МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, МИНИСТЕРСТВО НАУКИ, ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И ИННОВАЦИЙ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

МОО ВО Кыргызско-Российский Славянский университет
имени первого Президента Российской Федерации Б.Н. Ельцина



УТВЕРЖДАЮ

Директор
(должность)
Лоцев Г.В
(ФИО)
3 сентября____2026 г.

Управление механическими системами

рабочая программа дисциплины (модуля)

Закреплена за кафедрой **Высшая школа Природопользования, мехатроники и транспорта**

Учебный план Направление 15.03.03 - РФ, 650500 - КР Прикладная механика
Профиль "Вычислительная механика и компьютерный инжиниринг"

Квалификация **бакалавр**
Форма обучения **очная**

Общая трудоемкость **4 ЗЕТ**
Часов по учебному плану 144
в том числе:
аудиторные занятия 48
самостоятельная работа 62

Виды контроля в семестрах:
экзамен 5

Распределение часов дисциплины по семестрам

Семестр (<Курс>.<Семестр на курсе>)	**5 (3.1)**		Итого	
Недель	17 2/6			
Вид занятий	УП	РП	УП	РП
Лекции	24	24	24	24
Практические	24	24	24	24
Контактная работа в период теоретического обучения	2	2	2	2
Контактная работа в период экзаменационной сессии	0,3	0,3	0,3	0,3
Итого ауд.	48	48	48	48
Контактная работа	50,3	50,3	50,3	50,3
Сам. работа	62	62	62	62
Часы на контроль	31,7	31,7	31,7	31,7
Итого	144	144	144	144

Программу составил(и):
к.ф.-м.н., Герман Константин Анатольевич

к.т.н, Джаманкулов Азамат Кенешбекович

Рецензент(ы):
к.ф.-м.н., Комарцов Никита Михайлович

д.т.н, Муслимов Аннас Поясович

Согласовано РОП:
к.ф.-м.н., Герман Константин Анатольевич

Рабочая программа дисциплины
Управление механическими системами

разработана в соответствии с ФГОС 3++:

Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования - бакалавриат по направлению подготовки 15.03.03 Прикладная механика (приказ Минобрнауки России от 09.08.2021 г. № 729)

составлена на основании учебного плана:

Направление 15.03.03 - РФ, 650500 - КР Прикладная механика
Профиль "Вычислительная механика и компьютерный инжиниринг"
утвержденного учёным советом вуза от 26.06.2026 протокол № 11.

Рабочая программа одобрена на заседании **Высшей школы Природопользования, мехатроники и транспорта**

Протокол от 02.09.2026 г. № 1
Срок действия программы: 2026-2032 уч.г.
Руководитель подразделения: Алсеитов Мирлан Тилегенович

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ
к рабочей программе дисциплины (модуля)

Управление механическими системами

№ п/п	Основание внесения изменения	Раздел/ пункт	Содержание изменения
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			

1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	
1.1	формирование у студентов системных знаний и практических навыков в области анализа, моделирования и управления механическими системами различной физической природы и структуры. Дисциплина направлена на освоение методов построения математических моделей управляемых механических объектов, исследования их динамики и определения параметров управления. Особое внимание уделяется применению современных методов автоматического управления, обратной связи, регулирования и компьютерного моделирования для обеспечения требуемых характеристик движения механических систем. В результате освоения дисциплины студент должен приобрести способность самостоятельно анализировать динамику механических систем, разрабатывать алгоритмы управления и оценивать качество и устойчивость процессов управления.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП	
Цикл (раздел) ООП:	Б1.В.1.ДВ.07
2.1	**Требования к предварительной подготовке обучающегося:**
2.1.1	Б1.О.3.02. Теоретическая механика
2.1.2	Б1.О.2.02. Математический анализ
2.1.3	Б1.О.2.03. Линейная алгебра и аналитическая геометрия
2.1.4	Б1.О.2.04. Дифференциальные уравнения
2.1.5	Б1.О.2.05. Теория вероятностей и математическая статистика
2.2	**Дисциплины и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее:**
2.2.1	Б1.В.1.05. Планирование эксперимента и методы обработки данных
2.2.2	Б1.В.1.07. Компьютерный инжиниринг
2.2.3	Б3.О.02. Подготовка к сдаче и сдача государственного экзамена
2.2.4	Б1.В.1.ДВ.04.01. Экспериментальная механика деформируемого твердого тела
2.2.5	Б1.В.1.ДВ.07.01. Сопротивление материалов (продвинутый курс)
2.2.6	Б3.О.03. Подготовка к процедуре защиты и защита выпускной квалификационной работы
2.2.7	Б2.О.01(У). Научно-исследовательская работа (получение первичных навыков научно-исследовательской работы)
2.2.8	Б1.В.1.01. Теория упругости
2.2.9	Б2.О.02(Пд). Преддипломная практика
2.2.10	Б1.О.3.04. Строительная механика машин
2.2.11	Б1.В.1.02. Основы теории пластичности и ползучести

3. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)	
ПК-1: Способностью применять физико-математический аппарат, теоретические, расчетные и экспериментальные методы исследования, методы математического и компьютерного моделирования в процессе профессиональной деятельности	
Знать:	
Уровень 1	
Уровень 2	
Уровень 3	
Уметь:	
Уровень 1	
Уровень 2	
Уровень 3	
Владеть:	
Уровень 1	
Уровень 2	
Уровень 3	

В результате освоения дисциплины обучающийся должен

3.1	**Знать:**
3.1.1	основные понятия, принципы и задачи управления механическими системами;
3.1.2	методы математического моделирования управляемых механических объектов;
3.1.3	основные типы систем автоматического управления и принципы их построения;

