МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ГАГАРИНА Ю.А.»

(СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

САРАТОВСКИЙ КОЛЛЕДЖ МАШИНОСТРОЕНИЯ И ЭНЕРГЕТИКИ

«СОГЛАСОВАНО»	«УТВЕРЖДАЮ»
Решением П(Ц)МК	Заместитель директора по УР
Протокол № ____	_____ С.В. Клюквина
от «__» _____20__г.	«___» _____ 20__ г.

Методические рекомендации для студентов по проведению практических работ

по дисциплине

«МДК. 01.02. Тестирование разработанной модели элементов систем автоматизации с формированием пакета технической документации»

для специальности

15.02.14 Оснащение средствами автоматизации технологических процессов и производств (по отраслям)

Саратов 2021г

Разработал преподаватель СКМ и Э ФГБОУ ВО «СГТУ имени Гагарина Ю.А» **Карпеева Е.В.**

Данные методические рекомендации предназначены для студентов 2 и 3 курсов, специальности **15.02.14** Оснащение средствами автоматизации технологических процессов и производств (по отраслям).

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ .....
Введение.....
Цель практических занятий.....
Организация практического занятия.....
Структура практического занятия..... .
Практическая работа «Построение и описание структурной схемы АСР объекта автоматизации» 7
Практическая работа «Построение ЛАЧХ, ФЧХ и переходного процесса идеальных звеньев» 11
Практическая работа «Построение ЛАЧХ, ФЧХ и переходного процесса реальных звеньев» 17
Практическая работа «Построение ЛАЧХ и ФЧХ последовательного соединения звеньев» 23
Практическая работа «Построение ЛАЧХ и ФЧХ параллельного соединения звеньев» 25
Практическая работа «Построение ЛАЧХ и ФЧХ встречно-параллельного соединения звеньев» 28
Практическая работа «Определение передаточных функций сложных многоконтурных систем» 31
Лабораторная работа «Снятие кривой разгона объекта управления и определение основных параметров» 33
Практическая работа «Правила эквивалентного преобразования сложных систем управления» 36
Практическая работа «Интерфейс и принципы построения моделей в программном комплексе «МВТУ» 38
Практическая работа «Моделирование переходных процессов элементов систем автоматизации» 47

Практическая работа «Определение устойчивости системы автоматического управления и регулирования методом алгебраических критериев Гурвица и Рауса» 55
Практическая работа «Определение устойчивости системы автоматического управления и регулирования по виду расположения вектора годографа Михайлова» 58
Практическая работа «Определение устойчивости систем автоматического регулирования по критерию Найквиста» 61
Практическая работа «Инструменты частотного анализа систем управления в программном комплексе «МВТУ» 64
Практическая работа «Моделирование и исследование качества контура автоматического регулирования» 76
Список рекомендуемой литературы……….

Введение

Практические занятия, как виды учебных занятий, направлены на экспериментальное подтверждение теоретических положений и формирование учебных и профессиональных практических умений и составляют важную часть теоретической и профессиональной практической подготовки. Семинар является видом практических занятий.

В процессе практического занятия обучающиеся выполняют одно или несколько практических заданий под руководством преподавателя в соответствии с изучаемым содержанием учебного материала.

Выполнение обучающимися практических занятий проводится с целью:

- формирования практических умений в соответствии с требованиями к уровню подготовки обучающихся, установленными рабочей программой дисциплины по конкретным разделам/ темам дисциплины;
- обобщения, систематизации, углубления, закрепления полученных теоретических знаний;
- совершенствования умений применять полученные знания на практике, реализации единства интеллектуальной и практической деятельности;
- развития интеллектуальных умений у будущих специалистов: аналитических, проектировочных, конструктивных и др.;
- выработки таких профессионально значимых качеств, как самостоятельность, ответственность, точность, творческая инициатива при решении поставленных задач при освоении общих компетенций.

Цель практических занятий

В результате освоения учебной дисциплины «МДК. 01.02. Тестирование разработанной модели элементов систем автоматизации с формированием пакета технической документации» обучающийся должен **уметь:**

анализировать имеющиеся решения по выбору программного обеспечения для создания и тестирования модели элементов систем автоматизации;

выбирать и применять программное обеспечение для создания и тестирования модели элементов систем автоматизации на основе технического задания;

создавать и тестировать модели элементов систем автоматизации на основе технического задания;

разрабатывать виртуальную модель элементов систем автоматизации на основе выбранного программного обеспечения и технического задания;

использовать методику построения виртуальной модели;

использовать пакеты прикладных программ (CAD/CAM – системы) для разработки виртуальной модели элементов систем автоматизации;

проводить виртуальное тестирование разработанной модели элементов систем автоматизации;

проводить оценку функциональности компонентов;

использовать автоматизированные рабочие места техника для виртуального тестирования разработанной модели элементов систем автоматизации для оценки функциональности компонентов;

использовать пакеты прикладных программ (CAD/CAM – системы) для разработки технической документации на проектирование элементов систем автоматизации;

оформлять техническую документацию на разработанную модель элементов систем автоматизации, в том числе с использованием средств САПР;

читать и понимать чертежи и технологическую документацию.

В результате освоения учебной дисциплины обучающийся должен **знать:**

современное программное обеспечение для создания и выбора систем автоматизации;

критерии выбора современного программного обеспечения для моделирования элементов систем автоматизации;

теоретические основы моделирования;

назначения и области применения элементов систем автоматизации;

содержания и правила оформления технических заданий на проектирование;

методики построения виртуальных моделей;

программное обеспечение для построения виртуальных моделей;

функциональное назначение элементов систем автоматизации;

основы технической диагностики средств автоматизации;

основы оптимизации работы компонентов средств автоматизации;

классификацию, назначение, область применения и технологические возможности элементов систем автоматизации;

служебное назначение и конструктивно-технологических признаки разрабатываемых элементов систем автоматизации;

требования ЕСКД и ЕСТД к оформлению технической документации для элементов систем автоматизации.

Содержание практических и лабораторных работ ориентировано на подготовку студентов к освоению профессионального модуля основной профессиональной

образовательной программы по специальности и овладению профессиональными компетенциями:

ПК 1.1. Осуществлять анализ имеющихся решений для выбора программного обеспечения для создания и тестирования модели элементов систем автоматизации на основе технического задания.

ПК 1.2. Разрабатывать виртуальную модель элементов систем автоматизации на основе выбранного программного обеспечения и технического задания.

ПК 1.3. Проводить виртуальное тестирование разработанной модели элементов систем автоматизации для оценки функциональности компонентов.

ПК 1.4. Формировать пакет технической документации на разработанную модель элементов систем автоматизации.

А также формированию общих компетенций:

ОК1. Выбирать способы решения задач профессиональной деятельности, применительно к различным контекстам.

ОК2. Осуществлять поиск, анализ и интерпретацию информации, необходимой для выполнения задач профессиональной деятельности.

ОК3. Планировать и реализовывать собственное профессиональное и личностное развитие.

ОК4. Работать в коллективе и команде, эффективно взаимодействовать с коллегами, руководством, клиентами.

ОК5. Осуществлять устную и письменную коммуникацию на государственном языке с учетом особенностей социального и культурного контекста.

ОК6. Проявлять гражданско-патриотическую позицию, демонстрировать осознанное поведение на основе традиционных общечеловеческих ценностей.

ОК7. Содействовать сохранению окружающей среды, ресурсосбережению, эффективно действовать в чрезвычайных ситуациях.

ОК9. Использовать информационные технологии в профессиональной деятельности.

ОК10. Пользоваться профессиональной документацией на государственном и иностранном языках.

ОК11. Планировать предпринимательскую деятельность в профессиональной сфере.

Критерии оценки выполнения практической и лабораторной работы:

№	Критерии оценки	Оценка
1	Студент выполнил работу полностью, проявил самостоятельность, активность, при защите работы ответил на все вопросы	Отлично
2	Студент выполнил работу полностью, проявил самостоятельность, активность, при защите ответил не на все вопросы	Хорошо
3	Студент выполнил работу полностью, при выполнении работы проявил недостаточную самостоятельность, пользовался помощью преподавателя, при защите работы ответил не на все вопросы	Удовлетворительно
4	Студент не закончил выполнение работы, самостоятельности при выполнении работы не проявил, на вопросы при защите не ответил	Неудовлетворительно

Организация практического занятия

Практическое занятие должно проводиться в учебных кабинетах или специально оборудованных помещениях (площадках, полигонах и т.п.) - кабинет (В соответствии с УП).

В соответствии с требованиям ФГОС СПО 15.02.14 «Оснащение средствами автоматизации технологических процессов и производств» реализация ППССЗ должна обеспечивать выполнение обучающимися и практических занятий, включая как обязательный компонент *практические занятия. (с использованием персональных компьютеров).*

Выполнению практических занятий предшествует проверка знаний обучающихся - их теоретической готовности к выполнению задания.

Практические занятия могут носить репродуктивный, частично-поисковый и поисковый характер.

Работы, носящие *репродуктивный характер*, отличаются тем, что при их проведении обучающиеся пользуются подробными инструкциями, в которых указаны: цель работы, пояснения (теория, основные характеристики), оборудование, аппаратура,

материалы и их характеристики, порядок выполнения работы, таблицы, выводы (без формулировки), контрольные вопросы, учебная и специальная литература.

Работы, носящие *частично-поисковый характер*, отличаются тем, что при их проведении обучающиеся не пользуются подробными инструкциями, им не дан порядок выполнения необходимых действий, и они требуют от обучающихся самостоятельного подбора оборудования, выбора способов выполнения работы в инструктивной и справочной литературе и др.

Работы, носящие *поисковый характер*, характеризуются тем, что обучающиеся, опираясь на имеющиеся у них теоретические знания, должны решить новую для них проблему.

При планировании практических занятий необходимо находить оптимальное соотношение репродуктивных, частично-поисковых и поисковых работ, чтобы обеспечить высокий уровень интеллектуальной деятельности.

Формы организации обучающихся при проведении практических занятий - фронтальная, групповая и индивидуальная.

При *фронтальной форме* организации занятий все обучающиеся выполняют одновременно одну и ту же работу.

При *групповой форме* организации занятий одна и та же работа выполняется бригадами по 2 - 5 человек.

При *индивидуальной форме* организации занятий каждый обучающийся выполняет индивидуальное задание.

Для повышения эффективности проведения практических занятий рекомендуется:

- разработка сборников задач, заданий и упражнений;
- разработка контрольно-диагностических материалов для контроля за подготовленностью обучающихся к практическим занятиям, в том числе в форме педагогических тестовых материалов для автоматизированного контроля;
- подчинение методики проведения практических занятий ведущим дидактическим целям с соответствующими установками обучающимся;
- применение коллективных и групповых форм работы, максимальное использование индивидуальных форм с целью повышения ответственности каждого обучающегося за самостоятельное выполнение полного объема работ;
- проведение практических занятий на повышенном уровне трудности с включением в них заданий, связанных с выбором обучающимися условий выполнения работы, конкретизацией целей, самостоятельным отбором необходимого оборудования;

– подбор дополнительных задач и заданий для обучающихся, работающих в более быстром темпе, для эффективного использования времени, отводимого на практические занятия.

Методические указания к практическим и лабораторным работам разработаны на основе рабочей программы профессионального модуля ПМ 01 Разработка и компьютерное моделирование элементов систем автоматизации с учетом специфики технологических процессов.

Содержание практических и лабораторных работ ориентировано на подготовку студентов к освоению междисциплинарного курса МДК. 01.02. Тестирование разработанной модели элементов систем автоматизации с формированием пакета технической документации. основной профессиональной образовательной программы по специальности 15.02.14 «Оснащение средствами автоматизации технологических процессов и производств» и овладению профессиональными компетенциями.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

Тема: Построение и описание структурной схемы АСР объекта автоматизации

Цели и задачи урока:

1. Изучить правила выполнения структурных схем автоматизации.

2. Научиться проектировать структурные схемы автоматических систем регулирования объектов автоматизации.

3. Научиться описывать структурные схемы автоматических систем регулирования.

Тип урока – практическое занятие.

Методы обучения – репродуктивный и проблемный.

Обеспечение занятия - вычислительные средства.

Ход урока

1. Разработать согласно варианту (таблица 1) структурную схему автоматической системы регулирования.
2. Описать структурную схему автоматической системы регулирования.
3. Построить структурную схему автоматической системы регулирования в программе КОМПАС.
4. Оформить практическую работу.
5. Ответить на контрольные вопросы.

Любой проект по автоматизации технологических процессов начинается с разработки структурной схемы.

Структурная схема регулирования представляет собой набор отдельных функциональных элементов, выполненных в виде прямоугольников. Внутри прямоугольника изображается его функциональный признак.

Структуру системы можно представить по различным признакам построения, поэтому различают три вида структурных схем: алгоритмическая, функциональная и конструктивная.

Алгоритмической называют схему, где каждая часть предназначена для выполнения определенного алгоритма преобразования ее входной величины.

Функциональной называют схему, где каждый элемент выполняет определенную функцию (получение информации, ее переработка, формирование закона регулирования, усиление, преобразование и т.д.).

Конструктивной называется схема, в которой каждая часть представляет собой самостоятельное конструктивное целое.

На структурной схеме в общем случаи условно показывают:

- технологические подразделения объекта управления;

- функции и технические средства их реализации;

- взаимосвязи между элементами схемы.

При разработке структурной схемы автоматического регулирования решаются следующие вопросы:

- выбор способа регулирования, при этом выбирается регулируемая величина и чем эта величина будет регулироваться (регулирующее воздействие);

- выбор задающих и корректирующих воздействий для данной системы регулирования;

- выбор комплекса технических средств, на базе которого будет реализована данная система регулирования;

- выбор необходимых средств для преобразования измерительных, задающих, корректирующих и управляющих сигналов.

В качестве примера на рисунке 1 показана простейшая система регулирования.

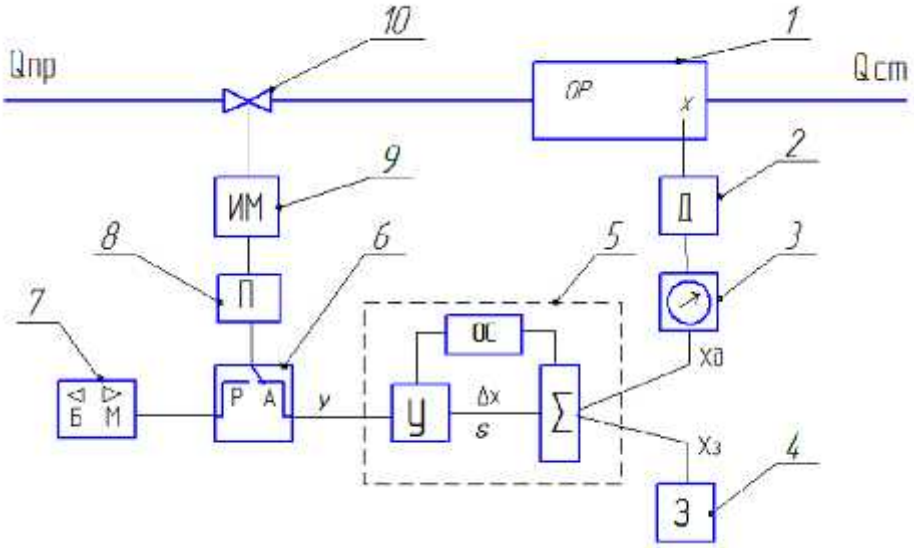


Рисунок 1 – Автоматическая система регулирования

На рисунке 1 цифрами обозначены:

1 - Объект регулирования – агрегат, машина, в котором должна поддерживаться регулируемая величина X. Для обеспечения технологического режима в объект подается энергия Qпр – приток энергии. Из объекта отводится энергия Qст – сток энергии.

2 - Измерительное устройство (датчик) – воспринимающее регулируемую величину и преобразующее ее в сигнал, пропорциональный действительному (текущему) значению регулируемой величины – Xд.

3 - Показывающий (регистрирующий) прибор.

4 - Задающее устройство (задатчик) – выдающее сигнал, соответствующий заданному значению регулируемой величины – Хз.

5 - Регулирующее устройство (регулятор) – устройство, которое воспринимает действительное и заданное значение регулируемой величины, сравнивает их между собой, выявляет рассогласование ΔХ (ε), усиливает его и вырабатывает управляющее воздействие «у» по определенному закону во времени. В общем случае регулятор состоит из суммирующего устройства "СУ", усилителя "У" и устройства обратной связи "ОС".

Суммирующее устройство выявляет рассогласование ΔХ (ε), усилитель его усиливает до величины, необходимой для перемещения регулирующего органа, устройство обратной связи формирует закон регулирования во времени, т.е. управляющее воздействие: У=f (ΔХ, t).

6 - Блок ручного управления – работает в двух режимах: «А» - автоматическое регулирование и «Р» - ручное управление.

7 - Кнопки «Б-М» («больше-меньше») для ручного управления.

8 - Пускатель – преобразует управляющее воздействие «у» до величины, необходимой для привода исполнительного механизма.

9 - Исполнительный механизм, который преобразует управляющее воздействие в механическое перемещение.

10 - Регулирующий орган, который непосредственно воздействует на технологический процесс путем изменения подачи или отвода энергии. Регулирующий орган механически сочленен с исполнительным механизмом.

Таблица 1 - Варианты практической работы

№ варианта	**Задание**
1	**2**
1	Построить и описать структурную схему АСР расхода газа, подаваемого на методическую печь
2	Построить и описать структурную схему АСР влажности дутья на доменной печи
3	Построить и описать структурную схему АСР температуры в зоне методической печи
4	Построить и описать структурную схему АСР температуры купола воздухонагревателя
5	Построить и описать структурную схему АСР температуры горна зажигания агломерационной машины
6	Построить и описать структурную схему АСР температуры горячего дутья на доменной печи

7	Построить и описать структурную схему АСР давления в рабочем пространстве камерной печи
8	Построить и описать структурную схему АСР давления газа на колошнике доменной печи
9	Построить и описать структурную схему АСР давления газа на сторону коксовой батареи
10	Построить и описать структурную схему АСР температуры в секционной печи
11	Построить и описать структурную схему АСР температуры перегретого пара в парогенераторе
12	Построить и описать структурную схему АСР уровня воды в барабане парогенератора
13	Построить и описать структурную схему АСР температуры нагревательного колодца
14	Построить и описать структурную схему АСР давления в роликовой подогревательной печи
15	Построить и описать структурную схему АСР расхода газа в трубопроводе
16	Построить и описать структурную схему АСР температуры в зоне печи
17	Построить и описать структурную схему АСР температуры в нагревательной печи
18	Построить и описать структурную схему АСР расхода кислорода на продувку кислорода конвертера
19	Построить и описать структурную схему АСР температуры в термической печи
20	Построить и описать структурную схему АСР расхода дутья в фурму доменной печи
21	Построить и описать структурную схему АСР температуры воды после бойлера
22	Построить и описать структурную схему АСР температуры перегретого пара в парогенераторе
23	Построить и описать структурную схему АСР температуры в нагревательной печи
24	Построить и описать структурную схему АСР соотношения газов на газосмесительной станции
25	Построить и описать структурную схему АСР давления в рабочем пространстве нагревательной печи

Примечание: № варианта соответствует порядковому номеру в журнале.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение структурной схемы.
2. Виды структурных схем.
3. Правила построения структурных схем.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

Тема: Построение ЛАЧХ, ФЧХ и переходного процесса идеальных звеньев

Цели и задачи:

Научиться определять передаточную функцию звена, строить логарифмические характеристики ЛАЧХ, ФЧХ и переходный процесс идеальных звеньев автоматического управления.

Тип урока – практическое занятие.
Методы обучения – репродуктивный и проблемный.
Обеспечение занятия - вычислительные средства.

Ход урока

1. По заданным параметрам (таблицы 1, 2, 3) своего варианта определить дифференциальное уравнение и передаточную функцию звена.
2. Построить логарифмические характеристики ЛАЧХ и ФЧХ звена.
3. Построить переходный процесс звена.
4. Оформить практическую работу.
5. Ответить на контрольные вопросы.

Любую автоматическую систему можно представить в виде соединения простейших динамических звеньев, которые называются **типовыми динамическими звеньями.**

Все типовые динамические звенья делятся на идеальные и реальные.

Идеальные звенья:

- пропорциональное;
- идеально интегрирующее;
- идеально дифференцирующее;
- звено «чистого» запаздывания.

Отношение изображения выходной величины элемента системы (звена) к изображению его входной величины при нулевых начальных условиях называется **передаточной функцией** элемента системы (звена) и обозначается W(p):

$$W(p) = \frac{X_{\text{вых}}(p)}{X_{\text{вх}}(p)}$$

Логарифмические частотные характеристики.

Для практических расчетов особенно широко используются частотные характеристики, построенные в логарифмическом масштабе.

Логарифмической единицей усиления или ослабления мощности сигнала при прохождении его через какое-либо устройство в технике принят бел.

Графики АЧХ и ФЧХ сроят в прямоугольной системе координат.

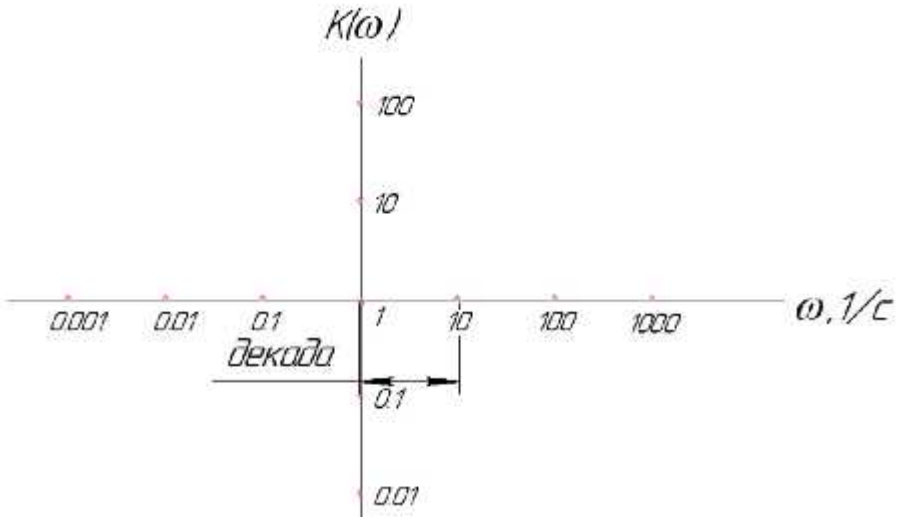


Рисунок 2 – Оси координат для построения ЛАЧХ

Причем, для удобства расчетов величины ω и К откладывают по осям в логарифмическом масштабе.

Единицей измерения величины lgω является декада. Декада – это интервал, кратный 10. Для измерения величины lgω используют величину лог (лг) – единица измерения, характеризующая степень усиления или ослабления амплитуды сигнала в 10 раз.

На графике одной декаде и одному логу соответствует 25 мм Масштабы Mω=ML=25мм/дек).

Величину φ откладывают в равномерном масштабе – 90^0 соответствует 45мм графика.

