулятор в ручном или автоматическом режиме, затем нажать любую из кнопок E-Stop. Зафиксировать время реакции. Проверить работу функции сброса: выполнить сброс системы и убедиться, что манипулятор не начинает движение автоматически. Проверить блокировку пуска: после сброса попытаться запустить манипулятор в автоматическом режиме без выполнения соответствующей команды запуска.

Тема 3. Обеспечение безопасности персонала на реальном производстве.

Обеспечение безопасности персонала при работе с робототехническими системами на производстве — это комплексная задача, включающая технические, организационные и правовые меры. Безопасность является приоритетом, и её обеспечение строится на строгом соблюдении стандартов и регламентов.

В России и мире действуют стандарты (ГОСТ Р 60, ИСО 10218, МЭК 60204-1), которые регламентируют требования к проектированию, установке и эксплуатации роботов. Ответственность за безопасность распределяется между тремя сторонами:

- **Производитель** отвечает за соответствие робота стандартам, наличие сертификатов и инструкций по безопасной эксплуатации.

- **Интегратор** несёт ответственность за правильную установку, настройку защитных систем и интеграцию в производственную линию.

- **Эксплуатант (предприятие)** обязан обучить персонал, контролировать техническое состояние оборудования, соблюдать нормы охраны труда и проводить регулярные проверки.

Организационные меры безопасности:

- **Обучение и допуск.** К работе с робототехникой допускается только персонал, прошедший специальное обучение, инструктажи по охране труда и проверку знаний. Перед допуском сотрудники изучают устройство оборудования, границы опасных зон и порядок действий в аварийных ситуациях.

- Зонирование и ограждение. Производственная площадка чётко делится на зоны. Опасные зоны движения роботов ограждаются (сетчатые, сплошные панели) или оснащаются системами обнаружения присутствия человека. Вход в такие зоны строго регламентирован.

- Средства индивидуальной защиты (СИЗ). В зависимости от характера работ и рисков персонал обеспечивается спецодеждой, защитными очками, касками, перчатками.

- Контроль и аудит: Назначаются ответственные за безопасную эксплуатацию. Ведутся журналы инструктажей, проверок и технического обслуживания. Проводятся регулярные аудиты защитных систем.

Технические средства защиты:

- Системы аварийной остановки (E-Stop) должны быть легкодоступны, иметь приоритет над всеми командами управления и требовать ручного сброса после активации.

- Сенсорные системы - лазерные сканеры (лидары), световые завесы, камеры машинного зрения и датчики усилия используются для обнаружения человека в рабочей зоне и немедленной остановки или замедления робота.

- Коллаборативные роботы (коботы) предназначены для работы рядом с человеком. Их конструкция (скруглённые формы, мягкие покрытия) и встроенные датчики усилия минимизируют риск травм при контакте.

Задания по теме 3.

Задание 1. Разработка инструкции по охране труда для оператора РТС. Инструкция должна включать разделы: общие требования безопасности, требования перед началом работы (проверка СИЗ, ограждений, работоспособности E-Stop), требования во время работы (запрещённые действия, правила нахождения в рабочей зоне), действия в аварийных ситуациях (порядок использования E-Stop, эвакуации), требования по окончании работы.

Задание 2. Анализ производственного инцидента. Необходимо провести анализ ситуации по схеме «5 почему» для выявления корневой причины инцидента «Сотрудник получил травму, зайдя за ограждение во время работы манипулятора».

Задание 3. Планирование аудита безопасности роботизированного участка. план аудита безопасности для гипотетического участка «Сборочная линия с коллаборативными роботами» должен включать проверки следующих элементов: физическое состояние ограждений и их соответствие нормам, доступность и исправность кнопок аварийной остановки, наличие и читаемость предупреждающих знаков и маркировки зон, проведение инструктажей (проверка записей в журналах), состояние и доступность инструкций по эксплуатации и охране труда.

Раздел 6. Навигация робототехнических систем

Навигация робототехнических систем — это комплекс алгоритмов и аппаратных средств, обеспечивающих определение текущего положения робота в пространстве, построение маршрута к цели и безопасное перемещение по этому маршруту с учётом окружающей обстановки.

Основные задачи навигации:

- Локализация (Localization): Определение текущих координат и ориентации робота относительно окружающей среды.

- Картографирование (Mapping): Построение карты местности или помещения, в котором происходит движение.

- Планирование пути (Path Planning): Поиск оптимального или допустимого маршрута от текущей точки до цели с обходом препятствий.