3.1.4	методы анализа устойчивости и качества процессов управления;
3.1.5	принципы построения систем с обратной связью;
3.1.6	основные методы синтеза регуляторов и алгоритмов управления;
3.1.7	современные средства компьютерного моделирования и исследования систем управления.
3.2	**Уметь:**
3.2.1	формулировать задачи управления механическими системами и определять требования к их характеристикам;
3.2.2	строить математические модели управляемых механических объектов;
3.2.3	анализировать динамические свойства и устойчивость механических систем;
3.2.4	выбирать методы и структуры управления в соответствии с поставленной задачей;
3.2.5	определять параметры регуляторов и оценивать качество переходных процессов;
3.2.6	выполнять компьютерное моделирование систем управления и анализировать результаты;
3.2.7	выявлять причины отклонения характеристик системы от заданных требований и разрабатывать способы их устранения.
3.3	**Владеть:**
3.3.1	методами математического и компьютерного моделирования управляемых механических систем;
3.3.2	методами анализа устойчивости и качества систем управления;
3.3.3	навыками построения систем с обратной связью и выбора структуры регулятора;
3.3.4	методами настройки и исследования параметров систем управления;
3.3.5	навыками применения современных программных средств для моделирования динамики и управления механическими системами;
3.3.6	навыками интерпретации результатов моделирования и обоснования инженерных решений.

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Код занятия	Наименование разделов и тем /вид занятия/	Семестр / Курс	Часов	Компетен-ции	Литература	Инте ракт.	Пр. подг.	Примечание
	Раздел 1. Модели управляемых механических систем. Анализ динамики и устойчивости							
1.1	Механическая система как объект управления Объект, исполнительное устройство, датчик и регулятор; сигналы задания, управления, выхода и возмущения на примере позиционирования подвижной платформы. Разомкнутое управление и отрицательная обратная связь; различие между стабилизацией положения, регулированием скорости и слежением за траекторией. Показатели инженерного задания: точность, длительность переходного процесса, перерегулирование и допустимое усилие привода. Выбор границ модели и контролируемых координат; роль трения, упругости передачи и инерции нагрузки. Физические ограничения хода и скорости; условия, при которых расчётная система управления может применяться к реальному механизму. /Лек/	5	2	ПК-1				

1.2	Постановка задачи управления подвижной платформой Выделить объект, входы и выходы; составить структурную схему; задать измеримые ограничения точности, времени и усилия. /Пр/	5	2	ПК-1				
1.3	Уравнения движения и линейные модели механических объектов Построение уравнения поступательной системы масса — пружина — демпфер; размерности массы, жёсткости, сопротивления и управляющей силы. Уравнение вращательного привода с моментом инерции и вязким трением; приведение нагрузки к выбранной координате. Использование уравнений Лагранжа второго рода для механизма с несколькими обобщёнными координатами; смысл матриц инерции, демпфирования и жёсткости. Равновесие и линеаризация в его окрестности на примере маятника с управляющим моментом; область допустимости малых отклонений. Проверка знаков сил, размерностей и предельных случаев модели; различие между параметрической погрешностью и ошибкой структуры. /Лек/	5	2	ПК-1				
1.4	Построение и линеаризация механической модели Вывести уравнения поступательной или вращательной системы; определить равновесие; записать линейную модель с единицами параметров. /Пр/	5	2	ПК-1				

1.5	Передаточные функции и структурные схемы Преобразование Лапласа уравнения движения при нулевых начальных условиях; передаточная функция от силы к перемещению. Полюса, нули и статический коэффициент передачи; связь знаменателя с собственными движениями механической системы. Последовательное и параллельное соединение звеньев; вывод передаточной функции замкнутой системы с отрицательной обратной связью. Каналы задания и внешней силы; различие между слежением и подавлением возмущения. Модели датчика и привода как динамических звеньев; влияние их постоянных времени на принятую структурную схему. /Лек/	5	2	ПК-1				
1.6	Преобразование модели и замыкание обратной связи . Получить передаточную функцию; преобразовать структурную схему; вычислить каналы задания и возмущения /Пр/	5	2	ПК-1				
1.7	Переходные процессы и установившаяся точность Реакции на ступенчатое и импульсное воздействие; раздельный учёт начальных условий и внешнего воздействия. Система второго порядка: собственная частота, коэффициент демпфирования, колебательный и апериодический характер движения. Время нарастания, перерегулирование и время установления; необходимость явно задавать полосу установления и амплитуду задания. Установившаяся ошибка при постоянном задании и постоянной нагрузке; условия применения теоремы о конечном значении. Сравнение вариантов настройки по графикам координаты и управляющего усилия; компромисс быстродействия и нагрузки на привод. /Лек/	5	2	ПК-1				

1.8	Расчёт переходного процесса и ошибки. Определить полюса, демпфирование и показатели качества; сопоставить аналитический расчёт с численным откликом. /Пр/	5	2	ПК-1				
1.9	Устойчивость линейной системы управления Равновесие и асимптотическая устойчивость непрерывной линейной системы; расположение корней характеристического уравнения. Проверка устойчивости систем второго порядка по коэффициентам и собственным значениям. Критерий Гурвица для полинома третьего порядка; определение допустимого интервала коэффициента регулятора. Граница устойчивости и её отличие от режима с приемлемым запасом; влияние изменения массы и жёсткости. Проверка численного результата по модели свободного движения; ограничения вывода об устойчивости по короткому графику. /Лек/	5	2	ПК-1				
1.10	Определение области устойчивости регулятора . Применить критерий Гурвица; найти диапазон усиления; проверить точки внутри и вне диапазона. /Пр/	5	2	ПК-1				
1.11	Частотные характеристики и запасы устойчивости Амплитуда и фаза установившейся гармонической реакции; механический резонанс и связь с демпфированием. Построение и чтение логарифмических амплитудной и фазовой характеристик разомкнутого контура. Частота среза, запас по фазе и запас по усилению; условия их корректной интерпретации для рассматриваемого контура. Связь полосы пропускания, скорости слежения и чувствительности к высокочастотному шуму датчика. Влияние чистого запаздывания и неучтённой упругой моды на запас устойчивости; выбор разумной полосы регулирования. /Лек/	5	2	ПК-1				