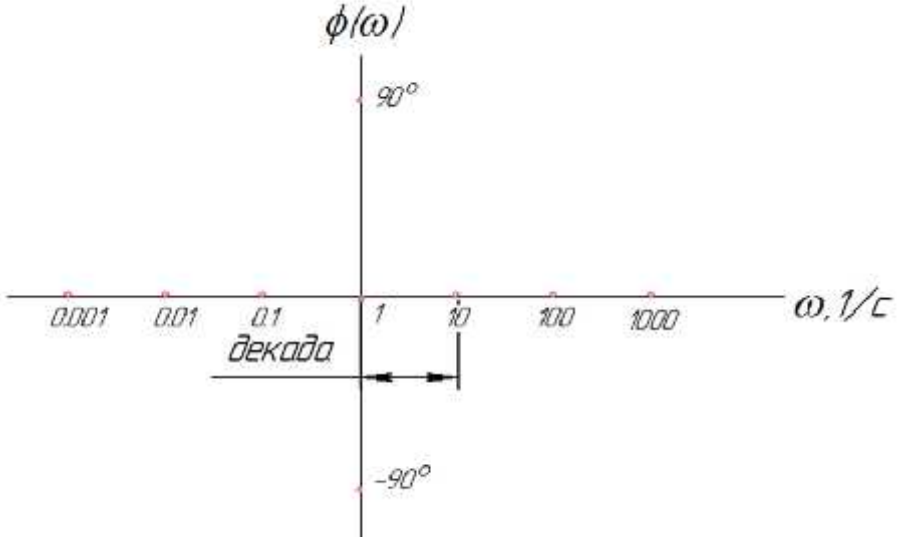
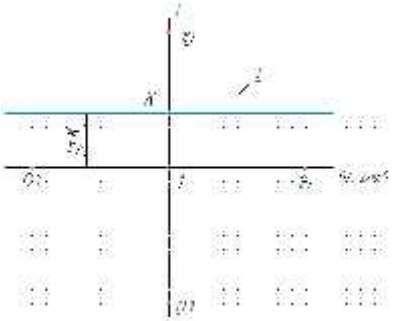
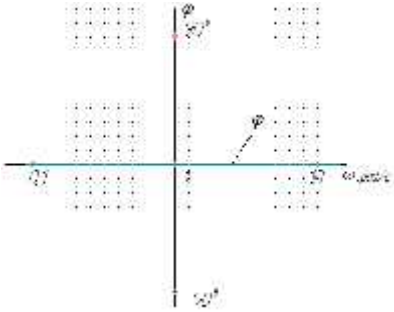
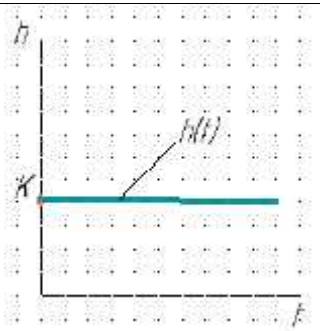
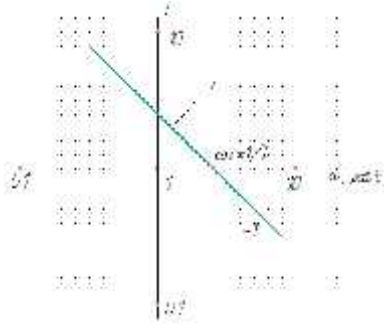
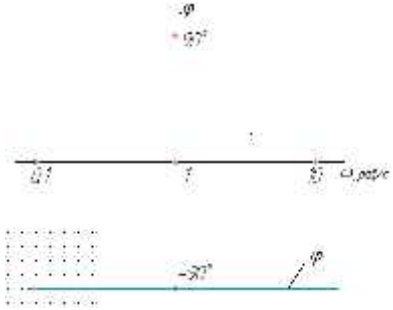
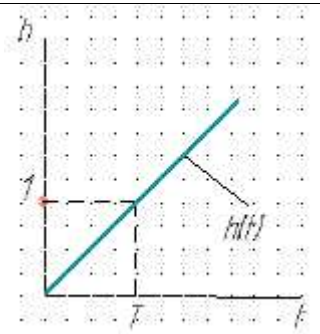
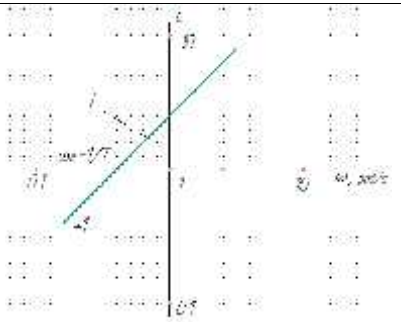
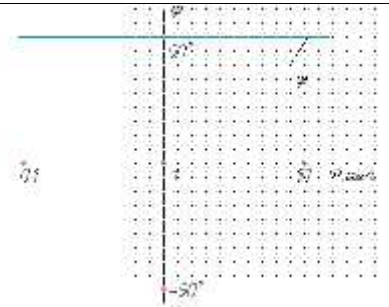
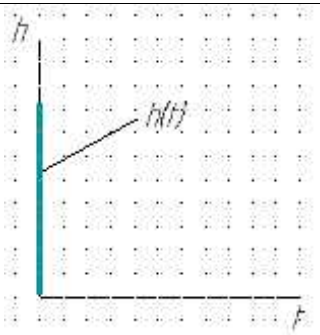


Рисунок 3 – Оси координат для построения ФЧХ

Кроме обозначения величин, откладываемых по осям, целесообразно нанести на график координатную сетку, как это показано на рисунках 2 и 3.

В таблице приведены примеры определения дифференциальных уравнений, передаточных функций, а также построения ЛАЧХ, ФЧХ и переходного процесса идеальных звеньев.

Тип звена	Дифференциальное уравнение	Передаточная функция	ЛАЧХ	ФЧХ	Переходный процесс
Пропорциональное звено	$x_{вых}(t) = K \cdot x_{вх}(t)$ $x_{вых}(p) = K \cdot x_{вх}(p)$ ***K*** - коэффициент пропорциональности (усиления). Звено усиливает входной сигнал в «K» - раз.	$W(p) = \frac{x_{вых}(p)}{x_{вх}(p)} = K$			
Интегрирующее	$x_{вых}(t) = \frac{1}{T} \cdot \int_0^t x_{вх}(t) \cdot d$ $x_{вх}(p) = T \cdot x_{вых}(p)$ ***T*** – постоянная времени При подаче на вход звена воздействия входной сигнал постоянно возрастает.	$W(p) = \frac{x_{вых}(p)}{x_{вх}(p)} = \frac{1}{T}$			
Идеально дифференцирующее	$x_{вых}(t) = T \cdot \frac{dx_{вх}(t)}{d}$ $x_{вых}(p) = T \cdot x_{вх}(p)$ ***T*** – постоянная времени	$W(p) = \frac{x_{вых}(p)}{x_{вх}(p)} = T$			

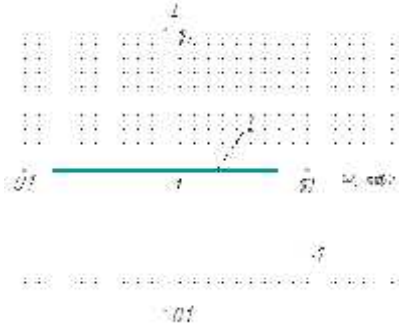
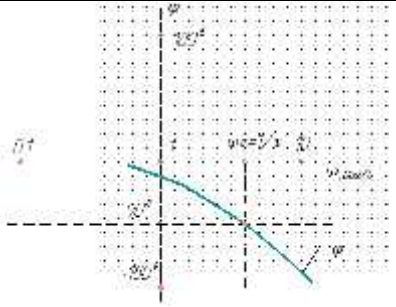
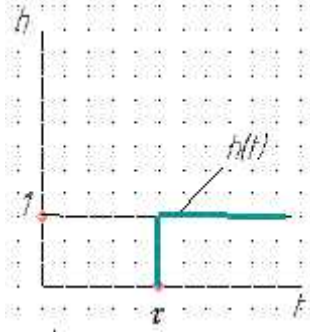
Звено «чистого» запаздывания	$x_{вых}(t) = x_{вх}(t-\tau)$ $x_{вых}(p) = e^{-p} \cdot x_{вх}(p)$ τ - время запаздывания	$W(p) = \frac{x_{вых}(p)}{x_{вх}(p)}$ $= e^{-p}$			

Таблица 1 - Варианты практической работы для построения ЛАЧХ, ФЧХ и переходного процесса пропорционального звена

Вар	Звено	Вар	Звено	Вар	Звено
1	W(p) = 2	10	W(p) = 1,6	19	W(p) = 4
2	W(p) = 0,2	11	W(p) = 0,5	20	W(p) = 3,6
3	W(p) = 2,5	12	W(p) = 0,9	21	W(p) = 0,15
4	W(p) = 1	13	W(p) = 1,2	22	W(p) = 2,1
5	W(p) = 0,4	14	W(p) = 2,3	23	W(p) = 2,8
6	W(p) = 1,75	15	W(p) = 0,75	24	W(p) = 3,2
7	W(p) = 2,7	16	W(p) = 1,9	25	W(p) = 0,45
8	W(p) = 3,5	17	W(p) = 2,2	26	W(p) = 2,25
9	W(p) = 0,8	18	W(p) = 3	27	W(p) = 3,3

Таблица 2 - Варианты практической работы для построения ЛАЧХ, ФЧХ и переходного процесса идеально интегрирующего звена

Вар	Звено	Вар	Звено	Вар	Звено
1	$W(p) = \frac{1}{0{,}9\text{p}}$	10	$W(p) = \frac{1}{0{,}6\text{p}}$	19	$W(p) = \frac{1}{0{,}3\text{p}}$
2	$W(p) = \frac{1}{1{,}2\text{p}}$	11	$W(p) = \frac{1}{0{,}95\text{p}}$	20	$W(p) = \frac{1}{1{,}6\text{p}}$
3	$W(p) = \frac{1}{1{,}8\text{p}}$	12	$W(p) = \frac{1}{1{,}3\text{p}}$	21	$W(p) = \frac{1}{4\text{p}}$
4	$W(p) = \frac{1}{2{,}7\text{p}}$	13	$W(p) = \frac{1}{0{,}5\text{p}}$	22	$W(p) = \frac{1}{3{,}1\text{p}}$
5	$W(p) = \frac{1}{1{,}6\text{p}}$	14	$W(p) = \frac{1}{0{,}7\text{p}}$	23	$W(p) = \frac{1}{0{,}4\text{p}}$
6	$W(p) = \frac{1}{2\text{p}}$	15	$W(p) = \frac{1}{2{,}4\text{p}}$	24	$W(p) = \frac{1}{2{,}3\text{p}}$
7	$W(p) = \frac{1}{0{,}8\text{p}}$	16	$W(p) = \frac{1}{0{,}75\text{p}}$	25	$W(p) = \frac{1}{3{,}5\text{p}}$
8	$W(p) = \frac{1}{\text{p}}$	17	$W(p) = \frac{1}{3\text{p}}$	26	$W(p) = \frac{1}{2{,}7\text{p}}$
9	$W(p) = \frac{1}{1{,}5\text{p}}$	18	$W(p) = \frac{1}{2{,}5\text{p}}$	27	$W(p) = \frac{1}{2{,}9\text{p}}$

Таблица 3 - Варианты практической работы для построения ЛАЧХ, ФЧХ и переходного процесса идеально дифференцирующего звена

Вар	Звено	Вар	Звено	Вар	Звено
1	W(p) = 1,65p	10	W(p) = 0,7p	19	W(p) = 3p
2	W(p) = 1,2p	11	W(p) = 0,75p	20	W(p) = p
3	W(p) = 1,5p	12	W(p) = 1,9p	21	W(p) = 1,1p
4	W(p) = 0,9p	13	W(p) = 1,55p	22	W(p) = 2,5p
5	W(p) = 0,2p	14	W(p) = 0,9p	23	W(p) = 2,7p
6	W(p) = 1,3p	15	W(p) = 2,2p	24	W(p) = 0,5p
7	W(p) = 0,8p	16	W(p) = 0,3p	25	W(p) = 4p
8	W(p) = 1,4p	17	W(p) = 1,8p	26	W(p) = 3,2p
9	W(p) = 2,7p	18	W(p) = 0,3p	27	W(p) = 1,7p

Примечание: № варианта соответствует порядковому номеру студента в журнале.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Элементарное динамическое звено.
2. Дифференциальное уравнение звена.
3. Оператор Лапласа.
4. Идеальные динамические звенья.
5. Правила построения ЛАЧХ, ФЧХ и переходного процесса.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

Тема: Построение ЛАЧХ, ФЧХ и переходного процесса реальных звеньев

Цели и задачи урока:
Научиться определять передаточную функцию звена, строить логарифмические характеристики ЛАЧХ, ФЧХ и переходный процесс реальных звеньев автоматического управления.

Тип урока – практическое занятие.
Методы обучения – репродуктивный и проблемный.
Обеспечение занятия - вычислительные средства.

Ход урока

1. По заданным параметрам своего варианта (таблицы 1, 2, 3, 4) определить дифференциальное уравнение и передаточную функцию звена.
2. Построить ЛАЧХ и ФЧХ звена.
3. Построить переходный процесс звена.
4. Оформить практическую работу.
5. Ответить на контрольные вопросы.

Любую автоматическую систему можно представить в виде соединения простейших динамических звеньев, которые называются **типовыми динамическими звеньями.**

Все типовые динамические звенья делятся на идеальные и реальные.

Реальные звенья:

- апериодическое;
- реально дифференцирующее;
- реально форсирующее;
- изодромное;
- колебательное.

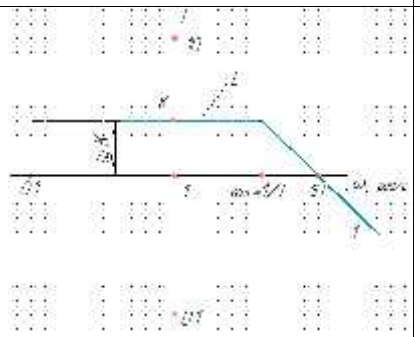
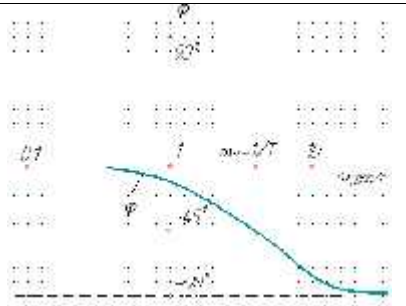
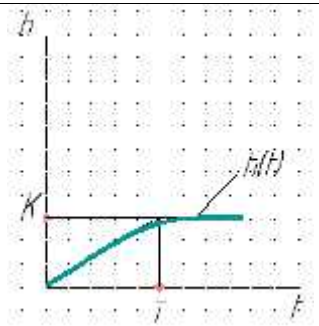
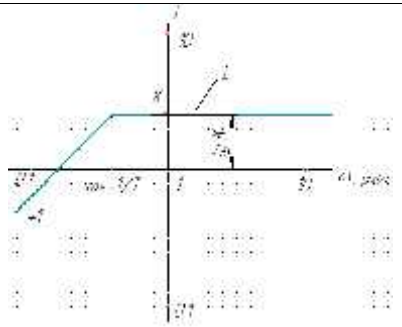
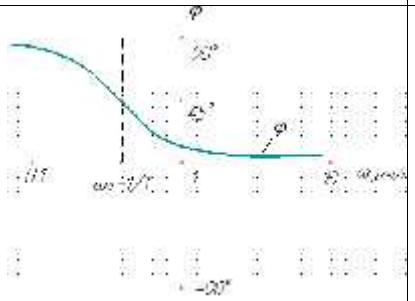
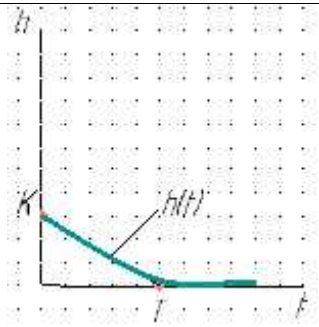
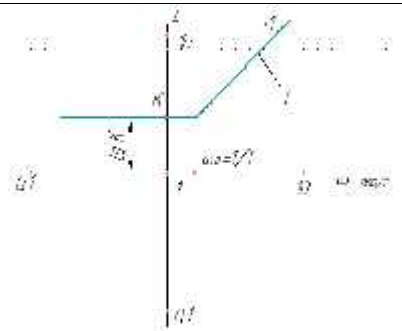
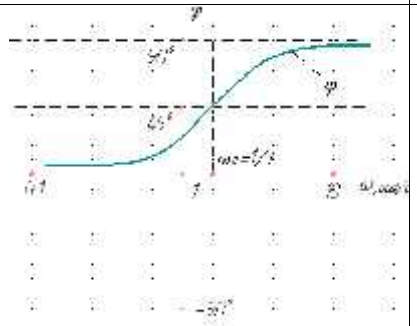
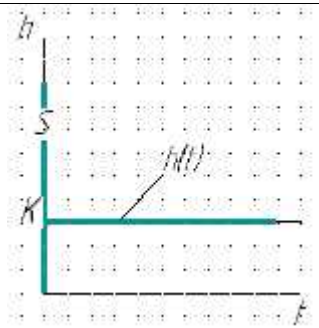
Отношение изображения выходной величины элемента системы (звена) к изображению его входной величины при нулевых начальных условиях называется **передаточной функцией** элемента системы (звена) и обозначается W(p):

$$W(p) = \frac{X_{\text{вых}}(p)}{X_{\text{вх}}(p)}$$

Логарифмические частотные характеристики.

Частотные характеристики строятся в логарифмическом масштабе.

В таблице приведены примеры определения дифференциальных уравнений, передаточных функций, а также построения ЛАЧХ, ФЧХ и переходного процесса реальных звеньев.

Тип звена	Дифференциальное уравнение	Передаточная функция	ЛАЧХ	ФЧХ	Переходный процесс
Апериодическое	$T \cdot \frac{dx_{вых}(t)}{d} + x_{вых}(t) = K\, x_{вх}(t)$ $T \cdot x_{вых}(p) = K \cdot x_{вх}(p)$ ***K*** - коэффициент пропорциональности ***T*** – постоянная времени	$W(p) = \frac{x_{вых}(p)}{x_{вх}(p)} = \frac{K}{1+T}$			
Реально дифференцирующее	$T \cdot \frac{dx_{вых}(t)}{d} + x_{вых}(t) = K \frac{d\ _{вх}(t)}{d}$ $(1+T\ ) \cdot x_{вых}(p) = K' \cdot x_{вх}(p)$ ***K*** - коэффициент пропорциональности ***T*** – постоянная времени	$W(p) = \frac{x_{вых}(p)}{x_{вх}(p)} = \frac{K'}{1+T}$			
Форсирующее	$x_{вых}(t) = K \frac{d\ _{вх}(t)}{d} + K \cdot x_{вх}(t)$ $x_{вых}(p) = K \cdot x_{вх}(p) \cdot (1+T\ )$ ***K*** - коэффициент пропорциональности ***T*** – постоянная времени	$W(p) = \frac{x_{вых}(p)}{x_{вх}(p)} = K \cdot (1+T\ )$			

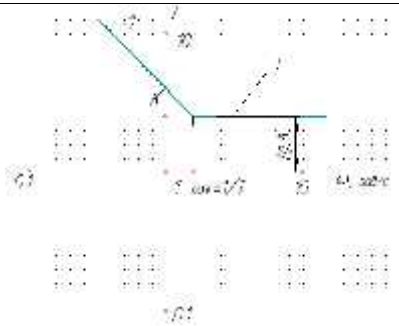
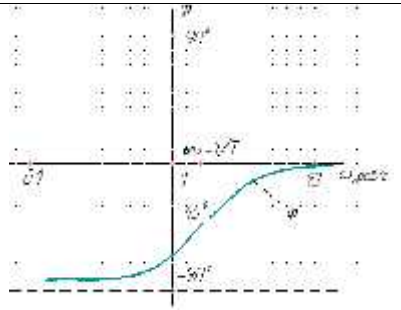
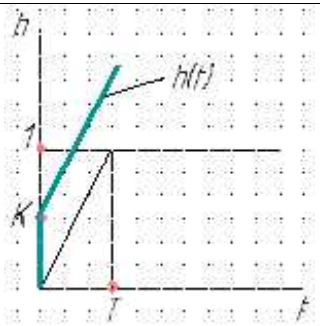
Изодромное	$T \cdot \frac{dx_{вых}(t)}{d} = K \frac{d_{вх}(t)}{d} + x_{вх}(t)$ $T \cdot x_{вых}(p) = K \cdot x_{вх}(p) + x_{вх}(p)$ ***K*** - коэффициент пропорциональности ***T*** – постоянная времени	$W(p) = \frac{x_{вых}(p)}{x_{вх}(p)} = \frac{1+K}{T}$			

Таблица 1 - Варианты практической работы для построения ЛАЧХ, ФЧХ и переходного процесса апериодического звена

Вар	Звено	Вар	Звено	Вар	Звено
1	$W(p)=\frac{1,1}{0,2p+1}$	10	$W(p)=\frac{1}{2,2p+1}$	19	$W(p)=\frac{1,1}{1,5p+1}$
2	$W(p)=\frac{1}{2,1p+1}$	11	$W(p)=\frac{2}{0,9p+1}$	20	$W(p)=\frac{1}{2p+1}$
3	$W(p)=\frac{3}{1,3p+1}$	12	$W(p)=\frac{2}{2,2p+1}$	21	$W(p)=\frac{1}{p+1}$
4	$W(p)=\frac{1,7}{0,6p+1}$	13	$W(p)=\frac{1}{1,7p+1}$	22	$W(p)=\frac{1,6}{p+1}$
5	$W(p)=\frac{1,7}{1,2p+1}$	14	$W(p)=\frac{1}{1,9p+1}$	23	$W(p)=\frac{1}{0,8p+1}$
6	$W(p)=\frac{2}{2,5p+1}$	15	$W(p)=\frac{2,1}{0,4p+1}$	24	$W(p)=\frac{1,5}{2p+1}$
7	$W(p)=\frac{1,5}{0,3p+1}$	16	$W(p)=\frac{1}{1,9p+1}$	25	$W(p)=\frac{1}{0,5p+1}$
8	$W(p)=\frac{1}{2,2p+1}$	17	$W(p)=\frac{2,1}{1,9p+1}$	26	$W(p)=\frac{1,8}{0,7p+1}$
9	$W(p)=\frac{2}{1,2p+1}$	18	$W(p)=\frac{1}{1,4p+1}$	27	$W(p)=\frac{1}{0,95p+1}$

Таблица 2 - Варианты практической работы для построения ЛАЧХ, ФЧХ и переходного процесса реально дифференцирующего звена

Вар	Звено	Вар	Звено	Вар	Звено
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
1	$W(p)=\frac{6p}{3p+1}$	10	$W(p)=\frac{p}{2p+1}$	19	$W(p)=\frac{5p}{2,5p+1}$
2	$W(p)=\frac{3p}{1,5p+1}$	11	$W(p)=\frac{p}{0,5p+1}$	20	$W(p)=\frac{2p}{2p+1}$
3	$W(p)=\frac{3p}{1,3p+1}$	12	$W(p)=\frac{0,7p}{3p+1}$	21	$W(p)=\frac{2,1p}{p+1}$
4	$W(p)=\frac{p}{1,6p+1}$	13	$W(p)=\frac{1,2p}{p+1}$	22	$W(p)=\frac{3p}{2p+1}$
5	$W(p)=\frac{0,6p}{p+1}$	14	$W(p)=\frac{1,5p}{2p+1}$	23	$W(p)=\frac{4p}{2p+1}$
6	$W(p)=\frac{2p}{1,5p+1}$	15	$W(p)=\frac{2p}{4p+1}$	24	$W(p)=\frac{0,8p}{2p+1}$

Продолжение таблицы 2

1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**

7	$W(p) = \frac{2{,}7p}{0{,}3p + 1}$	16	$W(p) = \frac{0{,}8p}{4p + 1}$	25	$W(p) = \frac{4p}{3p + 1}$
8	$W(p) = \frac{2{,}7p}{1{,}3p + 1}$	17	$W(p) = \frac{0{,}6p}{1{,}2p + 1}$	26	$W(p) = \frac{0{,}8p}{2p + 1}$
9	$W(p) = \frac{2p}{1{,}5p + 1}$	18	$W(p) = \frac{0{,}7p}{0{,}3p + 1}$	27	$W(p) = \frac{5p}{4p + 1}$

Таблица 3 - Варианты практической работы для построения ЛАЧХ, ФЧХ и переходного процесса реально форсирующего звена

Вар	Звено	Вар	Звено	Вар	Звено
1	W(p) = 2(1+2p)	10	W(p) = 0,8(1+2,5p)	19	W(p) = 0,8(1+p)
2	W(p) = 1,7(1+1,2p)	11	W(p) = 0,2(1+0,8p)	20	W(p) = 3,1(1+0,7p)
3	W(p) = 2,1(1+0,95p)	12	W(p) = 2,1(1+0,9p)	21	W(p) = 2(1+1,9p)
4	W(p) = 1,7(1+0,2p)	13	W(p) = 0,8(1+1,3p)	22	W(p) = 1,9(1+2,6p)
5	W(p) = 0,8(1+2p)	14	W(p) = 3(1+2,5p)	23	W(p) = 2(1+1,7p)
6	W(p) = 2,3(1+0,75p)	15	W(p) = 4(1+2p)	24	W(p) = 3(1+2,4p)
7	W(p) = 0,7(1+1,5p)	16	W(p) = 2(1+2,2p)	25	W(p) = 1,6(1+0,2p)
8	W(p) = 0,8(1+2p)	17	W(p) = 3(1+2p)	26	W(p) = 2,7(1+p)
9	W(p) = (1+3,2p)	18	W(p) = 2,7(1+1,5p)	27	W(p) = (1+2,4p)

Таблица 4 - Варианты практической работы для построения ЛАЧХ, ФЧХ и переходного процесса изодромного звена

Вар	Звено	Вар	Звено	Вар	Звено
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
1	$W(p) = \frac{1 + 6p}{3p}$	10	$W(p) = \frac{1 + 0{,}2p}{2p}$	19	$W(p) = \frac{1 + 5p}{2{,}5p}$
2	$W(p) = \frac{1 + 3p}{1{,}5p}$	11	$W(p) = \frac{1 + 2p}{0{,}5p}$	20	$W(p) = \frac{1 + 2p}{2p}$
3	$W(p) = \frac{1 + 3p}{1{,}3p}$	12	$W(p) = \frac{1 + 0{,}7p}{3p}$	21	$W(p) = \frac{1 + 2{,}1p}{p}$
4	$W(p) = \frac{1 + p}{1{,}6p}$	13	$W(p) = \frac{1 + 1{,}2p}{p}$	22	$W(p) = \frac{1 + 3p}{2p}$

5	$W(p) = \frac{1 + 0{,}6\text{p}}{\text{p}}$	14	$W(p) = \frac{1 + 1{,}5\text{p}}{2\text{p}}$	23	$W(p) = \frac{1 + 4\text{p}}{2\text{p}}$

Продолжение таблицы 4

1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
6	$W(p) = \frac{1 + 2\text{p}}{1{,}5\text{p}}$	15	$W(p) = \frac{1 + 2\text{p}}{4\text{p}}$	24	$W(p) = \frac{1 + 0{,}8\text{p}}{2\text{p}}$
7	$W(p) = \frac{1 + 2{,}7\text{p}}{0{,}3\text{p}}$	16	$W(p) = \frac{1 + 0{,}8\text{p}}{4\text{p}}$	25	$W(p) = \frac{1 + 4\text{p}}{3\text{p}}$
8	$W(p) = \frac{1 + 2{,}7\text{p}}{1{,}3\text{p}}$	17	$W(p) = \frac{1 + 0{,}6\text{p}}{1{,}2\text{p}}$	26	$W(p) = \frac{1 + 0{,}8\text{p}}{2\text{p}}$
9	$W(p) = \frac{1 + 2\text{p}}{1{,}5\text{p}}$	18	$W(p) = \frac{1 + 0{,}7\text{p}}{0{,}3\text{p}}$	27	$W(p) = \frac{1 + 2{,}5\text{p}}{4\text{p}}$

Примечание: № варианта соответствует порядковому номеру студента в журнале**.**

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дифференциальное уравнение звена.
2. Передаточная функция звена.
3. Реальные динамические звенья.
4. Правила построения ЛАЧХ, ФЧХ и переходного процесса.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

Тема: Построение ЛАЧХ и ФЧХ последовательного соединения звеньев

Цели и задачи урока:

Научиться определять передаточную функцию последовательного соединения звеньев, строить логарифмические характеристики ЛАЧХ, ФЧХ, строить суммирующие амплитудные и фазовые частотные характеристики и на ПК проверить правильность построения суммирующих характеристик.