- Обход препятствий (Obstacle Avoidance): Реактивное или предиктивное уклонение от динамических и статических препятствий в реальном времени.

Для решения задач навигации используются различные сенсорные системы, часто объединяемые в комплекс для повышения надёжности (принцип Sensor Fusion):

- Одометрия (Odometry): Оценка пройденного пути на основе данных с энкодеров колёс или инерциальных измерительных модулей (IMU). Обладает накоплением ошибки (дрейфом) со временем.
- Системы глобального позиционирования (GNSS/ГЛОНАСС/GPS): Обеспечивают абсолютные координаты на открытых пространствах. В помещениях и плотной городской застройке сигнал может быть недоступен или искажён.
- Лидарные сканеры (LiDAR): Измеряют расстояния до объектов, создавая плотное облако точек. Являются основой для построения 2D- и 3D-карт и одновременной локализации и картографирования (SLAM).
- Стереокамеры и камеры глубины: Позволяют получать информацию о геометрии сцены и расстоянии до объектов. Используются в алгоритмах визуальной одометрии (VO) и визуального SLAM.
- Ультразвуковые и ИК-дальномеры: Применяются для обнаружения препятствий на коротких дистанциях.

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) - фундаментальный алгоритм, позволяющий роботу одновременно строить карту неизвестной среды и определять своё положение на этой карте.

Планирование пути - процесс поиска траектории из точки А в точку Б.

- Глобальное планирование: Поиск пути по заранее известной карте. Популярны алгоритмы: A*, D*, RRT (Rapidly-exploring Random Tree).
- Локальное планирование: Корректировка глобальной траектории в реальном времени для обхода внезапно появившихся препятствий. Часто строится на основе векторных полей или методов потенциальных полей.

Обход препятствий использует реактивные методы, не требующие полной карты. Робот реагирует на показания ближайших сенсоров, чтобы изменить направление движения и избежать столкновения.

Тема 1. Формирование допустимых траекторий движения рабочего органа.

Формирование допустимых траекторий движения рабочего органа (схвата, инструмента) манипулятора — это задача планирования движения в пространстве задач (обычно в декартовых координатах X, Y, Z и ориентации) с последующим преобразованием этого плана в движение в пространстве конфигураций (в пространстве суставных углов или координат приводов).

Основная цель — найти такую последовательность промежуточных положений рабочего органа, которая обеспечивает:

- Достижимость: Каждое промежуточное положение должно находиться в рабочей зоне манипулятора.
- Отсутствие коллизий: Траектория не должна приводить к столкновению звеньев манипулятора между собой или с препятствиями в рабочей среде.
- Соблюдение технологических ограничений: Учет ограничений на скорость, ускорение, рывок, а также специфических требований (например, ориентация инструмента должна быть постоянной).

Основные методы формирования траекторий:

1. Точечное (Point-to-Point) планирование.: Задаются только начальная и конечная точки (положения и ориентации) рабочего органа. Промежуточные точки вычисляются автоматически. Планировщик генерирует траекторию в пространстве конфигураций (например, используя интерполяцию по кратчайшему пути в конфигурационном пространстве), а затем преобразует её в траекторию в декартовом пространстве. Применяется в простых задачах перемещения из точки А в точку Б без строгих требований к форме траектории между ними.

2. Линейная (CP - Continuous Path) интерполяция. Рабочий орган должен двигаться строго по прямой линии в декартовом пространстве между начальной и конечной точками. Для множества дискретных точек на прямой линии (отрезке) решается обратная задача кинематики для нахождения соответствующих конфигураций манипулятора. Полученная последовательность конфигураций сглаживается для обеспечения непрерывности скоростей и ускорений. Применяется везде, где требуется прямолинейное движение инструмента.

3. Сплайновая интерполяция. Траектория задаётся не прямыми отрезками, а гладкими кривыми (например, кубическими сплайнами), проходящими через ряд промежуточных опорных точек. Сначала строится гладкая кривая в декартовом пространстве. Затем для точек на этой кривой решается обратная задача кинематики. Этот метод позволяет создавать сложные и плавные траектории.

4. Учет препятствий и планирование в пространстве конфигураций (C-Space). Для обеспечения отсутствия коллизий планирование ведётся не в физическом пространстве, а в пространстве конфигураций робота. В этом пространстве "тело" робота представляется одной точкой, а препятствия приобретают сложную форму. Используются алгоритмы поиска пути на графе, выборки (PRM - Probabilistic Roadmap, RRT - Rapidly-exploring Random Tree).