1.12	Частотный анализ механического контура . Построить ЛАЧХ и ЛФЧХ; определить запасы устойчивости; оценить влияние задержки и резонанса. /Пр/	5	2	ПК-1				
1.13	Схемы управления положением и скоростью механизма. Вывод и проверка уравнений движения выбранного объекта. Преобразование структурных схем и анализ каналов возмущения. Сравнение переходных процессов при разном демпфировании. Параметрический анализ устойчивости. Частотные характеристики и действие задержки. /Ср/	5	29	ПК-1				
	Раздел 2. Синтез регуляторов с обратной связью. Управление в пространстве состояний. Цифровая реализация и компьютерная проверка.							
2.1	Пропорциональное и пропорционально дифференциальное управление Закон пропорционального регулирования положения; влияние коэффициента на эффективную жёсткость и статическую ошибку. Обратная связь по скорости как введение дополнительного демпфирования; структура ПД-регулятора механического объекта. Расчёт коэффициентов по заданным полюсам или параметрам системы второго порядка. Различие дифференцирования ошибки и измеренного выхода; скачок задания и фильтрация производной. Ограничение управляющего усилия при ускорении механизма; проверка допустимости рассчитанных коэффициентов. /Лек/	5	2	ПК-1				
2.2	Синтез П и ПД регуляторов положения . Рассчитать коэффициенты по требуемым полюсам; проверить статическую ошибку и пиковое усилие. /Пр/	5	2	ПК-1				

2.3	Интегральное действие и настройка ПИД регулятора Интегральная составляющая как способ устранения постоянной ошибки; условия сохранения устойчивости замкнутой системы. Влияние коэффициентов П, И и Д на характеристический полином механического объекта второго порядка. Настройка по модели с последующей проверкой переходного процесса и частотных запасов; сравнение ПИ и ПИД для выбранного объекта. Насыщение исполнительного устройства и накопление интегратора; условное интегрирование и обратный расчёт как варианты anti-windup. Проверка реакции на смену задания, постоянное возмущение и шум; выбор фильтра производной и сохранение воспроизводимых параметров. /Лек/	5	2	ПК-1				
2.4	Настройка ПИД регулятора при ограничении усилия. Сравнить ПИ и ПИД; включить насыщение; проверить подавление нагрузки и работу защиты от накопления интегратора. /Пр/	5	2	ПК-1				
2.5	Представление в пространстве состояний Выбор перемещения и скорости в качестве состояния; запись матриц A, B, C, D для механического объекта. Связь собственных значений A с динамикой; переход от пространства состояний к передаточной функции. Понятие управляемости и проверка ранга матрицы [B AB] для системы второго порядка. Понятие наблюдаемости и проверка ранга матрицы с блоками C и CA при измерении положения. Модели с несколькими степенями свободы: матричная запись и размерности; причины появления слабо наблюдаемых упругих мод. /Лек/	5	2	ПК-1				
2.6	Анализ управляемости и наблюдаемости. Построить A, B, C, D; вычислить ранги; сопоставить состояния и физические измерения. /Пр/	5	2	ПК-1				

2.7	Обратная связь по состоянию и оценивание скорости Закон u = −Kx + Nr и размещение полюсов управляемой системы второго порядка. Выбор предкомпенсатора N для слежения за постоянным заданием при известной номинальной модели; ограничения компенсации при неизвестной нагрузке. Наблюдатель Люенбергера при измерении положения; уравнение ошибки и размещение полюсов наблюдателя. Раздельное проектирование регулятора и наблюдателя для линейной модели; практические ограничения при насыщении и шуме. Понятие квадратичного критерия LQR и физический смысл весов состояния и управления; сопоставление с размещением полюсов без вывода уравнения Риккати. /Лек/	5	2	ПК-1				
2.8	Синтез обратной связи по состоянию и наблюдателя. Найти K, N и L для второго порядка; сравнить измеренную и оценённую скорость; исследовать шум. /Пр/	5	2	ПК-1				
2.9	Цифровая реализация управления механическим объектом Выбор периода дискретизации относительно характерных времён движения; различие между периодом регулятора и шагом интегратора модели. Экстраполятор нулевого порядка и дискретная модель x[k+1] = Ad x[k] + Bd u[k]. Устойчивость дискретной системы: полюса внутри единичного круга; связь z = exp(sT) при точной дискретизации. Разностная реализация ПИ-регулятора, ограничение выхода и состояния интегратора. Влияние задержки на один такт, квантования и шума; проверка алгоритма на непрерывной модели объекта. /Лек/	5	2	ПК-1				
2.10	Дискретизация и реализация цифрового ПИ регулятора. Построить дискретную модель; реализовать разностный алгоритм; сравнить два периода опроса и задержку на один такт. /Пр/	5	2	ПК-1				

2.11	Компьютерная проверка и инженерная оценка системы управления Согласование уравнений, передаточной функции и имитационной модели; проверка одинаковых начальных условий и единиц. Сценарии ступенчатого задания, смены нагрузки и ненулевого начального отклонения; фиксация критериев до моделирования. Чувствительность настроек к изменению массы, демпфирования и жёсткости; расчёт серии вариантов вместо единственного номинального случая. Проверка насыщения, шума, запаздывания и неучтённых упругих колебаний; разграничение численной и физической неустойчивости. Оформление воспроизводимого расчёта: параметры, версия среды, алгоритм, графики ошибки и усилия; границы выводов по результатам моделирования. /Лек/	5	2	ПК-1				
2.12	Комплексная проверка управления механическим объектом. Проверить номинальную модель и изменения массы ±20%; составить таблицу качества, ошибок и максимального усилия; обосновать вывод. /Пр/	5	2	ПК-1				
2.13	Сравнение настроек П и ПД регуляторов. Подавление постоянной нагрузки ПИ и ПИД регуляторами. Управляемость и наблюдаемость механических моделей. Оценивание скорости и сравнение обратных связей. Сравнение непрерывной и цифровой реализаций. Систематизация результатов моделирования и подготовка выводов /Ср/	5	33	ПК-1				
2.14	Консультации и прием заданий /КрТО/	5	2	ПК-1				
2.15	Консультации и прием экзамена /КрЭк/	5	0,3	ПК-1				

5. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

5.1. Контрольные вопросы и задания

Вопросы для текущего контроля

1. Чем отличаются задание, управление и внешнее возмущение в системе позиционирования платформы?
2. Какие измеримые требования нужно задать до выбора регулятора и как связать их с ограничениями привода?
3. Как вывести уравнение системы масса — пружина — демпфер и проверить размерности его членов?
4. Как выбираются равновесие и переменные отклонения при линеаризации механической системы?
5. Почему передаточную функцию выводят при нулевых начальных условиях?

6. Как получить передаточные функции замкнутой системы по заданию и по внешней силе?
7. Как полюса второго порядка определяют колебательность и скорость затухания?
8. Как измеряются время установления и перерегулирование и какие условия нужно указать?
9. Как связаны корни характеристического полинома и асимптотическая устойчивость?
10. Какие неравенства Гурвица требуется проверить для полинома третьего порядка?
11. Что означают частота среза и запас по фазе и где они определяются?
12. Почему запаздывание и неучтённая упругая мода ограничивают полосу регулирования?
13. Как обратная связь по положению меняет эффективную жёсткость объекта?
14. Как обратная связь по скорости меняет демпфирование и максимальное усилие?
15. Когда интегральное действие устраняет постоянную ошибку и почему оно может ухудшить устойчивость?
16. Что происходит с интегратором при насыщении и как действует условное интегрирование?
17. Как построить матрицы состояния из уравнения движения и выбрать измеряемый выход?
18. Как проверить управляемость и наблюдаемость системы второго порядка?
19. Как рассчитываются обратная связь по состоянию и предкомпенсатор для постоянного задания?
20. Каким уравнением описывается ошибка наблюдателя и как влияет измерительный шум?
21. Как различаются период дискретизации регулятора и шаг численного интегрирования объекта?
22. Где должны лежать полюса устойчивой дискретной системы и как они связаны с непрерывными?
23. Как отличить ошибку модели от погрешности численного интегрирования?
24. Какие расчётные сценарии нужны для проверки изменения нагрузки, параметров и ограничения усилия?

Вопросы для промежуточной аттестации

1. Постановка задачи управления механическим объектом и обоснование границ модели.
2. Вывод уравнений движения, выбор равновесия и линеаризация.
3. Передаточные функции и структурные преобразования систем с обратной связью.
4. Переходные процессы второго порядка, показатели качества и установившаяся ошибка.
5. Устойчивость непрерывных систем и параметрический анализ по критерию Гурвица.
6. Частотные характеристики, запасы устойчивости и влияние задержки.
7. Синтез ПД-регулятора по заданным полюсам и ограничения управляющего усилия.
8. Интегральное действие, настройка ПИД-регулятора и anti-windup.
9. Пространство состояний, управляемость и наблюдаемость механической модели.
10. Обратная связь по состоянию, предкомпенсатор и наблюдатель.
11. Дискретизация механического объекта и реализация цифрового регулятора.
12. Верификация компьютерной модели и оценка чувствительности результатов.

5.2. Темы курсовых работ (проектов)

курсовых работ не предусмотрено

5.3. Фонд оценочных средств

6.1 Паспорт и соответствие содержанию

ФОС разработан для ПК-1 из аннотации: способность применять физико-математический аппарат, теоретические, расчётные и экспериментальные методы исследования, методы математического и компьютерного моделирования в профессиональной деятельности. Ниже приведены рабочие критерии наблюдаемого результата; они не являются официальными индикаторами образовательной программы. Экспериментальные навыки по одному моделированию не подтверждаются.

Содержание Проверяемое действие Средства

Лекции 1–3 Выбирает координаты; выводит уравнения и передаточную функцию; проверяет единицы Опрос 1–6; тест 1–3; Т1–Т2; практические 1–3

Лекции 4–6 Вычисляет качество; проверяет устойчивость и интерпретирует частотные характеристики Опрос 7–12; тест 4–6; Т3–Т5; практические 4–6

Лекции 7–8 Рассчитывает регулятор; проверяет ошибку и ограничения привода Опрос 13–16; тест 7–8; Т6–Т7; практические 7–8

Лекции 9–10 Проверяет ранги; рассчитывает обратную связь и наблюдатель Опрос 17–20; тест 9–10; Т8–Т10; практические 9–10

Лекции 11–12 Проверяет цифровую реализацию и воспроизводимость расчёта Опрос 21–24; тест 11–12; Т11–Т12; практические 11–12; индивидуальное задание

6.2 Проект организации оценивания

Текущий контроль — 60 баллов: 12 практических работ по 3 балла — 36; один тематический тест — 12; индивидуальное расчётно-моделирующее задание — 12. Опрос и тренировочные задачи дают обратную связь и отдельно к баллам не прибавляются. Самостоятельная работа оценивается через представленные результаты, без повторного начисления баллов.

Промежуточная аттестация — 40 баллов: два теоретических вопроса по 10 и расчётная задача — 20. Рекомендуемая продолжительность подготовки и письменного решения — 60 минут, защиты — до 10 минут. На тесте — 20 минут. На расчётной части разрешены калькулятор и перечень базовых формул; правила использования программной среды задаются до экзамена.