Тип урока – практическое занятие.
Методы обучения – репродуктивный и проблемный.
Обеспечение занятия - вычислительные средства.

Ход урока

1. По заданным параметрам своего варианта определить передаточную функцию последовательного соединения звеньев.
2. Построить ЛАЧХ и ФЧХ каждого динамического звена, а также последовательного соединения звеньев.
3. Оформить практическую работу.
4. Ответить на контрольные вопросы.

Последовательным называется такое соединение, когда выходная величина предыдущего звена является входной величиной последующего.

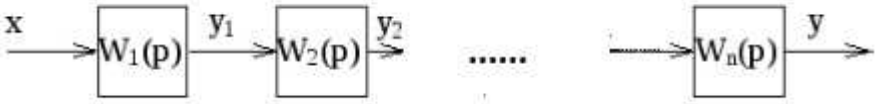


Рисунок 1 – Структурная схема последовательного соединения звеньев

Преобразование схемы: цепочку из последовательно соединенных звеньев можно заменить одним звеном:

Тогда, передаточная функция:

$$W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_n(p)$$

Таким образом, **передаточная функция системы из последовательно соединенных звеньев равна произведению передаточных функций отдельных звеньев.**

Логарифмические частотные характеристики.

Частотные характеристики строятся в логарифмическом масштабе.

Пример построения результирующих частотных характеристик представлен на рисунке 2.

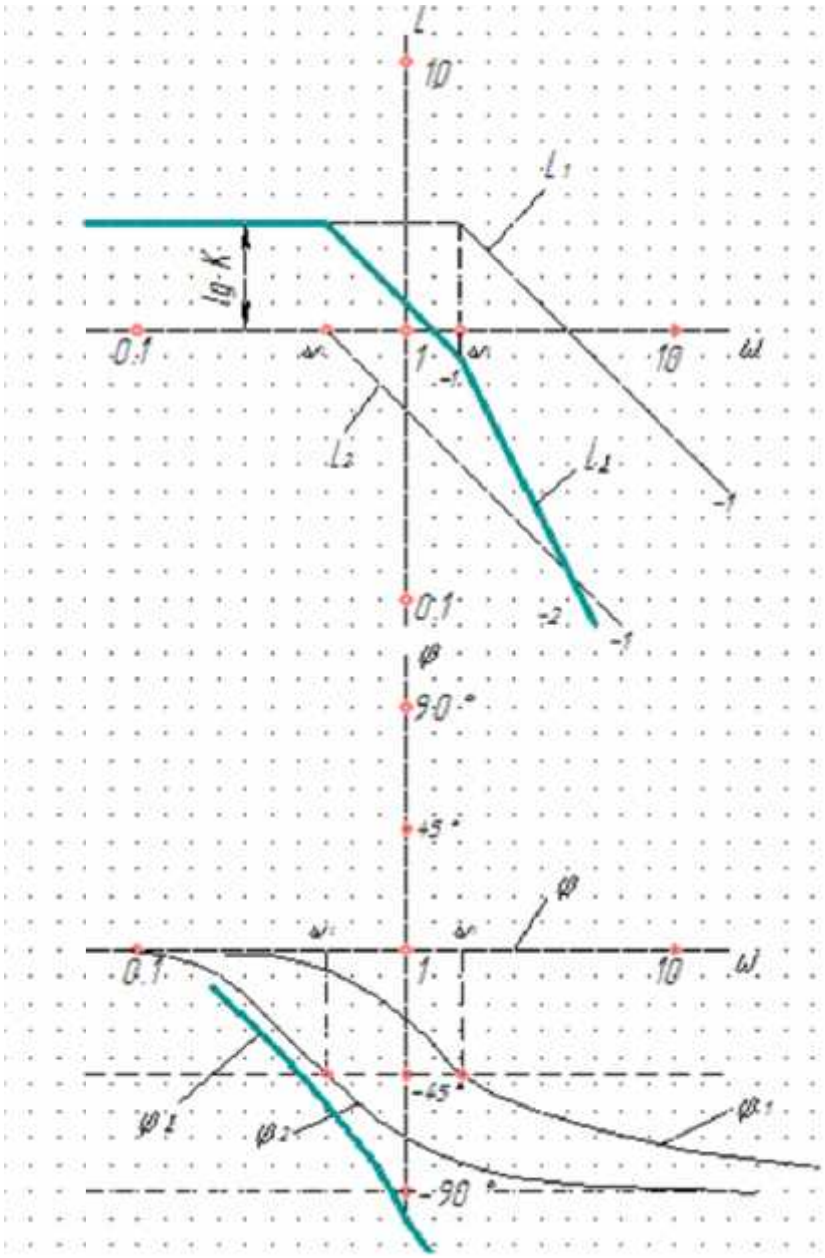


Рисунок 2 - Пример построения результирующих частотных характеристик

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Передаточная функция звена (системы).

2. Последовательное соединение звеньев.
3. Как определяется передаточная функция при последовательном соединении звеньев?
4. Амплитудно-частотная характеристика.
5. Фазо-частотная характеристика.
6. Как строятся логарифмические частотные характеристики?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

Тема: Построение ЛАЧХ и ФЧХ параллельного соединения звеньев

Цели и задачи урока:
Научиться определять передаточную функцию системы, строить логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики.

Тип урока – практическое занятие.
Методы обучения – репродуктивный и проблемный.
Обеспечение занятия - вычислительные средства.

Ход урока

1. По заданным параметрам своего варианта определить передаточную функцию параллельного соединения звеньев.
2. Построить ЛАЧХ и ФЧХ соединения.
3. Оформить практическую работу.
4. Ответить на контрольные вопросы.

Параллельным называется такое соединение звеньев, при котором один и тот же входной сигнал подается на вход всех звеньев, а выходная величина равна сумме выходных величин отдельных звеньев.

Преобразование схемы: цепочку из параллельно соединенных звеньев можно заменить одним звеном:

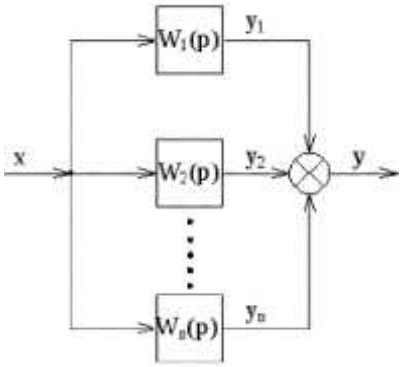
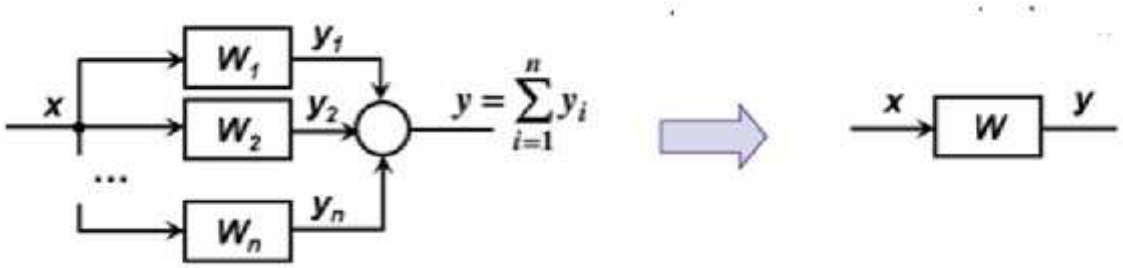


Рисунок 1 - Структурная схема параллельного соединения звеньев

Преобразование схемы: цепочку из параллельно соединенных звеньев можно заменить одним звеном:



Тогда, передаточная функция:

$$W(p) = W_1(p) + W_2(p) + W_n(p)$$

Таким образом, **передаточная функция системы, состоящей из параллельно соединенных звеньев, равна сумме передаточных функций отдельных звеньев**.

Логарифмические частотные характеристики.

Частотные характеристики строятся в логарифмическом масштабе.

Пример построения результирующих частотных характеристик представлен на рисунке 2.

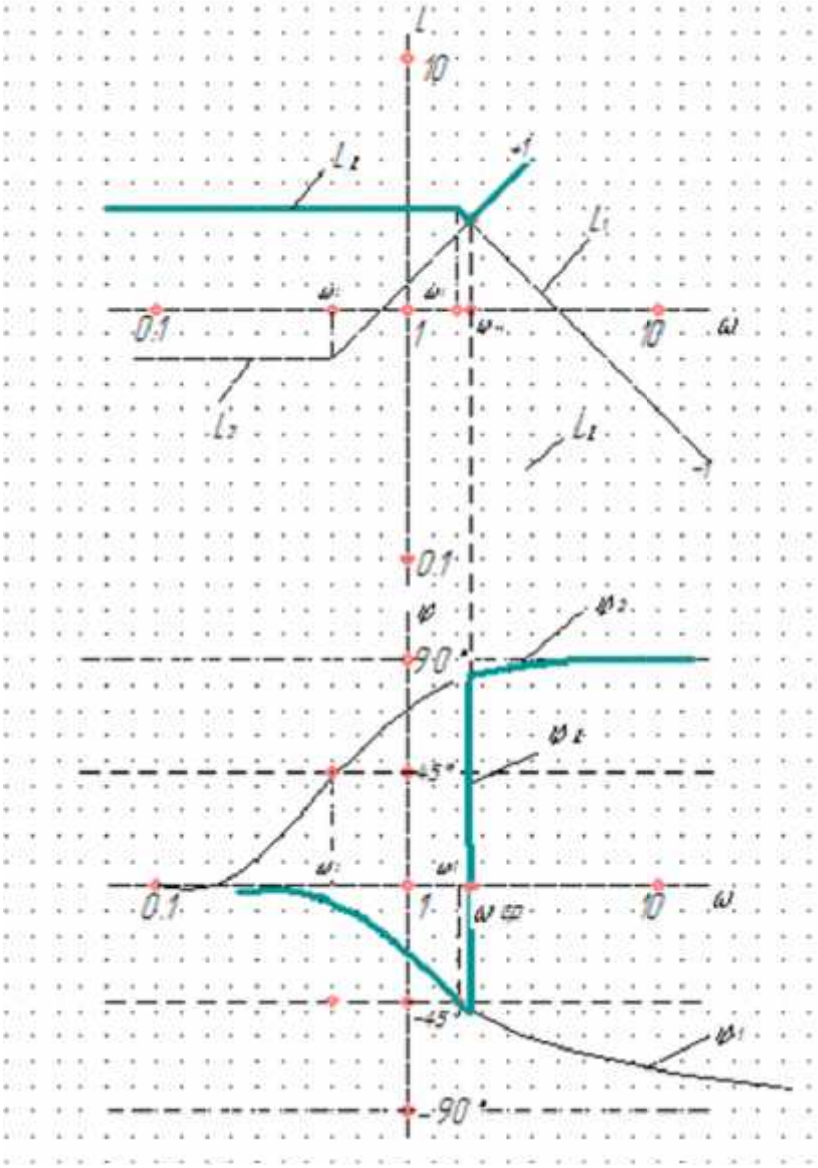


Рисунок 2 - Пример построения результирующих частотных характеристик

При параллельном соединении звеньев результирующие характеристики получаются следующим образом:

1. строятся ЛАЧХ и ФЧХ каждого канала – L1(ω), L2(ω), φ1(ω), φ2(ω);
2. суммирующая ЛАЧХ совпадает с ЛАЧХ того звена, у которого больше модуль;
3. суммирующая ФЧХ выбирается в соответствии с полученной ЛАЧХ.

При построении суммирующих характеристик вводится понятие частоты среза.

Частота среза – это частота, на которой модуль АЧХ прямого канала совпадает с модулем АЧХ обратного канала: $\omega_{ср}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Передаточной функция звена (системы).
2. Параллельное соединение звеньев.
3. Как определяется передаточная функция при параллельном соединении звеньев?
4. Амплитудно-частотная характеристика.
5. Фазо-частотная характеристика.
6. Как строятся результирующие ЛАЧХ и ФЧХ при параллельном соединении звеньев?
7. Частота среза.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

Тема: Построение ЛАЧХ и ФЧХ встречно-параллельного соединения звеньев

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Научиться определять передаточную функцию системы, строить логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики.

2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. По заданным параметрам своего варианта определить передаточную функцию системы.
2. Построить ЛАЧХ и ФЧХ соединения.
3. Оформить практическую работу.
4. Ответить на контрольные вопросы.

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Встречно-параллельным соединением звеньев называется такое, когда на вход звена одновременно с входной величиной подается ее выходная величина, прошедшее через звено обратной связи с передаточной функцией Woc(p).

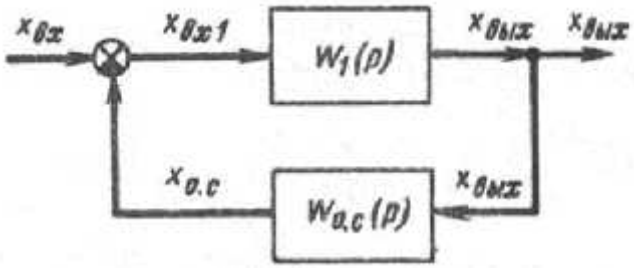
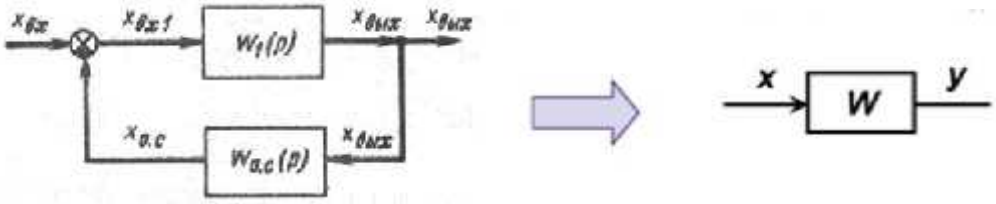


Рисунок 1 – Структурная схема встречно-параллельного соединения звеньев

Передаточная функция соединения с отрицательной обратной связью:



$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_{O.C}(p)}$$

Передаточная функция соединения с отрицательной обратной связью равна отношению: в числителе – передаточная функция соединения, которое охвачено обратной связью, в знаменателе – 1 + та же передаточная функция, умноженная на передаточную функцию звена обратной связи.

Если же обратная связь положительная, то передаточная функция определяется по формуле:

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 - W_1(p) \cdot W_{O.C}(p)}$$

Логарифмические частотные характеристики.

Частотные характеристики строятся в логарифмическом масштабе.

Пример построения результирующих частотных характеристик представлен на рисунке 2.

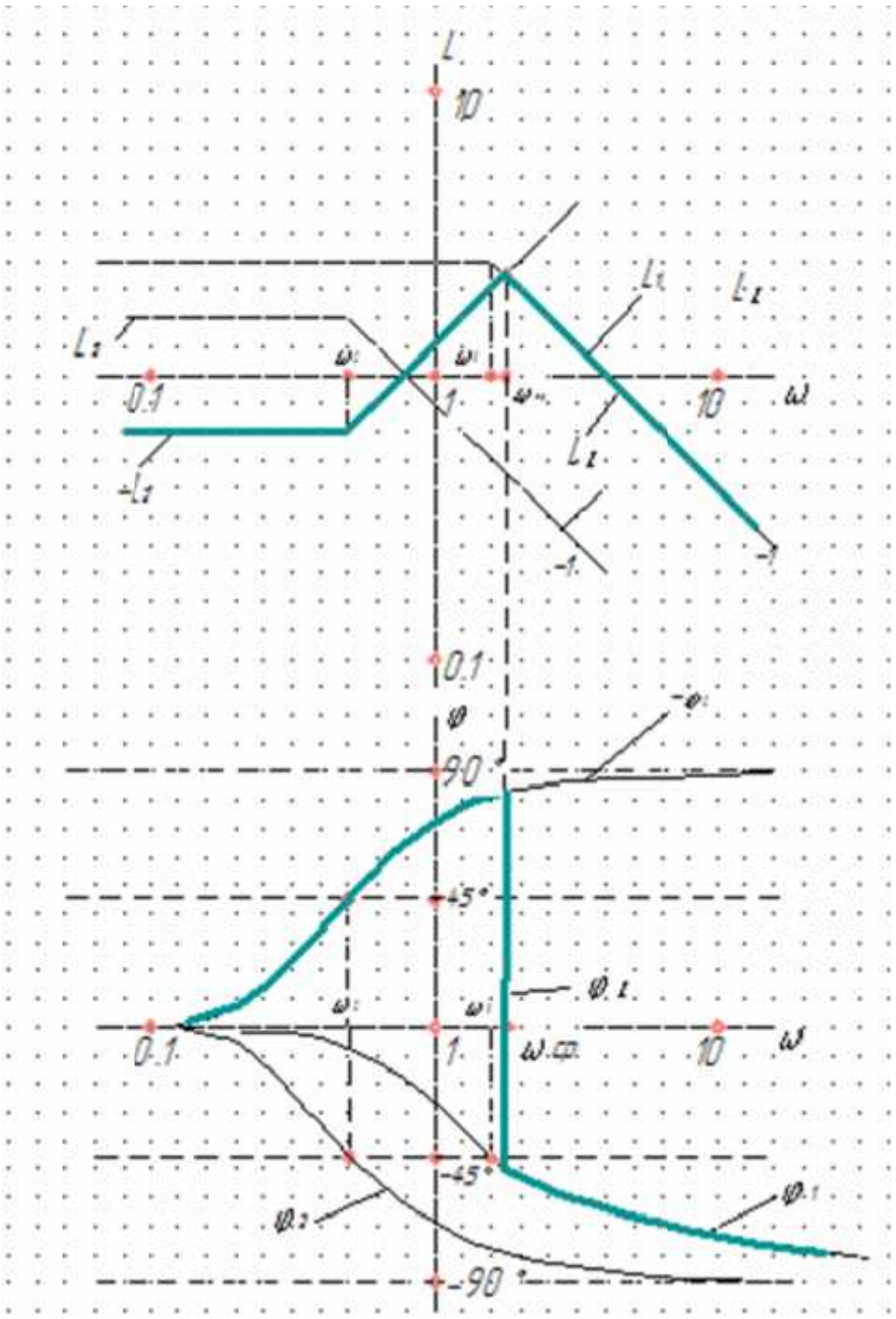


Рисунок 2 - Пример построения результирующих частотных характеристик

При встречно-параллельном соединении звеньев результирующие характеристики получаются следующим образом:

1. строятся ЛАЧХ и ФЧХ прямого канала: L1(ω), L2(ω), φ1(ω) и φ2(ω);

2. строят обратные ЛАЧХ и ФЧХ канала обратной связи: -Loc(ω) и -φос(ω);

3. суммирующая ЛАЧХ совпадает с ЛАЧХ того звена, у которого меньше модуль;

4. суммирующая ФЧХ приравнивается к соответствующей ФЧХ звеньев, определяемых по минимальному модулю ЛАЧХ.

При построении суммирующих характеристик вводится понятие частоты среза.

Частота среза – это частота, на которой модуль АЧХ прямого канала совпадает с модулем АЧХ обратного канала: $\omega_{ср}$.

4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Передаточная функция звена (системы).
2. Встречно-параллельное соединение звеньев.
3. Как определяется передаточная функция при встречно-параллельном соединении звеньев?
4. Амплитудно-частотная характеристика.
5. Фазо-частотная характеристика.
6. Как строятся результирующие ЛАЧХ и ФЧХ при встречно-параллельном соединении звеньев?
7. Частота среза.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

Определение передаточных функций сложных многоконтурных систем

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Научиться определять передаточную функцию многоконтурной системы автоматического регулирования и управления.

2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Преобразовать многоконтурную систему в одноконтурную методом эквивалентного преобразования структурных схем.
2. Определить передаточную функцию многоконтурной системы.
3. Оформить практическую работу.
4. Ответить на контрольные вопросы.

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Системы, в которых имеется не только главная обратная связь, но и дополнительные связи (прямые и обратные) называются **многоконтурными**.

Усложнение современных АСР производится путем преобразования одноконтурных систем в многоконтурные с помощью подключения дополнительных датчиков, внешних обратных связей, корректирующих сигналов.

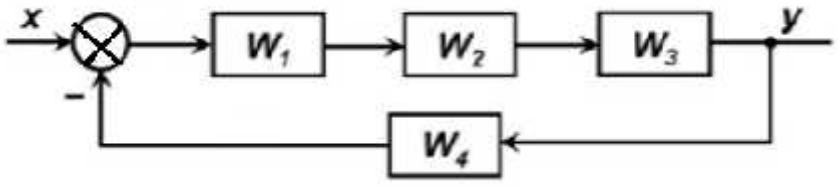


Рисунок 1 – Структурная схема многоконтурной системы

Для получения передаточной функции такой сложной системы необходимо выделить главный контур, а потом схему упростить по **правилам эквивалентного преобразования** структурных схем. Суть такого преобразования состоит в замене отдельных групп звеньев эквивалентным звеном, предварительно подсчитав его передаточную функцию. В конечном итоге многоконтурная система преобразуется в одноконтурную.

В процессе преобразования устанавливается также общая входная и выходная величины.

В итоге получаем одноконтурную систему с передаточной функцией:

$$W_{э1}(\text{p}) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p)$$

$$W_{э2}(p) = \frac{W_{э1}(p)}{1 + W_{э1}(p) \cdot W_4(p)}$$

4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Структурная схема АСР
2. Одноконтурные схемы
3. Многоконтурные АСР
4. Передаточная функция системы
5. Правила эквивалентного преобразования структурных схем

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Снятие кривой разгона объекта управления и определение основных параметров

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Научиться экспериментальным путем снимать кривую разгона и по данной характеристике определять основные параметры: коэффициент объекта, запаздывание, постоянное время.

2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить методику экспериментального определения кривых разгона объекта управления и определить кривые разгона по каналам регулирования и возмущения для системы отопления.

2. Определить по кривой разгона методом графического построения основные параметры: коэффициент объекта, запаздывание, постоянное время.

3. Оформить лабораторную работу

4. Ответить на контрольные вопросы

2 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Изучаемый объект

Лабораторный стенд «Автоматизация системы отопления».

Рисунок 1 – Технологическое оборудование лабораторного стенда

Конструкция стенда позволяет имитировать весь технологический процесс работы системы отопления и обеспечивает выполнение режимов работы средств автоматизации и процессов контроля и регулирования технологических параметров таких, как температура, давление теплоносителя, а также температура окружающей среды.

Системы автоматизации включают оборудование:

1 – датчик давления теплоносителя;

2 – датчик температуры теплоносителя;

3 – датчик температуры окружающей среды;

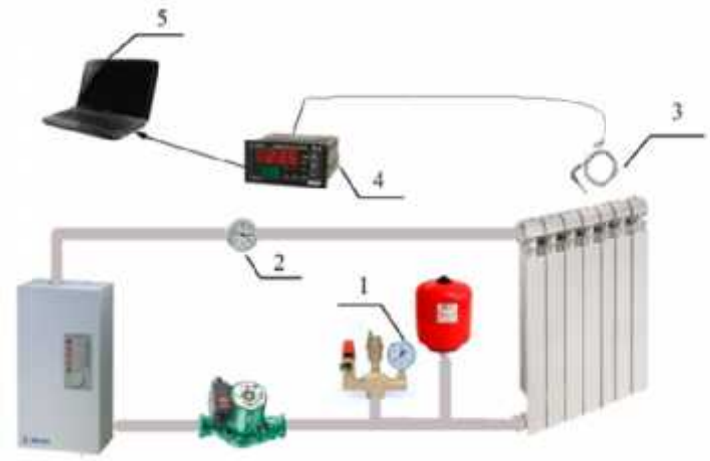
4 – ПИД – регулятор ОВЕН ТРМ 210;

5 – персональный компьютер.

Используются современные средства контроля технологических параметров потоками теплоносителя, средства сбора информации и управления процессом.

ПИД-регулятор ОВЕН ТРМ 210 предназначен для точного поддержания заданных параметров в различных технологических процессах. Измеритель-регулятор ОВЕН ТРМ 210 стенда имеет интерфейс связи с персональным компьютером.

С помощью компьютерной программы Owen Process Manager управления и системы сбора, обработки первичной информации, позволяет оперативно контролировать и обрабатывать все протекающие процессы, делать анализ и вносить необходимые корректировки в работу стенда.



1 - манометр; 2 – термометр; 3 – датчик температуры окружающей среды; 4 – измеритель-регулятор ОВЕН ТРМ 210; 5-ПК с программным обеспечением Owen Process Manager

Рисунок 2 – Системы контроля и регулирования системы отопления

Кривая разгона – это график изменения регулируемой величины во времени при подачи на вход объекта скачкообразного возмущения, равного единице (1% хода регулирующего органа).

Таким образом, основными параметрами объектов регулирования, которые используются при расчетах необходимого закона регулирования и параметров настройки регулятора являются: коэффициент передачи Кр, постоянная времени Тоб и время запаздывания τ.