Задания по теме 1.

Осуществляются на манипуляторе Promobot M Edu.

Задание 1. Точечное перемещение манипулятора. Целевая конфигурация точек задана преподавателем или сгенерирована случайным образом в рабочей зоне. Реализовать перемещение рабочего органа из начальной конфигурации в целевую с использованием стандартного планировщика "от точки к точке".

Задание 2. Линейная интерполяция в декартовом пространстве. Начальная и конечная точки заданы в декартовых координатах. Ориентация схвата должна быть одинаковой в обеих точках. Ориентация схвата должна быть одинаковой в обеих точках.

Задание 3. Планирование траектории с обходом препятствия. В рабочую зону манипулятора помещается статическое препятствие, расположенное на прямой линии между начальной и конечной точками из Задания 2. Попытаться выполнить линейное перемещение из Задания 2. Наблюдать за возникновением коллизии. Используя инструменты визуального программирования или API планировщика, добавить промежуточную опорную точку так, чтобы траектория обогнула препятствие.

Раздел 7. Технологическое применение робототехнических систем

Промышленные роботы широко используются для автоматизации технологических операций, обеспечивая высокую точность, повторяемость и производительность. Основные направления применения:

- Роботизированная сварка: Использование манипуляторов для дуговой, точечной и лазерной сварки. Преимущества: стабильное качество шва, высокая скорость работы, возможность сварки в труднодоступных местах и снижение влияния человеческого фактора.

- Покраска и нанесение покрытий: Роботы обеспечивают равномерное нанесение лакокрасочных материалов, герметиков и клеев. Это позволяет сократить расход материалов, повысить качество покрытия и улучшить условия труда, исключив контакт оператора с вредными веществами.

- Механическая обработка и зачистка: Манипуляторы, оснащенные режущим или шлифовальным инструментом, выполняют операции фрезерования, зачистки грата после литья или штамповки, удаления облоя. Это гарантирует стабильное качество поверхности и высокую производительность.

- Инструментальный контроль и измерительные операции: Роботизированные комплексы с контрольно-измерительными машинами (КИМ) или сканерами выполняют

автоматизированный контроль геометрии деталей, проверку сборочных единиц и проведение испытаний. Это обеспечивает объективность контроля и интеграцию результатов в систему управления производством (MES/ERP).

Тема 1. Подготовка технологических схем, создание схем КТС, выбор технологического оборудования.

Эффективная интеграция робототехнических систем (РТС) в производство начинается с грамотного проектирования. Этот процесс включает три ключевых этапа:

- Подготовка технологических схем. На этом этапе определяется логика производственного процесса, в который будет интегрирован робот. Схема должна наглядно отображать последовательность операций, материальные потоки (движение заготовок, готовых деталей, оснастки) и взаимодействие РТС с другим оборудованием (конвейерами, станками, постами контроля). Цель — оптимизировать цикл, минимизировать простои и холостые перемещения манипулятора.

- Создание схем комплекса технических средств (КТС)

Схема КТС (или структурная схема автоматизации) является логическим продолжением технологической схемы. Она описывает состав и взаимосвязи всех технических компонентов системы управления. На схеме КТС указываются:

- Исполнительные устройства: промышленный робот, его рабочий инструмент (сварочная горелка, захват и т.д.).
- Датчики: датчики положения, наличия детали, безопасности.
- Устройства управления: программируемый логический контроллер (ПЛК), панель оператора (НМИ), промышленный компьютер.
- Вспомогательное оборудование: конвейеры, станции загрузки/выгрузки.

Схема КТС служит основой для разработки алгоритмов управления и выбора аппаратной платформы.

- Выбор технологического оборудования. Выбор конкретного робота и периферийного оборудования осуществляется на основе требований, сформулированных на предыдущих этапах. Ключевые критерии выбора:

- Грузоподъемность и досягаемость: должны соответствовать массе и габаритам обрабатываемых изделий и обеспечивать доступ ко всем рабочим зонам.
- Точность и повторяемость: критически важны для операций сборки, сварки и контроля.
- Степень защиты (IP-класс): определяет возможность использования робота в агрессивных средах (например, при сварке или покраске).
- Совместимость: выбранное оборудование должно быть совместимо с существующей на предприятии инфраструктурой и системой управления.

Задания по теме 1.