Проектная итоговая шкала: 85–100 — «отлично», 70–84 — «хорошо», 55–69 — «удовлетворительно», ниже 55 — «неудовлетворительно». Для положительной итоговой оценки требуется также не менее 20 из 40 баллов за экзамен. Условия допуска и пересдачи определяются локальными актами КРСУ, а не данным проектом.

6.3 Тематический тест

Выберите один правильный ответ. За каждый правильный ответ — 1 балл; неверный или отсутствующий ответ — 0. Обозначения: m — масса, b — коэффициент вязкого сопротивления, k — жёсткость; все величины в СИ.

1. Какой сигнал является управлением при силовом приводе платформы?
А. Координата платформы; Б. Сила привода; В. Ошибка датчика; Г. Масса платформы.
2. Какова W(s) от силы к перемещению для m ẍ + b ẋ + kx = u при нулевых начальных условиях?
А. ms²+bs+k; Б. 1/(ms+b); В. 1/(ms²+bs+k); Г. s/(ms²+bs+k).
3. Какова замкнутая передаточная функция при единичной отрицательной обратной связи и разомкнутой L(s)?
А. L/(1+L); Б. L/(1−L); В. 1+L; Г. 1/L.
4. Какой набор полюсов соответствует асимптотически устойчивой непрерывной системе?
А. 0 и −2; Б. 1 и −3; В. ±2j; Г. −1±2j.
5. При каких K полином s³+3s²+2s+K является гурвицевым?
А. K>6; Б. 0<K<6; В. K<0; Г. K=6.
6. Как чистое запаздывание exp(−sτ) влияет на частотный отклик?
А. Увеличивает амплитуду в τ раз; Б. Не меняет фазу; В. Добавляет фазу −ωτ радиан без изменения модуля; Г. Всегда стабилизирует контур.
7. Как влияет u = −Kd ẋ при Kd>0 на m ẍ + b ẋ + kx = u?
А. Увеличивает эффективное демпфирование до b+Kd; Б. Уменьшает массу; В. Убирает жёсткость; Г. Увеличивает задание.
8. Когда интегральная составляющая гарантирует нулевую постоянную ошибку в рассматриваемом линейном контуре?
А. При любой структуре; Б. Только при Kp=0; В. Только при насыщении; Г. При устойчивом контуре и совместимом постоянном режиме без насыщения.
9. Какое условие управляемости системы второго порядка является верным?
А. det(A)=0; Б. rank[B AB]=2; В. C=B; Г. Все элементы A положительны.
10. Какая матрица задаёт динамику ошибки наблюдателя Люенбергера?
А. A+BK; Б. A−BK; В. A−LC; Г. C−LA.
11. Где лежат полюса асимптотически устойчивой дискретной линейной системы?
А. Внутри единичного круга; Б. На единичном круге; В. Только на мнимой оси; Г. В правой полуплоскости.
12. Какой результат подтверждает воспроизводимость моделирования?
А. Только рисунок траектории; Б. Только название среды; В. Только заявление об устойчивости; Г. Файлы модели, параметры, начальные условия и настройки расчёта.
Ключ: 1 — Б; 2 — В; 3 — А; 4 — Г; 5 — Б; 6 — В; 7 — А; 8 — Г; 9 — Б; 10 — В; 11 — А; 12 — Г.
Интерпретация: 10–12 правильных ответов — уверенное понимание; 8–9 — основные понятия усвоены; 6–7 — требуется устранить отдельные пробелы; 0–5 — требуется повторение соответствующих тем. Эта диагностическая интерпретация не заменяет итоговую шкалу.
6.4 Расчётные задания и ориентиры проверки
Каждое задание T1–T12 может оцениваться по 20-балльной рубрике пункта 6.7. При текущем контроле оно используется как тренировочное либо включается в соответствующую практическую работу. Эталон содержит достаточные ориентиры для проверки, а не заменяет развёрнутое решение. Нулевые начальные условия принимаются, если прямо не указано иное.
T1 Построение модели
Система m ẍ + b ẋ + kx = u: m=2 кг, b=4 Н·с/м, k=8 Н/м. Получить W(s), матрицы состояния для z=[x, ẋ]ᵀ, y=x и полюса. Объяснить физический смысл каждого члена.
Ориентир проверки. W(s)=1/(2s²+4s+8); A=[[0,1],[−4,−2]], B=[0; 0.5], C=[1,0], D=0. Полюса −1±j√3. В записи матриц точка обозначает десятичный разделитель, точка с запятой разделяет строки. Размерности членов исходного уравнения — ньютоны.
T2 Линеаризация маятника
Для J θ̈ + b θ̇ + mgl sinθ = u заданы J=0,5 кг·м², b=0,2 Н·м·с/рад, mgl=4,905 Н·м. Найти равновесие при θ₀=π/6, требуемый u₀ и передаточную функцию по малым отклонениям.
Ориентир проверки. u₀=4,905 sin(π/6)=2,4525 Н·м. При δθ=θ−θ₀, δu=u−u₀: 0,5 δθ̈+0,2 δθ̇+4,24785 δθ=δu. W(s)=1/(0,5s²+0,2s+4,24785). Линейная модель применима только в окрестности выбранного равновесия.
T3 Переходный процесс
Для нормированной замкнутой системы W(s)=9/(s²+4s+9) определить ωn, ζ, полюса, перерегулирование и приближённое время установления в полосе ±2%.
Ориентир проверки. ωn=3 рад/с; ζ=2/3; полюса −2±j√5. Перерегулирование 100 exp(−2π/√5)≈6,02%. Оценка времени установления 4/(ζωn)≈2 с. Это приближённая формула; измерение по графику может отличаться.
T4 Параметрическая устойчивость
Характеристический полином замкнутой системы p(s)=s³+3s²+2s+K. Найти область асимптотической устойчивости и объяснить случаи K=0 и K=6.
Ориентир проверки. Для третьего порядка требуются положительные коэффициенты и 3·2>K; ответ 0<K<6. При K=0 есть нулевой корень. При K=6: p(s)=(s+3)(s²+2), полюса −3, ±j√2; асимптотической устойчивости нет.
T5 Частотный запас
Для L(s)=2/[s(s+1)] при единичной отрицательной обратной связи найти частоту среза и запас по фазе. Оценить предельную дополнительную чистую задержку по фазовому запасу.
Ориентир проверки. |L(jω)|=2/[ω√(1+ω²)]. Отсюда ωc=√((√17−1)/2)≈1,2496 рад/с. Фаза −90°−arctan(ωc), запас ≈38,67°=0,6749 рад. Оценка задержки τ≈0,6749/1,2496≈0,540 с — граница, не допустимая рабочая задержка с запасом.
T6 Синтез ПД регулятора
Для 2ẍ+4ẋ+8x=u принять u=Kp(r−x)−Kd ẋ. Требуется характеристический полином с ωn=3 рад/с, ζ=2/3. Найти Kp, Kd и установившееся x при r=1 м.
Ориентир проверки. После деления на 2: s²+(4+Kd)s/2+(8+Kp)/2. Сопоставление с s²+4s+9 даёт Kd=4 Н·с/м, Kp=10 Н/м. При постоянном задании x∞=Kp/(8+Kp)=5/9 м; ошибка 4/9 м. Нужные полюса сами по себе не обеспечивают единичный статический коэффициент.
T7 ПИД регулятор и устойчивость