Построение кривой разгона по каналу регулирования

1. Задаем ступенчатое изменение $X_{рег}$, ждем, когда объект стабилизируется ($X_{вых}(t)=const$).

2. От момента задания возмущения до момента стабилизации по выходному каналу строим кривую разгона.

Кривая разгона с обозначениями параметров кривой

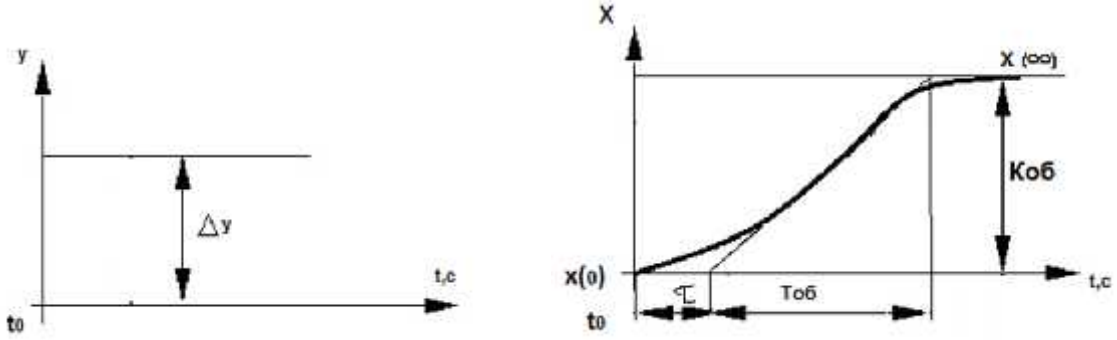


Рисунок 1а – График скачкообразного единичного возмущения

Рисунок 1б – График изменения регулируемой величины под действием возмущения

Рисунок 1 – Кривая разгона для статических объектов

На рисунке 1 представлена типовая форма кривой разгона для статических объектов и показана методика определения параметров объекта регулирования.

После построения по кривой разгона необходимо найти:

- тоб (с) – время запаздывания – отрезок времени от момента введения возмущения t0 до точки пересечения касательной с линией начального установившегося значения регулируемой величины;

- Тоб (с) – постоянная времени – отрезок времени, отсекаемый касательной от начального до конечного установившегося значения регулируемой величины;

- Коб – коэффициент передачи объекта – величина отклонения регулируемой величины в процессе самовыравнивания при возмущении, равном единице (1% хода регулирующего органа);

- тоб/ Тоб – степень инерционности.

4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Кривая разгона.

2. Динамические характеристики объекта управления: запаздывание, самовыравнивание, емкость, инерционность.

3. Основные параметры: коэффициент объекта, запаздывание, постоянное время, степень инерционности.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

Правила эквивалентного преобразования сложных систем управления

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Научиться определять передаточную функцию многоконтурной системы автоматического регулирования и управления.

2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Преобразовать многоконтурную систему в одноконтурную методом эквивалентного преобразования структурных схем.

2. Определить передаточную функцию многоконтурной системы.

3. Оформить практическую работу.

4. Ответить на контрольные вопросы.

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Одноконтурными называются такие системы, в которых звенья соединены между собой связями, образующими только один контур. Они имеют только одну главную отрицательную обратную связь.

В таких системах сигнал проходит через все звенья и возвращается в ту же точку по одному пути. Это простейшие системы для регулирования одного параметра, так называемые локальные системы.

Системы, в которых имеется не только главная обратная связь, но и дополнительные связи (прямые и обратные) называются **многоконтурными**.

Усложнение современных АСР производится путем преобразования одноконтурных систем в многоконтурные с помощью подключения дополнительных датчиков, внешних обратных связей, корректирующих сигналов.

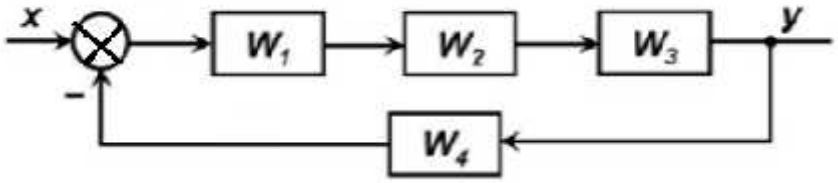


Рисунок 1 – Структурная схема многоконтурной системы

Для получения передаточной функции такой сложной системы необходимо выделить главный контур, а потом схему упростить по **правилам эквивалентного преобразования** структурных схем. Суть такого преобразования состоит в замене отдельных групп звеньев эквивалентным звеном, предварительно подсчитав его передаточную функцию. В конечном итоге многоконтурная система преобразуется в одноконтурную.

В процессе преобразования устанавливается также общая входная и выходная величины.

В итоге получаем одноконтурную систему с передаточной функцией:

$$W_{Э1}(\mathrm{p}) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p)$$

$$W_{Э2}(p) = \frac{W_{Э1}(p)}{1 + W_{Э1}(p) \cdot W_4(p)}$$

4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Структурная схема АСР
2. Одноконтурные схемы
3. Многоконтурные АСР
4. Передаточная функция системы
5. Правила эквивалентного преобразования структурных схем

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

Интерфейс и принципы построения моделей в программном комплексе «МВТУ»

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Знакомство с принципами построения моделей, с интерфейсом ПК «МВТУ» и приобретение элементарных навыков работы с ним.

2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с основной панелью программы.
2. Изучить основные элементы, позволяющие создавать модель и управлять ею.
3. Создать и исследовать простейшие виртуальные модели.
4. Оформить практическую работу.
5. Ответить на контрольные вопросы.

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

3.1 Принципы моделирования в ПК «МВТУ»

Принцип моделирования в ПК "МВТУ" состоит в создании и исследовании виртуального аналога реальной системы – модели. Модель функционирует в соответствии с теми же уравнениями, что и моделируемая система. При моделировании не обязательно записывать эти уравнения в явном виде, об этом позаботится программа. Модель составляется пользователем в специальном окне программы соединением отдельных виртуальных блоков, соответствующих элементам реальной системы.

Виртуальные блоки условно внешне представляются на рабочем пространстве окна модели прямоугольниками, т.е. они видимы исследователю, имеют входы и (или) выходы и функционируют в соответствии с определенными уравнениями, алгоритм решения которых реализуется в цифровом виде. Под функционированием виртуального блока понимается то, что он реагирует на виртуальные воздействия (функции времени), подаваемые другими блоками на его вход, определенным изменением величины выходного сигнала.

Взаимодействие между блоками условно отображается на рабочем пространстве окна модели в виде соединительных линий. Соединительные линии в ПК «МВТУ», как и блоки, являются однонаправленными, передают виртуальные воздействия только в одном направлении. Другими словами, последующие блоки и звенья не влияют на работу предыдущих. Для модели электрической цепи, например, это означает, что выходное сопротивление предыдущего блока значительно меньше входного сопротивления последующего блока. Сигналы, действующие в модели можно наблюдать и регистрировать виртуальными индикаторами. Для этого программа создает специальные окна с временными, частотными графиками, фазовыми портретами и др.

Параметры и характеристики блоков, как и структуру схемы модели, исследователь может изменять. Программа предоставляет возможность вычислять различные характеристики построенных моделей, в частности амплитудно-частотные, анализируя которые можно глубоко изучить свойства модели, а, следовательно, и моделируемой реальной системы.

Модель ПК «МВТУ» может быть сохранена в виде отдельного файла и, при необходимости, открыта вновь.

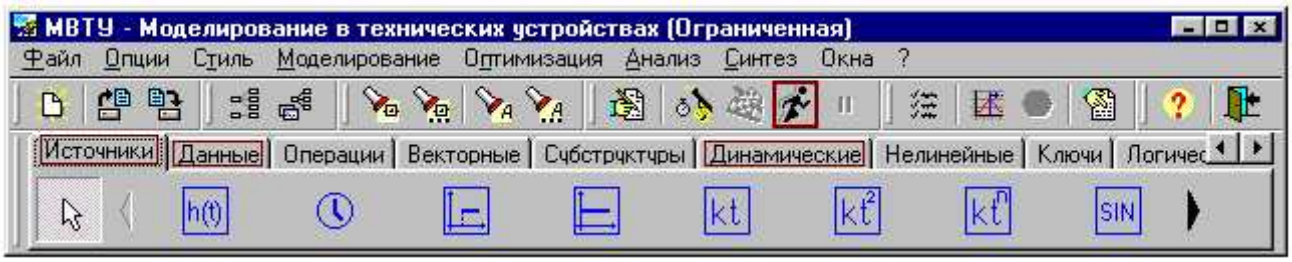
3.2 Интерфейс ПК «МВТУ»

Интерфейс программы это совокупность средств, позволяющих человеку общаться с ней:

- вводить и получать данные,
- подавать управляющие воздействия и наблюдать реакцию на них программы,
- контролировать ход ее выполнения и т.п.

Программный комплекс «МВТУ» использует развитой графический интерфейс, позволяющий основную часть создания модели выполнить с помощью мыши, а параметры элементов ввести с клавиатуры. Интерфейс ПК «МВТУ» состоит из основной панели (главного окна), имеющей меню и ряд кнопок управления, воспринимающих щелчки копок мыши, и совокупности окон, в которых строится модель и наблюдаются результаты ее работы.

Основная панель – главное окно программы, появляющееся в верхней части экрана после запуска ПК «МВТУ» (рисунок 1).



Выделены кнопка Пуск (Продолжить расчет) и три важных вкладки **Палитры** с наборами элементов (виртуальных блоков), которые будут использоваться при моделировании: **Источники** сигналов (генераторы) – вкладка открыта, **Данные** (индикаторы и регистраторы) и **Динамические** блоки (элементы линейных систем и систем в целом)

Рисунок 1 - Основная панель ПК «МВТУ»

Верхняя часть главного окна – панель управления. Она содержит меню и кнопки управления и настройки. Нижняя часть главного окна - это **Палитра** блоков – структурированный набор вкладок, содержащих образцы моделей различных элементов, которые могут быть

вынесены в окно модели (схемное окно). При необходимости палитра блоков может быть перенесена на другое место или вовсе удалена с экрана для освобождения места для схемы модели, индикаторов и др. На рисунке 1 выделены три важных набора элементарных блоков: генераторы, индикаторы и модели линейных элементов, которые позволяют строить модели линейных систем и объектов и будут подробнее рассмотрены ниже. Кнопки в правой верхней части палитры позволяют просматривать и другие вкладки, с наборами соответствующих блоков, в частности, вкладку **Анимация**.

3.3 Основные элементы модели

Генераторы сигналов

Генераторы сигналов размещены на вкладке Источники основной панели (рисунок 2):

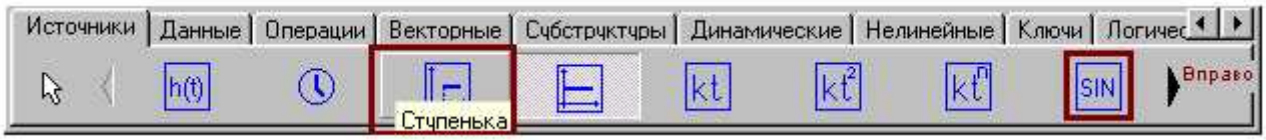


Рисунок 2 - Часть набора виртуальных генераторов, имеющихся на вкладке **Источники**. Важными источниками сигналов являются генераторы ступенчатого и синусоидального сигналов. Кнопка со стрелкой Вправо позволяет посмотреть и другие источники сигналов

Элементы линейных систем

Блоки, моделирующие элементы линейных систем и объектов различной сложности помещены на вкладке **Динамические** (рисунок 3):

Рисунок 3 - На вкладке **Динамические** блоки помещены образцы моделей элементов линейных систем. Для начала, обратим внимание на интегратор, апериодическое и колебательное звенья

Индикаторы и регистраторы

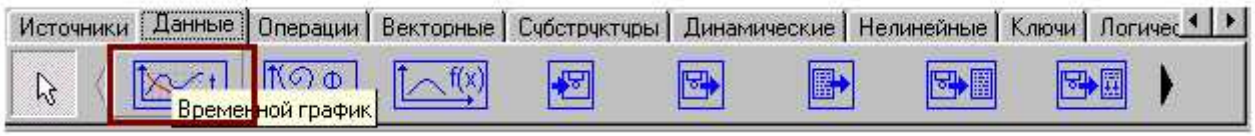


Рисунок 4 - Важный регистратор – виртуальный осциллограф (блок Временной график)

Примечание: программа позволяет создавать и собственные варианты индикаторов с помощью инструментов, расположенных на вкладке **Анимация** (в правой части **Палитры**).

Соединительные линии

Соединительные линии позволяют отобразить взаимодействие между отдельными элементами реальной системы. В ПК «МВТУ» соединительные линии однонаправленные: они передают виртуальные сигналы с выходов блоков на их входы. Это означает, что в моделируемых системах последующие блоки не должны влиять на работу предыдущих блоков. Такое требование следует выполнить при составлении функциональной схемы моделируемой системы, должным образом выделяя ее функциональные элементы. Линии проводятся от одного блока модели к другому с помощью мыши. Пример соединительных линий можно видеть в левом нижнем окне модели рисунок 5.

3.4 Простая модель

На рисунке 5 показана простая модель, состоящая всего из одного блока – апериодического звена и результаты его исследования, состоявшего в определении реакции этого звена на ступенчатое воздействие, так называемой переходной функции.

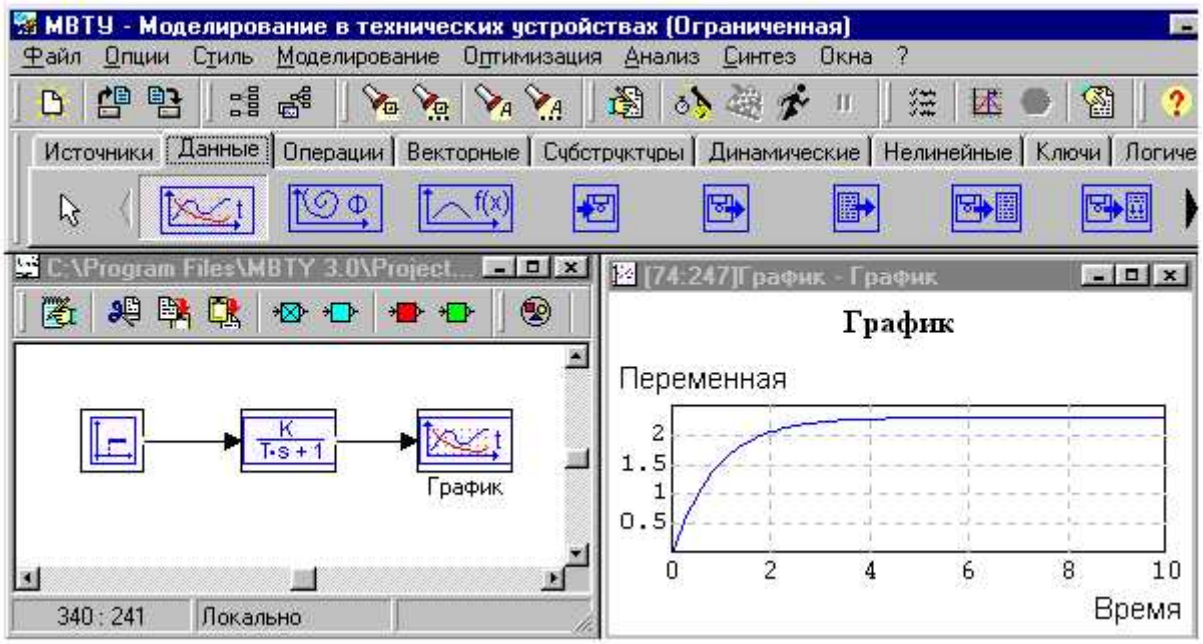


Рисунок 5 - Определение переходной функции апериодического звена. На левое нижнее окно модели вынесены генератор ступенчатого сигнала, апериодическое звено, осциллограф и соединены друг с другом. При запуске модели, нажатием на кнопку Пуск (Продолжить расчет CTRL+ F9) - бегущий человечек, на осциллографе появляется график реакции звена на ступенчатое воздействие – его переходная функция

Виртуальный генератор в нулевой момент времени подает на вход апериодического звена ступенчатое единичное воздействие, на которое звено откликается все замедляющимся ростом выходного сигнала. Виртуальный осциллограф позволяет увидеть изменение выходного сигнала звена с течением времени и проанализировать его.

3.5. Поясняющие надписи.

Сопровождение модели поясняющими надписями позволяет облегчить ее восприятие и работу с ней. В пояснении нужно указать кто, когда и какую модель создал. В ПК «МВТУ» можно создавать пояснения двух видов: заметку, текст которой виден вместе с блоками модели и комментарий, текст которого открывается в отдельном окне, при двукратном щелчке по квадратному блоку со знаком вопроса. Блоки заметки (без обозначения) и комментария (квадрат со знаком вопроса) «затерялись» в правой части вкладки Субструктуры (рисунок 6):

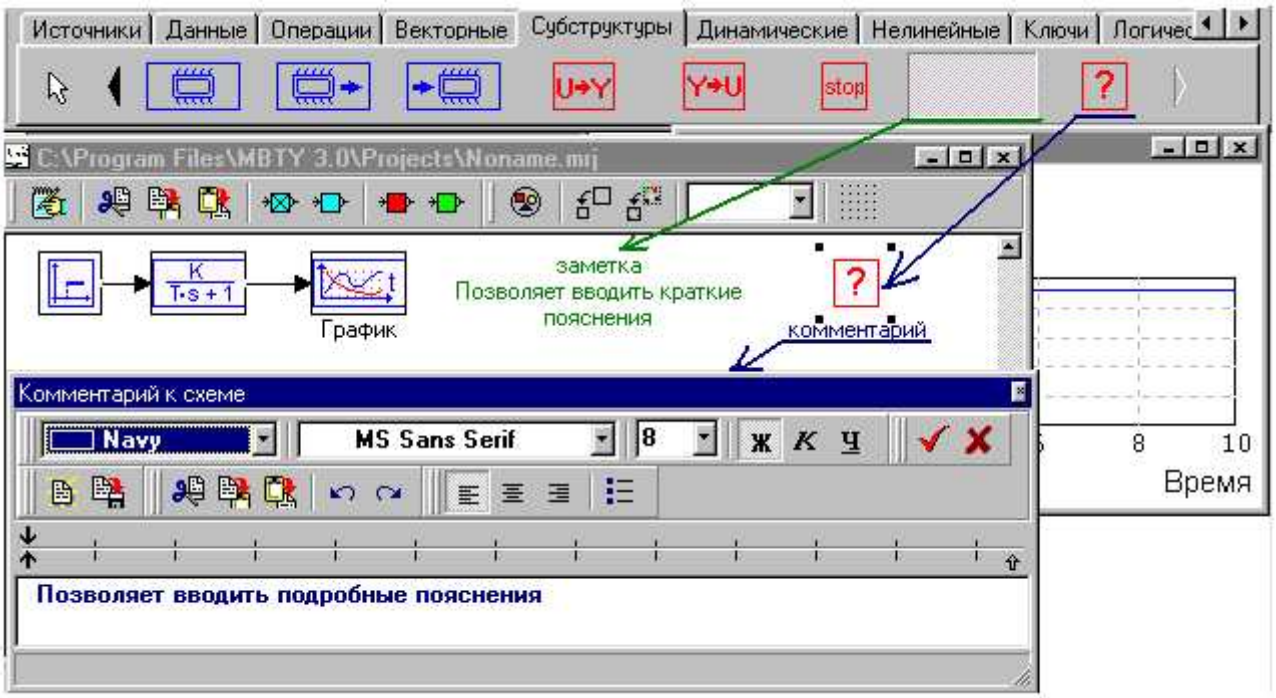


Рисунок 6 - Блоки заметка и комментарий выносятся на рабочее пространство окна модели с вкладки Субструктуры. Внизу показано окно просмотра и редактирования комментария

4 ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

4.1. Запуск программы

Запустить программный комплекс «МВТУ» двойным щелчком по иконке на рабочем столе, или Пуск – Программы – МВТУ 3.0 – МВТУ 3.0. В верхней части экрана появится основное окно ПК "МВТУ" (рисунок 1).

4.2 Исследование апериодического звена

Исследовать апериодическое звено, построив модель рисунок 5. Для этого:

1) Создать новый проект:

Выбрать в главном меню **Файл** -> **Создать** или щелкнуть по соответствующей иконке основной панели (рисунок 7).

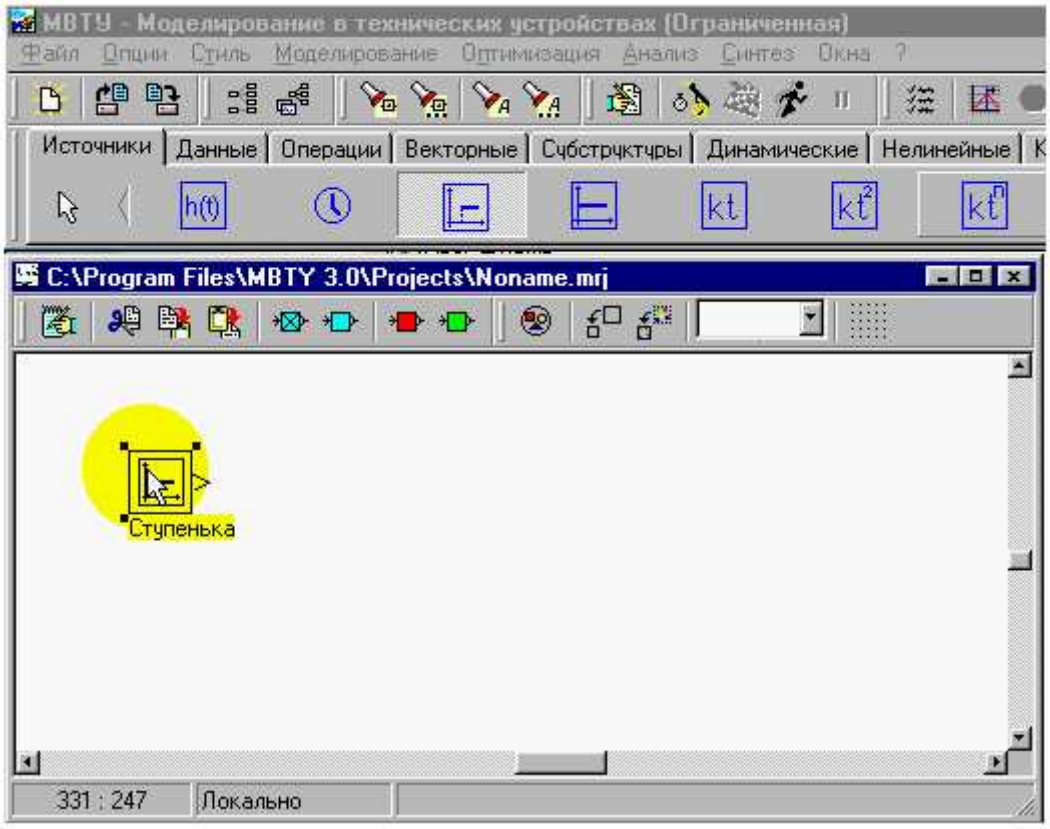


Рисунок 7 - Окно модели нового проекта, запускаемого кнопкой Новый, и вынесение генератора ступенчатого сигнала на рабочее пространство окна

2) Построить модель

Поместить на рабочее пространство окна модели блоки генератора ступенчатого сигнала с вкладки **Источники,** апериодического звена с вкладки **Динамические**, осциллографа (Временной график) с вкладки **Данные**. Для помещения блока следует щелкнуть по его обозначению на вкладке палитры, перенести курсор на нужное место рабочего пространства окна модели и вновь щелкнуть левой кнопкой.

Выровнять расположение блоков и соединить их. Соединение блоков требует определенной сноровки и навыка. Для соединения нужно щелкать на выходе одного блока, курсор принимает вид прицела, и при **отпущенной** кнопке мыши перемещать курсор к входу другого блока, где вновь щелкать левой кнопкой (рисунок 8). Если соединительная линия не удалась, то ее можно удалить, щелкнув по ней правой клавишей и выбрав пункт меню **Удалить линию в связи**.

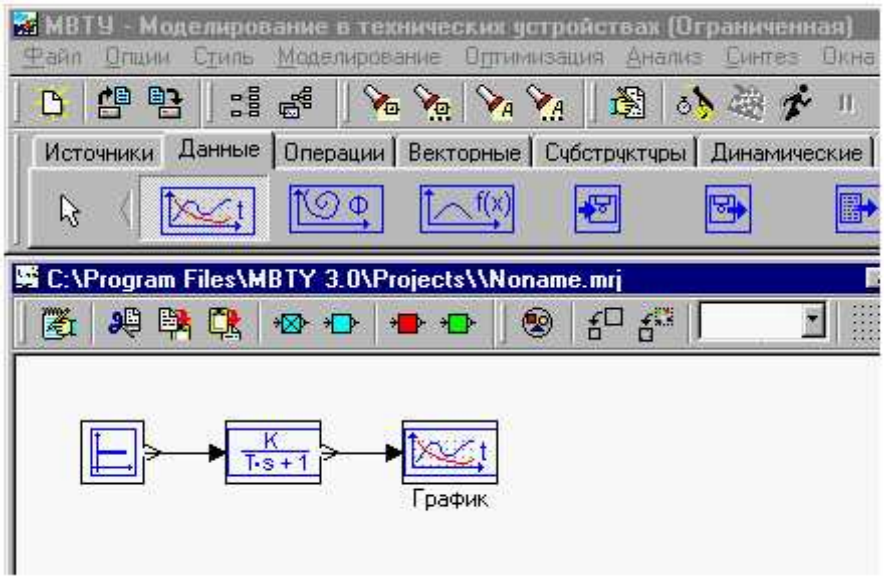


Рисунок 8 - Размещение блоков в окне модели и соединение их. Для приостановки анимации следует щелкнуть по кнопке Стоп браузера, а для продолжения – по кнопке Обновить

Дважды щелкнуть по блоку осциллографа (График), его появившееся окно переместить на свободное место вправо и подравнять размеры и расположение окон (рисунок 9).