Задание 1. Разработка технологической схемы для участка механической обработки.

Разработать технологическую схему для роботизированного участка, где манипулятор обслуживает два токарных станка. Цикл работы: робот берет заготовку из подающего лотка, устанавливает ее в патрон станка №1, после обработки вынимает готовую деталь и переносит ее на промежуточный стол-накопитель. Затем робот берет заготовку для станка №2 из другого лотка и повторяет операцию. По завершении обработки на обоих станках робот собирает готовые детали и укладывает их в тару.

Задание 2. Создание схемы КТС для роботизированного комплекса. На основе технологической схемы комплекса для автоматизации процесса дуговой сварки кузовных элементов. Состав: 6-осевой промышленный робот с источником сварочного тока, конвейер для подачи свариваемых элементов, позиционер для вращения изделия, система технического зрения для определения положения шва, ПЛК в качестве центрального контроллера

Задание 3. Обоснование выбора модели промышленного робота. Требуется подобрать модель 6-осевого манипулятора для выполнения операции сборки узла массой 5 кг. Максимальный вылет руки от основания до центра кисти должен составлять не менее 1300 мм. Операция требует высокой точности позиционирования (повторяемость не хуже $\pm 0,05$ мм). Робот будет работать в чистой среде (сборочный цех).

Тема 2. Получение информации с видеопотока и разметка данных.

Машинное зрение является ключевым компонентом современных робототехнических систем, позволяя им адаптироваться к изменяющейся производственной среде. Процесс получения и использования визуальной информации можно разделить на два основных этапа.

Получение информации с видеопотока. Этот этап включает в себя захват изображений с помощью камеры и их последующую обработку для извлечения значимых данных.

1. Захват изображения: Камера, подключенная к вычислительному модулю (компьютеру, контроллеру), формирует цифровой снимок (кадр) рабочей сцены.

2. Предварительная обработка: Исходное изображение часто содержит шум, имеет неоптимальный контраст или освещенность. На этом этапе применяются фильтры для улучшения качества изображения: устранение шума (фильтр Гаусса), коррекция яркости и контраста, преобразование в градации серого.

3. Извлечение признаков: Алгоритмы анализируют изображение для поиска характерных черт. Основные методы:

- Детекция контуров: Поиск границ объектов на изображении. Позволяет определить форму и расположение детали.
- Поиск по шаблону (Template Matching): Сравнение фрагмента изображения с эталонным шаблоном для нахождения объекта.
- Детекция и описание ключевых точек (например, ORB, SIFT): Поиск уникальных точек на объекте, которые можно использовать для определения его положения и ориентации в пространстве.

4. Интерпретация данных: Извлеченные признаки (например, координаты центра объекта, его угол поворота) преобразуются в данные, понятные системе управления роботом. Эти данные используются для корректировки траектории движения манипулятора.

Разметка данных. Для обучения сложных алгоритмов, в частности нейронных сетей, требуется большой объем данных с "ответами". Разметка — это процесс создания такого датасета. Цель — снабдить каждое изображение (или видеофрагмент) метаданными, которые описывают его содержимое. Например, для задачи "бининг" (захват деталей из ящика) разметка может включать в себя ограничивающие прямоугольники вокруг каждой детали и ее 6D-позу (координаты X, Y, Z и углы поворота Rx, Ry, Rz). Для этого оператор или специальный алгоритм выделяет объекты на изображении и присваивает им соответствующие метки. Качество разметки напрямую влияет на точность и надежность обученной модели. Для разметки используются специализированные программы (например, Label Studio, CVAT), которые позволяют эффективно создавать и проверять аннотированные наборы данных.

Задания по теме 2.

Задание 1. Калибровка камеры и определение координат объекта. Выполнить калибровку камеры по изображениям шахматной доски для вычисления внутренних параметров камеры и коэффициентов дисторсии. Сделать снимок рабочего пространства с размещенным в нем объектом. Используя калибровочные данные, определить координаты (X, Y) центра объекта в системе координат камеры. Рассчитать смещение объекта относительно заданной целевой точки.

Задание 2. Создание простого датасета для детекции объектов. Собрать набор из 50-100 фотографий рабочего места робота. В инструменте разметки выделить на каждом

изображении все объекты одного типа "болт", "гайка" с помощью прямоугольных рамок. Сохранить размеченные данные в общепринятом формате *COCO JSON*. Разделить датасет на обучающую (80%) и тестовую (20%) выборки.