Для объекта $W(s)=1/(s^2+2s+5)$ и идеального регулятора $C(s)=Kp+Ki/s+Kd\,s$ заданы $Kp=4$, $Kd=1$. Найти допустимый Ki для асимптотической устойчивости, затем выбрать $Ki=3$ и проверить условие.
Ориентир проверки. Характеристический полином $s^3+(2+Kd)s^2+(5+Kp)s+Ki=s^3+3s^2+9s+Ki$. Устойчивость при $0<Ki<27$; $Ki=3$ допустим. Нулевая ошибка на постоянное задание относится к устойчивой идеальной модели без насыщения. Реализуемая производная требует фильтра и повторной проверки.
T8 Управляемость и наблюдаемость
Заданы $A=[[0,1],[-4,-2]]$, $B=[0;\ 0.5]$, $C=[1,0]$. В записи матриц точка обозначает десятичный разделитель, точка с запятой разделяет строки. Построить матрицы управляемости и наблюдаемости и определить их ранги.
Ориентир проверки. $Qc=[0,\ 0.5;\ 0.5,\ -1]$; $\det Qc=-0{,}25$, $\operatorname{rank} Qc=2$. $Qo=[[1,0],[0,1]]$, $\operatorname{rank} Qo=2$. Измерения положения достаточно для теоретической наблюдаемости данной модели, но численное оценивание зависит от шума.
T9 Обратная связь по состоянию
Для A и B задания T8, $C=[1,0]$ найти $u=-Kz+Nr$ так, чтобы полюса были -2 и -3, а $x_\infty=r$ при постоянном r и номинальных параметрах.
Ориентир проверки. Пусть $K=[k_1,k_2]$. Тогда характеристический полином $s^2+(2+0{,}5k_2)s+4+0{,}5k_1$. Сравнение с s^2+5s+6 даёт $K=[4,6]$. Из равновесия $4x=0{,}5(-4x+Nr)$, следовательно $N=12$. При неизвестной постоянной нагрузке точное слежение предкомпенсатором не гарантировано.
T10 Наблюдатель состояния
Для A задания T8 и $C=[1,0]$ найти $L=[l_1,l_2]^T$, обеспечивающий полюса ошибки наблюдателя -6 и -7. Записать наблюдатель при известном u и измеренном y.
Ориентир проверки. $p(A-LC)=s^2+(l_1+2)s+(2l_1+4+l_2)$. Сравнение с $s^2+13s+42$ даёт $l_1=11$, $l_2=16$. Наблюдатель: $\dot{\hat{z}}=A\,\hat{z}+B\,u+L(y-C\,\hat{z})$. Ошибка $e=z-\hat{z}$ подчиняется $\dot{e}=(A-LC)e$ при точной модели без шума.
T11 Дискретная модель
Объект $\dot{x}=-2x+u$, $y=x$. При $T=0{,}1$ с и постоянном u на каждом такте найти Ad, Bd и установившийся выход при $u[k]=1$. Сравнить с явным методом Эйлера.
Ориентир проверки. Точно: $Ad=\exp(-0{,}2)\approx 0{,}818731$; $Bd=(1-\exp(-0{,}2))/2\approx 0{,}090635$. Полюс внутри единичного круга; $x_\infty=Bd/(1-Ad)=0{,}5$. Эйлер: $Ad=0{,}8$, $Bd=0{,}1$; статический выход тот же, переходный процесс отличается.
T12 Проверка реализуемости
Платформа описывается $2\ddot{x}+4\dot{x}+8x=u$, $|u|\le 10$ Н. Требуется удерживать $x=1$ м при постоянной дополнительной силе $d=-3$ Н, приложенной справа как $u+d$. Определить достижимость режима и объяснить поведение ПИ-регулятора без защиты интегратора.
Ориентир проверки. В равновесии $8x=u+d$, поэтому для $x=1$ требуется $u=11$ Н, что превышает предел. При $u=10$ предельное статическое положение $x=(10-3)/8=0{,}875$ м; недостающая точность — физическое ограничение. Интегратор без защиты продолжает накапливать положительную ошибку; anti-windup ограничивает накопление, но не увеличивает доступную силу.