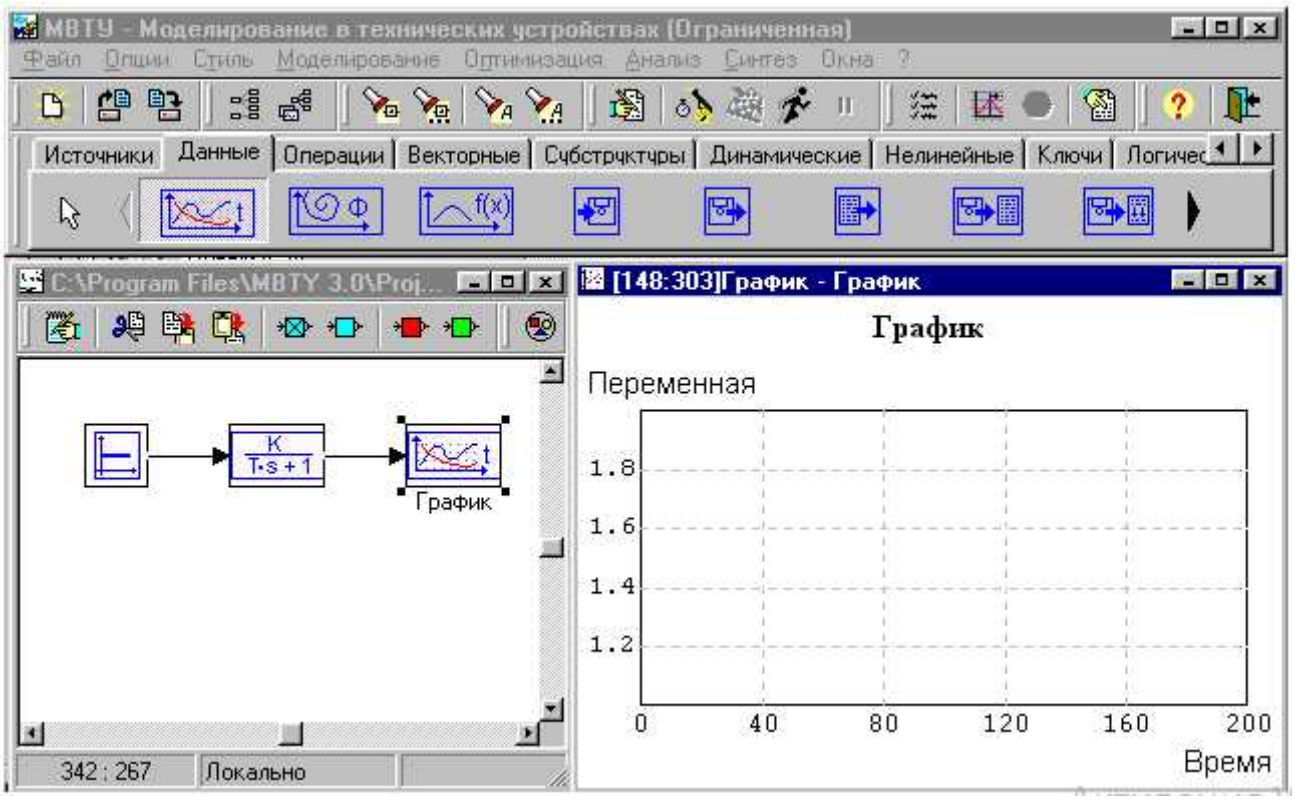


Рисунок 9 - Размещение окна виртуального осциллографа

3) Задание свойств блока апериодического звена

Напомним, что передаточная функция апериодического звена имеет вид:

$$W(p) = \frac{k}{T \quad + 1}$$

где k – коэффициент усиления звена;

T – постоянная времени звена.

Щелкнуть правой клавишей по апериодическому звену в окне модели, в появившемся меню выбрать Свойства. В появившемся окне ввести значение коэффициента усиления 2.3 и значение постоянной времени звена 0.9 сек (рисунок 10).

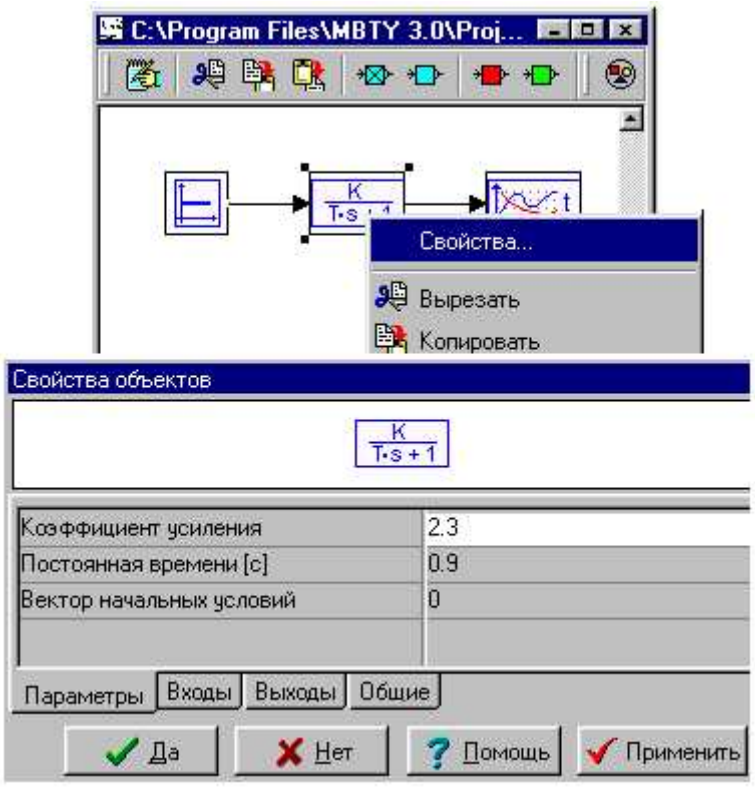


Рисунок 10 - Задание коэффициента усиления и постоянной времени исследуемого апериодического звена

Щелкнуть по кнопке **Да**.

4) Запуск программы на счет.

Щелкнуть по кнопке Пуск (Продолжить расчет Ctrl+F9) с изображением бегущего человечка на основной панели (рисунок 9). Моделирование запущено.

На вход апериодического звена будет подан ступенчатый виртуальный сигнал, на который блок отреагирует постепенным, все более медленным возрастанием сигнала до его устанавливающегося значения. Отметим, что появится окно с пугающим предупреждением о том, что заданная точность не обеспечивается. Но это предупреждение относится только к первому шагу интегрирования, поэтому его окно следует просто закрыть и можно анализировать полученную переходную характеристику (рисунок 5).

5) Исследование свойств апериодического звена

Переходная функция апериодического звена имеет вид:

$$h(t) = k(1 - e^{-t/T})$$

Обратим внимание, что переходная функция апериодического звена с течением времени стремится к значению его коэффициента усиления, а касательная, проведенная в нулевой момент времени к кривой переходного процесса, пересекает уровень стабилизации сигнала в момент

времени, равный постоянной времени звена. Это позволяет определять параметры апериодического звена по его известной переходной характеристике.

Проверьте это утверждение, меняя коэффициент усиления и постоянную времени звена. Результаты проверки сгруппируйте в таблице.

Если у вас еще осталось время, щелкните правой кнопкой по графику, в выпавшем меню выберете Свойства и поэкспериментируйте с ними: дайте содержательное название графику: **Переходная характеристика**, измените цвет и толщину линии графика, название переменной по оси ординат замените на более содержательное: **Выходной сигнал** (между словами нажать Enter).

Щелкните правой кнопкой по блоку осциллографа в окне модели, в выпавшем меню выберете Свойства, в появившемся окне перейдите на вкладку Общие и задайте в нижнем окне заголовок (название) блока: Осциллограф, который появится под блоком при щелчке по кнопке Да.

4.3 Сохранение проекта

В меню **Файл** выбрать **Сохранить как**, в появившемся окне указать путь к своей личной папке и, назвав проект **Perech_Ap_Zv.mrj**, сохранить его.

Кроме собственно проекта полезно сохранять и снимки экрана, с тем, чтобы прикладывать их к отчету. Для получения снимка следует нажать клавишу Print Screen клавиатуры, запустить программу Paint (Пуск – Программы – Стандартные - Paint) и в меню Правка выбрать Вставить. Полученный снимок следует аккуратно обрезать и сохранить в личной папке.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните принцип построения модели в ПК «МВТУ».
2. Назовите основные элементы главного окна ПК «МВТУ».
3. Назовите основные вкладки Палитры блоков ПК «МВТУ».
4. Как запустить новый проект? Как открыть созданную ранее модель?
5. Как вынести блок на рабочее пространство окна модели?
6. Как соединить выход одного блока и вход другого?
7. Какая передаточная функция у апериодического звена?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

Моделирование переходных процессов элементов систем автоматизации

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Научиться строить переходные процессы элементов систем автоматизации.

2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить возможности моделирования с помощью программного комплекса (ПК) «МВТУ».

2. Освоить процедуры формирования структурной схемы моделирования, выбора метода и параметров интегрирования, ввода параметров блоков, вывода данных расчета (на примере моделирования переходных процессов типовых звеньев и звена общего вида).

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Для выполнения работы необходимо изучить понятия структурных схем, типовых воздействий, переходных характеристик, типовых (элементарных) звеньев и их.

4 СОДЕРЖАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. На простейшем демонстрационном примере моделирования типового звена осваиваются и приобретаются навыки самостоятельной работы в среде ПК «МВТУ»;

2. Каждый студент для заданных вариантов самостоятельно готовит исходные данные для моделирования типового звена (таблица 1) и звена общего вида (таблица 2) и выполняет на компьютере все процедуры, необходимые при моделировании, по аналогии с демонстрационным примером.

Демонстрационный пример построен применительно к типовому колебательному звену, передаточная функция которого

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{K}{T^2 p^2 + 2b + 1},$$

где X(p), Y(p) – соответственно изображения по Лапласу входной и выходной величин при нулевых начальных условиях;

k, T, b –соответственно коэффициент передачи, постоянная времени и коэффициент затухания (k=1, T=1, b=0,5).

Структурная схема колебательного звена, соответствующая его передаточной функции, показана на рисунке 1.

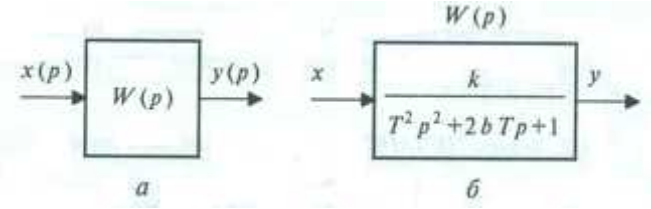


Рисунок 1 - Структурная схема звена: а – в общем виде; б – с раскрытием передаточной функции и отображением входной и выходной величин x и y

Задача моделирования звена заключается в получении графика переходного процесса выходной величины y (t) при нулевых начальных условиях и ступенчатом входном воздействии, то есть получении его переходной функции (кривой разгона).

Исходные данные для демонстрационного примера подготовлены в виде структурной схемы моделирования (рисунок 2) и следующих параметров интегрирования:

- максимальный шаг интегрирования (на порядок меньше постоянной времени T = 1с) 0,1 с;
- минимальный шаг интегрирования (на один-два порядка меньше максимального шага интегрирования) 0,001 с;
- время интегрирования (на один-два порядка больше постоянной времени T = 1 с) 15 с;
- точность интегрирования 0,001;
- шаг вывода результатов 0,01;
- метод интегрирования принят Адаптивный 1.

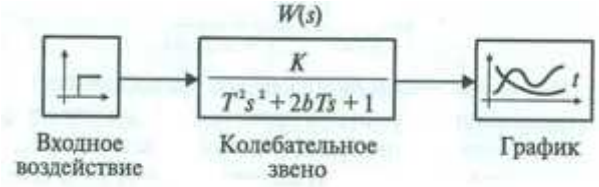


Рисунок 2 - Структурная схема моделирования колебательного звена, изображенная с использованием блоков библиотек ПК «МВТУ»

Последовательность использования подготовленных исходных данных:

1. Заполнение «Схемного Окна» необходимыми типовыми блоками.
2. Проведение линий связи на структурной схеме.
3. Ввод параметров структурной схемы.
4. Установка параметров интегрирования.
5. Оформление поясняющих надписей.

6. Открытие «Графического Окна» и изменение его размеров.

5 ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Для заданного типового элемента (таблица 9) и звена общего вида (таблица 10) подготовьте исходные данные и проведите моделирование переходного процесса при единичном ступенчатом входном воздействии в следующей последовательности:

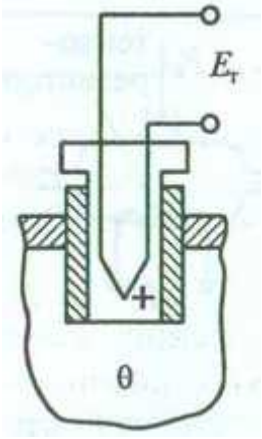
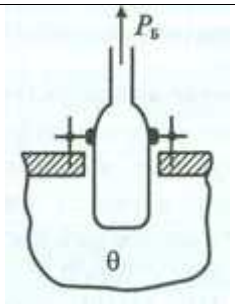
- подготовьте чертеж структурной схемы моделирования, используя библиотеку ПК «МВТУ»;

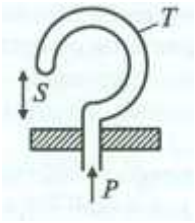
- исходя из числовых значений параметров передаточной функции элемента, определите параметры интегрирования (метод, точность, шаг, время интегрирования и шаг вывода результатов);

- введите исходные данные и выполните моделирование по аналогии с рисунками 1 и 2;

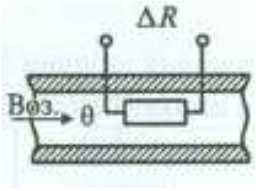
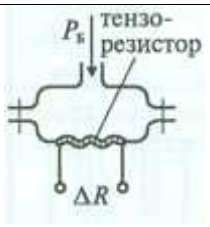
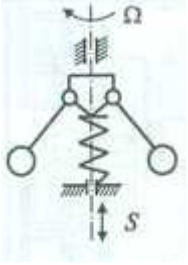
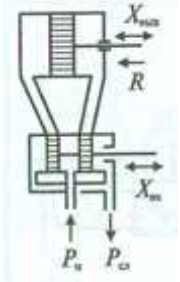
- снимите с экрана монитора данные расчета и постройте по ним графики переходных процессов или изображение графика скопируйте на носитель информации.

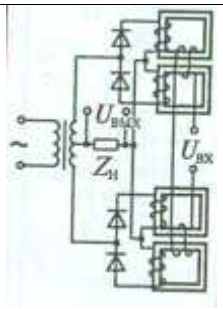
Таблица 1

Вариант	Наименование элемента (входная величина, выходная величина)	Принципиальная схема	Передаточная функция
1	**2**	**3**	**4**
1	Термоэлектрический преобразователь, помещенный в защитный кожух (температура в объекте измерения Θ, ЭДС на зажимах термоэлектрического преобразователя Ет)		$W(p) = \frac{E_т(p)}{\Theta(p)} = \frac{k_{ТП}}{T_{ТП}(p)+1}$, где $k_{тп}$ – коэффициент передачи; $T_{ТП}$ – постоянная времени термоэлектрического преобразователя; $k_{тп}$ = 0,0005÷0,001 В / ^{0}С; $T_{ТП}$ = 3÷10 с
2	Термобаллон (температура в объекте измерения Θ, давление в термобаллоне $P_Б$)		$W(p) = \frac{P_Б(p)}{\Theta(p)} = \frac{k_Б}{T_Б(p)+1}$, где $k_Б$ – коэффициент передачи; $T_Б$ – постоянная времени; $k_Б$ = 0,001÷0,01 МПа / ^{0}С; $T_Б$ = 0,001÷0,002 с

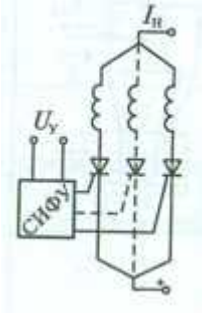
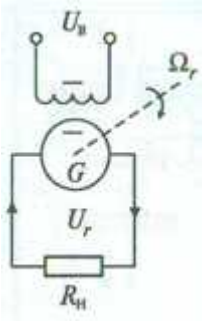
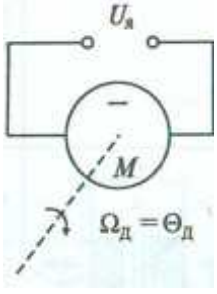
3	Трубка Бурдона для измерения давленгия (давление в объекте измерения Р, перемещение свободного конца трубки Бурдона S)		$W(p)=\frac{S(p)}{P(p)}=\frac{k_S}{T_P(p)+1}$, где k_S – коэффициент передачи; T_P – постоянная времени; k_S = 0,5÷1,0 мм / МПа; T_P = 0,005÷0,001 с

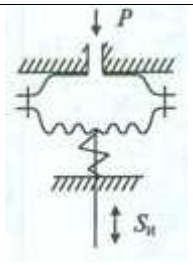
Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
4	Термометр сопротивления (температура Θ воздуха или газа, измерение сопротивления термометра сопротивления ΔR)		$W(p)=\frac{\Delta R(p)}{\Theta(p)}=\frac{k_{TC}}{T_{TC}(p)+1}$, где k_{TC} – коэффициент передачи; T_{TC} – постоянная времени; k_{TC} = 1÷10 Ом / ^{0}C; T_{TC} = 3÷10 с
5	Тензометрический датчик давления (давление $P_Б$, изменение сопротивления тензорезистора ΔR)		$W(p)=\frac{\Delta R(p)}{P_Б(p)}=k_T$, где k_T – коэффициент передачи; k_T = 20÷100 Ом / МПа
6	Центробежный тахометр (частота вращения Ω, перемещения тяги тахометра S)		$W(p)=\frac{S(p)}{\Omega(p)}=\frac{k}{T^2p^2+2b+1}$, где k – коэффициент передачи; T – постоянная времени; b – коэффициент затухания k = 0,05÷0,1 мс / рад; T = 3÷10 с; b=0,1÷0,8
7	Гидроусилитель (перемещение золотника Хвх, перемещение поршня Хвых)		а) $W(p)=\frac{X_{вых}(p)}{X_{вх}(p)}=\frac{k}{p(T^2p^2+2bT+1)}$, где k – коэффициент передачи (усиления); T – постоянная времени; b – коэффициент затухания k =5÷10; T = 0,01 с; b=0,2÷0,5 б) $W(p)=\frac{X_{вых}(p)}{X_{вх}(p)}=\frac{k}{p}$, при T=0

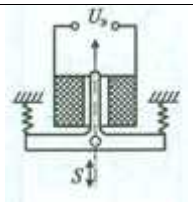
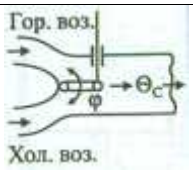
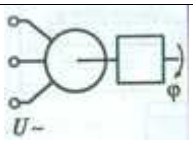
8	Магнитный усилитель (Uвх, Uвых)		$W(p)=\frac{U_{вых}(p)}{U_{вх}(p)}=\frac{k_{МУ}}{T_{му}p+1}$, где $k_{му}$ – коэффициент усиления магнитного усилителя; $T_{му}$ – постоянная времени обмотки управления магнитного усилителя; $K_{му}$ =10÷50; $T_{му}$ = 0,01÷0,1 с

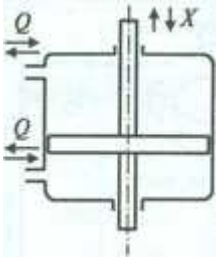
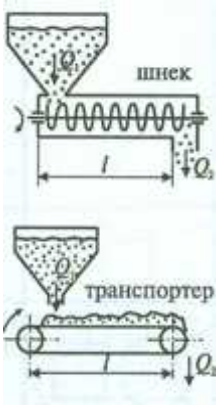
Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
9	Управляемый тиристорный преобразователь электродвигателя постоянного тока (напряжение на входе в систему импульсно-фазового управления $U_у$, сила тока нагрузки $I_Н$)		а) Для анализа САР с малым быстродействием $W(p)=\frac{I_Н(p)}{U_У(p)}=k_П$, где $k_П$ – коэффициент усиления тиристорного преобразователя; б) Для анализа САР с большим быстродействием $W(p)=\frac{I_Н(p)}{U_У(p)}=k_П e^{-\tau p}$, где τ – время запаздывания в цепи управления тиристоров; $k_П$ =5÷10 А/В; τ = 0,009÷0,015 с
10	Генератор постоянного тока с независимым возбуждением (напряжение на обмотке возбуждения $U_В$, напряжение на зажимах генератора $U_Г$)		$W(p)=\frac{U_В(p)}{U_Г(p)}=\frac{k_Г}{T_Г p+1}$, где $k_Г$ – коэффициент передачи; $T_Г$ – постоянная времени генератора; b – коэффициент затухания $k_Г$ = 2÷5; $T_Г$ = 0,05÷0,8 с
11	Электродвигатель постоянного тока с независимым возбуждением (напряжение на зажимах якоря $U_Я$, частота вращения вала двигателя $Ω_Д$)		$W(p)=\frac{Ω_Д(p)}{U_Я(p)}=\frac{k_Д}{T_Э T_М p^2+T_М p+1}$, где $k_Д$ – коэффициент передачи; $T_Э$, $T_М$ – соответственно электромагнитная и электромеханическая постоянные времени;

			$k_Д$ = 5÷10; $T_Э$ = 0,002÷0,005 с; $T_М$ = 0,015÷0,02 с
12	Пневматический исполнительный элемент (давление в мембранной камере P, перемещение тяги $S_И$)		$W(p) = \frac{S_И(p)}{P(p)} = \frac{k}{T_И^2 p^2 + 2bT_И p + 1}$, где $k_И$ – коэффициент передачи; $T_И$ –постоянная времени; b – коэффициент затуханя; $k_И$ = 0,5÷1,0 мм/МПа; $T_И$ = 0,005÷0,01 с; b = 0,1÷0,4 с

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
13	Электромагнит (электромагнитный исполнительный механизм) – (напряжение, подаваемое на электромагнит $U_Э$, перемещение якоря электромагнита S)		$W(p) = \frac{S(p)}{U_Э(p)} = \frac{k_Э}{(T_{Э1}p+1)(T_{Э2}p+1)}$, где $k_Э$ – коэффициент передачи; $T_{Э1}$ –электромагнитная постоянная времени электромагнита; $T_{Э2}$ –механическая постоянная времени электромагнита; $k_Э$ = 0,05÷0,1 мм/В; $T_{Э1}$ = 0,001÷0,0015 с; $T_{Э2}$ = 0,005÷0,01 с
14	Камера смешивания горячего и холодного воздуха (угол поворота заслонки φ, температура воздуха в камере смешивания $Θ_C$)		$W(p) = \frac{Θ_C(p)}{φ(p)} = \frac{k_C}{T_C p+1}$, где k_C – коэффициент передачи; T_C – постоянная времени камеры смешивания; k_C = 50÷100 ^{0}C/рад; T_C = 0,01÷0,03 с
15	Электродвигательный исполнительный механизм (напряжение на статорной обмотке электродвигателя U, угол поворота φ вала редуктора)		$W(p) = \frac{φ(p)}{U(p)} = \frac{k_Э}{p}$, где $k_Э$ – коэффициент передачи; $k_Э$ = 2÷8 рад/с, определяется передаточным числом редуктора

16	Поршневой гидравлический исполнительный механизм (расход Q жидкости (масла), подаваемой в гидроцилиндр, перемещение X штока гидроцилиндра)		$W(p) = \frac{X(p)}{Q(p)} = \frac{k_Г}{p}$, где $k_Г$ – коэффициент передачи; $k_Г$ = 0,003÷0,008 с/см^2
17	Шнековый (транспортерный) исполнительный механизм-питатель (расход сыпучего материала на входе шнека Q_1, расход сыпучего материала на выходе шнека Q_2)		$W(p) = \frac{Q_2(p)}{Q_1(p)} = e^{-\tau p}$, где e - основание натурального логарифма; τ - время запаздывания, с; $\tau = l/v$, где l – длина шнека (транспортера), м; v – скорость перемещения материала, м/с; τ = 2÷8 с

Продолжение таблицы 1

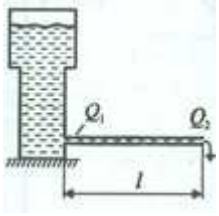
1	2	3	4
18	Протяженный водопровод (расход воды из водонапорной башни Q_1, расход воды на выходе водопровода Q_2)		$W(p) = \frac{Q_2(p)}{Q_1(p)} = e^{-\tau p}$, где e - основание натурального логарифма; τ - время запаздывания, с; $\tau = l/v$, где l – длина водопровода, м; v – скорость движения воды, м/с; τ = 1÷3 с

Таблица 2

Вариант	Передаточная функция	Значения параметров передаточных функций
1	$W(p) = \frac{b_3p^3 + b_2p^2 + b_1p + b_0}{a_4p^4 + a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + a_0}$	$a_0 = 1;\ a_1 = 5c;\ a_2 = 1{,}2c^2;$ $a_3 = 0{,}9c^3;\ a_4 = 0{,}5c^4;$ $b_0 = 1;\ b_1 = 3c;\ b_2 = 0{,}8c^2;$ $b_3 = 0{,}3c^3$
2	$W(p) = \frac{b_2p^2 + b_1p + b_0}{a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + a_0}$	$a_0 = 1;\ a_1 = 5c;\ a_2 = 1{,}2c^2;$ $a_3 = 0{,}9c^3;\ b_0 = 1;\ b_1 = 3c;$ $b_2 = 0{,}8c^2$

3	$W(p)=\frac{b_1p+b_0}{a_2p^2+a_1p+a_0}$	$a_0=1;\ a_1=5c;\ a_2=1{,}2c^2;$ $b_0=1;\ b_1=3c$
4	$W(p)=\frac{b}{a_4p^4+a_3p^3+a_2p^2+a_1p+a_0}$	$a_0=1;\ a_1=5c;\ a_2=1{,}2c^2;$ $a_3=0{,}9c^3;\ a_4=0{,}5c^4;$ $b=10$
5	$W(p)=\frac{b}{a_3p^3+a_2p^2+a_1p+a_0}$	$a_0=1;\ a_1=5c;\ a_2=1{,}2c^2;$ $a_3=0{,}9c^3;\ b=10$
6	$W(p)=\frac{b_3p^3+b_2p^2+b_1p+b_0}{a_4p^4+a_3p^3+a_2p^2+a_1p}$	$a_1=1c;\ a_2=1{,}2c^2;\ a_3=0{,}9c^3;$ $a_4=0{,}5c^4;\ b_0=1;\ b_1=3c;$ $b_2=0{,}8c^2;\ b_3=0{,}3c^3$
7	$W(p)=\frac{T_0p+1}{T_3^3p^3+T_2^2p^2+T_1p+1}$	$T_0=2c;\ T_1=4c;\ T_2=1{,}1c;$ $T_3=0{,}9c$
8	$W(p)=\frac{T_0p+1}{T_4^4p^4+T_3^3p^3+T_2^2p^2+p}$	$T_0=2c;\ T_2=4c;\ T_2=1{,}1c;$ $T_4=0{,}9c$
9	$W(p)=\frac{k}{T_3^3p^3+T_2^2p^2+T_1p+1}$	$k=10;\ T_1=4c;\ T_2=1{,}1c;$ $T_3=0{,}9c$
10	$W(p)=\frac{k}{T_4^4p^4+T_3^3p^3+T_2^2p^2+p}$	$k=10;\ T_2=4c;\ T_3=1{,}1c;$ $T_4=0{,}9c$
11	$W(p)=\frac{T_0p+1}{T_5^5p^5+T_4^4p^4+T_3^3p^3+T_2^2p^2+T_1p+1}$	$T_0=0{,}7c;\ T_1=3c;\ T_2=1{,}2c;$ $T_3=0{,}9c;\ T_4=0{,}8c;\ T_5=0{,}5c$
12	$W(p)=\frac{k}{T_5^5p^5+T_4^4p^4+T_3^3p^3+T_2^2p^2+T_1p+1}$	$k=10;\ T_1=3c;\ T_2=1{,}2c;$ $T_3=0{,}9c;\ T_4=0{,}8c;\ T_5=0{,}5c$

6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое структурная схема элемента САР?
2. Какие виды типовых воздействий используются в автоматике?
3. Что такое переходная функция (кривая разгона)?
4. Как выбираются параметры интегрирования?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

Определение устойчивости системы автоматического управления и регулирования методом алгебраических критериев Гурвица и Рауса

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Используя алгебраические критерии Гурвица и Рауса, определить устойчивость системы.