Задание 3. Применить обученную систему машинного зрения к сортировке изделий в бункере. По предоставленной преподавателем фотографии.

6 Вопросы для устного опроса на занятиях

1. Приведите классификацию промышленных роботов по типу кинематической схемы и грузоподъемности.
2. Опишите иерархию уровней управления роботом: от управления приводом до стратегического планирования.
3. Какие существуют интерфейсы для внешнего управления промышленным роботом? Сравните программные и аппаратные пульта.
4. Каковы основные функции и преимущества программной платформы ROS (Robot Operating System) при разработке систем управления?
5. Что такое обобщенные координаты манипулятора и как они используются в математическом описании его движения?
6. Дайте определение скоростных сил (сил Кориолиса и центробежных) в контексте динамики манипулятора.
7. Объясните назначение и правила формирования матриц Денавита-Хартенберга (Д-Х) для описания кинематической схемы манипулятора.
8. В чем заключается прямая задача кинематики (ПЗК) и каков алгоритм ее решения для манипулятора с вращательными и призматическими сочленениями?
9. Сформулируйте обратную задачу кинематики (ОЗК). Какие основные методы ее решения вы знаете?
10. Как количество степеней свободы манипулятора влияет на решение ОЗК (существование, единственность, бесконечное множество решений)?
11. Как на практике выполняется расстановка осей связанных систем отсчета для манипуляторов с различной геометрией рабочей зоны?
12. Как уравнения Лагранжа второго рода применяются для вывода динамической модели манипулятора?
13. Опишите рекуррентную вычислительную схему Ньютона-Эйлера для расчета динамики манипулятора.
14. Каким образом динамические характеристики манипулятора (масса, моменты инерции) влияют на выбор приводов и алгоритмов управления траекторией?
15. В чем заключается принцип Даламбера и как он используется при выводе уравнений динамики?
16. Сравните сервоприводы, шаговые двигатели и асинхронные двигатели с точки зрения их применения в робототехнике.
17. Каковы основные компоненты системы управления двигателем постоянного тока (ДПТ) с обратной связью по положению?
18. Опишите принцип работы и методы управления шаговым двигателем.
19. Для чего применяются преобразователи частоты и каков принцип их работы при управлении синхронными машинами?
20. Объясните принцип широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и ее роль в синтезе управляющего напряжения для силовых ключей.
21. Перечислите основные виды опасностей, возникающих при эксплуатации промышленных роботов на производстве.
22. Какие требования предъявляются к проектированию и установке коллаборативных роботов (коботов)?
23. Опишите принципы работы сенсорных систем (например, на основе лазерных сканеров или тактильных датчиков) для обнаружения человека в рабочей зоне робота.
24. Как функционирует система аварийной остановки (E-STOP) и какова ее роль в обеспечении безопасности?
25. Что такое задача SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) и какие алгоритмы используются для ее решения в мобильных роботах?

26. Какие существуют методы планирования траекторий движения робота в среде с препятствиями?
27. Для чего применяется интерполяция траекторий сплайнами при управлении движением рабочего органа?
28. Приведите примеры применения РТС в связке с технологическим оборудованием (сварка, покраска, сборка, контроль).
29. Каковы основные задачи, решаемые с помощью машинного зрения в робототехнике (детекция, локализация, инспекция)?
30. Опишите процесс подготовки технологической схемы и схемы комплекса технических средств (КТС) для роботизированного участка.
31. В чем заключается процесс разметки данных для обучения нейросетевых моделей в задачах компьютерного зрения?

Список рекомендуемой литературы

1. Лукинов А.П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств / А.П. Лукинов. - СПб.: Лань, 2012.-608с.
2. Проектирование информационных систем. Курс лекций: Учебное пособие для вузов/ В.И. Грекул, Г. Н. Денищенко, Н. Л. Коровкина. - М.: Интернет-Университет информационных технологий, 2005. - 298 с.
3. Технические средства автоматизации: учебник для вузов / Б. В. Шандров, А. Д. Чудаков. - 2-е изд., стереотип. - М.: Академия, 2010. - 368 с.
4. Технические средства автоматизации и управления: учебное пособие для вузов / А.Г. Гарганеев; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - Томск: ТУСУР, 2007. - 393с.
5. Шишмарев В.Ю. Технические измерения и приборы: учебник для вузов/ В.Ю. Шишмарев. - 3-е изд., перераб. и доп. - Москва: Издательство Юрайт, 2022. - 377 с.