6.5 Индивидуальное расчётно моделирующее задание
Построить и исследовать систему регулирования положения платформы $m\,\ddot{x}+b\,\dot{x}+kx=u+d$ с ограничением $|u|\le u_{max}$. Для каждого варианта: вывести модель; получить $W(s)$ и матрицы состояния; рассчитать ПД-настройку по полюсам; добавить интегральное действие и обосновать настройку; проверить переходные процессы, постоянную нагрузку, насыщение и изменение массы ±20%.
Вариант m кг b Н·с/м k Н/м umax Н r м d Н
1 2 4 8 10 0.1 -1
2 3 6 12 15 0.1 -1.5
3 1 2 6 8 0.1 -0.8
4 4 8 16 20 0.1 -2

Общие проектные требования: установившаяся ошибка не более 1% задания; перерегулирование не более 10%; время установления в полосе ±2% задания не более 3 с. Сначала проверить достижимость равновесия. Задание r подаётся при t=0, возмущение d — при t=5 с; начальные условия нулевые; интервал моделирования не менее 12 с. После подачи нагрузки время восстановления оценивается отдельно. Критерии проверяются для номинальной массы и при её изменении ±20%; b и k сохраняются.
Шум и задержка — дополнительные испытания: привести хотя бы один сценарий с задержкой T и один с шумом измерения, явно указав T, амплитуду и способ формирования шума. Для них требуется анализ ухудшения, а не безусловное выполнение номинальных порогов. Невыполнимое требование должно быть обосновано расчётом, с предложением изменения структуры или требований.
Состав результата: исходные данные и единицы; уравнения и допущения; коэффициенты регуляторов; файлы воспроизводимого расчёта; графики x(t), e(t), u(t); таблица показателей по сценариям; вывод о выполнении требований и пределах модели.
Оценка — 12 баллов: модель и размерности — 3; расчёт и обоснование регулятора — 3; сценарии и воспроизводимость — 4; инженерный вывод с проверкой ограничений — 2. В каждом пункте максимальный балл выставляется за корректное полное выполнение, половина с округлением вниз — за частичное, 0 — за отсутствие либо принципиальную ошибку. Достижение красивого графика без воспроизводимой модели не заменяет расчёт.
6.6 Проект экзаменационных билетов
Номера теоретических вопросов соответствуют перечню промежуточной аттестации в разделе 5. Условия задач берутся из пункта 6.4; эталоны предназначены преподавателю. Данный набор покрывает все 12 теоретических тем, но является проектным банком для адаптации кафедрой.
Билет Первый вопрос Второй вопрос Задача
1 1 7 T6

2 2 8 Т7
3 3 9 Т8
4 4 10 Т9
5 5 11 Т11
6 6 12 Т5

На защите преподаватель задаёт уточнение по физическому смыслу результата: что произойдёт при изменении массы, насыщении, шуме или постоянной нагрузке. Уточнение относится к соответствующему вопросу или задаче и не увеличивает максимальный балл.
6.7 Критерии оценивания
Практическая работа — 3 балла: 1 за корректную модель и расчёт; 1 за проверяемый результат с единицами и файлами; 1 за самостоятельное объяснение вывода и ограничений. По каждому признаку выставляется 0 или 1. При ошибке студенту указывают, какой критерий не выполнен; исправленная работа оценивается повторно в порядке, установленном преподавателем.
Теоретический вопрос — 10 баллов: корректность понятий и условий применимости — 0–4; логика вывода и необходимые формулы — 0–3; объяснение на механическом примере — 0–2; ответ на уточнение — 0–1. Внутри каждого критерия полный балл соответствует корректному завершённому ответу; частичный балл — верной части ответа с явно определимыми пробелами; 0 — отсутствию ответа либо принципиально неверному утверждению.
Критерий расчётной задачи Баллы Признаки полного выполнения
Физическая схема и модель 4 Правильно заданы вход, выход, обратная связь, уравнения и допущения
Метод и условия применения 4 Выбран подходящий метод, записаны критерии и ограничения
Вычисления 6 Верные преобразования, числа, знаки и единицы; результат доведён до ответа
Проверка 3 Есть независимая подстановка, проверка полюсов, рангов или предельного режима
Интерпретация 3 Объяснён физический смысл и достижимость требуемого режима

Для расчётной задачи по каждому критерию: максимум — полное корректное выполнение; максимум минус 1 — локальная неточность без изменения вывода; половина максимума с округлением вниз — существенный пробел при верном подходе; 0 — отсутствие либо неверная основа. Одна исходная арифметическая ошибка учитывается в вычислениях; последующие согласованные действия не штрафуются повторно за ту же ошибку.
Пример итогового расчёта: практические 30/36, тест 9/12, индивидуальное задание 9/12, экзамен 30/40. Итого 78/100 — «хорошо» по предложенной шкале, экзаменационный порог выполнен.

5.4. Перечень видов оценочных средств

1. Устный опрос по моделям, устойчивости и физическому смыслу обратной связи.
2. Тематический тест с одним правильным ответом и ключами проверки.
3. Расчётные задания на моделирование, анализ устойчивости и синтез регулятора.
4. Отчёт и защита практической работы с проверкой воспроизводимости компьютерного расчёта.
5. Расчётно-моделирующее индивидуальное задание по управлению механическим объектом.
6. Экзаменационный билет из двух теоретических вопросов и одной расчётной задачи — проектная форма промежуточной аттестации.

6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

6.1. Рекомендуемая литература

6.3. Перечень информационных и образовательных технологий

6.3.1 Компетентностно-ориентированные образовательные технологии

6.3.1.1	1. Python с NumPy, SciPy, Matplotlib и python-control — единый открытый комплект для моделей состояния, переходных и частотных характеристик, анализа устойчивости и синтеза обратной связи .
6.3.1.2	2. Scilab с Xcos — открытая альтернатива для численных расчётов и структурного моделирования непрерывных и дискретных систем.
6.3.1.3	3. MATLAB с Control System Toolbox — анализ и настройка линейных систем, расчёт откликов и обратной связи по состоянию; применение при наличии доступной лицензии .
6.3.1.4	4. Simulink — моделирование структурных схем, насыщения и цифровых регуляторов; применение при наличии доступной лицензии .