2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Используя алгебраические критерии Гурвица и Рауса, по заданным параметрам своего варианта (таблица 1) по характеристическому уравнению, определить устойчивость системы.
2. Оформить практическую работу.
3. Ответить на контрольные вопросы.

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Алгебраический критерий устойчивости Гурвица.

Критерий Гурвица читается: для того чтобы система была устойчивой, необходимо, чтобы все коэффициенты характеристического уравнения и все определители Гурвица были положительными.

Анализ устойчивости ведется в следующем порядке:

1) Составляется характеристическое уравнение системы:

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + ... + a_{n-1} p + a_n = 0.$$

2) Составляется главный определитель Гурвица:

- по главной диагонали выписываются все коэффициенты уравнения, начиная с «a_1» до последнего «a_n» в порядке возрастания индексов;

- столбцы дополняются вверх от диагонали, путем вписывая коэффициентов с последовательно возрастающим индексом;

- вниз от диагонали столбцы дополняются вписыванием коэффициентов с последовательно убывающим индексом;

- на место коэффициентов, имеющих индексы больше и меньше нуля, подставляются нули.

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & & 0 \\ & & & . & \\ 0 & & & & a_n \end{vmatrix}$$

3) На основании главного определителя подсчитываются все остальные определители Гурвица.

$$\Delta_1 = a_1; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix}; \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} \quad \text{и т.д.}$$

Алгебраический критерий устойчивости Рауса.

Устойчивость систем определяется путем заполнения таблицы Рауса, которая является упрощенной схемой определителей Гурвица.

Таблица - Таблицы Рауса

Номер строки	Значение λ	Номер столбца		
		1	2	3
1	-	$c_{11} = a_0$	$c_{21} = a_2$	$c_{31} = a_4$
2	-	$c_{12} = a_1$	$c_{22} = a_3$	$c_{32} = a_5$
3	$\lambda_3 = \frac{a_0}{a_1}$	$c_{13} = a_2 - \lambda_3 a_3$	$c_{23} = a_4 - \lambda_3 a_5$	$c_{33} = a_6 - \lambda_3 a_7$
4	$\lambda_4 = \frac{a_1}{c_{13}}$	$c_{14} = a_3 - \lambda_4 c_{23}$	$c_{24} = a_5 - \lambda_4 c_{33}$	$c_{34} = a_7 - \lambda_4 c_{43}$
5	$\lambda_5 = \frac{c_{13}}{c_{14}}$	$c_{15} = c_{23} - \lambda_5 c_{24}$	$c_{25} = c_{33} - \lambda_5 c_{34}$	$c_{35} = c_{43} - \lambda_5 c_{44}$

Таблица Рауса заполняется в следующем порядке:

1) первая строка заполняется вписыванием коэффициентов с четными индексами.
2) вторая строка заполняется вписыванием коэффициентов с нечетными индексами.
3) подсчитываются вспомогательные величины «λ».
4) подсчитываются коэффициенты всех остальных строк и столбцов.

Любой коэффициент таблицы Рауса определяется по формуле:

$$C_{K,i} = C_{K+1,i-2} - \lambda_i C_{K+1,i-1}, \text{где}$$

$к$ – номер столбца;

i – номер строки.

Формулировка критерия Рауса:

Для того чтобы система была устойчивой, необходимо и достаточно, чтобы все коэффициенты характеристического уравнения и все величины первого столбца таблицы Рауса были положительными.

4 ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Таблица 1 - Варианты практической работы

Вариант	**Характеристическое уравнение**	**Вариант**	**Характеристическое уравнение**
1	$6p^4+3p^3+2p^2+4p+1=0$	17	$5p^3+2p^2+5p+1=0$
2	$3p^3+5p^2+3p+1=0$	18	$7p^3+4p^2+4p+1=0$

3	$7p^4+3p^3+2p^2+4p+1=0$	19	$2p^4+5p^3+6p^2+2p+1=0$
4	$7p^3+2p^2+5p+1=0$	20	$9p^3+5p^2+4p+1=0$
5	$3p^3+4p^2+4p+1=0$	21	$2p^4+5p^3+4p^2+2p+1=0$
6	$2p^4+5p^3+6p^2+2p+1=0$	22	$4p^3+7p^2+5p+1=0$
7	$2p^3+5p^2+2p+1=0$	23	$6p^3+6p^2+4p+1=0$
8	$2p^4+3p^3+4p^2+4p+1=0$	24	$3p^3+4p^2+2p+1=0$
9	$3p^3+4p^2+2p+1=0$	25	$2p^4+6p^3+3p^2+4p+1=0$
10	$7p^3+4p^2+4p+1=0$	26	$4p^4+3p^3+9p^2+2p+1=0$
11	$2p^4+2p^3+3p^2+5p+1=0$	27	$5p^3+5p^2+6p+1=0$
12	$2p^3+4p^2+2p+1=0$	28	$5p^3+4p^2+3p+6p+1=0$
13	$5p^4+5p^3+7p^2+6p+1=0$	29	$7p^4+p^3+3p^2+2p+1=0$
14	$9p^3+2p^2+7p+1=0$	30	$6p^3+4p^2+4p+1=0$
15	$5p^4+7p^3+2p^2+4p+1=0$	31	$3p^3+4p^2+2p+1=0$
16	$3p^3+7p^2+3p+1=0$	32	$6p^3+2p^2+4p+1=0$

Примечание: № варианта соответствует порядковому номеру студента в журнале.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Какую систему называют устойчивой?
2. Как читается критерий Гурвица?
3. В каком порядке ведется анализ устойчивости Гурвица?
4. Как составляется главный определитель Гурвица?
5. Как читается критерий Рауса?
6. Как заполняется таблица Рауса?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

Определение устойчивости системы автоматического управления и регулирования по виду расположения вектора годографа Михайлова

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Используя графический критерий Михайлова, по характеристическому уравнению определить устойчивость системы.

2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. По характеристическому уравнению своего варианта (таблица 1) построить годограф Михайлова в комплексной плоскости при изменении частоты от 0 до ∞.
2. По виду годографа определить устойчивость системы.
3. Оформить практическую работу.
4. Ответить на контрольные вопросы.

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Критерий Михайлова относится к группе частотных критериев. Анализ устойчивости сводится к построению годографа в комплексной плоскости при изменении частоты от 0до ∞. Годограф строится на базе характеристического уравнения замкнутой системы.

Анализ устойчивости осуществляется в следующем порядке:

1. Находят характеристическое уравнение замкнутой системы:

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + ... + a_{n-1} p + a_n = 0 = M(j\mu).$$

2. В характеристическом уравнении производят замену $p = j\mu$:

$$M(j\mu) = a_0 (j\mu)^n + a_1 (j\mu)^{n-1} + ... + a_{n-1} j\mu + a_n.$$

3. Из уравнения $M(j\mu)$ выделяют вещественную и мнимую части $U(\mu)$ и $V(\mu)$, учитывая, что $j = \sqrt{-1}$, $j^2 = -1$, $j^3 = -j$, $j^4 = +1$; $(j\mu)^2 = -\mu^2$, $(j\mu)^3 = -j\mu^3$, $(j\mu)^4 = \mu^4$ и т.д., т.е. четные степени $(j\mu)$ – вещественны, а нечетные степени – мнимы.

$$U(\mu) = a_n - a_{n-2}\mu^2 + a_{n-4}\mu^4 - ...$$

$$V(\mu) = a_{n-1}\mu - a_{n-3}\mu^3 + a_{n-5}\mu^5 - ...$$

4. Задаваясь определенными значениями частоты μ от 0 до $+\infty$, подсчитывается для каждого значения частоты $U(\mu)$ и $V(\mu)$. Результаты подсчетов можно свести в таблицу:

μ	0	μ_1	μ_2	μ_3	…	…	…	…	∞
$U(\mu)$	$U(0)$	$U(\mu_1)$	…	…					$U(\infty)$
$V(\mu)$	$V(0)$	$V(\mu_1)$	…	…					$V(\infty)$

5. По данным таблицы на комплексной плоскости в координатах $U(\mu)$ и $V(\mu)$ наносят координаты точек в вещественной и мнимой части. Через полученные точки проводят плавную кривую, по виду которой судят об устойчивости системы.

Критерий устойчивости Михайлова формулируется:

Для того чтобы система $n-го$ порядка была устойчивой, необходимо и достаточно, чтобы вектор годографа Михайлова при изменении частоты от 0 до $+\infty$, начав свое движение с положительной вещественной полуоси, вращаясь против часовой стрелки и нигде не обращаясь в нуль, обходил последовательно $n-$ плоскостей комплексной плоскости, т.е. повернувшись на угол, равный $\frac{®}{2}\cdot n$, где $n-$ степень характеристического уравнения.

4 ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Таблица 1 - Варианты практической работы

Вариант	**Характеристическое уравнение**	**Вариант**	**Характеристическое уравнение**
1	$6p^4+3p^3+2p^2+4p+1=0$	17	$5p^3+2p^2+5p+1=0$
2	$3p^3+5p^2+3p+1=0$	18	$7p^3+4p^2+4p+1=0$
3	$7p^4+3p^3+2p^2+4p+1=0$	19	$2p^4+5p^3+6p^2+2p+1=0$
4	$7p^3+2p^2+5p+1=0$	20	$9p^3+5p^2+4p+1=0$
5	$3p^3+4p^2+4p+1=0$	21	$2p^4+5p^3+4p^2+2p+1=0$
6	$2p^4+5p^3+6p^2+2p+1=0$	22	$4p^3+7p^2+5p+1=0$
7	$2p^3+5p^2+2p+1=0$	23	$6p^3+6p^2+4p+1=0$
8	$2p^4+3p^3+4p^2+4p+1=0$	24	$3p^3+4p^2+2p+1=0$
9	$3p^3+4p^2+2p+1=0$	25	$2p^4+6p^3+3p^2+4p+1=0$
10	$7p^3+4p^2+4p+1=0$	26	$4p^4+3p^3+9p^2+2p+1=0$
11	$2p^4+2p^3+3p^2+5p+1=0$	27	$5p^3+5p^2+6p+1=0$
12	$2p^3+4p^2+2p+1=0$	28	$5p^3+4p^2+3p+6p+1=0$
13	$5p^4+5p^3+7p^2+6p+1=0$	29	$7p^4+p^3+3p^2+2p+1=0$
14	$9p^3+2p^2+7p+1=0$	30	$6p^3+4p^2+4p+1=0$
15	$5p^4+7p^3+2p^2+4p+1=0$	31	$3p^3+4p^2+2p+1=0$
16	$3p^3+7p^2+3p+1=0$	32	$6p^3+2p^2+4p+1=0$

Примечание: № варианта соответствует порядковому номеру студента в журнале.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какую систему называют устойчивой?
2. Как читается критерий устойчивости Михайлова?
3. Как строится годограф Михайлова?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

Определение устойчивости систем автоматического регулирования по критерию Найквиста

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Используя графический критерий Найквиста, по характеристическому уравнению определить устойчивость системы.

2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. По характеристическому уравнению своего варианта (таблица 1) построить годограф в комплексной плоскости при изменении частоты от 0 до ∞.
2. По виду годографа определить устойчивость системы.
3. Оформить практическую работу.
4. Ответить на контрольные вопросы.

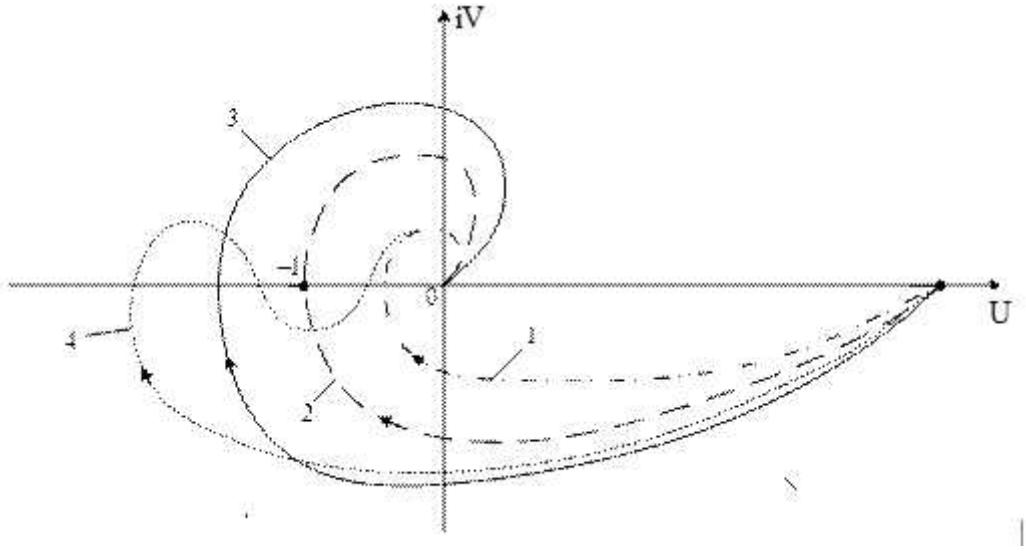
3 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Критерий Найквиста позволяет судить об устойчивости системы по амплитудно-фазовой характеристике разомкнутого контура системы. В этом заключается существенное преимущество критерия, так как построение амплитудно-фазовой характеристики разомкнутого контура для большинства реальных систем оказывается проще, чем построение годографа Михайлова. Особенно упрощается это построение для одноконтурных систем, состоящих из типовых звеньев. А в тех случаях, когда неизвестно математическое описание одного или нескольких конструктивных элементов системы и оценка их свойств возможна только путем экспериментального определения частотных характеристик, критерий Найквиста является единственно пригодным.

Критерий Найквиста является частотно–графическим критерием. Он определяет устойчивость системы в замкнутом состоянии по расположению в комплексной плоскости амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы.

Критерий Найквиста имеет следующую формулировку:

Автоматическая система управления устойчива, если амплитудно-фазовая характеристика разомкнутого контура не охватывает точку с координатами (-1, i0). Эта формулировка справедлива для систем, которые в разомкнутом состоянии устойчивы. Таковыми являются большинство реальных систем, состоящих из устойчивых элементов.



На рисунке, а характеристики 1 и 4 соответствуют устойчивым системам, характеристика 3 – неустойчивой, а характеристика 2 – нахождению системы на границе устойчивости

4 ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Таблица 1 - Варианты практической работы

Вариант	Характеристическое уравнение	Вариант	Характеристическое уравнение
1	$8p^3+5p^2+5p+1=0$	17	$4p^4+6p^3+3p^2+p+1=0$
2	$6p^3+4p^2+2p+1=0$	18	$5P^3+5p^2+4p+1=0$
3	$9P^4+5p^3+6p^2+p+1=0$	19	$4p^4+2p^3+3p^2+p+1=0$
4	$7p^3+9p^2+9p+1=0$	20	$7p^3+6p^2+5p+1=0$
5	$2p^4+5p^3+4p^2+p+1=0$	21	$3p^3+4p^2+3p+1=0$
6	$4p^3+7p^2+6p+1=0$	22	$2p^4+5p^3+6p^2+p+1=0$
7	$6p^3+5p^2+7p+1=0$	23	$12p^3+5p^2+2p+1=0$

8	$2p^3+4p^2+6p+1=0$	24	$2p^4+2p^3+3p^2+7p+1=0$
9	$7p^4+6p^3+7p^2+4p+1=0$	25	$3p^3+5p^2+2p+1=0$
10	$4p^4+3p^3+8p^2+2p+1=0$	26	$7p^3+4p^2+p+1=0$
11	$9p^3+p^2+6p+1=0$	27	$2p^4+3p^3+3p^2+5p+1=0$
12	$5p^3+4p^2+3p+5p+1=0$	28	$4p^3+3p^2+2p+1=0$
13	$7p^4+4p^3+3p^2+2p+1=0$	29	$3p^4+5p^3+5p^2+6p+1=0$
14	$6p^3+4p^2+4p+1=0$	30	$9p^3+2p^2+7p+1=0$
15	$3p^3+p^2+8p+1=0$	31	$3p^4+7p^3+2p^2+4p+1=0$
16	$6p^3+2p^2+4p+1=0$	32	$8p^3+7p^2+3p+1=0$

Примечание: № варианта соответствует порядковому номеру студента в журнале.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какую систему называют устойчивой?
2. Как читается критерий устойчивости Найквиста?
3. Как строится годограф?
4. Как читается критерий устойчивости Найквиста?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

Инструменты частотного анализа систем управления в программном комплексе «МВТУ»

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Освоить порядок построения частотных характеристик системы автоматического регулирования (САР) и их краткий анализ.

2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Построить модель САР третьего порядка и подготовить ее для проведения частотного анализа.
2. Построить годограф Михайлова.
3. Построить годограф Найквиста.
4. Оформить практическую работу.
5. Ответить на контрольные вопросы.

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Частотные характеристики линейной САР позволяют косвенно судить о ее качестве. Более того, эти характеристики позволяют оптимизировать параметры и структуру САР для получения

требуемых ее свойств. Частотные характеристики представляют в той или иной форме зависимость коэффициента усиления системой синусоидального сигнала от частоты этого сигнала. Анализируя частотные характеристики системы можно установить степень ее устойчивости и определить меры для ее стабилизации. Анализ частотных характеристик проводится с помощью критериев устойчивости Михайлова и Найквиста.

Ниже проведено рассмотрение способов построения частотных характеристик и их анализа на примере САР третьего порядка, наиболее простой из САР, способных терять устойчивость. Поскольку цель работы прежде всего состоит в освоении инструментов ПК «МВТУ», пример выбран так, чтобы большинство настроек сохранялось по умолчанию, с тем, чтобы легче было ухватить общую идею работы с инструментами и создать базу для изучения нюансов и подробностей.

3.1. Порядок построения модели

В качестве примера выберем очень простую одноконтурную схему системы автоматического регулирования частоты вращения вала двигателя постоянного тока (рисунок 1).

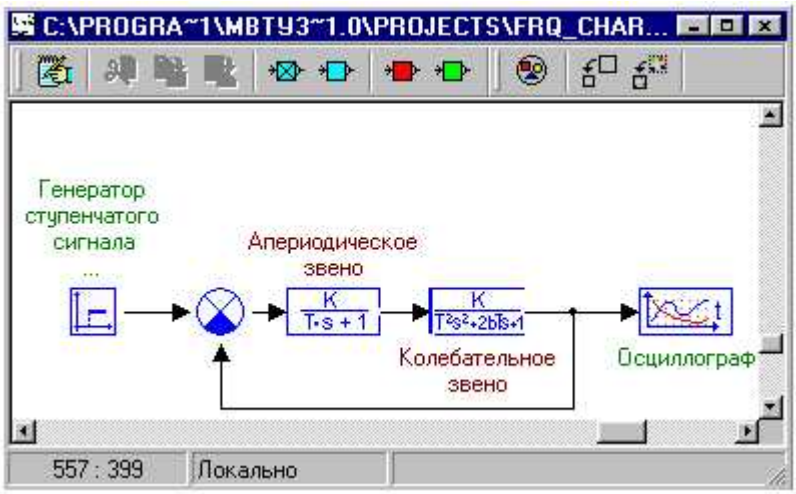


Рисунок 1 - Модель САР частоты вращения вала двигателя постоянного тока (ДПТ). П-регулятор и тиристорный преобразователь моделируются апериодическим звеном, а двигатель – колебательным звеном

Назначение рассматриваемой САР – поддержание частоты вращения вала двигателя в соответствии с величиной задающего воздействия, поступающего на устройство сравнения системы регулирования. Для изучения характеристик САР, на нее в данном случае подается сравнительно сложный для восприятия, быстро меняющийся в нулевой момент времени ступенчатый сигнал. Можно считать, что если система удовлетворительно отследит этот быстрый

сигнал, то при работе в реальных условиях, когда большую часть времени на нее поступают плавные сигналы, качество слежения, т.е. поддержания требуемого значения частоты вращения, будет еще лучше.

Контур моделируемой САР включает в себя П-регулятор, тиристорный преобразователь и двигатель постоянного тока. Для упрощения модели в данном случае П-регулятор объединен с тиристорным преобразователем, так, что они совокупно моделируются апериодическим звеном с коэффициентом усиления, равным произведению их коэффициентов усиления. Двигатель постоянного тока (ДПТ) моделируется колебательным звеном, влияние возмущений на работу ДПТ в данном учебном примере не рассматривается. В обратной связи реальной САР установлен тахогенератор - датчик частоты вращения вала. Это безинерционное пропорциональное звено, которое мы отнесем к ДПТ, скорректировав его коэффициент усиления, с тем, чтобы сделать обратную связь единичной. Апериодическое звено можно рассматривать как обобщенную модель регулятора, а колебательное звено – как объект управления.

Построение модели.

Порядок вынесения блоков в окно модели и их соединения вам известен из первой лабораторной работы. При желании можно убрать обрамление блоков, выбрав в главном меню ПК «МВТУ» **Опции – Настройки**, убрав галочку в пункте **Рисовать обрамление** и щелкнув по кнопке **Да**.

В дополнение к тем блокам, которые уже рассматривались в практической работе 9, в схеме рисунка 1 установлен блок сравнения (**Сравнивающее устройство**) с вкладки **Операции** Палитры блоков. Этот блок вычисляет сигнал ошибки, т.е. разность между сигналом задания, поступающим слева, и выходным сигналом колебательного звена, пропорциональным частоте вращения вала двигателя.

На схеме рисунка 1 появился еще один новый элемент – **ветвление**. После того, как выход колебательного звена подключен к входу осциллографа, от этой линии следует сделать ответвление к нижнему входу сравнивающего устройства. Это требует определенной сноровки и навыка. Один из простых способов проведения линии состоит в следующем. Необходимо, все время удерживая нажатой клавишу Ctrl щелкнуть по линии правой кнопкой мыши. На линии появится точка. Продолжая удерживать Ctrl, щелкнуть по точке левой кнопкой мыши. Курсор примет вид прицела. Продолжая удерживать клавишу Ctrl, перемещать курсор к точкам поворота линии, где щелкать левой клавишей. Продолжать действия вплоть до подключения линии к входу блока, после чего отпустить клавишу Ctrl. С течением времени это операция не будет встречать

затруднений, но на первом этапе, если линия получится неудачной, ее можно удалить, щелкнув по ней правой клавишей и выбрав в выпавшем меню **Удалить линию в связи (Ctrl+Del)**.