6.3.2 Перечень информационных справочных систем и программного обеспечения

6.3.2.1	Научные базы данных и электронные библиотеки
6.3.2.2	1. eLIBRARY.RU и РИНЦ — поиск русскоязычных научных публикаций по теории управления, динамике машин и мехатронике. https://elibrary.ru/ Полнотекстовый доступ определяется условиями конкретного издания и учётной записи.
6.3.2.3	2. КиберЛенинка — поиск и чтение открытых научных статей по механике, машиностроению и автоматическому управлению. https://cyberleninka.ru/
6.3.2.4	3. IEEE Xplore — поиск публикаций по автоматическому управлению, приводам, наблюдателям и цифровой реализации. https://ieeexplore.ieee.org/ Доступ к полным текстам зависит от лицензии или открытого статуса публикации.

6.3.2.5	4. Crossref Metadata Search — проверка DOI, названий, авторов и выходных данных научных работ. https://search.crossref.org/ Метаданные не заменяют чтение полного текста.
6.3.2.6	Учебные и технические справочные ресурсы
6.3.2.7	1. Control Tutorials for MATLAB and Simulink — университетские учебные примеры построения моделей, ПИД-регулирования и управления в пространстве состояний.
6.3.2.8	2. Официальная документация python-control и SciPy Signal — справка по моделям, откликам, устойчивости и дискретизации.
6.3.2.9	3. MathWorks Help Center — справочная система MATLAB, Control System Toolbox и Simulink.
6.3.2.10	4. Официальный справочный портал Scilab — функции линейных систем и блоки Xcos. https://help.scilab.org/

7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

8. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Работа с лекционным материалом

Перед лекцией повторите требуемые операции с дифференциальными уравнениями, комплексными числами и матрицами. После лекции восстановите переход от физической схемы к уравнению и от уравнения к выбранному представлению модели. Для каждой формулы запишите смысл переменных, единицы и условия применения. Отдельно отмечайте, где предполагаются малые отклонения, линейность, отсутствие насыщения и нулевые начальные условия.

В темах устойчивости не ограничивайтесь изображением затухающей кривой. Проверяйте корни характеристического уравнения или применяйте соответствующий критерий. В темах частотного анализа различайте характеристики разомкнутого контура и замкнутой системы; запас устойчивости определяйте по правильному контуру.

Порядок выполнения расчёта

1. Изобразите объект и задайте положительные направления координат, сил и моментов. Укажите, что измеряется и чем управляют.
2. Составьте уравнения, проверьте размерности, равновесие и физические предельные случаи. Выберите рабочую точку, если необходима линеаризация.
3. Получите передаточную функцию или модель состояния и сравните её полюса с исходной механической моделью.
4. Зафиксируйте требования к качеству и ограничения до настройки регулятора. Вычислите требуемые коэффициенты с указанием единиц.
5. Проверьте замкнутую устойчивость, достижимость статического режима, переходный процесс и управляющее усилие.
6. Исследуйте возмущение, изменение параметров и ограничения. Объясните причины ухудшения; сохраните модель, параметры и итоговую таблицу.

Работа в программной среде

Выберите одну основную среду: Python с NumPy, SciPy и python-control; Scilab/Xcos; либо MATLAB/Simulink при доступной лицензии. Не требуется дублировать каждую работу во всех средах. Используйте официальную документацию по представлению состояний, откликам и дискретизации [2–6].

В начале файла задайте все физические параметры, начальные условия, интервал расчёта, шаг вывода и допуски решателя. Для цифровой модели отдельно укажите период обновления регулятора. Уменьшите шаг или ужесточите допуски и убедитесь, что основной вывод не изменился. При случайном шуме сохраните способ генерации и начальное значение генератора.

Подписывайте оси и единицы; на одном графике используйте сопоставимые масштабы. Время установления считайте по заданной полосе; перерегулирование — относительно требуемого установившегося уровня, явно указав его. Если система не достигает заданного уровня, отдельно приведите статическую ошибку. При возмущении фиксируйте момент его подачи и время восстановления после него.

Самостоятельная работа и подготовка к защите

Распределяйте 62 часа по темам раздела 3. Сначала решайте простую модель вручную, затем переносите её в программу. Перед защитой подготовьте объяснение выбора модели, метода и настроек. Умейте показать, какой член уравнения описывает инерцию, диссипацию и упругость и почему выбранная обратная связь меняет динамику.

Отчёт должен позволять повторить результат: приложите исходные параметры и файлы расчёта, приведите существенные формулы, графики, таблицу качества и вывод. При использовании готовых функций поясните их входные данные и физический смысл результата. Отмечайте заимствованные схемы и фрагменты кода ссылкой на источник; адаптируйте их к своему объекту.

Типичные ошибки и способы самопроверки

Положительная обратная связь вместо отрицательной: заново выведите знаменатель замкнутой передаточной функции из уравнения ошибки.

Подмена перемещения скоростью или смешение градусов и радиан: проверьте обозначение выхода и все единицы.

Ошибочное применение теоремы о конечном значении: сначала проверьте полюса соответствующего выражения и существование предела.

Вывод о работоспособности по номинальному графику: дополнительно проверьте нагрузку, изменение массы и предел усилия.

Слишком быстрый наблюдатель или производная без фильтра: сравните результат при шуме и оцените рост управляющего сигнала.

Неустойчивость после дискретизации: проверьте период опроса, задержку, единичный круг и способ дискретизации.

Подготовка к промежуточной аттестации

Сгруппируйте вопросы по цепочке «модель — анализ — синтез — реализация — проверка». Решите задания T1–T12 без просмотра эталонов, затем сопоставьте не только числа, но и допущения. На экзамене начните с физической схемы и условий задачи, приведите выбранный метод, расчёт и проверку. Итоговый ответ должен содержать инженерное объяснение результата.