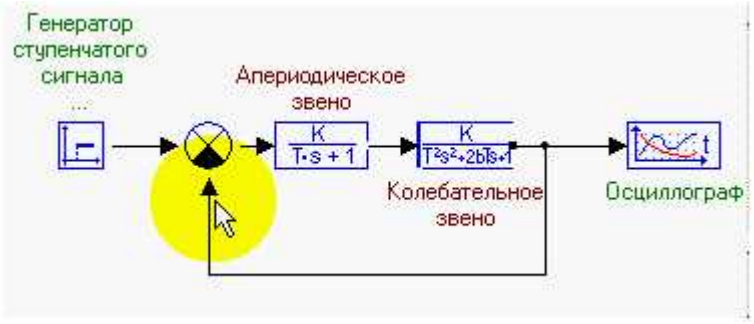


Рисунок 2 - Порядок создания ветвления и проведения линии связи. На всем протяжении операции следует удерживать нажатой клавишу Ctrl. По исходной линии следует сначала щелкнуть правой кнопкой, по возникшей точке и в углах поворота создаваемой линии следует щелкать левой кнопкой мыши. Анимацию можно остановить щелчком по кнопке **Стоп** в верхней части браузера, а запустить вновь – щелчком по кнопке **Обновить**

Далее следует задать значения коэффициентов усиления блоков регулятора и двигателя. Дважды щелкнув по апериодическому звену, введем в появившемся окне коэффициент усиления **2.1** и щелкнем **Да** (рисунок 3).

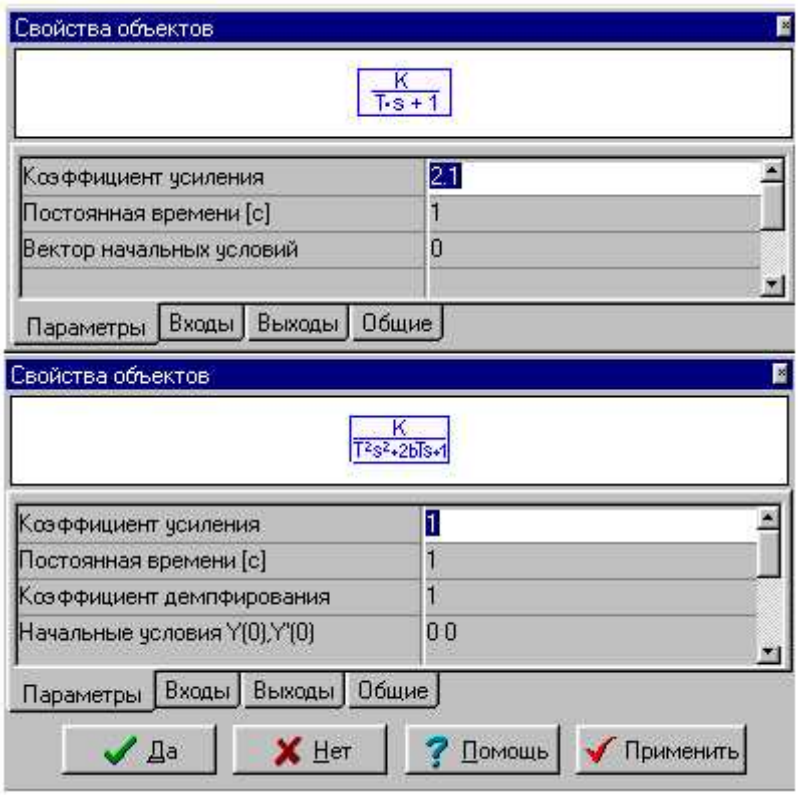


Рисунок 3 - Диалоговые окна для установки значений параметров апериодического и колебательного звеньев

Аналогичную операцию проделаем с колебательным звеном, убедимся, что его коэффициент усиления **равен 1** и нажмем **Да**.

Схема построена, параметры введены. Остается дважды щелкнуть по блоку осциллографа в окне модели, переместить появившееся окно графика в правую часть экрана и подравнять его размеры так, как показано на рисунке 4.

Запустить модель, щелчком по кнопке Пуск (**Продолжить расчет**) – бегущий человечек.

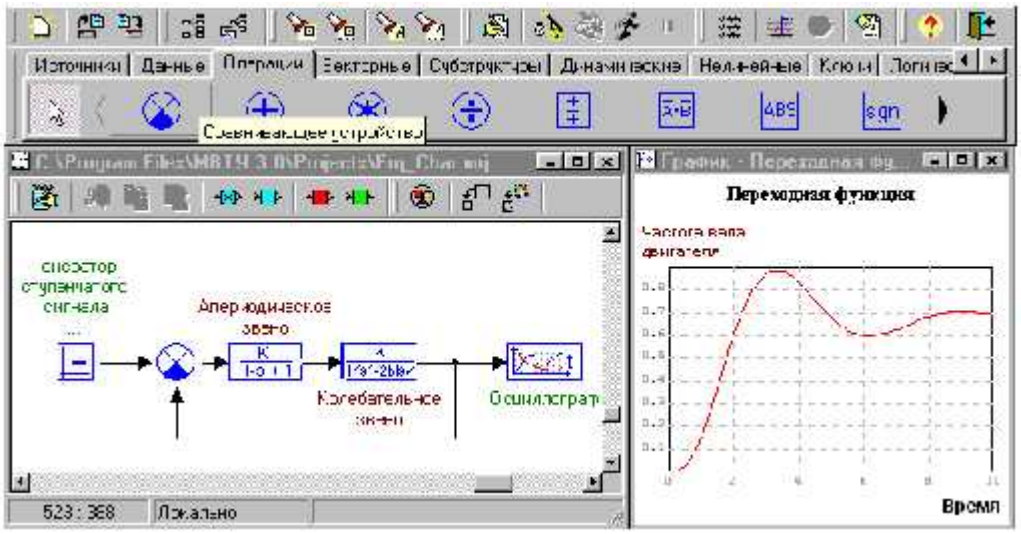


Рисунок 4 - Исходная схема САР и график ее переходной функции

Как видно на рисунке 4, заданные значения коэффициентов усиления и других параметров, оставленных по умолчанию, привели к устойчивой системе, но переходная функция стремится к стационарному значению со значительным переколебанием.

Рисунок 5 - По мере увеличения коэффициента усиления апериодического звена, а значит и всего контура, переходная функция становится все более колебательной и в итоге система теряет устойчивость: размах свободных колебаний при неизменном входном сигнале становится все больше с течением времени

Увеличение коэффициента усиления приводит к ухудшению устойчивости системы и одновременно улучшает качество ее в установившемся режиме. Задача проектировщика найти здесь разумный компромисс.

3.2. Подготовка модели к проведению ее частотного анализа

Для проведения частотного анализа модели нужно указать, какие ее звенья будут подвергнуты такому анализу. Для этого следует отметить условный вход анализируемого фрагмента схемы и его условный выход. В данном случае условным входом будет вход САР, а условным выходом – ее выход.

В программном комплексе «МВТУ» условный вход и условный выход обозначают с помощью блока **В память**, расположенном на вкладке **Субструктуры** (рисунок 6). Два таких блока следует вынести на окно модели и присоединить к входу и к выходу САР. Двойным щелчком по блоку, присоединенному ко входу САР вызвать окно задания названий переменных и изменить название **Y1** на более содержательное: **Вход**. Переменную **Y2** назвать **Выход** аналогичным образом. Для украшения схемы введем поясняющие надписи к этим блокам. Щелчком правой кнопки по левому блоку вызовем меню, выберем **Свойства** и на вкладке **Общие** введем поясняющую надпись **sin(wt)**, что напомнит о том, что частотный анализ проводится с использованием гармонического сигнала, частота которого изменяется в некоторых пределах. Аналогично, для правого блока запишем **A*sin(wt+fi)**, что поясняет то, что линейная система изменяет амплитуду и начальную фазу синусоидального сигнала, на нее подаваемого и эти изменения зависят от частоты.

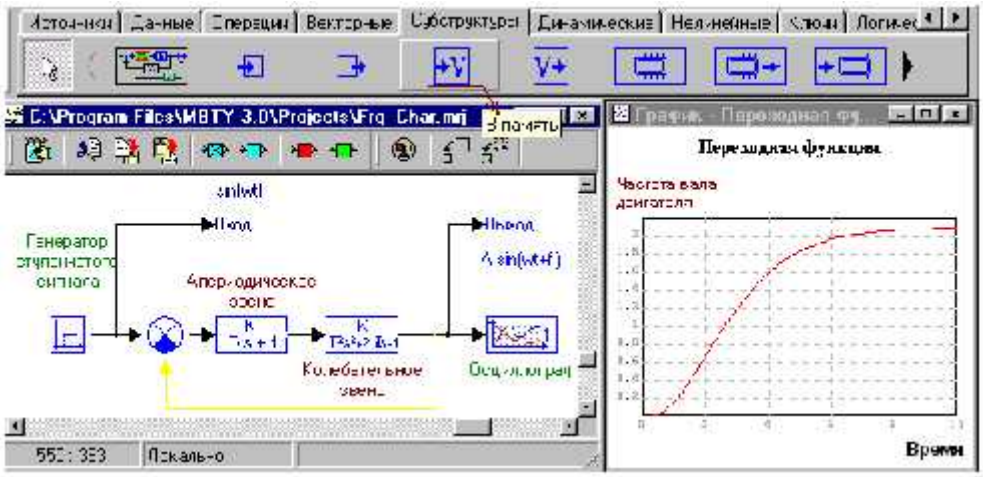


Рисунок 6 - Указание условных входа и выхода анализируемого фрагмента схемы с помощью двух блоков **В память** с вкладки **Субструктуры**. Обратная связь, условно показанная желтым цветом, изображена на схеме, но фактически отсутствует, поскольку весовой коэффициент по нижнему входу устройства сравнения задан равным нулю (рисунок 7), т.е. контур САР разомкнут. Переходная функция разомкнутой САР монотонно и асимптотически стремится к своему максимуму. Следовательно, разомкнутый контур устойчив.

Отметим, что в соответствии с критериями устойчивости частотному анализу должна быть подвергнута разомкнутая САР. Особенность ПК «МВТУ» в том, что он проверяет, все ли входы и выходы соединены и если это не так, то не позволяет проводить моделирование. Поэтому не всегда можно разорвать обратную связь удалением соединительной линии. В данном случае можно просто установить коэффициент веса сравнивающего устройства по нижнему входу равным нулю. Для этого следует дважды щелкнуть по устройству сравнения в окне модели и в появившемся окне заменить второй весовой множитель с -1 на 0 (рисунок 7).

Рисунок 7 - Для размыкания контура первый весовой множитель устройства сравнения оставлен равным 1, а второй задан равным нулю

Примечание: Для наглядного изображения размыкания и замыкания обратной связи может применен блок **Ключ управляемый** с вкладки Палитры блоков **Ключи** (рисунок 7.1).

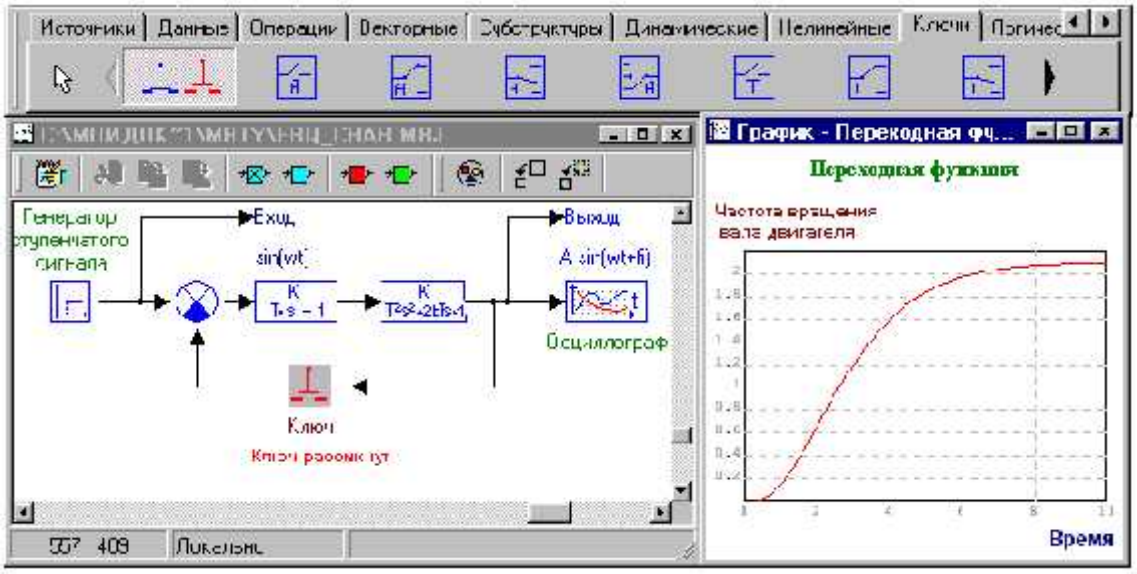


Рисунок 7.1 - Управляемый ключ позволяет видеть его состояние и менять его на обратное двойным щелчком по блоку. Как видно, переходные характеристики САР в замкнутом и разомкнутом состоянии существенно отличаются

3.3. Оценка устойчивости разомкнутого контура САР по критерию Михайлова

На рисунке 6 по графику переходной функции хорошо видно, что разомкнутый контур устойчив. Поэтому проверка его устойчивости по критерию Михайлова проводится здесь только с методической целью изучения порядка проведения этого исследования в «МВТУ». Отметим, что в маловероятном случае, когда невозможно получить непосредственно переходную функцию разомкнутого контура, необходимость обеспечения его устойчивости может потребовать применения именно критерия Михайлова. Необходимость же проверки устойчивости разомкнутого контура диктуется условием практического применения критерия Найквиста, который в свою очередь необходим для оценки устойчивости замкнутого контура и выработки мер по его стабилизации.

В главном меню «МВТУ» **Анализ** выбрать **Частотный анализ**. Появляется окно Параметры частотного анализа, в котором следует щелкнуть по кнопке Создать окно **Годографов**. Это добавит в окно нижнюю часть (рисунок 8):

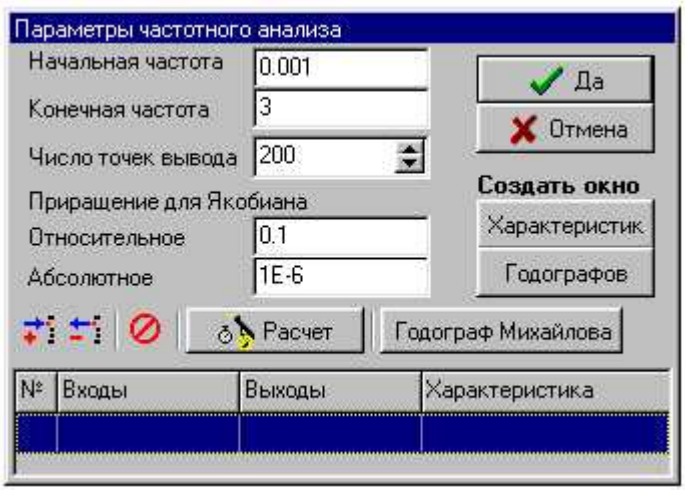


Рисунок 8 - Окно задания параметров частотного анализа для построения годографа Михайлова (годографа характеристического полинома разомкнутой САР)

Методом проб и ошибок в окне рисунка 8 подбирается значение конечной частоты так, чтобы на графике можно было бы видеть какие квадранты, и в каком порядке проходит годограф. Остальные значения установить такими, какие показаны на рисунке 8.

Щелкнуть по кнопке **Годограф Михайлова** в окне **Параметры частотного анализа**. Немедленно появляется окно с годографом:

Рисунок 9 - Годограф характеристического полинома разомкнутой САР третьего порядка проходит три квадранта в положительном направлении. Разомкнутая САР устойчива

В нашем случае удачное задание значения конечной частоты в 3 рад/сек позволяет увидеть, что годограф начинается на действительной оси в точке (1, 0j) и при увеличении частоты последовательно проходит против часовой стрелки три квадранта. Увеличение конечной частоты

не выводит годограф из третьего квадранта. В соответствии с критерием Михайлова такая система устойчива, что впрочем, мы и так знаем из рисунке 6.

Окно рисунка 9 может потребовать подбора его параметров и цвета линии. Для этого следует щелкнуть правой кнопкой по окну и применить Автомасштаб, если график не виден, или выбрать Свойства и задать такие значения концов осей координат и число делений, чтобы масштабы осей стали одинаковыми. Кроме того, здесь же задается название годографа и цвет линии.

Нетрудно доказать, что последовательное соединение конечного числа устойчивых звеньев устойчиво. Поскольку разомкнутая САР состоит из двух устойчивых звеньев, то она структурно устойчива. Это значит, что при любом сочетании параметров апериодического и колебательного звеньев годограф характеристического полинома будет начинаться на действительной оси и последовательно проходить против часовой стрелки три квадранта. Тем не менее, существуют и неустойчивые системы третьего порядка, например, замкнутая САР рисунок 4 при коэффициенте усиления контура 8.4 (рисунок 5). В этом случае, годограф характеристического полинома замкнутой САР (годограф Михайлова) начинается на действительной оси, из первого квадранта сразу переходит в четвертый, а потом в третий квадрант (рисунок 10):

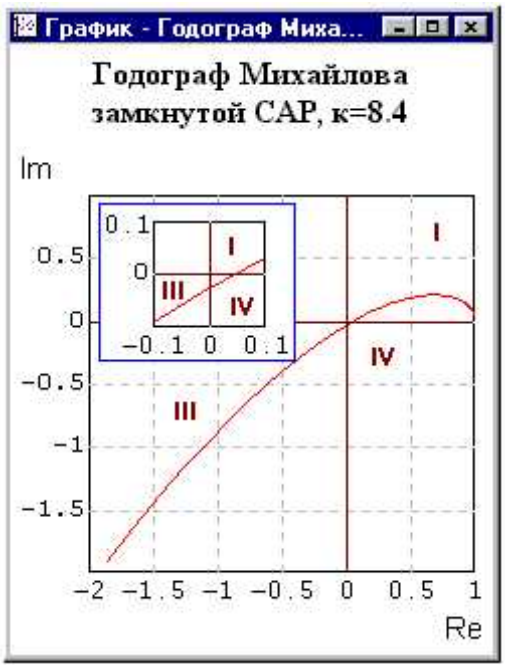


Рисунок 10 - Годограф характеристического полинома неустойчивой САР. Состояние САР близко к границе устойчивого и неустойчивого режимов работы: годограф проходит вблизи начала координат

Как видно на рисунке 5 и рисунке 10, при коэффициенте усиления контура, равном 8.4, замкнутая САР неустойчива, и находится близко к границе устойчивого и неустойчивого режимов работы.

Итак, если указан фрагмент схемы, для которого следует построить годограф Михайлова, то вся процедура построения сводится к четырем щелчкам левой кнопкой мыши: **Анализ – Частотный анализ – Создать окно Годографов - Годограф Михайлова**. При необходимости можно добавить **Автомасштаб**, щелкнув правой кнопкой по графику.

3.4. Оценка устойчивости замкнутой САР по критерию Найквиста

Полезную работу выполняет замкнутая САР, она-то и должна быть устойчивой. Годограф комплексного коэффициента передачи разомкнутой САР позволяет с помощью критерия Найквиста судить не только о факте, но, косвенно, и о степени устойчивости замкнутой САР. По этому годографу можно определить косвенные параметры качества: запасы устойчивости САР по амплитуде и по фазе.

Убедитесь, что обратная связь САР в схеме рис. 6 разомкнута: второй весовой коэффициент устройства сравнения (по нижнему входу) должен быть равен 0 (рисунок 7). Проверьте и при необходимости установите исходное значение коэффициента усиления апериодического звена равное 2.1. Сделайте контрольный запуск модели, с тем, чтобы переходная функция имела вид, показанный на рисунке 6.

Выберете **Анализ – Частотный анализ** – появится окно **Параметры частотного анализа**, в котором следует выбрать пункт Создать окно **Годографов**. Появятся окно годографов, которое временно нужно убрать на задний план, а на передний вызвать окно **Параметры частотного анализа**, рисунок 8. В нем следует выбрать построение годографа Найквиста. Для этого нужно щелкнуть в окне **Параметры частотного анализа** по кнопке с красным плюсом +, в результате чего в нижнем поле появится нумерованная строка с номером 1. Щелкнуть по синей графе **Входы** и в появившемся окне выбрать переменную Вход, введенную нами ранее в блоке **В память**, определившем начало фрагмента анализируемой схемы (рисунок 6). В следующей графе **Выходы** аналогичным способом выбрать переменную **Выход**. В последней графе выбрать **Найквиста** (рисунок 11).

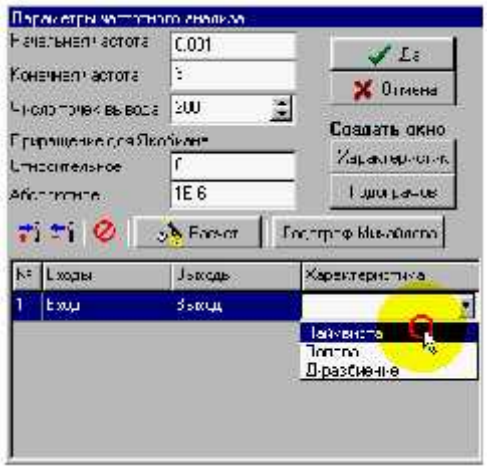


Рисунок 11 - Задание входной и выходной переменных, определяющих фрагмент схемы, для которого будет построен годограф и выбор типа годографа – годограф Найквиста

Остается щелкнуть по кнопке **Расчет** в окне **Параметры частотного анализа** и через короткое время годограф будет построен. При конечной частоте 3 рад/сек (рисунок 11) годограф слегка не дошел до начала координат, поэтому изменим значение конечной частоты на 100 и вновь щелкнем по кнопке **Расчет**. Оформим внешний вид окна, в частности сделаем одинаковыми масштабы осей. Результат на рисунке 12.

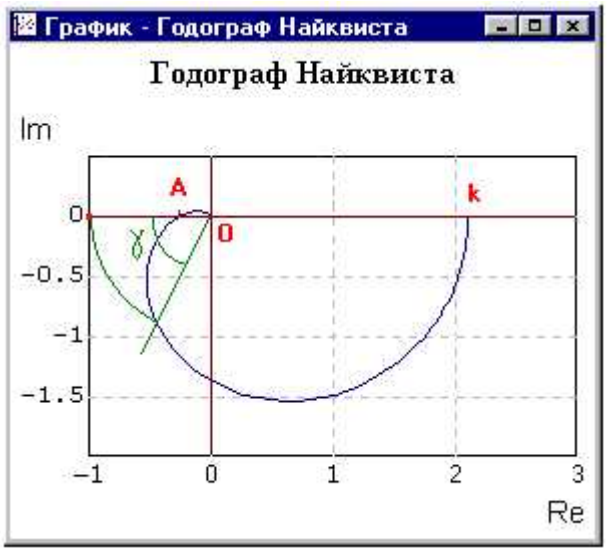


Рисунок 12 - Годограф комплексного коэффициента передачи разомкнутого контура САР с дополнительной прорисовкой. Выделена точка (-1, 0j). Если годограф не охватывает эту точку, как в данном случае, замкнутая система устойчива. Отметим, что для правильной оценки запаса по фазе, масштабы осей должны быть одинаковыми

Точка А на рисунке 12 соответствует значению комплексного коэффициента передачи W(jω) на частоте ωп. Частота, на которой модуль коэффициента передачи равен единице называется частотой среза ωср.

Как видно на рисунке 12, анализируемая САР имеет хорошие запасы устойчивости по амплитуде 1/ОА=1/0.25= 4 раза = 12 дБ и по фазе γ= 720. Это свидетельствует о том, что в переходном режиме качество САР будет вполне удовлетворительным. В то же время, коэффициент усиления контура равен k = 2.1= 6 дБ, что косвенно говорит о низком качестве работы моделируемой САР в установившемся режиме. Эта величина должна составлять для статической системы 20 ÷ 40 дБ. Отсюда следует, что для обеспечения удовлетворительного качества работы системы необходима структурная коррекция исходной САР, которая может быть осуществлена введением ПИ-регулятора в контур управления.

4 ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

4.1. Запуск программы

Запустить программный комплекс «МВТУ» двойным щелчком по иконке на рабочем столе, или Пуск – Программы – МВТУ 3.0 – МВТУ 3.0. В верхней части экрана появится основное окно ПК "МВТУ" (рисунок 1).

4.2 Построение модели

Постройте модель замкнутой САР частоты вращения вала двигателя постоянного тока рисунок 1, определите ее переходную функцию, соотнесите с рисунка 4. Дополните схему и окно осциллографа содержательными надписями. Обрамление блоков, при желании, можно убрать, выбрав в главном меню «МВТУ» **Опции – Настройки**, убрав галочку в пункте Рисовать обрамление и щелкнув по кнопке **Да**.

Проверьте, как влияет изменение коэффициента усиления апериодического звена на вид переходной функции замкнутой системы.

В качестве дополнительного задания, по выполнении основной части работы, можно проверить, как влияет изменение коэффициента усиления контура на установившееся значение ошибки регулирования. Для этого может быть использован либо еще один осциллограф, который следует подключить к выходу устройства сравнения, либо в имеющемся можно добавить еще один вход. Из этого исследования можно сделать вывод о том, что увеличение коэффициента

усиления контура приводит к уменьшению установившегося значения ошибки, но время установления увеличивается ввиду повышения колебательности переходного процесса.

Сделайте выводы.

Верните исходное значение коэффициента усиления апериодического звена, равное 2.1 и для контроля еще раз запустите модель на счет.

Сделайте снимки экрана, сохраните проект в личной папке с названием Frq_Char.mrj

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое частотные характеристики линейной системы?
2. С какой целью в ПК «МВТУ» указываются входная и выходная переменные при частотном анализе САР?
3. Как провести соединительную линию между блоками?
4. Как создать ветвление соединительной линии?
5. Как в ПК «МВТУ» построить годограф Михайлова для линейной системы?
6. Как в ПК «МВТУ» построить годограф Найквиста для линейной системы?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

Моделирование и исследование качества контура автоматического регулирования

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследовать динамические и статические процессы в замкнутой системе с пропорциональным (П), интегральным (И), пропорционально-интегральным (ПИ) законами регулирования.

2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить возможности моделирования с помощью программного комплекса (ПК) «МВТУ».
2. Освоить процедуры формирования структурной схемы моделирования, выбора метода и параметров интегрирования, ввода параметров блоков, вывода данных расчета.
3. Оформить практическую работу.
4. Ответить на контрольные вопросы.

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Принцип моделирования в ПК "МВТУ" состоит в создании и исследовании виртуального аналога реальной системы – модели. Модель функционирует в соответствии с теми же уравнениями, что и моделируемая система. При моделировании не обязательно записывать эти уравнения в явном виде, об этом позаботится программа. Модель составляется пользователем в специальном окне программы соединением отдельных виртуальных блоков, соответствующих элементам реальной системы.

Виртуальные блоки условно внешне представляются на рабочем пространстве окна модели прямоугольниками, т.е. они видимы исследователю, имеют входы и (или) выходы и функционируют в соответствии с определенными уравнениями, алгоритм решения которых реализуется в цифровом виде. Под функционированием виртуального блока понимается то, что он реагирует на виртуальные воздействия (функции времени), подаваемые другими блоками на его вход, определенным изменением величины выходного сигнала.

4 ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Задание 1. Для последовательного соединения заданного апериодического звена и усилительного звена подготовьте исходные данные и проведите моделирование переходного процесса при **единичном ступенчатом входном воздействии** в следующей последовательности:

1) подготовьте чертеж структурной схемы моделирования, используя библиотеку ПК «МВТУ» по аналогии с рисунком 4; скопируйте чертеж в отчет практической работы;

2) исходя из числовых значений параметров передаточных функции элементов, определите параметры интегрирования (метод, точность, шаг, время интегрирования и шаг вывода результатов); внесите расчетные параметры интегрирования в отчет профессионального задания;

3) введите исходные данные и выполните моделирование;

4) скопируйте изображение исходного (по заданным параметрам) графика переходного процесса в отчет практической работы.

Задание 2.

1 Исследование динамических и статических процессов в замкнутой системе с пропорциональным законом регулирования производится в следующем порядке:

- предварительно установить задание в форме постоянного входного воздействия - константа (значение сигнала 1) и подключить внешнюю обратную связь, установив коэффициент обратной связи k = 1;

- исследовать переходные характеристики при различных значениях коэффициента k пропорционального регулятора **(три варианта переходных процессов)** с условием выполнения параметров интегрирования и заданного значения сигнала 1;

- для выбранных значений k регулятора зафиксировать переходные характеристики, сформулировать и записать выводы.

2 Исследование динамических и статических свойств замкнутой системы с интегральным регулятором выполняется в следующей последовательности:

- предварительно вместо пропорционального регулятора установить интегральный регулятор с передаточной функцией k/s;

- установить задание в форме постоянного входного воздействия и подключить внешнюю обратную связь, установив коэффициент обратной связи k = 1;

- исследовать переходные характеристики при различных значениях коэффициента k интегрального регулятора **(три варианта переходных процессов)** с условием выполнения параметров интегрирования и заданного значения сигнала 1;

- для выбранных значений k регулятора зафиксировать переходные характеристики, сформулировать и записать выводы.

3 **Исследование динамических и статических свойств замкнутой системы с пропорционально - интегральным регулятором** выполняется аналогично вышеуказанным пунктам.

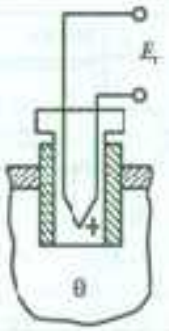
Оформите отчет.

Содержание отчета. Отчет должен содержать структурные схемы моделирования исследуемых контуров регулирования и графики переходных процессов, построенные по результатам моделирования, а также выводы по работе.

Демонстрационный пример

Демонстрационный пример построен применительно к последовательному соединению апериодического звена 1 порядка (таблица 1) и усилительного звена (таблица 2).

Таблица 1 - Исходные данные типового динамического звена

Наименование элемента (Входная величина. Выходная величина)	Принципиальная схема	Передаточная функция
Термопара, помещенная в защитный кожух (Температура в объекте измерения θ. ЭДС на зажимах термопары E_T)		$W(p)=\frac{E_T(p)}{\theta(p)}=\frac{k_{TП}}{T_{TП}p+1}$, где $k_{TП}$ – коэффициент передачи; $T_{TП}$ – постоянная времени термопары; $k_{TП}$ = 0,0005-0,001 В/ °С; $T_{TП}$ = 3÷10 с

$$W(p)=\frac{Y(p)}{X(p)}=\frac{K_{ТП}}{Т_{ТП}p+1},$$

где X(p), Y(p) – соответственно изображения по Лапласу входной и выходной величин при нулевых начальных условиях;

K, T – соответственно коэффициент передачи, постоянная времени (k=0,001, T=10с).

Структурная схема апериодического звена, соответствующая его передаточной функции, показана на рисунке 1.

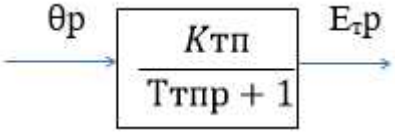


Рисунок 1 - Структурная схема звена с раскрытием передаточной функции и отображением входной и выходной величин

Исходные данные усилительного звена

$$W(p)=\frac{Y(p)}{X(p)}=\frac{K_{У}}{Т_{У}P+1},$$

где X(p), Y(p) – соответственно изображения по Лапласу входной и выходной величин при нулевых начальных условиях;

K, T – соответственно коэффициент передачи, постоянная времени (k=50, T=0,1с).

Структурная схема усилительного звена, соответствующая его передаточной функции, показана на рисунке 2.

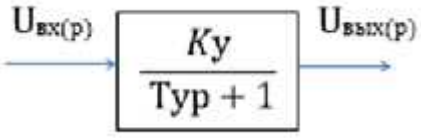


Рисунок 2 - Структурная схема звена с раскрытием передаточной функции и отображением входной и выходной величин

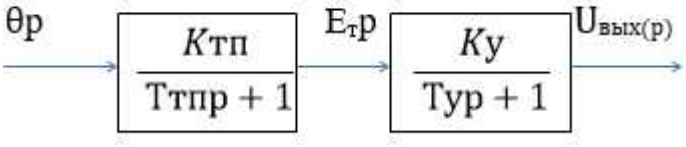


Рисунок 3 - Структурная схема последовательного соединения звеньев

Задача моделирования звена заключается в получении графика переходного процесса выходной величины y (t) при нулевых начальных условиях и постоянном входном воздействии, то есть получении его переходной функции (кривой разгона).

Параметры передаточных функций (таблица 1) исходной структурной схемы (рисунок 1) следующие: Ттп = 10 с; $k_{тп}$ = 0.01; Ту = 0,1 с; Ку=50.

Руководствуясь методикой подготовки исходных данных, выберем метод и зададим параметры интегрирования:

- метод интегрирования «Рунге-Кутта классический 45»;
- исходя из наибольшей постоянной времени $T_{тп}$ = 10 с, принимаем первоначальное время интегрирования (на один-два порядка больше постоянной времени) 100 с;
- исходя из наименьшей постоянной времени Тму= 0,1 с, принимаем первоначальное значения шага интегрирования: максимального (на порядок меньше постоянной времени) 0,01 с, минимального (на один-два порядка меньше максимального шага интегрирования) 0,001 с;
- интервал выдачи данных 0,01 с;
- точность интегрирования 0,001.

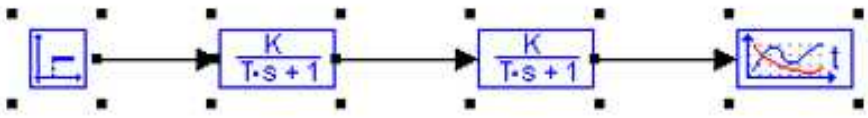


Рисунок 4 - Структурная схема моделирования соединения звеньев, изображенная с использованием блоков библиотек ПК «МВТУ»

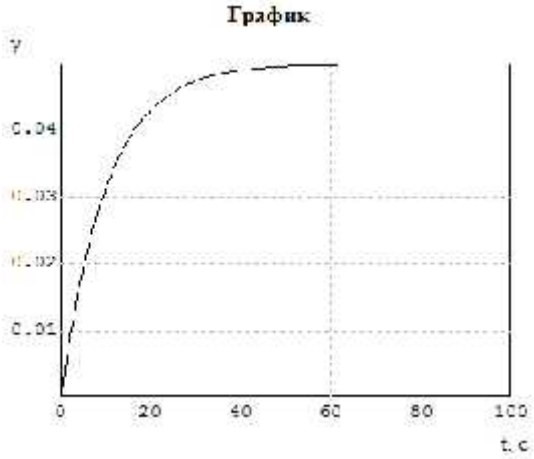


Рисунок 5 - Переходной процесс с начальными условиями (время интегрирования 100)

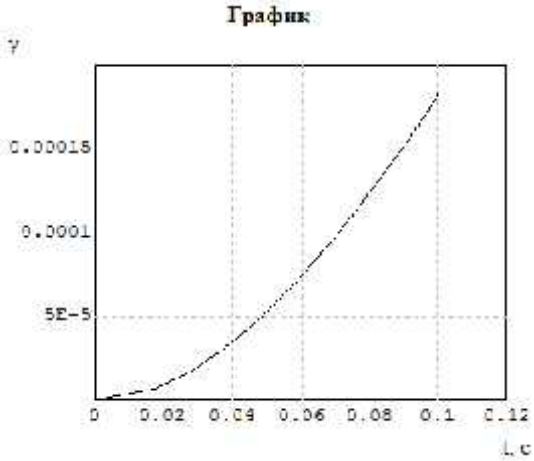


Рисунок 6 - Переходной процесс с начальными условиями (время интегрирования 0.1)

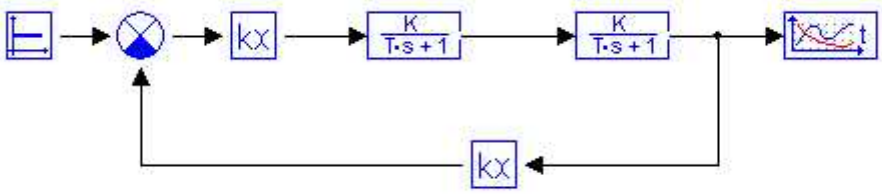


Рисунок 7 - Структурная схема моделирования с П-регулятором

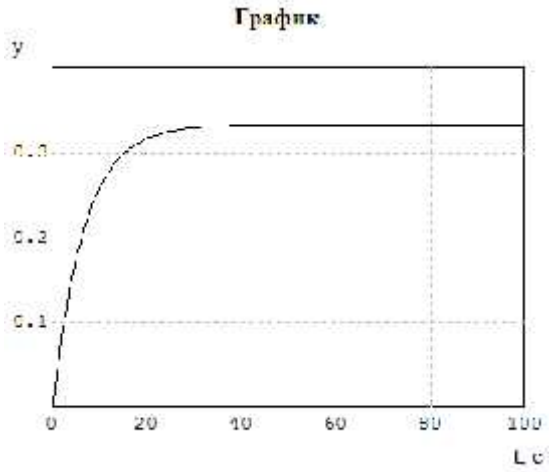


Рисунок 8 - Переходной процесс контура регулирования с П-регулятором Кп=10

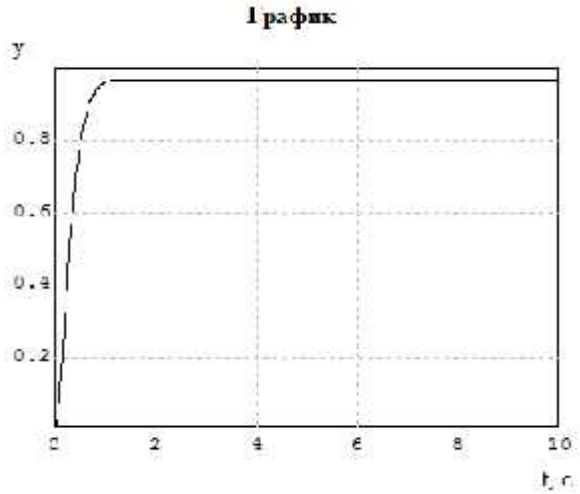


Рисунок 9 - Переходной процесс контура регулирования с П-регулятором Кп=600

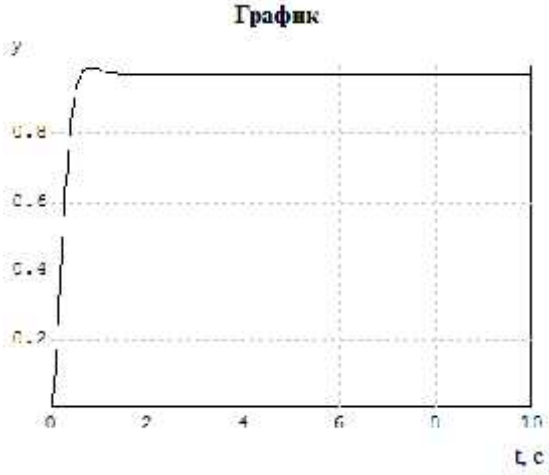


Рисунок 10 - Переходной процесс контура регулирования с П-регулятором Кп=800

Вывод относительно П-регулятора: Обоснование оптимальных параметров регулирования

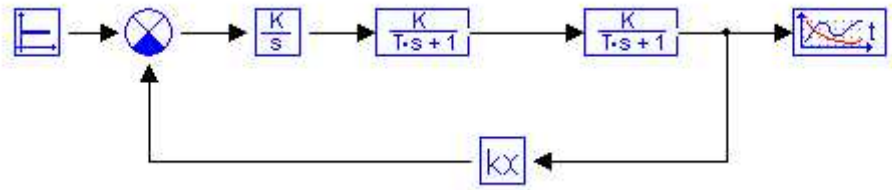


Рисунок 11 - Структурная схема моделирования с И-регулятором

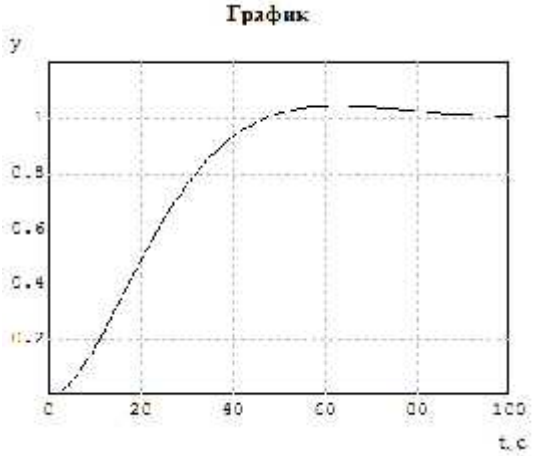


Рисунок 12 - Переходной процесс контура регулирования с И-регулятором Ки=0,1

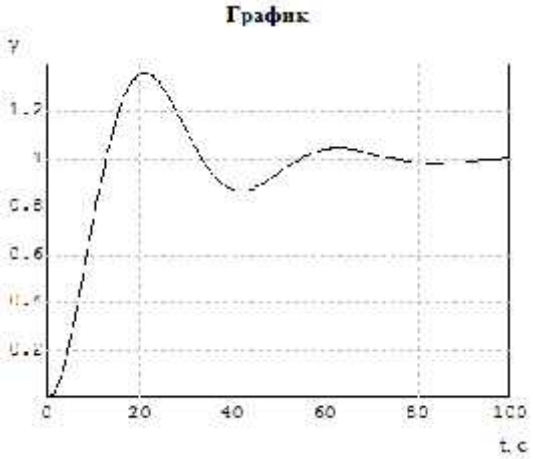


Рисунок 13 - Переходной процесс контура регулирования с И-регулятором Ки=5

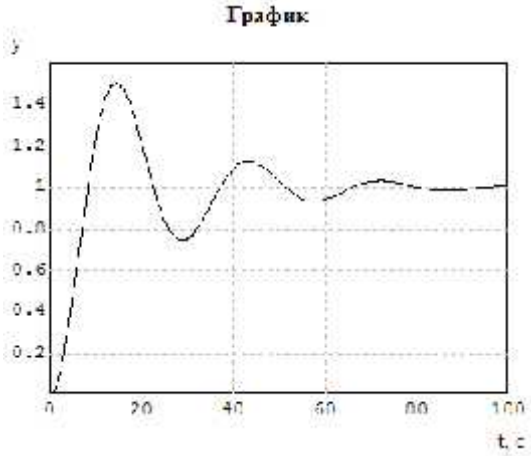


Рисунок 14 - Переходной процесс контура регулирования с И-регулятором Ки=10

Вывод относительно И-регулятора: Обоснование оптимальных параметров регулирования.

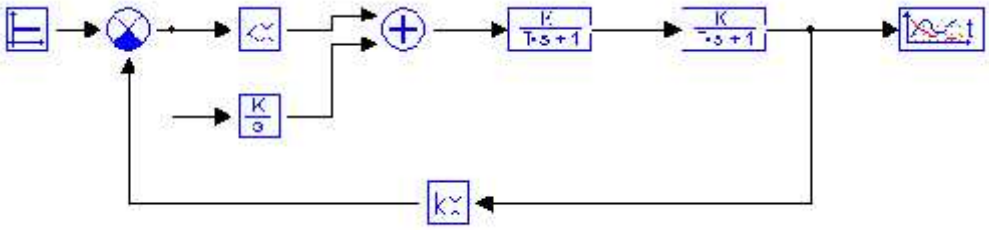


Рисунок 15 - Структурная схема моделирования с ПИ-регулятором

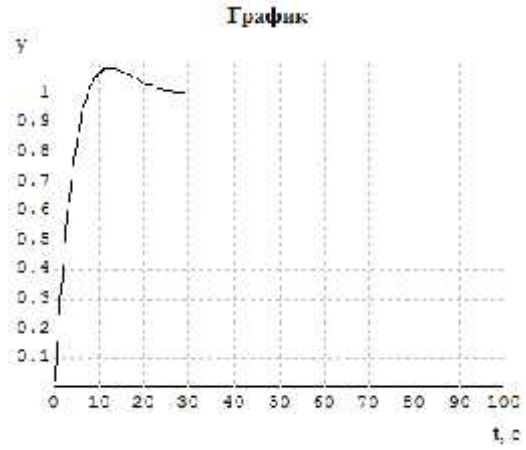


Рисунок 16 - Переходной процесс контура регулирования с ПИ-регулятором Кп=50, Ки=10

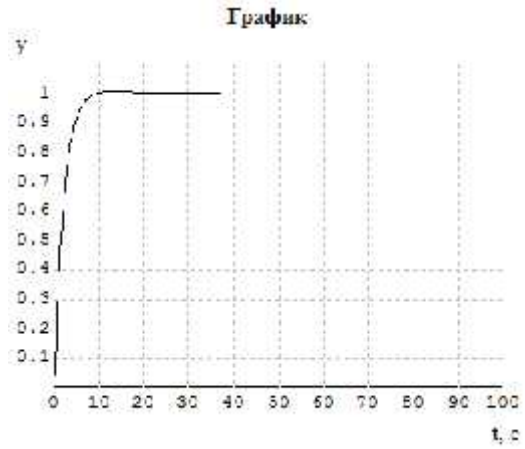


Рисунок 17 - Переходной процесс контура регулирования с ПИ-регулятором Кп=90, Ки=10

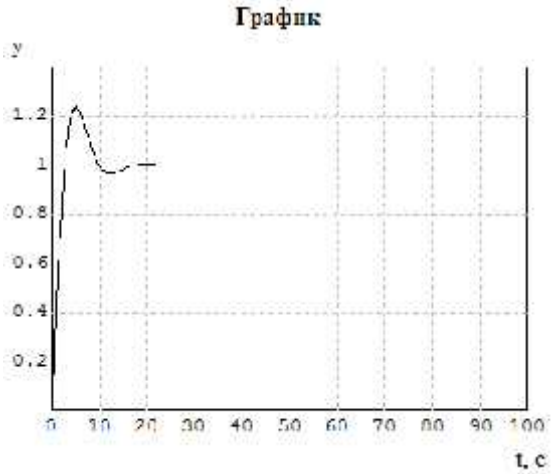


Рисунок 18 - Переходной процесс контура регулирования с ПИ-регулятором Кп=90, Ки=50

Вывод относительно ПИ-регулятора: Обоснование оптимальных параметров регулирования

Выводы: Достоинства и недостатки регуляторов, рекомендации к их использованию

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение П-, И-, ПИ-регулятора.
2. Дайте определение передаточной функцией звена (системы)?

ЛИТЕРАТУРА

Основные источники:

1. Акопов А.С. Компьютерное моделирование: учебник и практикум для СПО / А.С. Акопов. - М.: Издательство Юрайт, 2017. – 389 с. – (Серия: Профессиональное образование).
2. Боев В.Д. Компьютерное моделирование систем: учеб. пособие для СПО – В.Д. Боев. - М.: Издательство Юрайт, 2017. – 253 с. – (Серия: Профессиональное образование).
3. Боресков А.В. Компьютерная графика: учебник и практикум для СПО / А.В. Боресков, Е.В. Шикин. - М.: Издательство Юрайт, 2017. – 219 с. – (Серия: Профессиональное образование).
4. Ким Д.П. Основы автоматического управления: учебник и практикум для среднего профессионального образования / Д.П. Ким. - М.: Издательство Юрайт, 2017. – 276 с. – (Серия: Профессиональное образование).

Дополнительные источники:

1. Коломейцева М.Б. Системы автоматического управления при случайных воздействиях: учеб. пособие для СПО / М.Б. Коломейцева, В.М. Беседин. – 2-е изд., испр. и доп. - М.: Издательство Юрайт, 2017. – 104 с. – (Серия: Профессиональное образование).
2. Коломейцева М.Б. Основы импульсной и цифровой техники: учеб. пособие для СПО / М.Б. Коломейцева, В.М. Беседин, Т.В. Ягодкина. – 2-е изд., испр. и доп. - М.: Издательство Юрайт, 2017. – 124 с. – (Серия: Профессиональное образование).
3. Рачков М.Ю. Автоматизация производства: учебник для СПО / М.Ю. Рачков. – 2-е изд., испр. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2017. – 180 с. – (Серия: Профессиональное образование).
4. Селезнев В.А. Компьютерная графика: учебник и практикум для СПО / В.А. Селезнев, С.А. Дмитроченко. – 2-е изд., испр. и доп. - М.: Издательство Юрайт, 2017. – 218 с. – (Серия: Профессиональное образование).
5. Серебряков А.С. Автоматика: учебник и практикум для СПО / А.С. Серебряков, Д.А. Семенов, Е.А. Чернов; под общ. ред. А.С. Серебрякова. М.: Издательство Юрайт, 2017. – 431 с. – (Серия: Профессиональное образование).

6. Советов Б.Я. Компьютерное моделирование систем. Практикум: учеб. пособие для СПО / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – 4-е изд., пер. и доп. - М.: Издательство Юрайт, 2017. – 295 с. – (Серия: Профессиональное образование).

7. Советов Б.Я. Информационные технологии: учебник для СПО / Б.Я. Советов, В.В Цехановский. – 7-е изд., перераб. и доп. - М.: Издательство Юрайт, 2017. – 327 с. – (Серия: Профессиональное образование).

8. Терёхин В.Б. Компьютерное моделирование систем электропривода в Simulink: учебное пособие для СПО / В.Б. Терёхин, Ю.Н. Дементьев. - М.: Издательство Юрайт, 2017. – 306 с. – (Серия: Профессиональное образование).

9. Троценко В.В. Системы управления технологическими процессами и информационные технологии: учеб. пособие для СПО / В.В. Троценко, В.К. Федоров, А.И.Забудский, В.В. Комендантов. – 2-е изд., испр. и доп. - М.: Издательство Юрайт, 2017. – 136 с. – (Серия: Профессиональное образование).

10. Хейфец А.Л. Инженерная 3D-компьютерная графика. В 2 т. Том 2: учебник и практикум для СПО / А.Л. Хейфец, А.Н. Логиновский, И.В. Буторина, В.Н. Васильева; под ред. А.Л. Хейфеца. – 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Издательство Юрайт, 2017. – 279 с. – (Серия: Профессиональное образование).

11. Шишмарёв В.Ю. Автоматика: учебник для СПО / В.Ю. Шишмарёв. – 2-е изд., испр. и доп. - М.: Издательство Юрайт, 2017. – 280 с. – (Серия: Профессиональное образование).

12. Ягодкина Т.В. Основы автоматического управления: учебник и практикум для среднего профессионального образования / Т.В. Ягодкина, В.М. Беседин. М.: Издательство Юрайт, 2017. – 470 с. – (Серия: Профессиональное образование).